

Correção dinâmica de frequência de transdutores piezelétricos utilizando um sistema computacional inteligente

R.B.Battilana^a, R.L.Ximenes^b, M.C.Aranda^a, F.J.Arnold^b

^a Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Faculdade de Tecnologia, R. Emílio de Menezes, Vila Amorim, Americana - SP, Brasil.

^b Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, R. Paschoal Marmo, 1888, Jd. Nova Itália, Limeira - SP, Brasil

Resumo—Sistemas de correção dinâmica de frequência para transdutores piezelétricos podem ser implementados por meio de técnicas com inteligência artificial. Este artigo apresenta resultados preliminares da implementação de um sistema que ajusta a frequência de excitação de um transdutor a partir de uma busca inteligente feita em uma base de dados carregada previamente. A informação resgatada da base de dados atua sobre a malha de realimentação de um oscilador. Os resultados mostraram que o sistema é ágil, robusto, de construção simples e tem hardware de baixo custo, além do fato de que a magnitude dos erros, que estão próximas a 0,02 kHz, não deve afetar severamente o desempenho do sistema.

Palavras-Chave—correção de frequência, sistemas inteligentes, transdutores piezelétricos.

Abstract— Dynamic frequency correction systems for piezoelectric transducers can be implemented using techniques with artificial intelligence. This paper presents preliminary results of the implementation of a system that adjusts the excitation frequency of a transducer from an intelligent search done in a preloaded database. The information retrieved from the database acts on the feedback loop of an oscillator. The results showed that the system is agile, robust, simple building and the hardware is low cost, besides the fact of the magnitude of the errors, the values are around 0.02 kHz, should not severely affect the performance of the system.

Keywords—correction frequency, intelligent system, piezoelectric transducers.

I. INTRODUÇÃO

Transdutores piezelétricos são utilizados em sistemas de ultrassom de alta potência são excitados com sinais elétricos em frequências próximas a de ressonância. Geralmente utilizam-se amplificadores classe D [1], que usualmente apresentam rendimentos superiores a 90%. Além disso, é necessário utilizar sistemas de correção das frequências de operação, entre a ressonância e a antirressonância do transdutor piezelétrico.

Alguns estudos comprovam que fatores externos afetam o comportamento do transdutor provocando desvios da ressonância, como por exemplo, altos níveis de tensão [2], a temperatura [3], o pré-tensionamento mecânico [4] e variações de cargas acústicas [5]. Estes fatores externos provocam deslocamentos nas curvas de impedância elétrica em função da

frequência, sendo necessária a correção da frequência para assim garantir que o transdutor opere com máxima eficiência.

Para realizar a correção de frequência são utilizadas abordagens eletrônicas, tais como phase-locked loop (PLL) apresentado por Ishikawa em 1997 na correção de frequência utilizando um transdutor operando a 3 MHz [6]. Um método semelhante ao PLL é o apresentado por Ramos et al. [7] que utiliza circuitos analógicos a fim de controlar a ressonância de transdutores piezelétricos de alta potência. Outra técnica, baseada na identificação do máximo da admitância, utiliza um sistema de busca da máxima corrente como referência para buscar a ressonância [8].

Além dos artificios eletrônicos, a utilização do LabView para controlar a frequência em largas faixas de operação também é empregada, conforme proposto por Kuang *et al.* 2014 [9]. Em um trabalho anterior, os Arnold *et al.* 2015 [10] propuseram a correção de frequências por meio de buscas em bases de dados utilizando técnicas de inteligência artificial.

Neste trabalho é apresentada uma complementação do trabalho anterior [10]. Foi implementada uma comunicação entre a base de dados e um circuito oscilador que excita o transdutor pertencente ao sistema. As frequências corrigidas obtidas do processamento dos dados são enviadas a um potenciômetro digital que compõe a malha de realimentação do oscilador o qual, por sua vez excita o transdutor.

