

ESTUDO OBSERVACIONAL PARA A SELEÇÃO DE SENSORES DE DISTÂNCIA EM MEDIÇÕES ESTÁTICAS E DINÂMICAS

Matheus Fontana Zanette¹

Elvys Isaias Mercado Curi²

Resumo: A qualidade dos dados obtidos por um instrumento de medição é de fato um parâmetro decisivo no momento da sua seleção. Assim, o estudo de um método capaz de caracterizar níveis de precisão e incerteza de determinado instrumento de forma prática e consistente no ambiente industrial, se mostra muito útil e necessário quando não se possui informações suficientemente confiáveis do real estado de funcionamento deste. O trabalho almejou a aplicação de uma metodologia para classificação de sensores de distância de baixo custo utilizados em medições estáticas e dinâmicas, baseando-se no método de estudo observacional e analisou-se os dados utilizando modelos estatísticos, caracterizando a precisão, exatidão e incerteza dos sensores estudados. Os ensaios de medições estáticas foram realizados em dois sensores ultrassônicos e um sensor infravermelho utilizando bancadas projetadas com aproximadamente 400 mm. Já os ensaios dinâmicos, foram realizados com o sensor infravermelho em uma esteira com velocidade controlada. Os ensaios apresentaram resultados positivos e foi possível observar, por meio de gráficos, o comportamento sistemático e aleatório dos sensores. Verificou-se a presença de diferentes níveis de incerteza e erros sistemáticos para diferentes faixas de medição, recomendando-se o uso restrito à certas faixas de acordo com a tolerância que o processo requerer. Observou-se ainda que a incerteza da medição está diretamente ligada à repetibilidade, resolução do instrumento e qualidade do padrão de referência. Estudos futuros poderiam aprofundar-se na capacidade de medição dinâmica de sensores, bem como a utilização da metodologia proposta à outras áreas como medição de temperatura, pressão e etc.

Palavras-chave: Estudo observacional. Metrologia. Sensores. Incerteza de medição.

1. INTRODUÇÃO

A metrologia, ciência das medições e suas aplicações, está presente nos ensaios experimentais e atividades industriais, onde, a aquisição correta de dados referente às medições estáticas ou dinâmicas do processo, tem se tornado de suma importância em todas as áreas de estudo da engenharia. Nesse contexto, inserem-se os mais variados tipos de sensores e instrumentos, capazes de obterem esses dados e mostrá-los de forma interativa ao observador. Todo aquele instrumento que

¹ Graduando em engenharia mecânica. E-mail: matheuszanette2@gmail.com

² Prof. Elvys Isaias Mercado Curi. E-mail: elvys.curi@satc.edu.br

possibilita a leitura e indicação de uma grandeza física ou mensurando, pode ser considerado um sensor e pode ser classificado de melhor a pior, pelo seu nível de precisão e sua incerteza de medição. Desse modo, quanto menor seja a incerteza e maior seja a precisão do sensor, mais confiáveis serão os resultados obtidos por este. Cabe ao responsável técnico ter o conhecimento detalhado do comportamento de cada tipo, para somente assim tomar a melhor decisão de escolha do sistema de medição, pois algumas vezes os sensores têm valores de incerteza diferentes em todas as faixas de medição, sendo sua aplicação mais recomendável, onde os valores da incerteza sejam menores.

O problema em questão está justamente em saber qual tipo de sensor apresenta o melhor custo x benefício para determinado tipo de medição seja ela estática ou dinâmica, visto que, muitas vezes, o responsável técnico possui, *in loco*, alguns sensores ou instrumentos de medição porém não tem uma metodologia específica para caracterizar estes instrumentos e saber se estes são ou não capazes de mensurar seu processo de maneira satisfatória baseado em seu nível de precisão. Por este motivo, se faz importante o estudo observacional de sensores, para analisar e comprovar, qual deles apresentam melhor rendimento, obtendo dados que mais se aproximam de um resultado padrão (teórico). Por outro lado, o estudo também pode auxiliar na checagem intermediária entre calibrações, atuando como um meio de manutenção preventiva onde a equipe técnica pode promover alguns testes práticos para análise da funcionalidade e integridade do instrumento de medição, podendo assim, perceber de forma antecipada algum defeito iminente ou que já esteja se manifestando mesmo que de forma sucinta.

A pesquisa possui caráter observacional, visando conhecer o funcionamento de cada instrumento de medição e pô-lo em prática por meio de metodologias de estudo e testes a serem realizados em bancadas construídas para simular uma situação genérica, onde pode-se medir, com variados sensores, um mesmo mensurando, a fim de caracterizar seu erro e incerteza de medição para diferentes faixas de utilização. As bancadas serão construídas em madeira, cortadas à laser. Os instrumentos testados serão: sensores ultrassônicos e infravermelhos. O padrão de medição será uma escala de medição com 300 mm gravada na bancada fabricada e terá seu valor padrão validado por meio da checagem com um paquímetro digital padrão com resolução de 0,01 mm e com certificado de calibração recente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, apresenta-se o referencial teórico que embasa o presente estudo no que diz respeito à estudos observacionais, caracterização de sensores e análise estatística de dados.

2.1 ESTUDOS OBSERVACIONAIS

No campo da saúde, as pesquisas mais frequentes são feitas na forma de estudos observacionais. Nesse tipo de investigação científica os pesquisadores não interferem nos fenômenos em estudo, apenas os observam de maneira sistemática e padronizada, coletando e registrando informações, dados ou materiais que ocorrem espontaneamente num determinado momento do processo saúde-doença, ou ao longo de sua evolução natural, para posteriormente proceder à sua descrição e/ou análise. Nos estudos observacionais normalmente quatro tipos de desenho de estudo são passíveis de utilização: estudos de series de casos, estudos de corte transversal, estudos de caso-controle estudos de coorte. (RAIMUNDO, *et al*, 2018).

2.1.1 Características direcionais e temporais.

Os estudos observacionais adquirem características quanto ao tempo e direção de estudo, como podemos observar na Tab. 1 e Tab.2:

Tabela 1: Características dos estudos observacionais.

| | |
|--|--|
| Transversal ou <i>cross sectional</i> | O estudo é feito num instante e não há acompanhamento do fenômeno ao longo do tempo. |
| Longitudinal ou <i>follow up</i> | O estudo é acompanhado durante um período de tempo. Ocorrem várias observações do fenômeno estudado. |

Fonte: Adaptado de Hochman (2005)

Tabela 2: Tempo de estudo

| | |
|-----------------------|--|
| Prospectivos | Monta-se o estudo no presente, e o mesmo é seguido para o futuro. |
| Retrospectivos | Realiza-se o estudo a partir de registros do passado, e é seguido adiante a partir daquele momento até o presente. |

Fonte: Adaptado de Hochman (2005)

2.1.2 Características de controle do estudo.

Quanto ao tipo de controle que pode ser adotado nos estudos observacionais, podemos citar os apresentados na Tab. 3:

Tabela 3: Tipos de controle de estudo.

| | |
|-----------------------|--|
| Não controlado | O estudo é realizado apenas executando observações e coletando dados sem a presença de um grupo controle ou padrão. |
| Controlado | O estudo é realizado com a presença de um grupo controle ou padrão conhecido de maneira a comparar os dados obtidos com este grupo padrão. |
| Comparativos | Trata-se das pesquisas onde se comparam grupos diferentes, não sendo um controle do outro. |

Fonte: Adaptado de Hochman (2005)

2.2 MEDIÇÕES ESTÁTICAS E DINÂMICAS

Para se efetuar medições confiáveis, é necessário não só o conhecimento das características da grandeza física que se deseja medir (mensurando), como também as características do sistema de medição, constituído pelos sensores, transdutores e todas as partes construtivas que atuam na aquisição, transformação e apresentação do resultado (SANTOS, *et al*, 2011).

As características estáticas de um sensor, transdutor ou sistema de medição estão relacionadas ao seu desempenho quando é submetido a um sinal de entrada constante ou que varie lentamente ao longo do tempo. As características dinâmicas mostram a capacidade e o desempenho do sensor, transdutor ou sistema de medição quando sujeito a um sinal de entrada que varia rapidamente no tempo. Assim, o sistema de medição como um todo precisa estar adequado ao fenômeno que se está analisando, pois as características relacionadas com o seu funcionamento, quando submetido a um sinal de entrada, definem o tipo de medição. Quando esse sinal é constante ou varia lentamente no tempo, o sistema tem características estáticas. Quando esse sinal varia rapidamente no tempo, o sistema tem características dinâmicas. É, portanto, a velocidade de resposta dos sistemas de medição em comparação com a velocidade com que o mensurando está mudando, que caracteriza a diferença da medição estática para a dinâmica (ESWARD, *et al*, 2009).

