

## SENSOR CAPACITIVO PARA DETECÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO EM ESCOAMENTO BIFÁSICO ÁGUA -AR

Anderson Giacomeli Fortes<sup>1</sup>, anderson.fortes@hotmail.com  
Jeferson Diehl de Oliveira<sup>1</sup>, jeferson.oliveira@fsg.edu.com

<sup>1</sup>Centro Universitario da Serra Gaúcha, Campus Sede, Av. Rua os Dezoito do Fortes, 2366, 95020-472, Caxias do Sul, RS, Brasil

**Resumo.** *Escoamentos bifásicos possuem ampla aplicação na indústria, estando presente em processos como transformação de energia, condensação, evaporação, extração e produção de petróleo, entre outros. Eles têm como característica o escoamento, dentro de um tubo, de duas substâncias imiscíveis e de diferentes fases. Um parâmetro importante utilizado para a compreensão dos padrões de escoamentos é a fração de vazio, que consiste em determinar a proporção de gás da mistura gás-líquido. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sensor capacitivo capaz de detectar a proporção de fração de vazio presente em escoamentos bifásicos água/ar no interior de um tubo com diâmetro interno de 3,0mm. Foi desenvolvido a estrutura mecânica de suporte aos eletrodos de cobre assim como o hardware do circuito eletrônico, que comporta os circuitos de amplificação, filtro e tratamento do sinal obtido pelo sensor. Os resultados mostram que o sensor capacitivo desenvolvido se mostra eficiente para a detecção e medida da fração de vazio em escoamento bifásico água-ar.*

**Palavras chave:** *Fração de vazio, Sensor capacitivo, Escoamento bifásico*

**Abstract.** *Two-phase flows have wide application on industry, present in processes such as power transformation, condensation, evaporation, extraction and oil production, among others. They are characterized by the flow, inside a tube, with two immiscible substances and different phases. An important parameter used to understand flow patterns is the void fraction, which consists of determining the proportion of the gas-liquid mixture. This work aims to develop a capacitive sensor capable of detecting a proportion of void fraction presented in water/air two-phase flows inside a tube with an internal diameter of 3.0 mm. A mechanical support structure for the copper electrodes was developed, as well as the electronic circuit hardware, which includes the amplification, filter and sensor information signal processing circuits. The results show that the capacitive sensor is efficient for the detection and measurement of the void fraction in two-phase water-air flow.*

**Keywords:** *Void fraction, Capacitive sensor, Two-phase flow*

### 1. INTRODUÇÃO

Na indústria, o escoamento bifásico, que consiste em um escoamento com duas fases imiscíveis dentro de um tubo, está presente em diversos processos como geração de energia, condensação, evaporação, extração e produção de petróleo.

Fração de vazio consiste em determinar a proporção de gás da mistura gás-líquido (Crowe; Michaelides, 2006), sendo ela uma medida crucial para compreensão do efeito dos padrões de escoamento sobre a queda de pressão e transferência de calor (Ishii; Hibiki, 2011).

A literatura vem apresentando diversos estudos propondo novas tecnologias para o desenvolvimento de sensores capazes de detectar fração de vazio e outros parâmetros, como flutuações de temperatura, pressão e velocidade do fluxo em escoamentos bifásicos. Dentre tais tecnologias, destacam-se os sensores ópticos, sensor wire-mesh, sensores ultrassônicos e sensores capacitivos (Wang 2020).

Sensores óticos englobam uma ampla gama de sensores, os mais comuns utilizam fontes luminosas, como LEDs ou laser, posicionados de um lado do tubo que terá o escoamento, sendo essas as fontes emissoras. Do lado oposto do duto temos as fontes receptoras, que podem ser feitos com fotodiodos ou sensores de foto resistência LDR (Vendrusculo, 2016). Já o sensor *wire-mesh* é um tipo de tomógrafo invasivo que utiliza a diferença de impedância elétrica das fases para medir a fração de vazio. O sensor é formado por duas malhas de condutores paralelos inseridas na seção transversal do tubo, possibilita a medição com resolução na ordem de 2mm (Da Silva, 2008). Outro método de medição que vem sendo bastante explorado recentemente são os sensores baseados em ultrassom, sendo que o mesmo é formado por um

sistema que emite ondas de ultrassom da ordem de 1MHz e outro que coleta as ondas refletidas pelo escoamento (Dong, 2015).