As faixas de frequência obtidas por meio de testes realizados foram analisadas com o auxílio de um osciloscópio digital, a fim de verificar se o valor da frequência obtido com o sistema de correção era igual ao exibido pelo osciloscópio.

II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A. Sistema geral

O sistema é composto por um oscilador XR2206 que gera sinais senoidais que, após amplificados, alimentam o transdutor piezelétrico. A partir das medições dos sinais elétricos (tensão e corrente) no transdutor, pode-se determinar a impedância elétrica do transdutor a qual, juntamente com a frequência correspondente, é inserida e processada pelo sistema computacional. O sistema completo de correção é descrito pelo diagrama de blocos representado pela Figura 1.

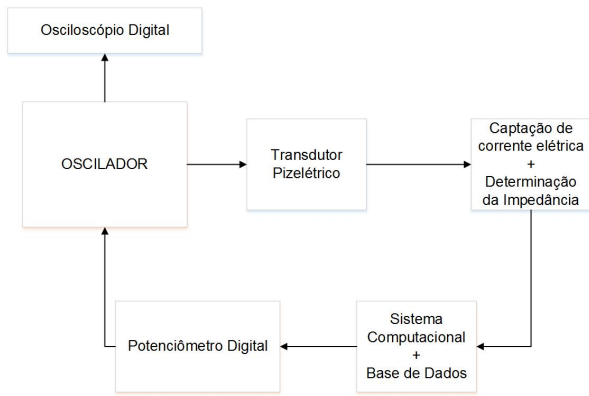


Fig. 1. Diagrama de blocos do sistema.

Todavia, esta etapa ainda não foi finalizada no projeto, então, a inserção de impedâncias e frequências no sistema computacional se faz manualmente por um usuário. Tal procedimento se resume a uma etapa de testes.

Quando é inserida uma entrada no sistema computacional, é disparado um processo de busca na base de dados em um conjunto de dados que foi previamente armazenado. A geração desse conjunto de dados é feita por simulações baseadas no comportamento do transdutor previamente conhecido.

O resultado da busca consiste numa frequência de correção com aproximadamente o mesmo valor de impedância elétrica original. A partir dessa frequência é gerado uma palavra digital de controle que atua em um potenciômetro digital (MAX-5497) pertencente a malha de realimentação do XR2206. Como consequência, este modifica sua resistência interna, alterando também a frequência de oscilação do circuito integrado XR2206. As frequências corrigidas são lidas com um osciloscópio digital ligado ao circuito oscilador.

B. Sistema Computacional

O sistema computacional é representado pelo fluxograma ilustrado na Figura 2.

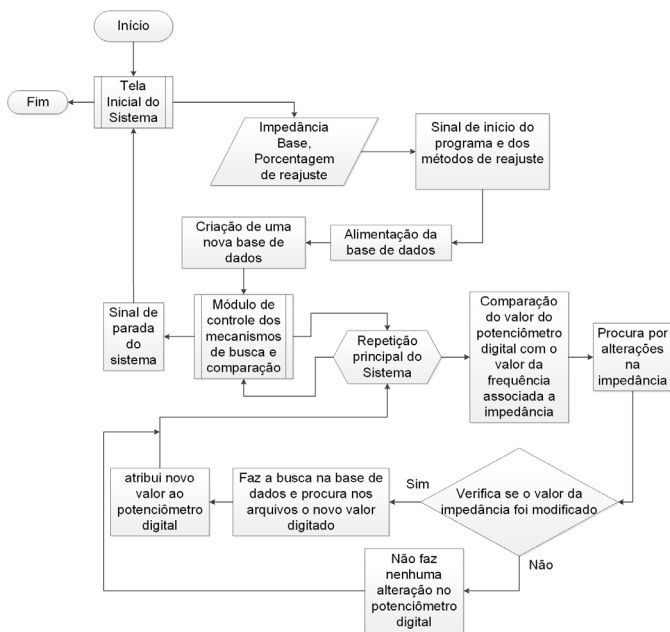


Fig. 2. Fluxograma de funcionamento do sistema.

