



## Um sistema para correção de ressonância em transdutores piezelétricos

Jaqueline Rohvedder de Oliveira  
Francisco José Arnold

UNICAMP – Faculdade de Tecnologia – Laboratório de Instrumentação Eletrônica

Contato: Jaqueline Rohvedder de Oliveira (RA 175664)  
Email: j175664@dac.unicamp.br

Bolsa de Iniciação Científica: CNPq – Vigência: 01/08/2019 - 31/07/2020

### **RESUMO**

Transdutores piezelétricos de fator Q elevado podem ter sua curva de impedância modificada por efeitos externos, que levam a diminuição do desempenho. Sistemas eletrônicos são utilizados para corrigir desvios da frequência de ressonância e manter o transdutor operando sob máxima performance. Neste trabalho foi desenvolvido um sistema microcontrolado baseado num PLL que corrige a frequência de ressonância a partir da identificação de uma diferença de fase entre tensão e corrente no transdutor. O sistema desenvolvido forneceu uma tensão DC que pode ser usada para controlar um oscilador que aciona o transdutor. O nível dessa tensão é linearmente proporcional ao desvio de fase.

Palavras-chave: Ultrassom, PLL, microcontrolador.

### **1 – Introdução**

Transdutores piezoelétricos são dispositivos que atuam na conversão de energia elétrica em deformações mecânicas, ou vice-versa [1], sendo assim, representam um importante recurso na medicina e setores militar e industrial [2]. Transdutores ultrassônicos de altas potências possuem elevado fator de qualidade Q, ou seja, as perdas mecânicas por amortecimento no material são mínimas, isso resulta em alto rendimento quando o sinal senoidal de excitação atua em sua frequência de ressonância [3,4]. No entanto, a frequência de ressonância tende a variar devido influências externas, como aquecimento ou alteração dos meios de atuação.

Sendo assim, a busca por sistemas que sejam capazes de manter o transdutor operando em ressonância é importante nos sistemas de ultrassom. O objetivo do projeto é desenvolver um sistema microcontrolado que permita corrigir dinamicamente a



frequência de ressonância de um transdutor piezelétrico. A detecção desvio da frequência de ressonância é realizada através do monitoramento da diferença de fase entre tensão e corrente no transdutor por um de um circuito PLL (*phase-locked loop*) [5].

## 2 – Metodologia

O desenvolvimento do trabalho consiste em, inicialmente, emular um dispositivo piezoelétrico (um transdutor de ultrassom comercial de 25 kHz). A partir da ressonância e da anti-ressonância e suas respectivas impedâncias, medidas em um analisador de impedância (HP4194A), foi determinado o circuito equivalente Butterworth-Van Dyke (BVD) [6]. Na Figura 1 é apresentado o circuito BVD em paralelo com um indutor L0, que normalmente é inserido para ressoar com C0 [10],

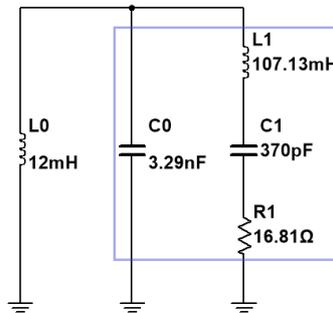


Figura 1. Circuito equivalente do transdutor (BVD). Fonte: Multisim 14.

O circuito da Figura 1 foi acionado nas proximidades de sua ressonância por uma fonte de tensão alternada. Foram medidas a tensão e a corrente no transdutor. A corrente foi obtida por meio de um transformador T1. Alterações nos valores dos componentes do BVD promoverão variações da fase entre os sinais de tensão e corrente (Figura 2).

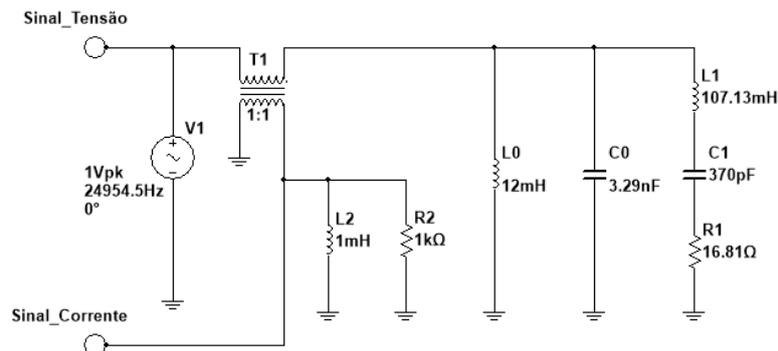


Figura 2 - Simulação circuito BVD, sinais de tensão e corrente. Fonte: Multisim 14.

Desenvolveu-se um circuito PLL de modo a obter um sinal quadrado com *duty cycle* proporcional a diferença de fase entre tensão e corrente no transdutor (Figura 3).