Estudos para desenvolvimento de sensores de fração de vazio, utilizando o método capacitivo, vêm sendo apresentados há alguns anos, devido à sua natureza não intrusiva de medição. Os sensores capacitivos são formados, em sua maioria, por duas placas paralelas de cobre colocadas ao redor do duto por onde passa o escoamento, sendo que essas placas são chamadas de eletrodos, conforme mostrado na Fig. 1. Quando se tem variação de fração de vazio no escoamento presente no duto a capacitância do sensor se altera e, fazendo uso de circuitos eletrônicos, é possível medir esta variação de capacitância e conseqüentemente estimar a fração de vazio. Como o valor de capacitância varia de 0.1 a 10 pF, é necessário a detecção de variação na ordem de 1fF para determinar a fração de vazio. Nota-se que pôr o sensor apresentar uma variação de capacitância extremamente baixa é necessário utilizar técnicas de amplificação e tratamento do sinal para uma possível leitura (Libert, 2013).

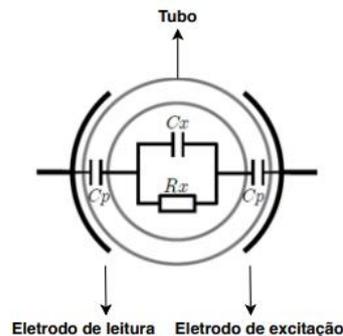


Figura 1. Modelo de um sensor capacitivo (Libert, 2013)

Analisando a Fig. 1, nota-se que a impedância entre os dois eletrodos é dada pelo circuito equivalente composto por  $C_p$ ,  $C_x$  e  $R_x$ . Caso o fluido seja não condutivo de eletricidade ou quando é aplicado um sinal de alta frequência nos eletrodos, a resistência  $R_x$  terá valor próximo a infinito, sendo assim ignorada. Neste caso, a capacitância entre os dois eletrodos é a capacitância do fluido em série com as capacitâncias das paredes do tubo (Libert, 2013).

Neste estudo será desenvolvido um sensor capacitivo para medir a fração de vazio em um escoamento bifásico água-ar em tubo vertical com diâmetro de 3mm, com a possibilidade de leitura em diversos tipos de escoamentos.

## 2. METODOLOGIA

Nesta secção é apresentado o desenvolvimento do sensor assim como os aparatos experimentais utilizados nos testes e validação. Primeiramente foi desenvolvido a estrutura mecânica para encapsular os eletrodos de excitação e de medição e após foi desenvolvido o hardware da placa eletrônica, composta pelo esquema eletrônico e pela PCI (placa de circuito impresso).

### 2.1. Desenvolvimento da estrutura mecânica

Foi desenvolvido uma estrutura mecânica para envolver o tubo onde está presente o escoamento. A função dessa peça é receber os eletrodos de cobre e, conforme já dito, ser posicionada ao redor do tubo para que seja possível, de forma fácil, ajustar a posição do sensor. Esta peça foi projetada utilizando o software Solidworks® e é formada por duas partes que quando posicionadas formam a estrutura de suporte aos eletrodos do sensor, conforme mostrado na Fig. 2. Esta estrutura foi fabricada utilizando uma impressora 3D e tem comprimento de 50mm e diâmetro interno de 6mm.