O programa se inicia com uma interface para que o usuário insira um valor de impedância inicial, que será atribuída como

impedância base, valor este utilizado como referência para as correções posteriores. Também deverá escolher uma porcentagem de ajuste, margem de aceitação para valores próximos ao da base de dados e adicionar uma base de dados já selecionada para alimentar o sistema de correção.

Após estas etapas o mecanismo de buscas e correções deve ser iniciado pelo usuário, que irá utilizar a base de dados alimentada no sistema como referência para a criação de uma nova base de dados que será executada na memória do computador. Para a geração da nova base de dados, são utilizados mecanismos de árvores de decisão, atrelados a algoritmos de minimax e poda alfa-beta, a fim de garantir a melhor eficiência na escolha dos valores.

Na primeira execução do sistema, após o carregamento da nova base de dados na memória, o módulo de buscas e correções realiza a verificação do valor da impedância atual, fazendo a busca do valor de frequência relacionado a impedância atual.

Após realizada a primeira correção, o sistema verifica se foram realizadas alterações nos valores de impedância. Caso o valor da impedância atual tenha sido modificado, diferenciando-se da impedância base, o sistema procura novamente na base de dados, que se encontra na memória, por um novo valor de frequência.

Se existirem valores de frequência diferentes, porém com a mesma impedância, quando o arquivo de menor diferença em relação a impedância base for encontrado, o programa seleciona este arquivo para reajustar a frequência. Porém caso não tenha havido modificações do valor de impedância, o sistema não faz alteração alguma em seus valores de frequência, mantendo o mesmo estado.

O usuário pode encerrar o mecanismo de buscas e salvar relatórios das etapas de correção com os valores que foram inseridos na impedância, com o valor da frequência para cada correção e os arquivos correspondentes nos quais os valores de frequência e impedância estavam mais próximos ao da impedância base. Outros detalhes do fluxograma são encontrados em [11].

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Modelo de simulação

Em um primeiro momento foram feitas simulações para alimentar a base de dados. Foi utilizado o modelo de Butterworth-van Dyke (BVD) em paralelo com um indutor de compensação da capacitância intrínseca do transdutor (LP). O modelo BVD adaptado está representado na Figura 3.

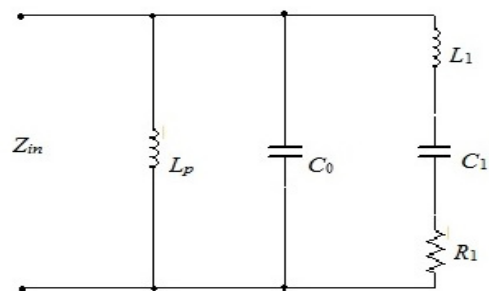


Fig. 3. Modelo BVD com indutor de compensação (adaptado de [10]).

Os valores utilizados no modelo BVD estão descritos na Tabela I.

Tabela I. Valores dos componentes do modelo BVD (extraído de [10] e adaptado pelo autor).

Símbolo	Valor	Faixa de valores
L_P	10 mH	-
C_0	3.12 nF	-
L_1	113.4 mH	-
C_1	341.25 pF	341.25 pF até 411.25 pF
R_1	39.7 Ω	39.7 Ω até 109.7 Ω

Onde L_P é um indutor inserido em paralelo com o circuito, para anular os efeitos capacitivos de C_0 . C_0 é capacitância intrínseca do transdutor (ramo elétrico), L_1 é a representação da massa do sistema (transdutor + carga aplicada), C_1 é a capacidade de indutância do transdutor (efeito elástico) e R_1 é a resistência mecânica do transdutor (efeito dissipativo).

Para gerar as curvas de impedância pela frequência foram alterados os valores de C_1 e R_1 com incrementos sucessivos de 5% [12]. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 4, onde a curva com os maiores valores de ressonância e antirressonância representam a condição inicial do transdutor (sem carga mecânica) e as demais correspondem aos acréscimos feitos em C_1 e R_1 .

