

## CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UM SENSOR DE NÍVEL CAPACITIVO PARA TRABALHO POR IMERSÃO EM LÍQUIDO

**Rodrigo S. F. Nascimento** – rodrigoscoralick@ig.com.br

**Janison R. Carvalho** – janison@leopoldina.cefetmg.br

**Alex S. Temoteo** – alextemoteo@leopoldina.cefetmg.br

**Lindolpho O. A. Junior** – lindolpho@leopoldina.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais Campus III

Rua José Peres, nº: 558 – Centro

36700-000 – Leopoldina – Minas Gerais

**Resumo:** Este artigo tem por finalidade apresentar o desenvolvimento de quatro sensores de nível capacitivo, para trabalho por imersão em líquidos, assim como o levantamento das curvas de capacitância versus nível. Foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov para garantir a normalidade dos dados e a construção de Intervalo de Confiança para a média, consequentemente obteve-se a calibração dos sensores através do característico de resposta de cada um dos sensores, além da validação das aferições desenvolvidas. Também, foi realizada análise dos resultados alcançados, visando aplicação futura desses sensores em uma bancada didática para realização de técnicas de controle em sistemas acoplados do tipo MIMO – Multiple Input Multiple Output.

**Palavras-chave:** Sensor de nível capacitivo, Teste de Kolmogorov-Smirnov, Intervalo de confiança.

### 1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de construção de um protótipo para controle de nível multivariável com quatro tanques baseado no sistema desenvolvido por (JOHANSSON, 2000), tendo a finalidade de utilização em atividades de ensino e pesquisa junto ao curso de Engenharia de Controle e Automação e do grupo de Pesquisa em Controle e Automação, do Campus III do CEFET-MG, fez-se necessária a elaboração de quatro sensores de nível, um para cada tanque, tendo em vista que a compra destes sensores é inviável pelo pequeno orçamento disponível.

Várias topologias de sensores foram avaliadas e as que melhor atenderam as características do projeto, foram os sensores de nível capacitivo, por serem contínuos, terem baixo custo em sua implementação e de simples construção. Dentre os sensores capacitivos, o que melhor se ajustou no projeto foi o cilíndrico, pois os materiais para sua confecção estavam disponíveis, o que facilitou a adoção de uma linha metodológica construtivista ao projeto (BARQUERO, 1998).

Um capacitor cilíndrico, como mostrado na “Figura 1”, consiste em dois cilindros concêntricos de comprimento  $L$ , cujo cilindro maior (externo) é uma casca de raio  $b$  e o menor (interno) um sólido de raio  $a$ . O espaço existente entre os cilindros concêntricos é ocupado por um dielétrico, que pode ser o próprio ar ou vácuo, um fluido líquido qualquer ou mesmo um sólido.

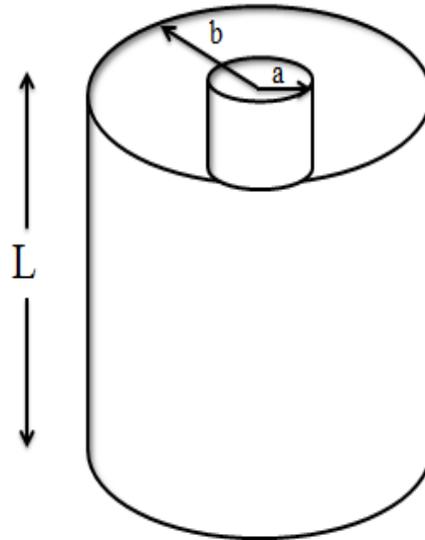


Figura 1 – Cilindro capacitivo.

O sensor capacitivo pode funcionar como uma sonda, ficando com uma parte imersa no fluido que ali esteja estocado no reservatório, ou ainda uma simples haste cilíndrica metálica, sendo que o cilindro externo será o próprio tanque metálico de estocagem (BALBINOT & BRUSAMARELO, 2007).