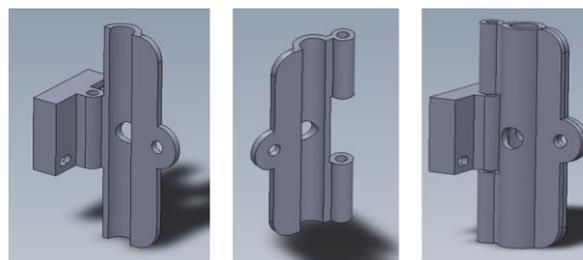


Figura 2. Estrutura mecânica de suporte aos eletrodos, do autor

Após a fabricação da estrutura mecânica, foram colados os eletrodos de excitação e medição na parte interna da peça, para os mesmos estarem o mais próximo possível do tudo. Posteriormente, foi soldado os fios pelo furo central da peça. Também foram colados eletrodos aterrados na parte externa da estrutura para minimizar os efeitos de ruídos no sinal medido, conforme mostra a Fig. 3.

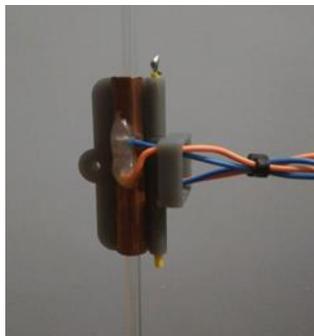


Figura 3. Sensor com os eletrodos, do autor

## 2.2. Desenvolvimento do Hardware

O circuito desenvolvido pode ser dividido em quatro etapas principais, sendo que essas etapas estão exemplificadas no diagrama de blocos da Fig. 4 e serão abordadas individualmente a seguir.

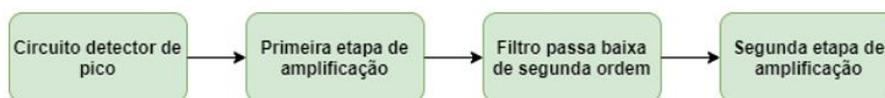


Figura 4. Diagrama de blocos dos circuitos desenvolvidos, do autor

### 2.2.1. Circuito detector de pico

O sinal retornado do sensor é senoidal de alta frequência e, conforme a proporção de fração de vazio varia dentro do tubo, conseqüentemente a capacitância do sensor se altera e o pico de tensão da onda deste sinal varia. Essa variação é obtida com o circuito apresentado na Fig. 5. Neste circuito, temos um diodo para ceifar a parte negativa da onda e, após esta etapa, um capacitor é carregado e mantém o nível de pico de tensão da onda. Nesta etapa, foi utilizado um diodo BAS140W ultra fast, um capacitor de 10nF e um resistor de 1k ohm.

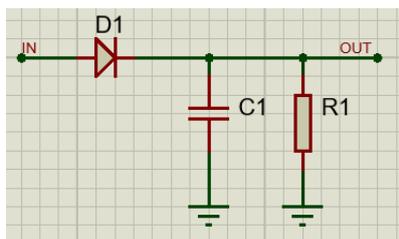


Figura 5. Circuito detector de pico, do autor

### 2.2.2. Primeira etapa de amplificação

Na primeira etapa de amplificação foi utilizado um amplificador não inversor com o circuito integrado OPA2350, sendo que o sinal de saída tem um ganho de 38 vezes em relação ao sinal de entrada. A escolha por esse componente se deu pela sua elevada largura de banda (*Bandwidth*) e pela sua baixa tensão de deslocamento de entrada (*voltage input offset*). O circuito do amplificador inversor é mostrado na Fig. 6.

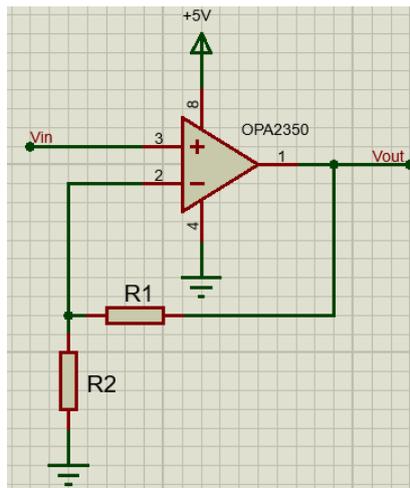


Figura 6. Amplificador não inversor, do autor

### 2.2.3. Filtro passa baixa

Após as etapas de amplificação, foi desenvolvido um filtro passa baixa ativo de segunda ordem, conforme mostrado na Fig. 7, para atenuar os sinais providos de interferências (ruídos) no sinal retornado do sensor. Neste caso, as fontes de interferência mais comuns são as capacitâncias parasitas e da fonte de alimentação. Foi utilizado o amplificador operacional OPA2350 e a frequência de corte do filtro foi ajustada para 20 Hz.