2.3 CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES

As características de um sensor ou transdutor estão relacionadas com seu funcionamento e com sua interação com o tipo de fenômeno que representa a grandeza a ser mensurada, além da sua interação com outros dispositivos que fazem parte da cadeia de medição. Não somente o sensor, mas todo o sistema de medição (amplificadores, conversores, indicadores) deve possuir características que não comprometam as medições realizadas.

Dessa forma, é importante o conhecimento dessas características para a compatibilização dos componentes do sistema de medição. Essa compatibilização diz respeito à determinação da função de transferência de cada componente do sistema de medição e da função de transferência do sistema como um todo, para que o mesmo atenda satisfatoriamente às exigências para medição do sinal (SANTOS, 2012).

2.3.1 Características estáticas

As características estáticas de um sensor, transdutor ou sistema de medição, são normalmente contempladas em catálogos fornecidos pelos fabricantes e são determinadas em função de projeto ou através de ensaios experimentais de calibração denominados de calibração estática (SANTOS *apud* DINIZ, 2012).

Exemplos:

a) Faixa de indicação.

Indica o range de acionamento do sensor, ou seja, a faixa compreendida entre a mínima e a máxima excitação em que o sensor consegue perceber o sinal sem que haja falha, ou dúvida na medição.

b) Sensibilidade:

A sensibilidade do sensor, é definida como a inclinação da curva característica de saída modelada na Eq.1 ou, de forma mais geral, a mínima entrada do parâmetro físico que cria uma variação detectável na saída. (TERMINOLOGIA *apud* CARR, 2019).

$$Sb = \frac{dS}{dX} \quad (1)$$

c) Resolução:

A resolução de um transdutor é a menor mudança que pode ser detectada da variação do fenômeno medido. Pode ser expressa como uma porcentagem da faixa de indicação do transdutor (SANTOS *apud* DINIZ, 2012).

d) Não linearidade ou erro fiducial em relação ao fundo de escala:

A não linearidade ou erro fiducial de um sensor é um tipo de parâmetro que expressa o quanto a sua curva característica se desvia da reta de calibração. É uma característica típica de equipamentos ou sensores cuja relação entre entrada e saída pode ser considerada linear. Normalmente é especificada em termos do percentual de não linearidade, relativa a medição atual, ao fundo de escala (neste caso costuma-se apresentar as letras FS – full scale – ou outro indicador semelhante) ou faixa dinâmica (FSS – full span scale).

$$NL(\%) = \frac{Erro_{MÁX}}{FS} \times 100\% \quad (2)$$

2.3.2 Características dinâmicas

Na especificação de um sensor para um mensurando que varie rapidamente seu valor, precisa-se de um instrumento de medição com velocidade de resposta maior que a da variável mensurada, caso contrário, a dinâmica do instrumento poderá interferir consideravelmente na dinâmica do sistema de controle da malha, introduzindo atrasos e provocando oscilações na resposta (BRAGA, 2010).

Os procedimentos comumente usados para caracterização dinâmica de sensores geralmente envolvem apenas a determinação de algumas características representativas de seu comportamento dinâmico, como tempo de resposta, frequência natural e taxa de amortecimento (DINIZ *et al*, 2006).

2.3.3 Modos de detecção e funcionamento

Existem diferentes tipos de sensores e instrumentos de medição, baseando-se em vários modos de detecção, como por exemplo:

a) Sensores infravermelho

Existem sensores de infravermelho ativos e passivos. Um sensor de infravermelho ativo é composto por um emissor de luz infravermelha e um receptor que reage a essa luz. Por sua vez, um sensor de infravermelho passivo não emite luz infravermelha, mas apenas capta esse tipo de luz no ambiente (CORRÊA, CAMPIGOTO, 2015).

b) Sensor ultrassônico

Os sensores ultrassônicos detectores de proximidade funcionam livre de fricção mecânica e detectam objetos a distâncias que variam de poucos centímetros a vários metros. O sensor emite um sinal sonoro e mede o tempo que o sinal leva para retornar. Este sinal reflete em um objeto, o sensor recebe o eco produzido e converte em sinais elétricos (CORRÊA, CAMPIGOTO, 2015).

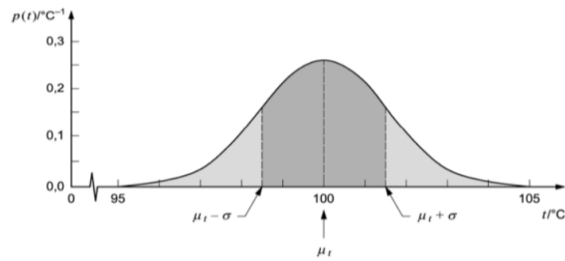
2.4 ERROS ASSOCIADOS À MEDIÇÃO

Há diversos tipos de erros possíveis, mas podemos englobá-los basicamente em duas categorias: aleatórios e sistemáticos. Os erros aleatórios decorrem de fatores não controlados na realização de medições e seu efeito consiste em produzir ao acaso acréscimos e decréscimos no valor obtido. Estes efeitos aleatórios são a causa de variações em observações repetidas do mensurando.

Embora não seja possível compensar o erro aleatório de um resultado de medição, ele pode geralmente ser reduzido aumentando-se o número de observações, no caso de um mensurando invariável; seu valor esperado num cenário ideal, é zero. Os erros sistemáticos também não podem ser eliminados, porém podem ser reduzidos. Um fator de correção pode ser aplicado para compensar este efeito (ISO GUM, 2008).

Nos estudos observacionais, a presença dos erros pode ser identificada pela distribuição de Laplace-Gauss da Fig. 1 e de testes estatísticos. Os estudos pouco precisos estariam distribuídos simetricamente na parte mais larga da curva. Estudos de maior precisão e exatidão, estariam mais próximos do valor real e situados na parte mais estreita da curva (ALMEIDA, GOULART, 2017).

Figura 1: Distribuição de Laplace-Gauss.



Fonte: ISO GUM (2008).

A distribuição de probabilidade de uma variável aleatória x , é dada pela função de densidade da distribuição normal $f(x)$ expressada na Eq.3 ou ainda pelo *Microsoft Excel* com a fórmula =DIST.NORM.N:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - \bar{X}}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3)$$

2.5 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando. O resultado de uma medição, após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é ainda, uma estimativa do valor do mensurando, por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos.

A incerteza, segundo Manso (2013), pode ser agrupada em dois tipos de avaliação:

a) Avaliação do tipo A: na qual a incerteza é obtida por meio de análise estatística de uma série de observações. É obtida por meio da função de densidade de probabilidade proveniente de uma distribuição de frequência de um conjunto de dados mostrada na Eq.3;

b) Avaliação do tipo B: baseia-se em meios que não utilizam uma série de observações repetidas.

2.5.1 Incerteza do Tipo A

Na maioria dos casos, a melhor estimativa disponível do valor esperado de uma grandeza X que varia aleatoriamente e para a qual, n observações independentes x_i foram obtidas sob as mesmas condições de medição, é a média aritmética ou média das observações (ISO GUM, 2008):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

A variância experimental $s^2(x_i)$ das observações é dada por:

$$s^2(x_i) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (5)$$

O desvio padrão é dado pela raiz quadrada da variância $s^2(x_i)$:

$$\sigma(x_i) = \sqrt{s^2(x_i)} \quad (6)$$

Esta estimativa da variância e sua raiz quadrada positiva, denominada desvio-padrão experimental, caracterizam a variabilidade das medições observadas ou, mais especificamente, sua dispersão em torno de sua média.

Segundo o Gum (2008), define-se a incerteza padrão como a incerteza do resultado expressa como um desvio padrão. Quando este resultado é obtido por meio de várias outras fontes, que não só a repetibilidade das medições, a incerteza padrão é então denominada incerteza padrão combinada.

O grau de liberdade para as medições do tipo A é considerado de acordo com a Eq. 7.

$$v_i = n - 1 \quad (7)$$

2.5.2 Incerteza do Tipo B

Segundo Manso (2013), a avaliação da incerteza do tipo B depende de informações relacionadas à variável medida que podem ser obtidas em documentos ou por meio de conhecimento adquirido. Essas informações podem incluir:

- a) resultados de medições prévias;
- b) especificações de fabricantes;
- c) dados de certificados de calibração;
- d) incertezas relacionadas a dados de referência obtidos de manuais.

2.5.3 Incerteza expandida e valor final

A incerteza expandida está associada à probabilidade de abrangência ou nível de confiança do intervalo. Para o caso em que a distribuição de probabilidade de valores é aproximadamente normal, o valor do fator de abrangência k é igual a dois e fornece um intervalo com 95% de confiança. (MANSO,2013). Desse modo, a incerteza expandida é dada pela Eq. 8

$$U = k \times u_c \quad (8)$$

Para a correta determinação do fator de abrangência, deve-se conhecer os graus de liberdade efetivos (V_{eff}), conhecido através da fórmula de *Welch-Satterthwaite* apresentada na Eq. 9:

$$V_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (9)$$

O fator de abrangência (k) é então determinado através da Tab.4, entrando com o valor dos graus de liberdade efetivos encontrado e assumindo uma confiabilidade de 95,45 %.