O método capacitivo pode ser empregado para medição de nível de materiais condutores ou isolantes. Em líquidos condutores de corrente elétrica, deve-se moldar uma capa isolante em volta de uma haste, a qual serve como eletrodo (uma das placas do capacitor). A outra placa condutora ou eletrodo do capacitor pode ser a própria carcaça do reservatório (se esta for metálica), ou então uma nova haste com uma camada isolante (BALBINOT & BRUSAMARELO, 2007).

## 2 CONTRUÇÃO DO SENSOR

Para o desenvolvimento do protótipo foi necessária a construção de quatro sensores que utilizam o método capacitivo. Estes sensores medem o nível de um material condutor, neste caso o líquido que estará no reservatório, a água. A “Figura 2” ilustra um tanque e o capacitor cilíndrico equivalente, no qual o nível está sendo medido pela variação da capacitância. Pode-se observar um eletrodo de diâmetro  $d_1$ , um isolante de diâmetro  $d_2$ , e um tanque de diâmetro  $d_3$ . Desta forma, a capacitância do sistema é definida por:

$$C = \frac{2\pi\xi_0L}{\frac{1}{\xi_1} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{\xi_2} \ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right)} \quad (1)$$

Sendo  $L$  o nível do reservatório e  $\xi_0$ ,  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ , as constantes dielétricas do vácuo, do isolante e do líquido, respectivamente. A capacitância aumenta de acordo com a elevação do nível da água. Conforme a “Equação (1)” o nível varia linearmente com a capacitância. Esta afirmação será confrontada com os resultados finais, para a validação do modelo do capacitor.

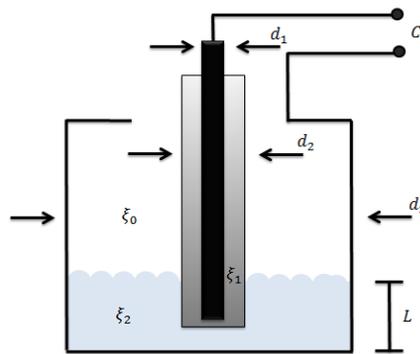


Figura 2 – Medição de nível por variação de capacitância e seu capacitor cilíndrico equivalente.

Quatro sensores foram construídos, um para cada tanque, todos com o mesmo método construtivo e os mesmos materiais. Na “Figura 3” é mostrado um dos sensores capacitivos construído. Os materiais utilizados para a construção do sensor foram:

- Um tubo de cobre: 35 cm de altura, 22 mm de diâmetro externo, 0,5 mm de parede.
- Uma haste de cobre: 35 cm de altura, 9 mm de diâmetro, interna ao tubo de cobre.
- Duas peças plásticas confeccionadas no torno para suporte e centralização da haste, localizadas nas duas extremidades do tubo de cobre. As peças são vazadas para que a água entre internamente ao tubo.
- Esmalte para fios a base de poliesterimida modificado com Theic contendo cresol, para o isolamento da haste.
- Régua milimetrada de 30 cm de comprimento.

A haste de cobre foi isolada com o esmalte, e colocada internamente ao tubo, fixada com as duas peças plásticas e centralizada em relação ao tubo, as peças também precisaram ser vazadas nas laterais para que a água entre por dentro do sensor. Nas extremidades do tubo e da haste foram soldados fios que servem de terminais do capacitor, a régua foi utilizada de base para as medições. Os sensores foram nomeados com as letras A, B, C e D. O sensor A pode ser visto na “Figura 3”.



Figura 3 – Vista frontal do sensor A.

Nos sensores propostos no trabalho a “Equação (1)” não foi levada em consideração, pois na construção dos sensores, a camada de isolante foi preenchida artesanalmente, não existindo assim uma homogeneidade em toda sua extensão. Para o levantamento da curva característica foi utilizado apenas medidas experimentais. A peça plástica que serve de base interfere no zero da altura do sensor por não ocorrer nenhuma relação de capacitância em sua extensão. O ponto inicial (zero) de medição foi definido pelo zero da régua milimetrada, conforme a “Figura 3”.

### **3 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO**

Para o processo de calibração e validação foram seguidas regras básicas, que serão demonstradas nesse tópico.