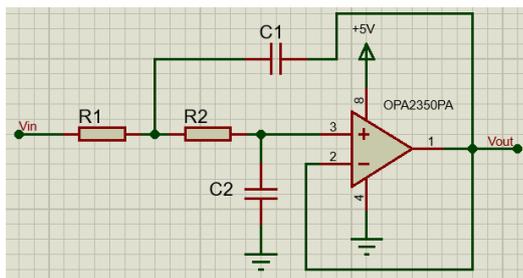


Figura 7. Filtro passa baixa ativo de segunda ordem, do autor

### 2.2.4. Segunda etapa de amplificação

Na segunda etapa de amplificação foi utilizado um amplificador de instrumentação. O amplificador de instrumentação é um amplificador diferencial que utiliza dois buffers na entrada para evitar interferência no sinal lido, deixando a impedância de entrada extremamente alta. O sinal retornado do sensor foi amplificado diferencialmente com relação a um valor de tensão selecionado em um potenciômetro. O amplificador utilizado foi o circuito integrado INA826.

## 2.3. Desenvolvimento do esquema eletrônico e da PCI (placa de circuito impresso)

Utilizando o software *Altium Designer 2019*® foram desenvolvidos o esquema eletrônico e a PCI (placa de circuito impresso). Todos os circuitos eletrônicos exemplificados anteriormente estão contemplados nessa PCI, conforme mostrado na Fig. 8. Como é possível notar na PCI, todos os circuitos explanados anteriormente são duplicados, podendo assim ser lido até dois sensores simultaneamente. Foram deixados também na PCI circuito com microcontrolador ARM-Cortex M3, comunicação USB e circuito para geração do sinal senoidal de excitação do sensor, sendo que estes circuitos não foram utilizados inicialmente e podem ser usados em trabalhos futuros.

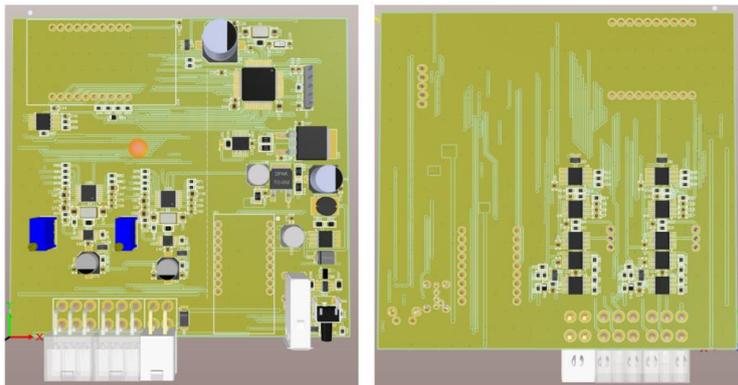


Figura 8. Vista 3D da PCI, do autor

## 2.4. Bancada experimental

A bancada experimental é constituída por cinco componentes, sendo eles a fonte DC, gerador de funções, osciloscópio, sensor e a placa eletrônica. Estes componentes serão abordados individualmente e exemplificados a seguir.

### 2.4.1. Osciloscópio

Para visualizar e amostrar as formas das ondas disponibilizadas pelo sensor desenvolvido, em forma de tensão, após o tratamento da placa eletrônica, foi utilizado o osciloscópio DSOX2024A®, da fabricante KEYSIGHT TECHNOLOGIES. Este equipamento é composto por 4 canais analógicos, largura de banda de 200 MHz e taxa de amostragem máxima de 2 GSA/s.

### 2.4.2. Fonte de alimentação

Para disponibilizar alimentação de 12 V DC para a placa eletrônica foi utilizado a fonte PS 5000, da fabricante ICEL. Este equipamento disponibiliza duas saídas variáveis de 0 - 30 V de até 3 A cada, apresentando um *Ripple* de saída no sinal menor que 1 mV.