Um microcontrolador irá associar o *duty cycle* a uma tensão contínua (nível DC), que poderá ser a referência para que se tenha controle a frequência do sinal de alimentação



atuando-se em um oscilador controlado por tensão (VCO). O microcontrolador escolhido para o desenvolvimento da parte VCO do sistema foi o FRDM - KL25Z da Freescale. Este microcontrolador pode ser programado em um ambiente online através da plataforma *compiler* do Mbed.

### 3 – Resultados e Discussão

O gráfico da Figura 4 mostra os resultados obtidos com o analisador de impedâncias (linha azul) e com o do circuito BVD (linha vermelha). A frequência de ressonância encontrada foi de 25,28 kHz. Mesmo com valores diferentes na prática, o teste variando a frequência em torno da ressonância mostrou um comportamento condizente com um transdutor.

Os resultados referentes ao circuito PLL são apresentados na Figura 5, neles temos a variação do *duty cycle* do sinal de saída (linha verde), uma resposta proveniente do afastamento da frequência do sinal de alimentação com relação a ressonância, adquirida através da diferença de fase entre tensão (linha amarela) e corrente (linha azul).

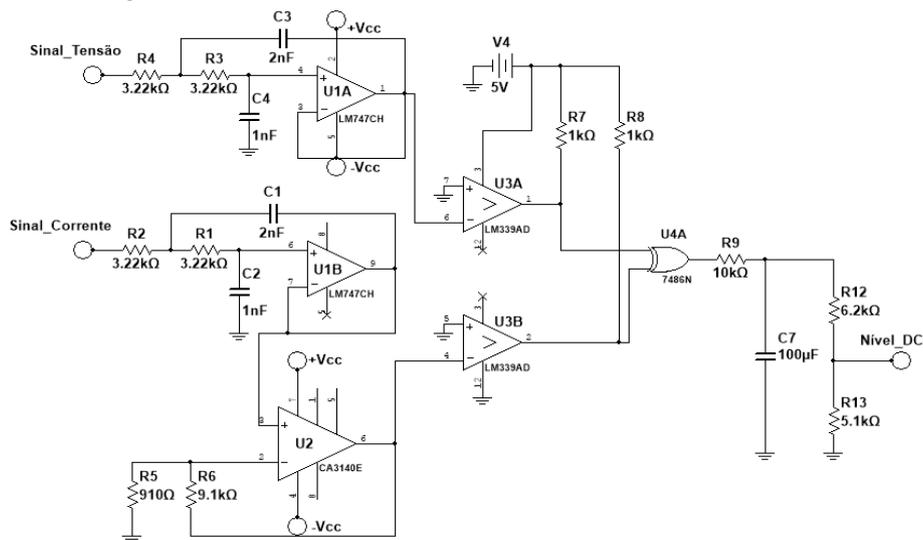


Figura 3. Diagrama esquemático do PLL do sistema desenvolvido.

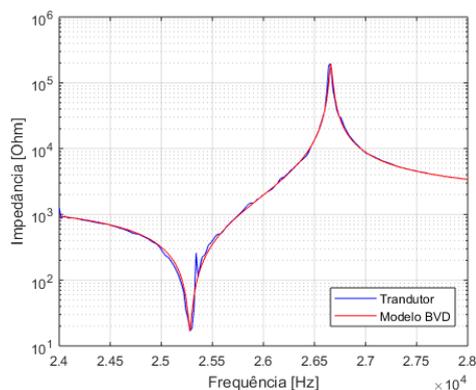


Figura 4. Caracterização do transdutor. Fonte: MATLAB 2017.

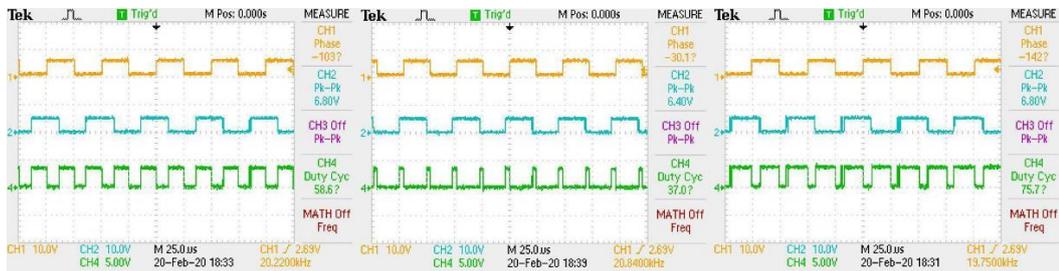


Figura 5. Resultados circuito PLL. Fonte: Osciloscópio Tectronix.