#### **3.1 Especificação dos requisitos da medição**

Será necessária a validação de quatro sensores, cada um com uma faixa diferente de valores de capacitância. Um capacímetro digital da marca ICEL, modelo CD-300, foi usado para as aferições. A curva capacitância versus altura do sensor é o objetivo principal da medição. Todos os sensores têm uma faixa de medição de 0-30 cm.

#### **3.2 Tomada de decisão sobre o rigor da validação e planejamento do experimento**

O número de aferidores empregado no experimento foi de seis pessoas. Escolheu-se um intervalo de confiança de 95%, que é um percentual satisfatório para o levantamento das curvas dos sensores. Este intervalo de confiança atende as demandas do sensor, que não necessita de uma precisão alta, por causa de sua finalidade didática. Não se levou em consideração os erros do capacímetro e da régua milimetrada.

#### **3.3 Realização das medições**

As medições foram realizadas de acordo com a disponibilidade de cada aferidor. Foram gastas três semanas para a finalização das medições. O processo de medição se tornou bem simples, media-se primeiramente a capacitância com o sensor seco, sem contato com água, depois o sensor era colocado em um tubo de acrílico transparente vazio, adicionando-se água até chegar ao zero do sensor. No zero era feita uma medição de capacitância e depois se adicionava mais água para chegar ao nível de 1cm, esse processo era repetido até se chegar no nível máximo de medição, 30 cm. Cada um dos seis aferidores repetiu o processo para os sensores A, B, C e D, uma vez.

#### **3.4 Teste de Normalidade e Intervalo de Confiança**

Como já foi dito acima, apenas um capacímetro foi disponibilizado para as medições. Com essa deficiência se faz necessário a medição por mais aferidores para evitar que os dados sejam correlacionados. Para averiguar a normalidade dos dados, optou-se por apresentar apenas o teste de Kolmogorov-Smirnov. Garantida a normalidade, podemos construir Intervalos de Confiança, com nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%. A construção de Intervalos de Confiança foi considerada necessária para verificar a variação das medições realizadas.

Observou-se que algumas medições, principalmente do Sensor C, não podem ser considerados com distribuição normal. Porém, optou-se por construir os intervalos de confiança para esses dados, por se tratar de uma quantidade pequena que não sugere normalidade e por ser um dispositivo com fins educacionais. A seguir, são apresentados os

gráficos com os Intervalos de Confiança e a “Tabela 1” com os resultados do teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov).

Tabela 1- Teste de Normalidade (Kolmogorv-Smirnov), estatística do teste e p-valor para as médias de medidas de cada distância no sensor com erros de  $\alpha=5\%$ .