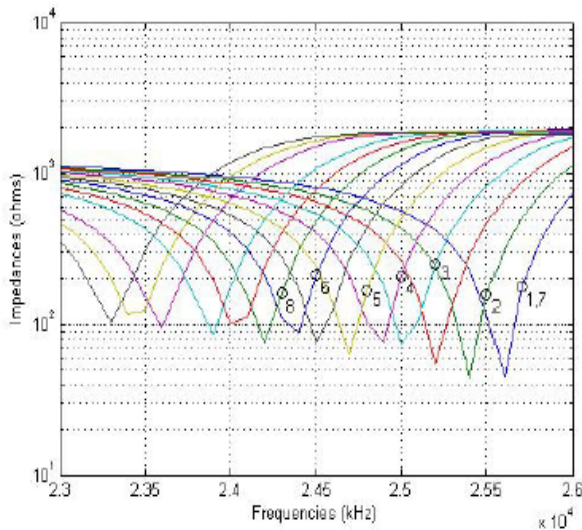


Fig. 4. Curvas obtidas por meio de simulação (extraído de [10]).

B. Descrição dos circuitos eletrônicos

O circuito integrado XR2206 foi utilizado neste projeto como um circuito oscilatório, que produz saída de sinais senoidais, que são analisados por um osciloscópio digital. O circuito oscilador completo com o XR2206 está representado pela Figura 5.

Juntamente com o XR2206 está o potenciômetro digital MAX5497 representado neste diagrama pelo R2 (resistência variável) que está em série com um resistor R3, com uma resistência fixa de 178,3k Ω . A estrutura interna do

potenciômetro digital é apresentada na Figura 6. Os potenciômetros do MAX5497 estão conectados em série correspondendo a uma variação de resistência elétrica de 0 Ω a 100k Ω . A palavra de controle possui 10 bits por potenciômetro. Logo, para cada bit modificado obtêm-se uma variação de 48,8 Ω .

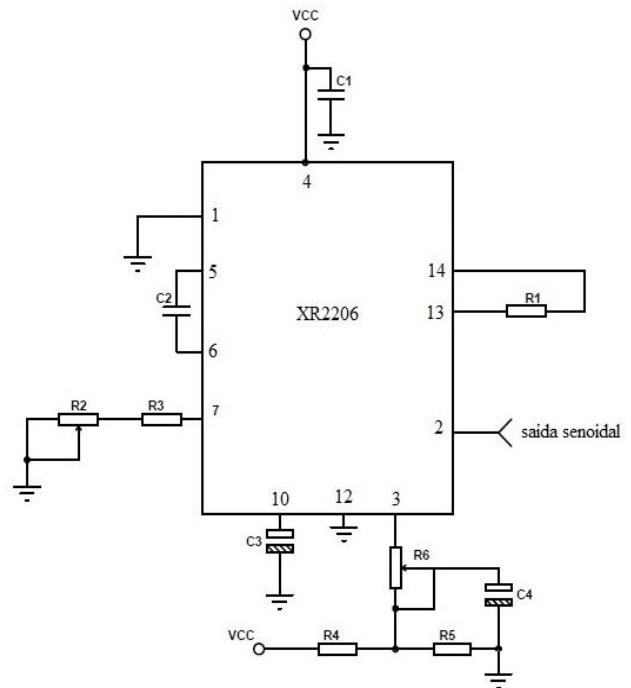


Fig. 5. Diagrama de blocos do XR2206 (extraído de [13]).

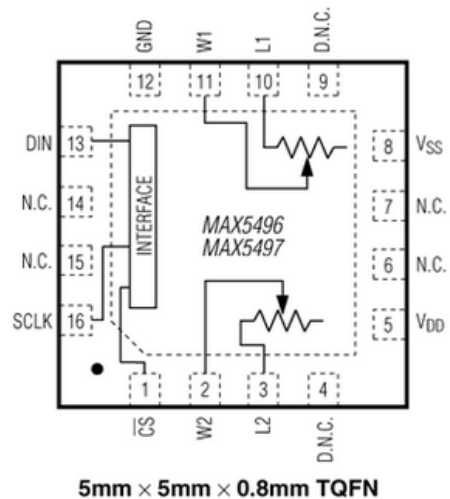


Fig. 6. Estrutura interna do potenciômetro digital (extraído [14]).