Os gráficos da Figura 6 mostram resultados de um experimento em que a frequência varia a cada 100 Hz, com objetivo de acompanhar a variação nos valores do nível DC e do *duty cycle*. Sendo assim, nota-se que o comportamento das amostras que se assemelham ao comportamento linear, de modo que a cada 100 Hz o nível DC varia aproximadamente 10 mV, para o microcontrolador isso significa que 10 mV distante da tensão que DC que representa 100 Hz mais distante da frequência de ressonância.

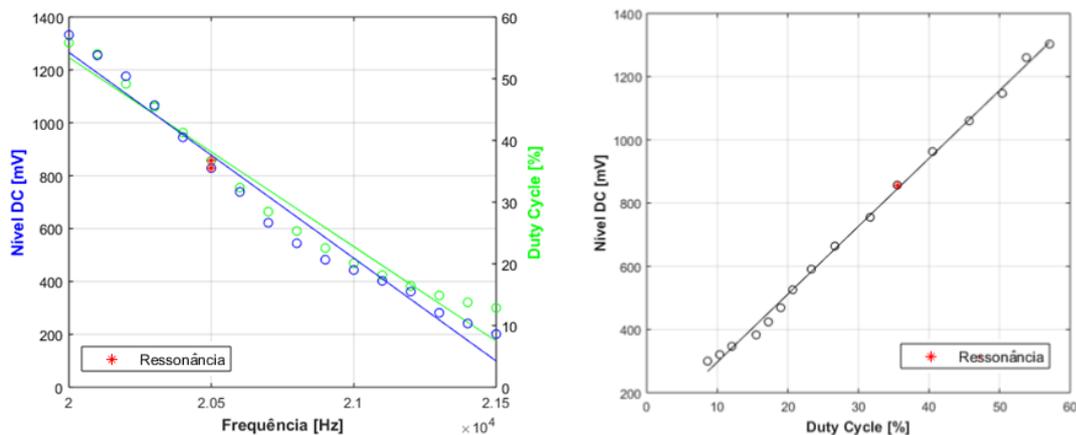


Figura 6. À esquerda: Variação do ciclo de trabalho e nível DC em função da frequência. À direita: Variação do nível DC em função do duty cycle. Fonte Matlab 2017.

As retas que representam as variações do nível DC em mV ( $VDC$ ) e do *duty cycle* ( $D$ ) em função da frequência ( $f$ ) e a variação de  $VDC$  em função do  $D$  são respectivamente representadas pelas Equações 1 a 3.

$$VDC = -0,715f + 15546 \quad (1)$$

$$D = -0,0333f + 721,09 \quad (2)$$

$$VDC = 21,475D + 82,356 \quad (3)$$



#### **4 – Conclusões**

A caracterização de um transdutor comercial foi base para o cálculo de um circuito ressonante equivalente BVD, os testes em laboratório mostraram que seu comportamento foi similar ao transdutor. O circuito PLL implementado também mostrou um resultado satisfatório, uma vez que foi capaz de detectar leves variações na frequência da fonte. Dessa forma, pode-se gerar uma tensão que irá controlar o oscilador que aciona o transdutor, garantindo sempre a operação otimizada do mesmo.

O código desenvolvido na plataforma Mbed para o microcontrolador funciona com a detecção da variação do nível DC de entrada, proveniente do circuito PLL, variando assim a frequência do sinal de saída proporcionalmente, a fim de encontrar a condição de ressonância no transdutor. O funcionamento em loop do código garante sempre a atualização do sinal de excitação do transdutor.

#### **5 – Referências Bibliográficas**

- [1] S. Katzir. The Discovery of the Piezoelectric Effect. *Archive for History of Exact Sciences*. v. 57, cap 2. Jan, 2003.
- [2] M. S. Vijaya, *Piezoelectric Material and Devices: Applications in Engineering and Medical Sciences*. Boca Raton, FL: CRC, 2013. 186 p.
- [3] Kuang, Y., Sadiq, M., Cochran, S., Huang, Z., High-power characterization of a microcutter actuated by PMN-PT piezoelectric crystals, *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Freq. Control*, vol. 62(11), 1957-1967 (2015).
- [4] Arnold, F.J., Ximenes, R. L., Arthur, R., Mühlen, S. S., A driver for piezoelectric transducers with control of resonance, *Physics Procedia*, 63, 115-119, (2015).
- [5] Ramos-Fernandez, A., Montoya-Vitini, F., Gallego-Juarez, J. A., “Automatic system for dynamic control of resonance in high power and high Q ultrasonic transducers”, *Ultrasonics*, vol. 23, 151-156, (1985).
- [6] R. Queiróz, P. S. Girão, A. C. Serra, Single-Mode Piezoelectric Ultrasonic Transducer Equivalent Circuit Parameter Calculations and Optimization Using Experimental Data, *IMEKO TC4 Symp.*, 468-471, (2005).