Medida(cm)	Sensor A		Sensor B		Sensor C		Sensor D	
	Estatística KS	P-valor	Estatística KS	P-valor	Estatística KS	P-valor	Estatística KS	P-valor
0	0,107	>0,150	0,253	>0,150	0,269	>0,150	0,195	>0,150
1	0,199	>0,150	0,258	>0,150	0,218	>0,150	0,16	>0,150
2	0,176	>0,150	0,245	>0,150	0,202	>0,150	0,136	>0,150
3	0,174	>0,150	<b>0,325</b>	<b>0,047*</b>	<b>0,382</b>	<b>0,010*</b>	0,181	>0,150
4	0,255	>0,150	<b>0,307</b>	<b>0,075*</b>	0,230	>0,150	0,202	>0,150
5	0,200	>0,150	0,240	>0,150	0,234	>0,150	0,140	>0,150
6	0,264	>0,150	0,228	>0,150	0,251	>0,150	0,187	>0,150
7	0,167	>0,150	0,173	>0,150	<b>0,299</b>	<b>0,090*</b>	0,137	>0,150
8	0,202	>0,150	0,146	>0,150	0,222	>0,150	0,161	>0,150
9	0,217	>0,150	0,204	>0,150	<b>0,348</b>	<b>0,031*</b>	0,195	>0,150
10	0,243	>0,150	0,250	>0,150	<b>0,333</b>	<b>0,042*</b>	0,203	>0,150
11	0,253	>0,150	0,180	>0,150	0,260	>0,150	0,257	>0,150
12	0,255	>0,150	0,152	>0,150	<b>0,342</b>	<b>0,035*</b>	0,165	>0,150
13	<b>0,305</b>	<b>0,080*</b>	0,265	>0,150	<b>0,324</b>	<b>0,048*</b>	0,178	>0,150
14	<b>0,320</b>	<b>0,052*</b>	0,235	>0,150	0,189	>0,150	0,149	>0,150
15	<b>0,288</b>	<b>0,117*</b>	0,211	>0,150	0,222	>0,150	0,164	>0,150
16	0,264	>0,150	0,222	>0,150	<b>0,324</b>	<b>0,048*</b>	0,228	>0,150
17	0,259	>0,150	0,196	>0,150	0,225	>0,150	0,142	>0,150
18	0,264	>0,150	0,254	>0,150	0,186	>0,150	0,164	>0,150
19	0,220	>0,150	0,228	>0,150	0,227	>0,150	0,142	>0,150
20	0,233	>0,150	0,198	>0,150	0,198	>0,150	0,156	>0,150
21	0,200	>0,150	0,186	>0,150	0,206	>0,150	0,247	>0,150
22	0,198	>0,150	0,157	>0,150	0,175	>0,150	0,149	>0,150
23	0,200	>0,150	0,180	>0,150	0,211	>0,150	0,191	>0,150
24	0,194	>0,150	0,224	>0,150	0,257	>0,150	0,278	>0,150
25	0,199	>0,150	0,206	>0,150	0,187	>0,150	0,206	>0,150
26	0,202	>0,150	0,185	>0,150	0,173	>0,150	0,269	>0,150
27	0,182	>0,150	0,207	>0,150	0,167	>0,150	0,142	>0,150
28	0,175	>0,150	0,176	>0,150	0,157	>0,150	0,138	>0,150
29	0,192	>0,150	0,185	>0,150	0,171	>0,150	0,171	>0,150
30	0,189	>0,150	0,162	>0,150	0,248	>0,150	0,241	>0,150

Para se construir o intervalo de confiança foi utilizado o desvio-padrão da amostra (s), já que o desvio-padrão populacional é desconhecido. Os limites inferiores (LCI) e superiores (LCS) são definidos por:

$$LCI = \bar{X} - t_{\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

$$LCS = \bar{X} + t_{\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

$$\bar{X} - t_{\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Onde:

$\bar{X}$  = média da amostra

$n$  = número de elementos da amostra

$t_{\alpha/2, n-1}$  = valor de t na tabela t-Student para  $\alpha/2$  e com n-1 graus de liberdade

$s$  = desvio-padrão

$\mu$  = média da população

### 3.5 Avaliação das informações obtidas e aplicação do método de Intervalo de Confiança para variância desconhecida

Cada aferidor obteve quatro tabelas com trinta e duas medições, uma com o sensor sem água, e trinta e uma medidas com um centímetro de variação sabendo-se que o range dos sensores é (0-30)cm. Nestas tabelas constam informações sobre as alturas com suas respectivas capacitâncias medidas, sendo uma tabela para cada sensor. Com esses dados foram calculadas a média, a variância, o desvio padrão, os limites de confiança inferior e superior para cada ponto. Para esse cálculo foi implementado um algoritmo no software matlab®. A “Tabela 2” apresenta os valores médios dos pontos máximos e mínimos de capacitância (0cm e 30cm).

Tabela 2 - Valores mínimos e máximos de capacitância.

Sensor	0cm	30cm
A	45pF	1498pF
B	44pF	1497pF
C	53pF	1097pF
D	56pF	1339pF

Com essas informações pode-se aplicar o método de validação escolhido anteriormente. Foi gerado no matlab® um gráfico para cada sensor onde mostra uma curva das médias da capacitância em função da altura. Em cada média os limites de confiança inferior e superior estão como barras que determinam o intervalo de confiança de 95%. Os respectivos gráficos podem ser vistos na “Figura 4”, “Figura 5”, “Figura 6” e “Figura 7”. Os gráficos apresentam

no eixo das abscissas a altura (cm) e no eixo das ordenadas a capacitância (pF). A curva representa os pontos médios dos sensores A, B, C e D, respectivamente.