C. Comunicação SPI

Foi utilizada uma comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*) para interligar o sistema computacional à placa de circuitos, onde se encontram o XR2206 e o potenciômetro digital, por meio da utilização de um Arduino UNO.

As configurações da comunicação SPI variam de acordo com o dispositivo (velocidade do clock, transmissão de dados e seleção do dispositivo). Deste modo, foi utilizado um dispositivo mestre (Arduino) e apenas um escravo (placa de circuitos). A Figura 7 ilustra a configuração SPI para o potenciômetro digital.

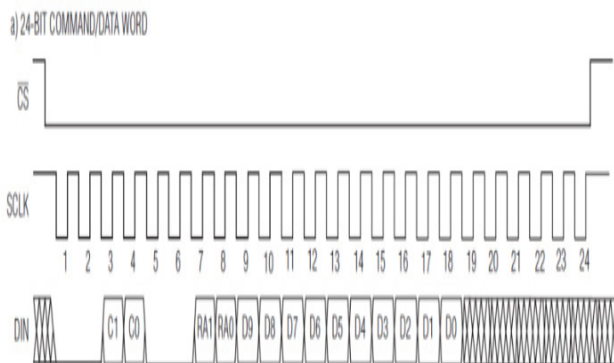


Fig. 7. Comunicação SPI (extraído de [13]).

SCLK são os pulsos de *Clock* para sincronismo. CS é o *Chip-Select* para seleção do integrado, DIN é a porta de envio do pacote, contemplando um cabeçalho de 8 bits, onde, RA0 e RA1 selecionam o potenciômetro a ser usado, para posteriormente realizar o envio de uma palavra binária de 10 bits que corresponderá aos valores ôhmicos.

D. Obtenção das frequências

Para se calcular as frequências de ressonância e antirressonância, utilizando o modelo BVD, foram utilizadas as Equações 1 e 2 respectivamente.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1)$$

$$f_A = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1 C_0}} \quad (2)$$

onde

f_0 é a frequência de ressonância;

f_A é a frequência de antirressonância.

Para calcular a frequência de saída do XR2206 (f) foi utilizada a Equação 3.

$$f = \frac{1}{(R_2 + R_3)C_2} \quad (3)$$

Para operar com o potenciômetro digital e com o circuito oscilador XR2206 foi necessário realizar calibrações. A calibração do potenciômetro foi realizada por meio da variação dos bits no potenciômetro. A escala de variação foi de 0 a 1023 em passos de 10 em 10 (DIN), variando a resistência interna do potenciômetro digital, utilizando os registradores RA0 (Registrador 1) e RA1 (Registrador 2), e consequentemente obtendo uma resposta em frequência na saída do XR2206, conforme mostrado na Tabela II.

Os valores 00000001 (Registrador 1) e 00000010 (Registrador 2) são endereços utilizados pelo circuito interno do potenciômetro para identificar qual resistor terá seu valor modificado, por isso, são valores constantes.

Tabela II. Variação dos bits x frequência de saída.

Registrador 1	Registrador 2	Palavra Binária (Base 10)	Frequência
00000001	00000010	0	29,9
		10	29,7
		20	29,5
		30	29,3
		40	29,1
	
		1020	18,99
		1023	18,99

Após ter analisado o comportamento do potenciômetro digital em relação ao XR2206, foi gerado um gráfico, utilizando o software MATLAB®, desta relação conforme ilustrado na Figura 8.