Tabela 4: determinação do fator de abrangência

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| V_{eff} | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 20 | 50 | ∞ |
| k | 13,97 | 4,53 | 3,31 | 2,87 | 2,65 | 2,52 | 2,43 | 2,37 | 2,28 | 2,13 | 2,05 | 2,00 |

Fonte: Manso (2013)

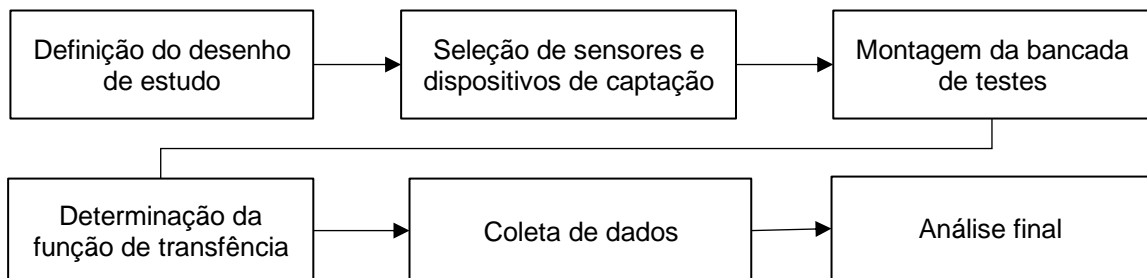
O procedimento estatístico usualmente indicado para o tratamento de medições experimentais consiste justamente em fazer os cálculos acima indicados e expressar o valor de uma grandeza X usando os dados obtidos com as Eq. 4 e Eq. 8 assim como é mostrado na Eq.10.

$$VM = \bar{X} \pm U \quad (10)$$

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental pode ser dividido de acordo com a Fig. 2.

Figura 2: Procedimento experimental



Fonte: do Autor (2020).

3.1 DETERMINAÇÃO DO DESENHO DE ESTUDO OBSERVACIONAL

Na área epidemiológica, utiliza-se largamente algumas metodologias que conduzem os estudos sobre determinadas doenças de interesse. Estas metodologias propõem algumas diretrizes para seleção, por exemplo, de grupos a serem estudados e grupos a serem tomados como padrão, ou como são chamados, grupos de controle. Por isso, nesta etapa, busca-se o apoio nestas metodologias e utilizar as mesmas ideias para um estudo voltado na área da metrologia.

Definiu-se, então, que o tipo de estudo observacional tomado como referência, será o Estudo de Coorte, pois se trata de um estudo longitudinal e prospectivo, onde pode-se criar uma metodologia para múltiplas observações numa faixa de tempo e compará-las à um padrão de medição, caracterizando um estudo controlado como cita HOCHMAN (2005).

Caso houvesse necessidade de um estudo com um desenho voltado à análise de dados históricos, por exemplo, o método em si, somente difere no momento da coleta de dados, pois a análise dos mesmos é realizada de forma muito semelhante. Vale ressaltar que para cada tipo de objetivo de estudo, deve-se realizar as análises que mais trarão resultados convergentes ao mesmo.

3.2 SELEÇÃO DE SENSORES E DISPOSITIVOS DE CAPTAÇÃO DE DADOS

Para a aquisição e processamento de dados foram utilizados os materiais dispostos na Tab. 5.

Tabela 5: Materiais para coleta e processamento de dados.




| Descrição | Função |
|---|--------------------------------------|
| Placa <i>National Instruments</i> ® 6002 | Coleta de dados |
| Placa <i>Arduino Uno</i> | Coleta de dados |
| Software <i>LabView</i> ® | Programação e processamento de dados |
| Paquímetro Digital <i>Insize</i> ® 200 mm | Padrão confiável (Resolução 0,01 mm) |
| Notebook <i>intel i3</i> ® | Coleta e processamento de dados |

Fonte: do Autor (2020).

Como o foco era realizar o estudo em cima de sensores de baixo custo, os sensores foram selecionados levando em conta sua disponibilidade na instituição e/ou custo no mercado.

Deste modo, o grupo definido para o estudo apresenta-se disposto na Tab.6, sendo que os sensores ultrassônicos tem uso compatível com a placa *Arduino Uno* e o sensor infravermelho apresenta compatibilidade com a placa da *National Instruments*.

Tabela 6: Sensores observados.

| Tipo de sensor | Imagem | Alimentação | Corrente | Frequência Ultrassom | Dimensão |
|----------------------------|---|---------------|----------|----------------------|-----------------|
| Ultrassônico HC-SR04 |  | +5 VCC | 15 mA | 40 kHz | 40 x 20 x 15 mm |
| Ultrassônico JSN-SR04T |  | 3 a 5,5 VCC | < 8 mA | 40 kHz | 40 x 20 x 12 mm |
| Infravermelho SHARP 2Y0A21 |  | 4,5 a 5,5 VCC | 12 mA | ----- | 30 x 13 x 14 mm |

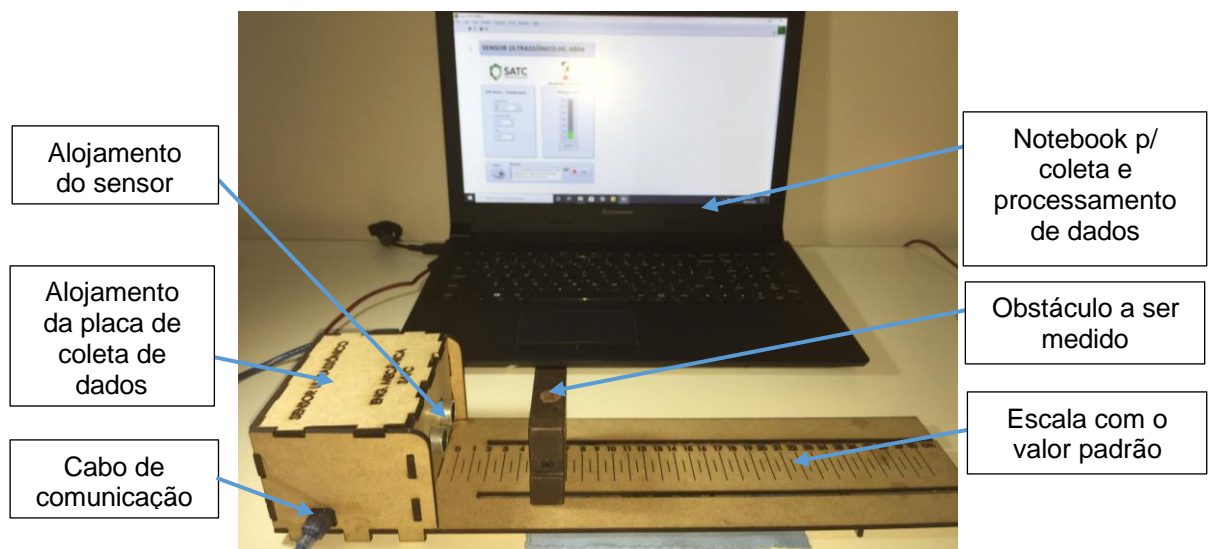
Fonte: do Autor (2020).

3.3 MONTAGEM DAS BANCADAS DE TESTES

Para os testes, foram projetadas três bancadas idênticas à Fig. 3 (somente mudando a parte frontal de fixação do sensor), em madeira, cortadas à laser, uma para cada sensor estudado, de modo que sua fixação fosse perfeita e sem folgas.

O esquema para o referido estudo foi montado em ambiente controlado nas dependências da Faculdade SATC, no Laboratório de Vibrações e Tribologia (LAVITRI) em parceria com o Laboratório de Instrumentação, Controle e Metrologia e (LABICOM) como pode ser visto na Fig. 3.

Figura 3 - Bancada operando.



Fonte: do Autor (2020).

Esta etapa deve ser realizada com cuidado para garantir o máximo de imparcialidade no que diz respeito às medições que serão realizadas. Ou seja, tentar manter inalteradas as condições de trabalho para todos os tipos de sensores observados. Preferencialmente, realizar as observações em laboratório com condições ambientais controladas, para evitar erros de medição devido a alterações de temperatura e com bancadas que possibilitem a perfeita fixação do sensor, eliminando um possível fator gerador de erro de medição.

No corpo da bancada, de aproximadamente 400 mm, foi marcada uma escala com 300 mm de comprimento, marcação esta, efetuada pela máquina de corte à laser. A escala teve sua exatidão comprovada por meio da checagem com o paquímetro digital, onde foi possível aprovar seu uso como padrão de medição nas observações realizadas. A checagem foi efetuada nos pontos: 20 mm, 50 mm, 100 mm e 200 mm. O paquímetro indicou 20,00 mm, 50,00 mm, 100,00 mm e 200,00 mm respectivamente. As leituras foram tomadas como mostra a Fig.4 onde a referência para o início da medição foi definida como sendo o início do traço da escala.