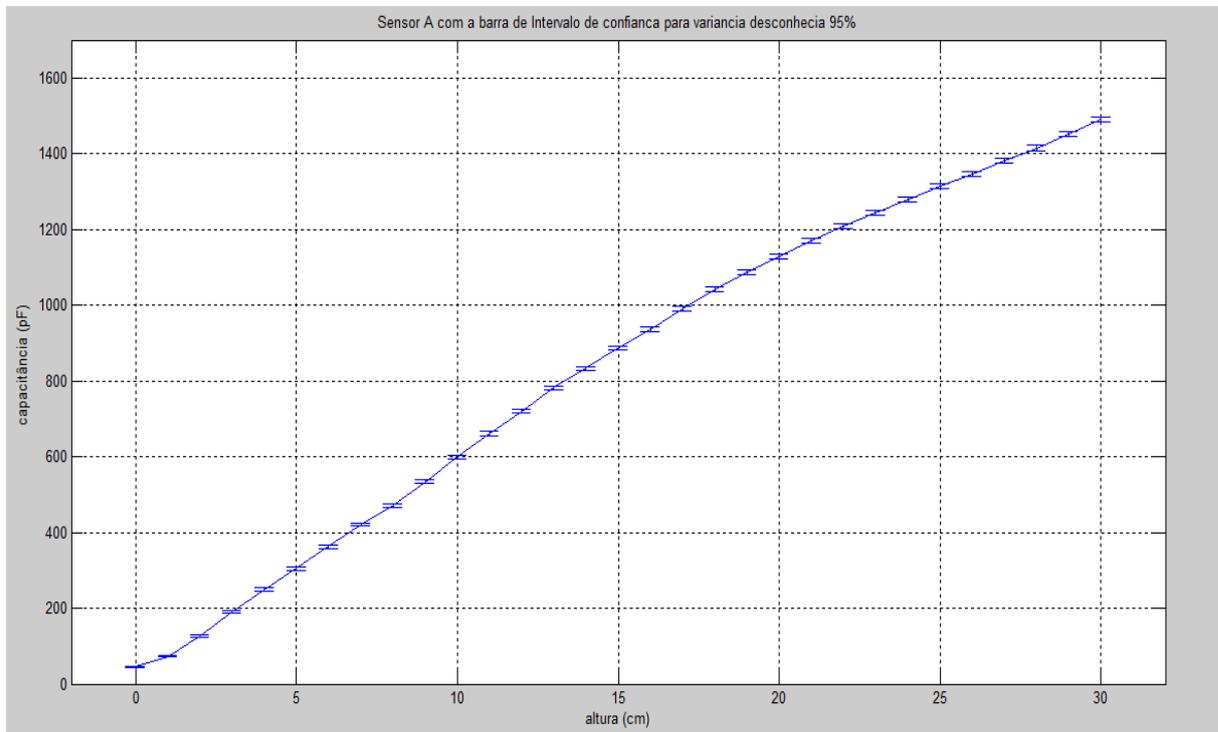


Figura 4 – Curva das médias do sensor A e seus intervalos de confiança.