### 2.4.3. Gerador de funções

Como o sensor capacitivo precisa de um sinal de excitação senoidal de alta frequência nos seus eletrodos para funcionar, foi utilizado o gerador de funções GV2002, da fabricante ICEL, para fornecer este sinal. Este equipamento pode ser alimentado em 127/220 V – 50/60 Hz, podendo fornecer uma saída senoidal de 0,2 Hz até 2 MHz, com amplitude de pico configurável de no máximo 10 V.

## 3. RESULTADOS

Será avaliado nesta seção o funcionamento do sensor desenvolvido, sendo que, em um primeiro momento, será apresentado os resultados experimentais obtidos em cada etapa de amplificação e filtro e, em um segundo momento, será discutido os resultados do equipamento submetidos a variação de fração de vazio de forma estática e em escoamento. Todos os testes foram realizados utilizando um sinal de tensão senoidal com amplitude de 2 V de pico e frequência de 1,5 MHz para excitar os eletrodos do sensor.

### 3.1. Circuito detector de pico

Como vimos anteriormente, o sensor capacitivo atenua o pico de um sinal senoidal de excitação e esse valor deve ser filtrado e amplificado. O primeiro passo é detectar a amplitude desse pico de tensão e transformá-lo em sinal contínuo, isso é feito utilizando o circuito detector de pico. Obteve-se uma tensão elétrica de 58 mV para o sensor preenchido somente com água (sensor com 0 % de fração de vazio) e uma tensão elétrica de 70 mV para o sensor preenchido somente com ar (sensor com 100 % de fração de vazio), obtendo-se uma variação de 12 mV.

### 3.2. Primeira etapa de amplificação

O sinal de tensão elétrica provindo do circuito detector de pico apresentado anteriormente foi amplificado em 38 vezes. Considerando que na etapa anterior tínhamos um sinal de tensão elétrica que variava entre 58 mV (0 % de fração de vazio) e 70 mV (100 % de fração de vazio), amplificando-o obtemos aqui uma variação de sinal de 2,2 V e 2,66 V.

### 3.3. Filtro passa baixa de segunda ordem

Esse filtro foi projetado com sua frequência de corte em 20 Hz e com objetivo de filtrar o ruído de 60 Hz. Como é um filtro de segunda ordem, ele atenua 40 dB de amplitude do sinal a cada década, sendo que foi selecionado a sua frequência de corte em 20 Hz para não comprometer os escoamentos com velocidades de até 1 m/s, considerando o comprimento do sensor de 5 cm. Durante os testes, observou-se o sinal antes e depois do filtro, sendo nítido a atenuação adequada do ruído.

### 3.4. Segunda etapa de amplificação

Na entrada deste amplificador temos uma tensão elétrica que varia entre 2,2 V (0 % de fração de vazio) e 2,66 V (100 % de fração de vazio), considerando as etapas de amplificação e filtros anteriormente apresentadas, tendo assim uma diferença de 0,46 V. Essa diferença é amplificada para obtermos uma variação de 3,3 V, assim, é aplicado um amplificador de 7 vezes. Esse amplificador precisa ser diferencial, ou seja, será amplificado apenas a diferença entre o valor medido (valor que varia de 2,2 V até 2,66 V) e 2,2 V, considerando 2,2 V a referência. Como resultado, quando tivermos 2,2 V na entrada desse amplificador teremos 0 V na saída e quando tivermos 2,66 V na entrada teremos 3,3 V na saída.

### 3.5. Análise da fração de vazio estática

Para analisar de forma estática o comportamento do sensor foram realizadas 6 medidas de tensão do mesmo, sendo que a Fig. 9 apresenta o comportamento do sensor conforme a fração de vazio. Para obter essa resposta, foi dividido o sensor em 5 partes iguais utilizando uma régua e elevado a coluna de água até todo o sensor estar preenchido, realizando uma medida a cada 20% do comprimento do mesmo.