Figura 4: Checagem da escala



Fonte: do Autor (2020).

3.4 DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DOS SENSORES

Nesta etapa, é realizada a modelagem da curva característica do sensor. Esse processo é necessário para eliminar o erro existente entre a fixação do sensor e o início da escala de medição, caso contrário estaria se propagando um erro sistemático grosseiro na leitura das medições. Neste momento com o auxílio do *software LabView*, um programa foi criado para que possibilite a comunicação entre a placa de aquisição de dados e o *software*.

O procedimento pode ser executado entre 5 a 10 pontos distribuídos ao longo da faixa de medição utilizável do sensor. O anteparo a ser medido que possui

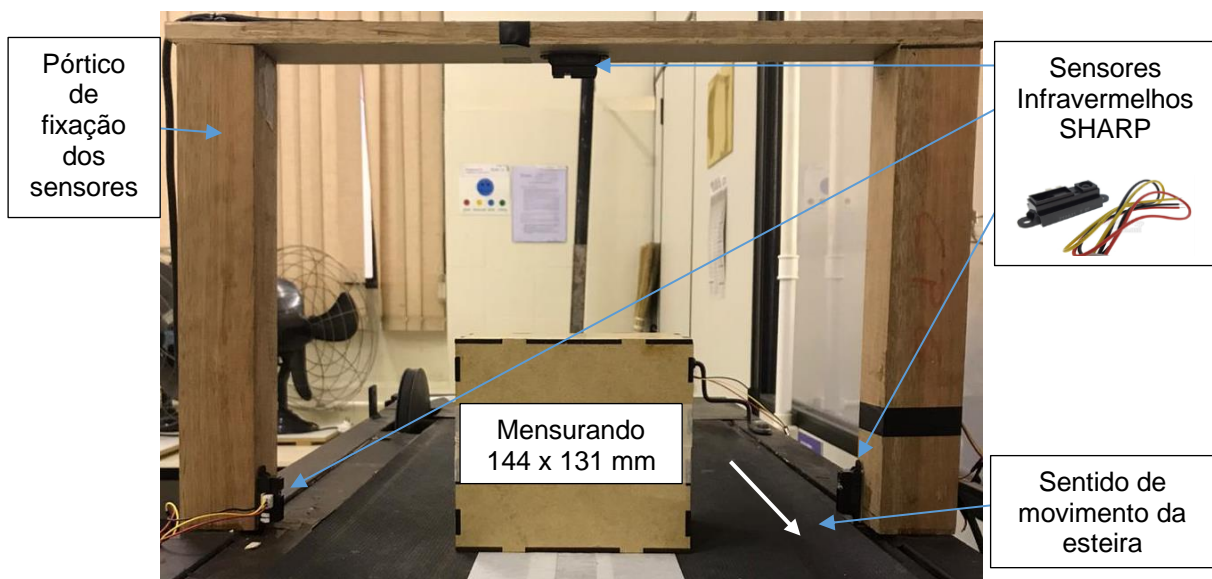
uma superfície usinada e plana é posicionado no início do traço do primeiro ponto a ser mensurado e os dados exibidos pelo sensor são gravados em arquivo .txt para posterior análise. Este procedimento é realizado para o restante dos pontos em que será determinada a curva característica do sensor.

3.5 MEDIÇÕES ESTÁTICAS E DINÂMICAS

Os dados das medições estáticas e dinâmicas devem ser analisados matematicamente e/ou estatisticamente. Portanto, após conhecer a função de transferência do sensor, é necessário estabelecer no mínimo 3 pontos de medição realizar de 6 a 8 repetições nestes pontos para que se possa obter um comportamento típico do sensor nestas diferentes faixas.

Por exemplo, para as medições estáticas, define-se que o primeiro ponto de medição seja 50 mm. O anteparo é então posicionado na escala (assim como mostrado anteriormente na Fig.3) e é realizada a primeira medição com o sensor. O processo é interrompido e após 5 segundos inicia-se outro ciclo. Este procedimento é então repetido de modo a atingir-se 8 medições. Após isso, o anteparo é posicionado no segundo e terceiro ponto de medição e então mais 8 medições são realizadas em cada ponto. Já as medições dinâmicas ocorrem de acordo com a Fig. 5

Figura 5: Teste dinâmico.



Fonte: do Autor (2020).

No teste dinâmico, o mensurando encontra-se em movimento por meio de uma esteira com velocidade aproximada de 0,1 m/s onde um sistema composto por 3 sensores selecionados realiza medições de altura e largura em um mensurando retangular de 144 x 131 mm, a fim de analisar o comportamento do sensor em uma possível aplicação prática na medição de volume de um determinado corpo. Foi construído um suporte em forma de pórtico onde possibilita-se a fixação de dois sensores na base do pórtico para realizar a medição de largura e um sensor na posição central da parte superior horizontal do pórtico para realizar a medição de altura do corpo. São realizadas 8 medições repetidas do mesmo mensurando deslocando-se na esteira.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa, sensores serão analisados por meio do gráfico de distribuição de probabilidade, curva de calibração, gráfico precisão x exatidão, incerteza de medição e todas as características pertinentes dos mesmos.

4.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO SENSOR

O conceito da teoria observacional de coorte, aplicado na saúde, sugere a comparação de grupos de pessoas com incidência e ausência de determinada doença para posterior análise de certos parâmetros. Transpondo esta teoria para o atual estudo, um bom modo de visualizar a presença ou ausência de alguma deficiência no sensor estudado é pelo gráfico formado pela função de transferência do sensor. Portanto, a seguir apresentam-se os resultados das funções de cada sensor, reforçando a importância de sua determinação conforme cita Santos, *et al* (2011).

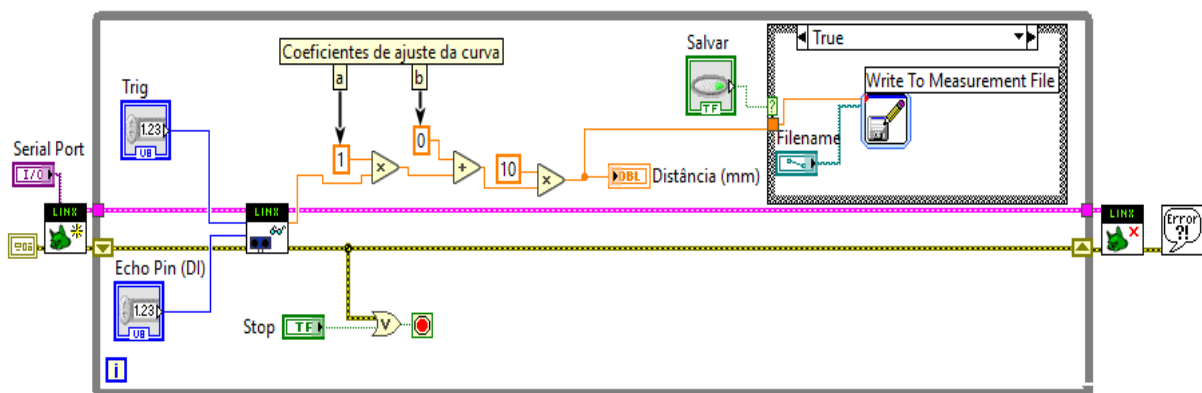
Inicialmente foram realizados testes preliminares a fim de conhecer a reprodutibilidade de valores entre sensores de um mesmo modelo, ou seja, dispunha-se de dois grupos: ultrassônico e infravermelho; e nove sensores, sendo: três ultrassônicos HC-SR04, três ultrassônicos JSN-SR04 e três infravermelhos SHARP; realizando o ensaio para conhecer suas funções de transferência, percebeu-se que todos os sensores do mesmo modelo apresentaram funções muito próximas,

confirmando um bom funcionamento e a possibilidade de realizarem-se os ensaios estáticos e dinâmicos a fim de conhecer seu comportamento sistemático e aleatório.

4.1.1 Sensores ultrassônicos

Na Fig.6 pode-se observar o diagrama de blocos e o painel frontal do *LabView®* utilizado para a captação de dados dos sensores ultrassônicos. No diagrama de blocos, da esquerda para direita, tem-se: a configuração da placa de aquisição de dados com o computador; a configuração dos pinos de entrada de sinal *echo* e *trigger*, os coeficientes de ajuste da curva de calibração; um multiplicador para expressar a medição em milímetros e por último, o armazenamento de dados. Para a calibração, os coeficientes “a” e “b” são mantidos em 1 e 0, sendo modificados somente para a posterior medição.