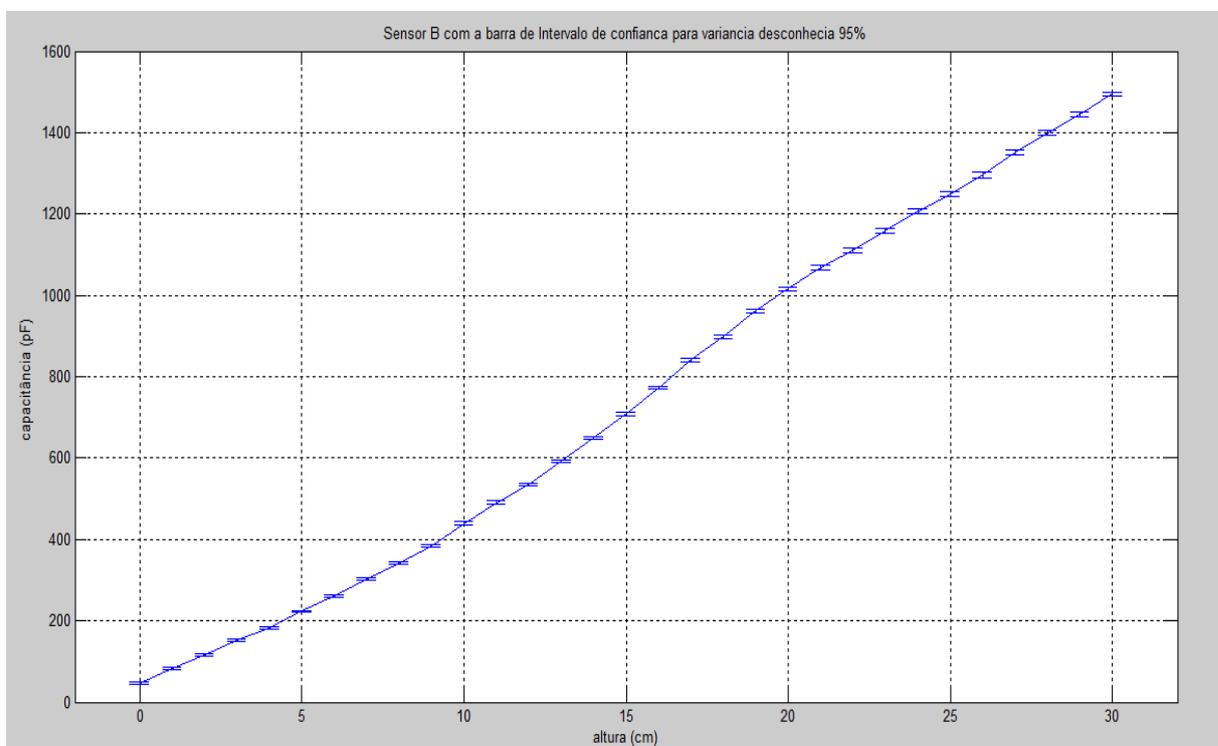


Figura 5 – Curva das médias do sensor B e seus intervalos de confiança.