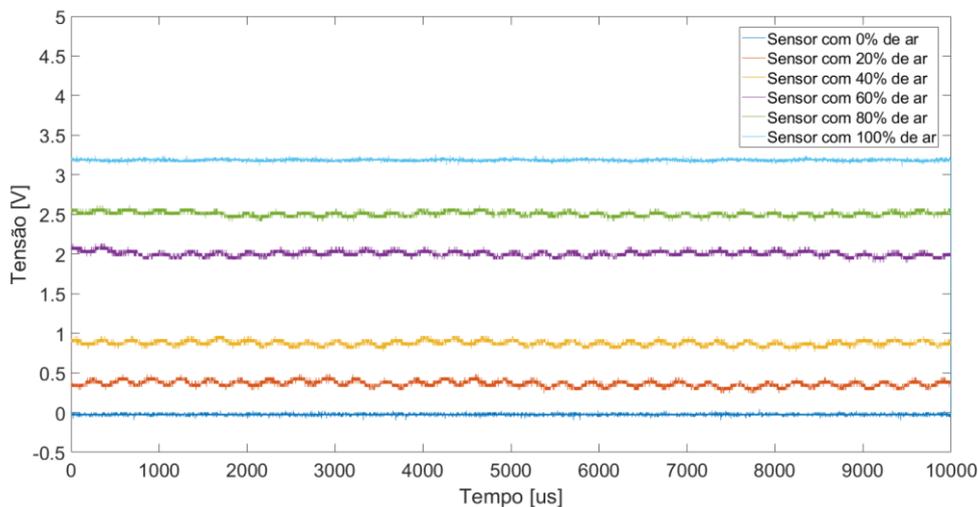


Figura 9. Tensão elétrica para fração de vazio em função do tempo, do autor

Outra forma de se analisar esses dados é comparando a tensão elétrica medida no sensor pela fração de vazio. Na Fig. 10 podemos verificar essa comparação. Nota-se que a medida com 60 % de fração de vazio destoa do restante dos valores, sendo uma possível explicação para isso é o fato do sinal de excitação estar conectado exatamente no meio do sensor e o campo elétrico gerado pelo mesmo ser mais intenso nesta posição.

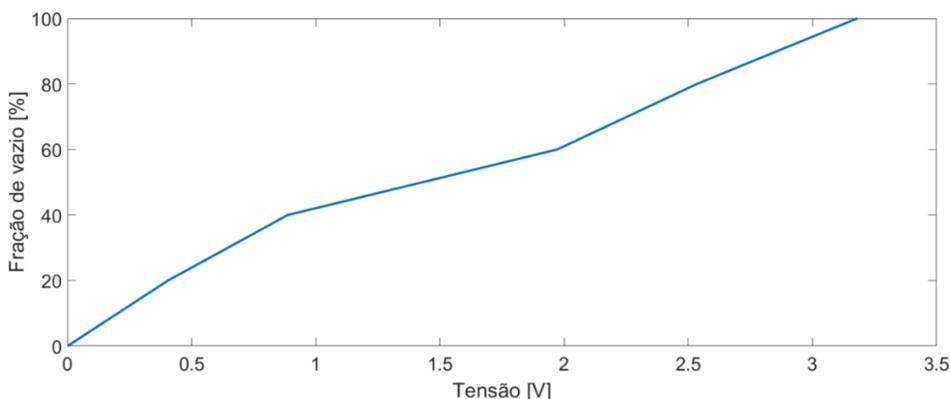


Figura 10. Tensão elétrica x fração de vazio, do autor

### 3.6. Análise da fração de vazio em escoamento

Para analisar o comportamento do sensor de forma dinâmica, isto é, em um escoamento, foi preenchido o sensor com 100 % de água e injetado uma bolha no mesmo. Na Fig. 11 observa-se o resultado obtido com a passagem da bolha, sendo que o valor de tensão medido como resposta do sensor foi satisfatório. Obteve-se uma tensão de 250 mV, considerando 3,3 V como 100 % de fração de vazio, essa bolha tem aproximadamente 7,5 % de fração de vazio. Para validar o sensor neste tipo de escoamento, isto é, verificar se a fração de vazio medida por ele é realmente a fração de vazio do escoamento, seria necessário utilizar algum equipamento já validado para medir o mesmo escoamento e comparar os resultados. Isto não foi possível pois, devido ao fato deste ano ser atípico, não tivemos acesso aos equipamentos da universidade no período da realização deste estudo, sendo que para um trabalho futuro este comparativo será realizado.