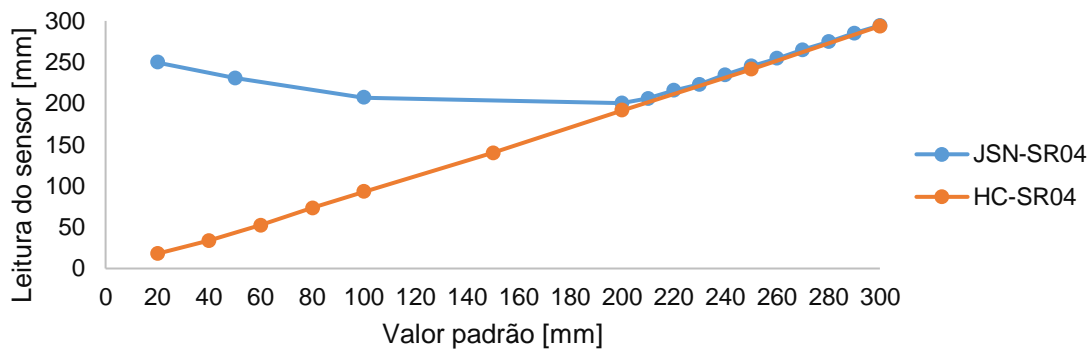
Figura 6: Programação em LabView para sensores ultrassônicos.



Fonte: do Autor (2020).

A Fig.7 mostra a curva de calibração dos dois sensores ultrassônicos observados. Por meio dela pode-se comprovar o funcionamento baseado no envio (*trigger*) e recebimento (*echo*) possibilitando um grande range de medição, como cita Corrêa *et al* (2015), pois é uma característica do sensor a necessidade de uma distância mínima para que possa ocorrer o envio e o recebimento do sinal sonoro. Os dados foram obtidos com a placa *Arduino UNO* e o sinal é apresentado em milímetros pelo fato de o programa já utilizar a conversão automática do sinal de tempo.

Figura 7: Curvas de calibração dos sensores ultrassônicos.



Fonte: do Autor (2020).

A partir da Fig.7 conclui-se ainda que o JSN-SR04 é utilizável a partir de 200 mm, pois as medições anteriores não apresentam coerência de valores quando comparado ao valor real, enquanto que o HC-SR04 apresenta um *range* muito maior, visto que este é utilizável a partir de 20 mm. Portanto, percebe-se que os sensores possuem uma “deficiência” em certas faixas de indicação.

Analisando a Tab.7 verifica-se que os dois sensores ultrassônicos apresentam uma tendência (Td) de erros sistemáticos que podem ser corrigidos de maneira a minimizar os erros de indicação como cita o ISO GUM 2008. Deste modo, para a modelagem da função de transferência dos dois sensores e conseqüentemente os coeficientes de ajuste da curva, é levado em conta somente a faixa que a tendência apresenta maior constância de valores. A tendência é calculada por:

$$Td = VM - VC \tag{11}$$

Tabela 7: Tendência dos erros sistemáticos dos sensores ultrassônicos.

| JSN-SR04 | | | HC-SR04 | | |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| VC [mm] | VM [mm] | Td [mm] | VC [mm] | VM [mm] | Td [mm] |
| 200 | 200,4 | 0,4 | 20 | 17,9 | -2,1 |
| 210 | 205,8 | -4,2 | 40 | 33,8 | -6,2 |
| 220 | 215,6 | -4,4 | 60 | 52,4 | -7,7 |
| 240 | 234,7 | -5,3 | 80 | 73,2 | -6,8 |
| 260 | 254,5 | -5,5 | 100 | 93,1 | -6,9 |
| 270 | 264,7 | -5,3 | 150 | 140,1 | -9,9 |
| 280 | 274,8 | -5,2 | 200 | 191,7 | -8,3 |
| 290 | 285,1 | -4,9 | 250 | 241,4 | -8,6 |
| 300 | 294,5 | -5,5 | 300 | 293,7 | -6,3 |

Fonte: do autor (2020).

Sendo assim, a função de transferência para o sensor JSN-SR04 que descreve uma equação linear do tipo $y = ax + b$ foi calculada na faixa de 210 a 300 mm e é dada por: $y = 0,9958x - 4,1673$ com uma correlação de valores $R^2 = 0,9994$.

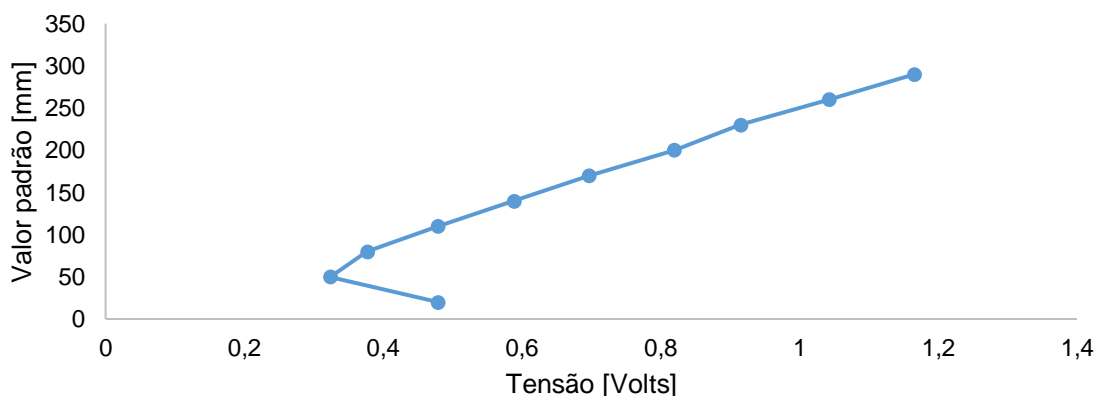
Da mesma maneira para o sensor HC-SR04 a função de transferência foi calculada na faixa de 40 a 300 mm e é dada por: $y = 0,9971x - 7,148$ para uma correlação de valores $R^2 = 0,9998$.

4.1.2 Sensor infravermelho

A Fig.8 apresenta a curva de calibração do sensor infravermelho. Os dados deste sensor foram captados utilizando a placa da *National Instruments 6002*, e pode-se perceber que o sensor infravermelho trabalha em cima de uma equação que relaciona a tensão de entrada (V_i) com a tensão de saída (V_o), que varia de acordo com a proximidade do objeto medido, visto que o fluxo de luz infravermelha recebido pelo receptor, vai variar proporcionalmente à distância em que estiver sendo efetuada a medição, como explica Corrêa *et al* (2015).

Pode-se observar que as tendências começam a se alinhar a partir do ponto 80 mm, portanto a partir deste ponto, o sensor segue uma tendência linear e sua função de transferência calculada é dada por: $y = 266,6x - 17,721$ com uma correlação de valores $R^2 = 0,999$.

Figura 8: Curva de calibração do sensor infravermelho SHARP.



Fonte: do Autor (2020).

4.2 TESTES ESTÁTICOS

A seguir, apresentam-se os resultados dos testes estáticos dos três sensores estudados onde foram analisados os parâmetros relacionados à precisão, exatidão e repetibilidade das medições, possibilitando uma fácil visualização da performance dos sensores para diferentes faixas.

4.2.1 Sensor ultrassônico HC-SR04

A Tab.8 apresenta as oito medições com o sensor HC-SR04. Os pontos escolhidos foram: 50 mm, 150 mm e 250 mm

Tabela 8: Medições do sensor HC-SR04

| VC [mm] | M1 [mm] | M2 [mm] | M3 [mm] | M4 [mm] | M5 [mm] | M6 [mm] | M7 [mm] | M8 [mm] | Média | Desv. Pad |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|--------------|
| 50,0 | 50,2 | 50,3 | 50,3 | 50,3 | 50,3 | 50,3 | 50,3 | 50,3 | 50,3 | 0,03 |
| 150,0 | 147,0 | 147,2 | 146,9 | 146,8 | 146,8 | 146,9 | 146,8 | 146,8 | 146,9 | 0,15 |
| 250,0 | 248,8 | 249,8 | 251,8 | 252,6 | 252,8 | 251,9 | 252,7 | 249,9 | 251,3 | 1,55 |

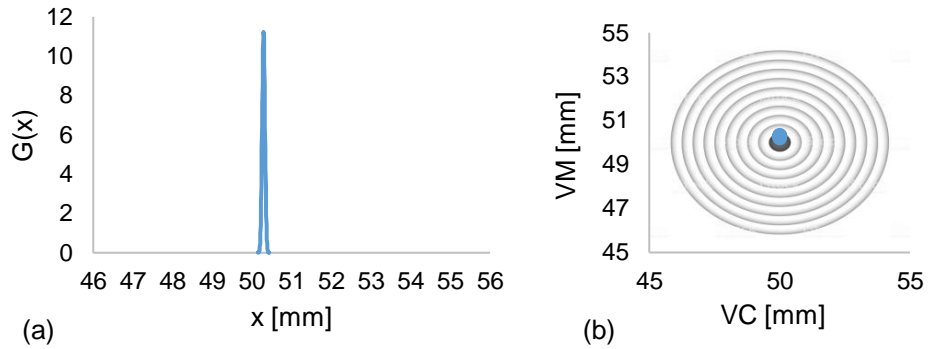
Fonte: do Autor (2020).