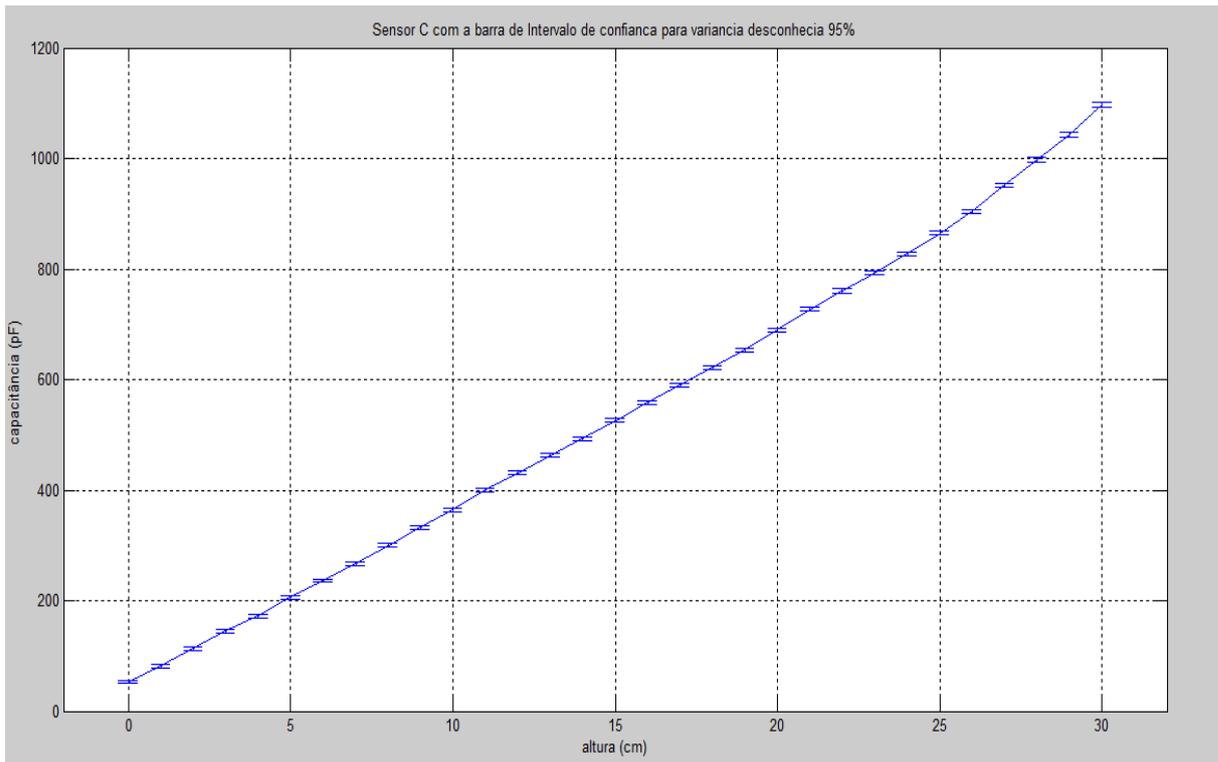


Figura 6 – Curva das médias do sensor C e seus intervalos de confiança.

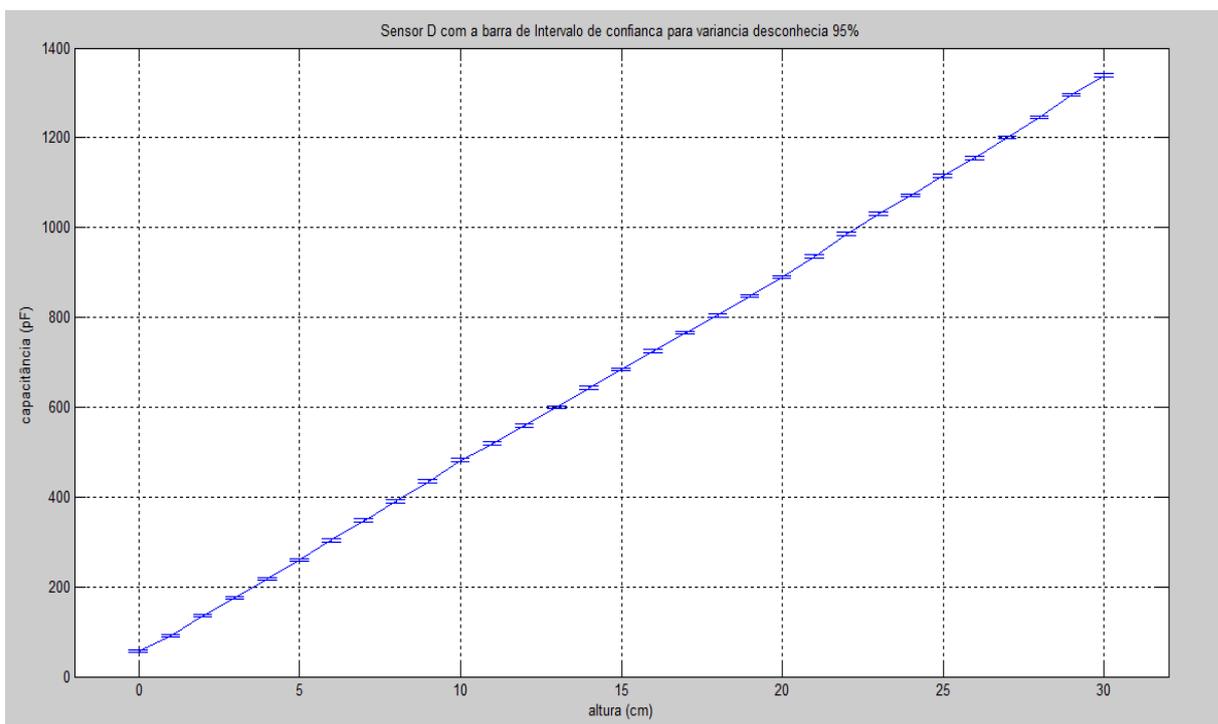


Figura 7 – Curva das médias do sensor D e seus intervalos de confiança.