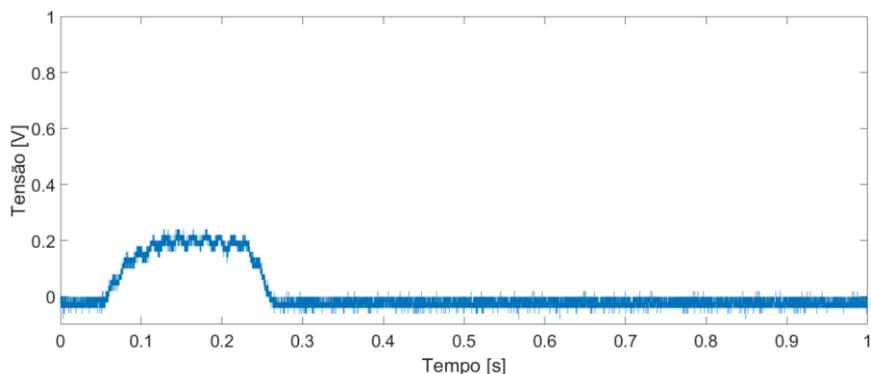


Figura 11. Tensão elétrica x fração de vazio, do autor

## 4. CONCLUSÃO

Com o sensor desenvolvido e excitado com uma onda senoidal de 1,5 MHz e 2 V de pico de amplitude, obteve-se uma variação de tensão na ordem de 12 mV para todo o sensor. Após as etapas de amplificação e filtro, essa tensão elétrica de 12 mV foi convertida em 3,3V. Considerando que a resolução da entrada analógica do microcontrolador é 806  $\mu$ V aproximadamente, desconsiderando o ruído que permaneceu no sinal lido, obteve-se como resultado a possibilidade de leitura de fração de vazio da ordem de 1 % do volume do sensor. Assim, o objetivo inicial de desenvolver um sensor capaz de ler fração de vazio em escoamento bifásico foi atendido.

Nos testes experimentais em escoamentos, como resultado obteve-se uma variação de tensão na ordem de 250 mV para uma bolha escoada. Considerando 3,3 V como 100 % de fração de vazio, temos algo em torno de 7,5 % de fração de vazio neste escoamento, validando assim o funcionamento do sensor de forma dinâmica.

#### **4. REFERÊNCIAS**

- CROWE, Clayton T.; MICHAELIDES, Efstathios E. Basic Concepts and Definitions. In: C. T. Crowe (Ed). Multiphase Flow Handbook. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- DA SILVA, Marco J. Impedance Sensors for Fast Multiphases Flow Measurement and Imaging. 2008. 154 f. Tese – Technische Universitat Dresden, 2008.
- DONG, Xiaoxiao; TAN, Chao, YUAN Ye; DONG Feng. Oil-water two-phase flow velocity measurement with continuous wave ultrasound Doppler. Chemical Engineering Science, 2015.
- ISHII, M, HIBIKI, T., 2011. Thermo-fluid dynamics of two-phase flow, Springer.
- LIBERT, N. Sistema de Medição Capacitivo para determinação de fração de vazio em escoamentos bifásicos. Curitiba: Biblioteca Central da UTFPR, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.
- VENDRUSCULO, P. Tiago. Técnicas Ópticas para Investigação de Escoamento Multifásicos. Universidade Tecnológica Federal do Parana, 2016.
- WANG, Xiaoxin; CHEN, Yangzheng; WANG Bo; TANG Kaihao; HU, Hongli. Sectional void fraction measurement of gas-water two-phase flow by using a capacitive array sensor. Flow Measurement and Instrumentation, 2020.

#### **5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES**

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.