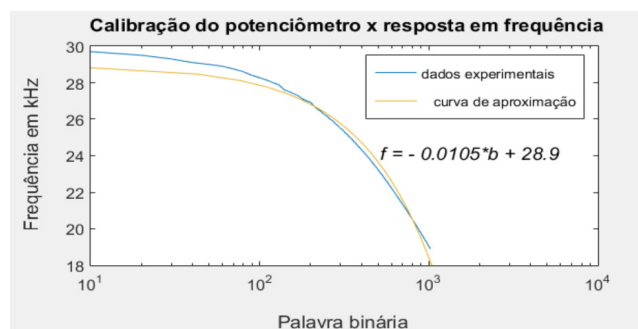


Fig. 8. Relação da variação dos bits pela frequência gerada.

Por meio de uma função de ajuste dada pela Equação 4 é calculada a palavra binária a partir da frequência gerada no sistema computacional. Essa palavra ajusta a resistência do potenciômetro digital que, por sua vez, define a frequência na saída do XR2206.

$$b = (f - 28,9) / -0,0105 \quad (4)$$

onde b representa os bits que serão enviados aos registradores do potenciômetro digital e f é o valor da resposta em frequência corrigida pelo sistema de correção. Verifica-se na Figura 8 que entre os valores 200 e 1023 houve um ajuste muito satisfatório da curva de dados experimentais, portanto esta é a faixa de valores utilizada nos testes. Cabe ressaltar que os bits enviados já estão concatenados com os valores dos registradores criando, assim, a palavra binária.

E. Metodologia dos testes

Inicialmente foi utilizado o modelo BVD para criar a base de dados simulando o comportamento do transdutor piezelétrico. Após a criação da base de dados, o sistema computacional de correção de frequência foi alimentado com esta mesma base.

Para realizar a transmissão de dados do sistema foi criada uma comunicação SPI, ligando um Arduino à placa onde estão os demais componentes (potenciômetro digital e circuito oscilador). Depois de criada a comunicação SPI o sistema computacional foi acionado e inserida uma impedância base de 179,20 Ω .

Após a primeira inserção de dados o sistema realizou a primeira correção da frequência, permitindo que o valor encontrado pudesse ser enviado para o potenciômetro digital. Depois de reajustado o valor da frequência no software, foi realizada a calibração do potenciômetro digital.

Para calcular a escala de variação do potenciômetro digital, foi necessário aumentar os bits de forma gradativa. A variação do valor do potenciômetro foi controlada por aumentos sucessivos de 10 em 10 (em base decimal). Os valores utilizados encontram-se na Tabela II. Após a calibração do potenciômetro, os valores dos bits relacionados a frequência foram enviados ao Arduino, que através da comunicação SPI, fez o envio dos dados ao potenciômetro digital, modificando seus valores de resistência interna, alterando assim, a tensão de saída.

A tensão de saída do potenciômetro digital está ligada a entrada do circuito oscilador XR2206, que produz uma frequência de oscilação em sua saída de acordo com a variação da resistência R2, conforme apresentado na Equação 3. Após estas calibrações, os sinais de saída do circuito oscilatório, foram analisados com o auxílio de um osciloscópio digital.

IV. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Foram escolhidas 3 execuções consecutivas, que serão apresentadas como resultados obtidos pelo sistema de correção. As etapas de execução, a impedância do sistema e a frequência de saída estão apresentados na Tabela III, bem como seus respectivos valores inseridos no sistema e a respectiva frequência encontrada para cada etapa.

Tabela III. Etapas da correção de frequência

Execução	Impedância (Ω)	Frequência (kHz)	Frequência Osciloscópio	Erro (kHz)
1	179,2	25,7	25,72	0,02
2	157,3	25,5	25,51	0,01
3	252,1	25,2	25,18	0,02
4	210,7	25,0	24,98	0,02
5	167,0	24,8	24,74	0,06
6	214,4	24,5	24,42	0,08
7	179,2	25,7	25,72	0,02
8	159,2	24,3	24,24	0,06

V. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do sistema de correção de frequências realizado até o momento mostrou que a técnica apresentada em [10] conduz a resultados que podem ser processados eletronicamente para acionar um circuito oscilador. O sistema como um todo apresenta comportamento robusto e ágil (com

respostas da ordem de 6 ms). Embora a literatura não mencione tempos de correção, o tempo reduzido de resposta, representa uma característica muito adequada para sistemas ultrassônicos.