As Fig. 9, 10 e 11 mostram o comportamento do sensor HC-SR04. Percebe-se na Fig. 9-a, na faixa de 50 mm, que o sensor apresentou a maior densidade de probabilidade $G(x)$, indicando 50,3 mm, ou seja, possui um erro sistemático de 0,3 mm neste ponto com o menor desvio padrão dentre as três faixas analisadas.

Já na faixa de 250 mm foi onde ocorreu a pior performance, com uma baixa densidade $G(x)$ e um erro sistemático de aproximadamente 1,5 mm, confirmando o que ALMEIDA, GOULART, 2017 diz a respeito da distribuição de Laplace-Gauss, onde os resultados menos precisos apresentam afastados do valor padrão e com baixa densidade de probabilidade estando situados na parte mais larga do funil.

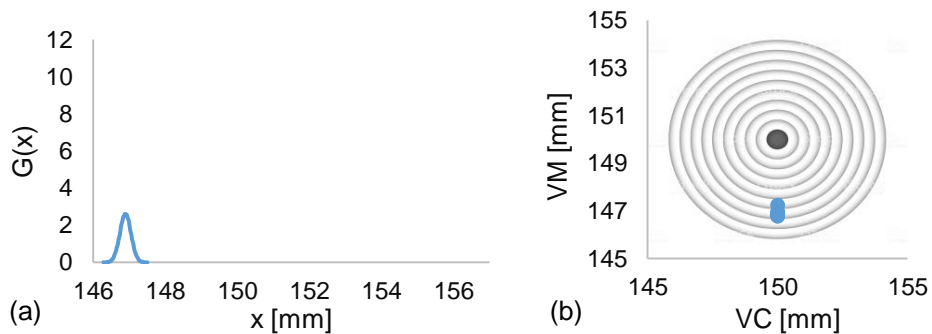
Outra forma de visualizar a performance do sensor são pelas Fig.9-b,10-b e 11-b onde podemos perceber seu melhor rendimento na faixa de 50 mm com medições próximas valor real (boa exatidão) e pouco dispersas umas das outras (boa precisão). Já na faixa de 250 mm o sensor não é preciso nem exato.

Figura 9: HC-SR04: (a) densidade de probabilidade e (b) precisão e exatidão. Faixa 50 mm.



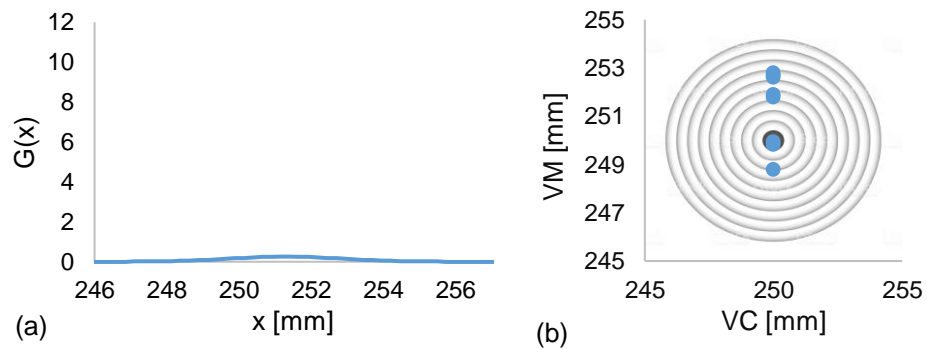
Fonte: do Autor (2020).

Figura 10: HC-SR04: (a) densidade de probabilidade e (b) precisão e exatidão. Faixa 150 mm.



Fonte: do Autor (2020).

Figura 11: HC-SR04: (a) densidade de probabilidade e (b) precisão e exatidão. Faixa 250 mm.



Fonte: do Autor (2020).

4.2.2 Sensor ultrassônico JSN-SR04

A Tab. 9 apresenta as oito medições com o sensor JSN-SR04. Os pontos escolhidos foram: 210 mm, 250 mm e 300 mm.

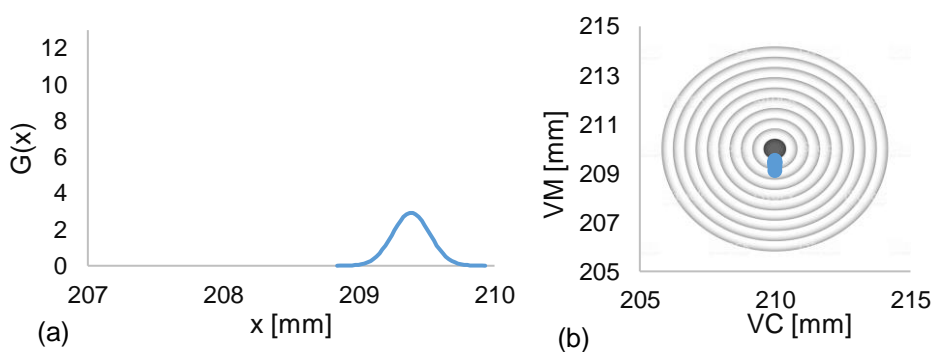
Tabela 9: Medições do sensor JSN-SR04

| VC [mm] | M1 [mm] | M2 [mm] | M3 [mm] | M4 [mm] | M5 [mm] | M6 [mm] | M7 [mm] | M8 [mm] | Média | Desv. Pad. |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|------------|
| 210,0 | 209,5 | 209,5 | 209,3 | 209,3 | 209,5 | 209,4 | 209,5 | 209,1 | 209,4 | 0,1 |
| 250,0 | 248,6 | 248,7 | 248,7 | 248,7 | 248,7 | 248,7 | 248,7 | 248,7 | 248,7 | 0,03 |
| 300,0 | 297,6 | 297,8 | 297,7 | 297,7 | 297,7 | 297,7 | 297,6 | 297,8 | 297,7 | 0,06 |

Fonte: do Autor (2020).

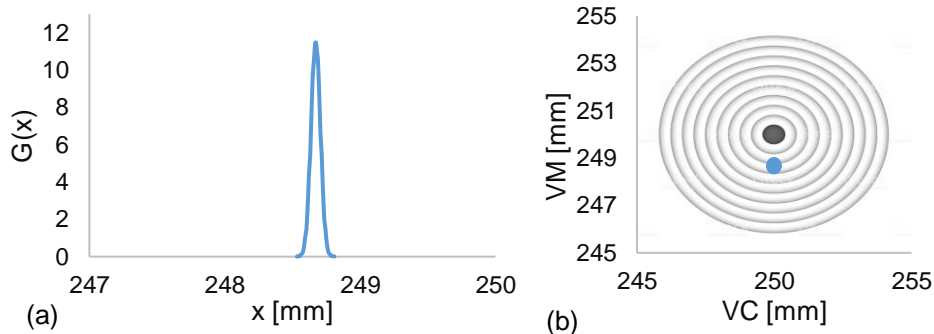
As Fig.12, 13 e 14 apresentam os três pontos de medição escolhidos para o sensor JSN-SR04. Percebe-se que a faixa onde ocorreu o menor erro aleatório foi em 250 mm pois apresenta maior densidade de probabilidade dentre as faixas analisadas, porém o sensor apresenta um erro sistemático que varia de aproximadamente -0,5 mm em 210 mm até -2,3 mm em 300 mm, isto nos diz que ele apresenta diferentes níveis de exatidão e precisão para diferentes faixas medição. Este aumento progressivo do erro sistemático pode ser acompanhado nas Fig. 12-b, 13-b e 14-b, onde percebe-se o afastamento do valor medido em relação ao valor padrão.

Figura 12: JSN-SR04: (a) densidade de probabilidade (b) precisão e exatidão. Faixa de 210 mm.



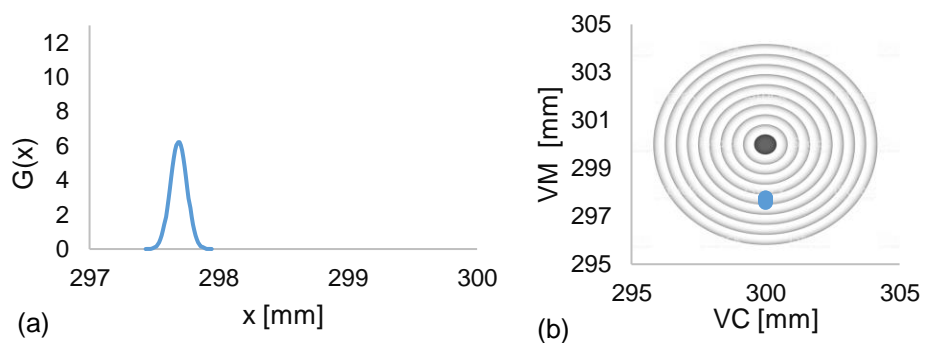
Fonte: do Autor (2020).