## 4 CONCLUSÕES

As curvas dos sensores se mostraram bem lineares concordando com “Equação (1)”. A não linearidade completa se deve a vários fatores, dentre eles estão: a camada isolante não ter

a mesma espessura ao longo da haste devido ao método de pintura artesanal com o esmalte, a haste e o tubo não são perfeitos ocorrendo pequenas variações nos seus diâmetros ao longo dos respectivos comprimentos, a não centralização correta da haste em relação ao tubo, a alocação das bases de plástico, a solda nos fios conectores, e como a capacitância é muito pequena, outros fatores externos podem causar variações na mesma.

A variação da capacitância média, máxima e mínima, nos sensores também se deve aos mesmos fatores com uma maior relevância da espessura da camada de esmalte, onde se tem uma maior interferência na construção, pois é feita artesanalmente. Para uma melhoria da medição e obtenção de um resultado com intervalo de confiança mais elevado, um maior número de medidas para cada sensor e uma diversificação maior no instrumento de aferição, proporcionaria uma melhor precisão no resultado final.

Com a proposta inicial de uso didático dos sensores, os resultados se mostraram satisfatórios, o método utilizado para a validação das medidas foi confiável e o erro encontrado ficou dentro das expectativas. A adequada linearidade das curvas é outro fator que confirma uma apropriada medição. O custo benefício dos sensores também se mostrou atrativo, pois os materiais para sua confecção são de fácil acesso e baixo custo.

A próxima etapa do projeto será o desenvolvimento de uma placa transdutora de capacitância em tensão para o envio de informações obtidas na medição dos sensores para um sistema microcontrolado baseado em microcontrolador PIC da Microchip®, este realizará o envio das informações para o computador onde serão desenvolvidas técnicas de controle para o protótipo.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao apoio logístico e suporte financeiro do CNPq, CEFET-MG, Fundação CEFETMINAS e FAPEMIG à realização deste projeto.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ARAÚJO, A. L. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, **Desenvolvimento de um sensor de nível capacitivo para controle de processos através do CLP Micrologix 1500**, 1997. 50p, il .Trabalho de conclusão de curso.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. In: *Medição de Nível*. v. 2. Rio de Janeiro : LTC, 2007. p. 362-394.

BARQUERO, R. **Vygotsky e a Aprendizagem Escolar**. 1. ed. Porto Alegre : Artmed, 1998. p. 168.

COSTA NETO, P.L.O. **Estatística**. 7. ed. São Paulo: Blucher Ltda, 1987. p. 264.

JOHANSSON, K. H. **The Quadruple-Tank Process: A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero**. IEEE Transactions on Control Sytems Technology, v.8, n.3, pp.456-465, 2000.

MENDES SOBRINHO, J. A. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, **Desenvolvimento de um sistema automático para medida de evaporação em tanques de classe A**, 1987. Tese (Mestrado).

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C., HUBELE, Norma F. **Estatística Aplicada à Engenharia**. Tradução Profa. Verônica Calado, D. Sc. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. p. 352.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W.O. **Métodos Quantitativos**. 4. ed. São Paulo: Atual Editora Ltda, 1991. p. 321.

## CONSTRUCTION, CALIBRATION AND VALIDATION OF A CAPACITIVE LEVEL SENSOR IMMERSION

**Abstract:** *This article aims to present the development of four capacitive level sensors that work with immersion in liquids, as well as the lifting of curves of capacitance versus level. We used the Kolmogorov-Smirnov test to ensure normality of the data and the construction of confidence interval for the average, thus obtained the calibration of the sensors through the characteristic response of each sensor, beyond validation of measurements developed. Also, we performed analysis of the results achieved in order to future application of these sensors on a prototype to perform teaching techniques of control in coupled systems like MIMO – Multiple Input Multiple Output.*

**Key-words:** *Capacitive level sensor, Kolmogorov-Smirnov test, Confidence interval.*