As diferenças observadas entre o valor esperado, obtido dos dados armazenados, e o valor medido com o osciloscópio podem ser reduzidas por meio de um carregamento mais volumoso da base de dados. Este carregamento consiste em diminuir as variações de R1 e C1 nas simulações, gerando uma maior quantidade de curvas a serem pesquisadas. Tal procedimento será objeto de futuras implementações.

REFERÊNCIAS

- [1] AGBOSSOU, K., DION, J., CARIGNA, S., ABDELKRIM, M., CHERITI, A., 2000. Class D amplifier for a power piezoelectric load, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 47(4), 1036-1041.
- [2] DUBUS, B., HAW, G., GRANGER, C., LEDEZ, O., 2002. Characterization of multilayered piezoelectric ceramics for high power transducers. Ultrasonics, 40, 903-906.
- [3] UMEDA, M., NAKAMURA K., UEHA S., 1999. Effects of vibration stress and temperature on the characteristics of piezoelectric ceramics under high vibration amplitude levels measured by electrical transient responses. Japanese Journal of Applied Physics, 38, 5581-5585.
- [4] ARNOLD, F., MÜHLEN, S., 2001. The resonance frequencies on mechanically pre-stressed ultrasonic piezotransducers. Ultrasonics, 39(1), 1-5.
- [5] ARNOLD, F., GONÇALVES, M., BRAVO-ROGER, L., MÜHLEN, S., 2001. Electric impedance of piezoelectric ceramics under acoustic loads. ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, 12(2), 48-54.
- [6] ISHIKAWA, J., MISUTAMI, Y., SUZUKI, T., YKEDA, H., YOSHIDA, H., 1997. High-Frequency Drive-Power and Frequency Control for Ultrasonic Transducer Operating at 3 MHz. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 2, 900-905.
- [7] RAMOS-FERNANDEZ, A., MONTROYA-VITINI, F., GALLEGO-JUAREZ, J., 1985. Automatic system for dynamic control of resonance in high power and high Q ultrasonic transducers. Ultrasonics, 23, 151-156.
- [8] MORTIMER, B., DU BRUYN, T., DAVIES, J., TAPSOM, J., 2011. High power resonant tracking amplifier using admittance locking. Ultrasonics, 39(4), 257-261.
- [9] KUANG, Y., JIN, Y., COCHRAN, S., HUANG, Z., 2014. Resonance tracking and vibration stabilization for high power ultrasonic transducers. Ultrasonics, 54(1), 187-194.
- [10] ARNOLD, F. J., BATTILANA, R. B., ARANDA, M. C.; Dynamic Frequencies Correction in Piezoelectric Transducers using Genetic Algorithms. Physics Procedia, v. 70, p. 901-904, 2015.
- [11] BATTILANA, R. B., Uma Nova Técnica de Correção de Frequência em Transdutores Piezelétricos Utilizando Inteligência Artificial. 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sistemas da Informação e Comunicação, Telecomunicação, Faculdade de Tecnologia - Unicamp, Limeira, 2017.
- [12] KAUCZOR, C.; FRÖHLEKE, N., 2004. Inverter Topologies for Ultrasonic Piezoelectric Transducers with High Mechanical Q-Factor. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference, Aachen, Germany.
- [13] ARNOLD, F. J., XIMENES, R. L., ARTHUR, R., SANTOS, T. S.; Sistema simples para medição de impedância elétrica para transdutores piezelétricos; Anais do XX Congresso Brasileiro de Automação, Belo Horizonte, 1712-1717, (2014).
- [14] <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/data-converters/digital-potentiometers/MAX5497.html>