Figura 13: JSN-SR04: (a) densidade de probabilidade (b) precisão e exatidão. Faixa de 250 mm.



Fonte: do Autor (2020).

Figura 14: JSN-SR04: (a) densidade de probabilidade (b) precisão e exatidão. Faixa de 300 mm.



Fonte: do Autor (2020).

4.2.3 Sensor infravermelho SHARP

A Tab.10 mostra as oito medições com o sensor infravermelho SHARP nos pontos: 80 mm, 200 mm e 300 mm.

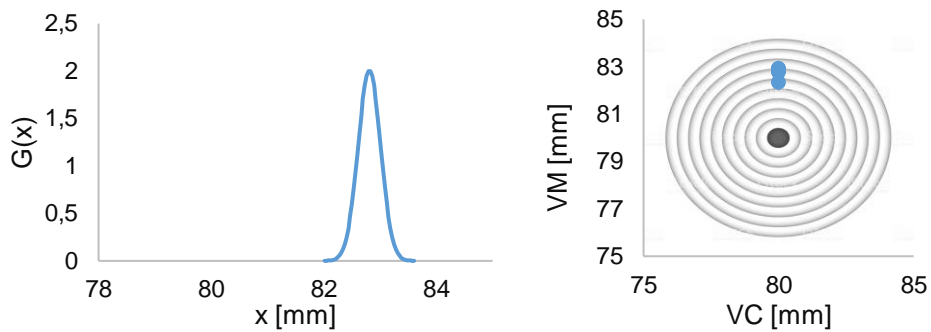
Tabela 10: Medições do sensor SHARP.

| VC [mm] | M1 [mm] | M2 [mm] | M3 [mm] | M4 [mm] | M5 [mm] | M6 [mm] | M7 [mm] | M8 [mm] | Média | Desv. Pad. |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|------------|
| 80 | 82,3 | 82,8 | 82,8 | 82,9 | 82,8 | 82,9 | 83 | 82,9 | 82,8 | 0,2 |
| 200 | 201,0 | 202,2 | 202,3 | 202,3 | 202,3 | 202,4 | 200,9 | 200,9 | 201,8 | 0,6 |
| 300 | 301,4 | 303,1 | 303,3 | 303,2 | 303,2 | 303,2 | 303,4 | 303,0 | 303,0 | 0,6 |

Fonte: do Autor (2020).

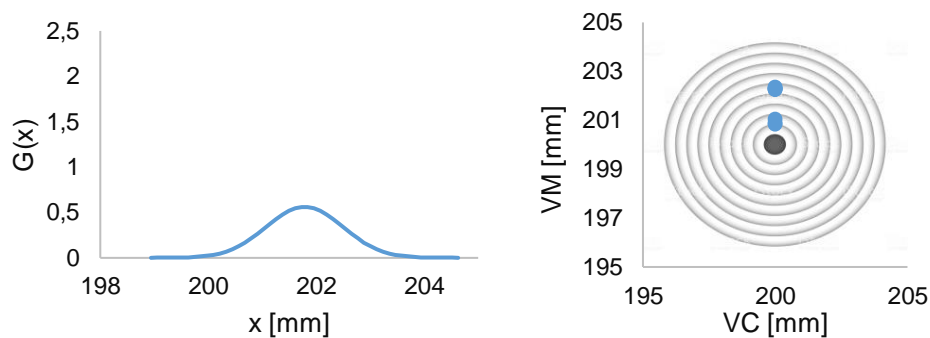
Pelas Fig. 15, 16 e 17 percebe-se que o sensor infravermelho SHARP apresentou uma performance com um erro sistemático tendendo para mais, porém com um maior desvio padrão nas duas últimas faixas

Figura 15: SHARP: (a) densidade de probabilidade, (b) precisão x exatidão. Faixa de 80 mm.



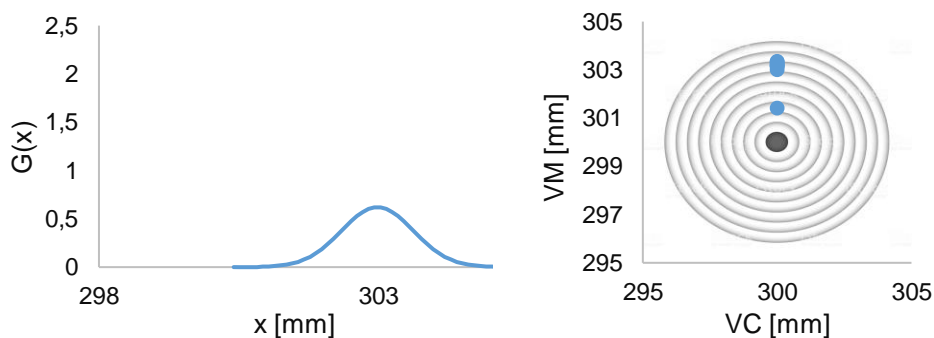
Fonte: do Autor (2020).

Figura 16: SHARP: (a) densidade de probabilidade, (b) precisão x exatidão. Faixa de 200 mm.



Fonte: do Autor (2020).

Figura 17: SHARP: (a) densidade de probabilidade, (b) precisão x exatidão. Faixa de 300 mm.



Fonte: do Autor (2020).

Na Tab. 11 pode-se observar as características dos três sensores ao final dos testes estáticos, onde, os parâmetros analisados, fornecem mais informações a respeito da qualidade dos sensores, como por exemplo, range de medição, sensibilidade e não linearidade. Eles apresentam não linearidade ou erro fiducial em

relação ao fundo de escala muito parecidos e relativamente baixos estando dentro do esperado, porém estes parâmetros sozinhos não revelam a performance dos sensores em diferentes faixas, o que foi comprovado por meios dos gráficos de densidade de probabilidade e precisão x exatidão.

Tabela 11: Características estáticas gerais.

| Sensor | Range | Erro fiducial ao fundo de escala | Resolução |
|---------------|--------------|---|------------------|
| HC-SR04 | 40 a 300 mm | 1,06 % | 0,1 mm |
| JSN-SR04 | 210 a 300 mm | 0,8 % | 0,1 mm |
| SHARP | 80 a 300 mm | 1,13 % | 0,1 mm |

Fonte: do Autor (2020).

4.5 TESTE DINÂMICO

Para o teste dinâmico, foi selecionado sensor infravermelho SHARP, pois seu range de medição atendia melhor as condições geométricas e por sua performance apresentar uma característica com menor erro aleatório. Os três sensores responsáveis pela medição da altura e largura do mensurando foram calibrados separadamente e seus erros sistemáticos corrigidos a fim de avaliar somente o comportamento aleatório do sensor, e comparar com o seu comportamento quando medindo estaticamente. Pela Tab.12 pode-se perceber que o desvio padrão das medias teve um aumento de 50 % em relação ao desvio da faixa estática de 200 mm, em contra partida o erro sistemático foi de apenas 1 mm. Observa-se que as características dinâmicas do processo influenciam no resultado final da medição e o sensor deve ser adequadamente dimensionado para tal fim, como cita Santos (2012).

Ainda analisando a Tab.12, nota-se que o VC apresentado de 144 mm e 131 mm, refere-se às dimensões do mensurando, sendo que o cálculo do volume, que foi sugerido como aplicação prática, não foi avaliado, pois o interesse principal aqui era verificar a performance do sensor numa situação de medição dinâmica em comparação à uma medição estática. Vale ressaltar ainda que, para este teste, não foram realizados os ensaios a fim de descobrir o tempo de resposta nem a frequência natural deste sensor, informações estas, que também são relevantes na análise dinâmica do mesmo.

Tabela 12 : Teste dinâmico sensor SHARP.

| VC [mm] | M1 [mm] | M2 [mm] | M3 [mm] | M4 [mm] | M5 [mm] | M6 [mm] | M7 [mm] | M8 [mm] | Média | Desv. Pad. |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|---------------|
| 144 | 143,8 | 143,5 | 142,9 | 141,6 | 141,5 | 142,3 | 144,0 | 144,1 | 143,0 | 1,1 |
| 131 | 132,2 | 130,6 | 132,1 | 131,2 | 129,4 | 129,6 | 131,8 | 129,2 | 130,8 | 1,2 |

Fonte: do Autor (2020).

4.6 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

O cálculo seguiu a recomendação do ISO GUM 2008 onde primeiramente foi listada as principais fontes de incerteza das medições observadas que são elas: resolução do padrão (tipo B e distribuição retangular), resolução do sensor (tipo B e distribuição retangular) e repetibilidade (tipo A e distribuição normal). A resolução do padrão foi adotada como sendo 0,01 mm. A resolução dos sensores foi fixada em 0,1 mm e a repetibilidade foi avaliada por meio do desvio padrão das 8 medições. A incerteza foi calculada baseando-se numa confiabilidade de 95,45 %.

Uma planilha em *Excel* foi montada para determinar a incerteza de medição em cada sensor juntamente com seus erros sistemáticos e os resultados são apresentados nas Tab.13 e Tab.14 e Tab.15, onde pode-se observar a presença não uniforme de erros sistemáticos e incertezas para os três pontos analisados, fazendo-se necessária uma análise crítica de acordo com os critérios de aceitação desejados.

Tabela 13: Incerteza de medição HC-SR04.

| VC [mm] | VM [mm] | EM [mm] | U [mm] | k | Veff |
|--------------|---------|---------|--------|------|------|
| 50,0 | 50,3 | 0,3 | 0,06 | 2,01 | 312 |
| 150,0 | 146,9 | -3,1 | 0,14 | 2,25 | 11 |
| 250,0 | 251,3 | 1,3 | 1,33 | 2,43 | 7 |

Fonte: do Autor (2020).

Tabela 14: Incerteza de medição JSN-SR04.

| VC [mm] | VM [mm] | EM [mm] | U [mm] | k | Veff |
|--------------|---------|---------|--------|------|------|
| 210,0 | 209,4 | -0,6 | 0,12 | 2,21 | 13 |
| 250,0 | 248,7 | -1,3 | 0,07 | 2,02 | 154 |
| 300,0 | 297,7 | -2,3 | 0,08 | 2,06 | 45 |

Fonte: do Autor (2020).

Tabela 15: Incerteza de medição sensor SHARP

| VC [mm] | VM [mm] | EM [mm] | U [mm] | k | Veff |
|---------|---------|---------|--------|------|----------|
| 80,0 | 82,8 | 2,8 | 0,2 | 2,32 | 9 |
| 200,0 | 201,8 | 1,8 | 0,6 | 2,43 | 7 |
| 300,0 | 303,0 | 3,0 | 0,6 | 2,43 | 7 |

Fonte: do Autor (2020).

A Tab.16 mostra a incerteza de medição do sensor SHARP no teste dinâmico. Percebe-se que o aumento do desvio padrão em relação à medição estática, promove um aumento proporcional na incerteza dinâmica, revelando uma pior performance do mesmo nestas condições.

Tabela 16: Incerteza dinâmica do sensor SHARP.

| VC [mm] | VM [mm] | EM [mm] | U [mm] | k | Veff |
|---------|---------|---------|--------|------|----------|
| 144,0 | 143,0 | -1,0 | 0,9 | 2,43 | 7 |
| 131,0 | 130,8 | -0,2 | 1,1 | 2,43 | 7 |

Fonte: do Autor (2020).

5. CONCLUSÃO

O estudo observacional apresentado possibilita uma interpretação descomplicada dos dados obtidos em uma série de medições. O gráfico da densidade de probabilidade juntamente com o gráfico da precisão *versus* exatidão, possibilitam um rápido e claro diagnóstico sobre a performance do sensor para diferentes faixas de medição, constituindo uma ferramenta importante, tanto na seleção de um novo sensor, quanto na verificação de seu correto funcionamento. Ou seja, o método mostra-se eficiente como uma ferramenta utilizável desde a compra até a manutenção preventiva do instrumento de medição.

Conclui-se também que o conhecimento do regime de trabalho em que o sensor estará operando, é um fator decisivo na sua seleção, visto que, um mesmo sensor apresentou acréscimo de mais de 50% em seu desvio padrão numa medição dinâmica, quando comparado a uma medição estática numa mesma faixa.

O sensor, além de seu comportamento aleatório e sistemático, pode ou não, apresentar diferentes níveis de incerteza em todo seu *range* de medição. Esta incerteza é diretamente ligada à fatores como: repetibilidade, resolução do sensor e

qualidade do padrão de referência. Portanto, um bom padrão de referência e um método imparcial, faz do estudo uma ferramenta eficaz na correta seleção ou verificação de sensores.

Como sugestão para futuros estudos, destaca-se o aprofundamento na caracterização dinâmica dos sensores, realizando testes em diferentes faixas de velocidade e analisar como a frequência natural e o tempo de resposta influenciam no comportamento dos mesmos.

Agradecimentos

Aos colaboradores do LAVITRI e LABICOM, pelo espaço e equipamentos cedidos. Aos professores e orientadores pela ajuda e conhecimentos repassados e à minha família por todo apoio e incentivo em todo o curso.

6. BIBLIOGRAFIA

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. P. B. A. GOULART, B. N. G. **Como minimizar vieses em revisões sistemáticas de estudos observacionais**. 2017, vol.19, n.4. ISSN 1982-0216. Disponível em:<<https://doi.org/10.1590/1982-021620171941117>>. Acesso em: 24/03/2020.

BRAGA, Anísio Rogério. POLITO, Carmela Maria. **Instrumentação Industrial**. UFMG, 2010.

CORRÊA, Anderson. CAMPIGOTO, Evandro. **Metrologia e instrumentação: Relatório de desenvolvimento scanner 2D**. IFSC, Joinville, 2015.

CARR, Joseph J. **Sensors and Circuits**. Upper Saddle River, NJ, PTR Prentice-Hall Inc, 1993.

DINIZ, Alberto C. G. C., OLIVEIRA, Alessandro B. S., VIANNA, João N. S., NEVES, Fernando J. R. **Dynamic Calibration Methods for Pressure Sensors and Development of Standard Devices for Dynamic Pressure**, XVIII IMEKO World Congress, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2006.

DINIZ, Alberto C. G. C., VIANNA, João N. S., OLIVEIRA, Alessandro B. S., NEVES, Fernando J. R. **Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão e Temperatura**. VI Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação, São Paulo – SP, Brasil, 2004.

DINIZ, Alberto C. G. C. **Gerador Periódico para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão**. 1994. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 1994.

ESWARD, T. J., ELSTER, C., HESSLING, J. P. **Analysis of Dynamic Measurements: New challenges require new solutions**. In: Proceedings of XIX IMEKO World Congress, Lisboa, Portugal, 2009.

HOCHMAN, Bernardo, *et al.* **Desenhos de pesquisa**. São Paulo – Escola Paulista de Medicina (UNIFESP – EPM), 2005.

ISO GUM. **Avaliação de dados de Medição - Guia para a expressão de incerteza de medição**. 1ª edição brasileira, 2008.

MANSO, Gabriel Fernandes Almeida. **Estudo da determinação da incerteza de medição na calibração dinâmica de sensores de temperatura**. Universidade de Brasília. 2013. Trabalho de conclusão de curso.

MORAES, Camila F. W. de C. **Procedimento objetivo para a garantia da qualidade de dados observacionais de vento em superfície no litoral do Rio Grande do Norte**. Recife, 2015.

RAIMUNDO, Juliana Zangirolami. ECHEIMBERG, Jorge. LEONE, Claudio. **Research methodology topics: Cross-sectional studies**. Journal of Human Growth and Development. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.7322/jhgd.152198>>. Acesso em: 24/03/2020.

SANTOS, A. M. N., DINIZ, A. C. G. C., PIRATELLI-FILHO, A. (2011). **“Metrologia Dinâmica - A Experiência da Universidade de Brasília”**. In: Congresso Internacional de Metrologia Mecânica - II CIMMEC. Natal-RN, 2011.

SANTOS, Ângela Maria Nogueira. **Efeitos Dinâmicos na Medição: Problemas em Metrologia Dinâmica e Medição por Coordenadas**. 2012. 110p. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2012.

TERMINOLOGIA de sensores. **National Instruments**, 2019. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/13/sensor-terminology.html#section--228450672>>. Acesso em: 29/09/2019.

VEJEN, F. et al. **Quality control of meteorological observations. Automatic methods used in the Nordic countries.** Norwegian meteorological institute. [S.l.], p. 1106. 2002

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|--------------|---------|------------------------------------|
| σ | [mm] | Desvio padrão |
| \bar{x} | [mm] | Valor médio das medições |
| x_i | [mm] | Medição independente |
| n | [-----] | Número de observações |
| $s^2(x_i)$ | [mm] | Variância |
| v_i | [-----] | Graus de liberdade |
| k | [-----] | Fator de abrangência |
| u_c | [mm] | Incerteza combinada |
| U | [mm] | Incerteza expandida |
| u_i | [mm] | Incerteza padrão |
| N | [----] | Quantidade de fontes de incerteza |
| V_{eff} | [----] | Graus de liberdade efetivos |
| $NL(\%)$ | [%] | Não linearidade |
| $Erro_{MÁX}$ | [mm] | Erro máximo |
| FS | [mm] | Fundo de escala |
| S_b | [mm/mm] | Sensibilidade |
| dS | [mm] | Sinal de saída |
| dX | [mm] | Sinal de entrada |
| Td | [mm] | Tendência |
| VM | [mm] | Valor medido |
| VC | [mm] | Valor convencional ou valor padrão |
| EM | [----] | Erro médio |