



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP

FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA – PIBIC/CNPq

RELATÓRIO FINAL DE ATIVIDADES (2017– 2018)

TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: Determinação de impedância elétrica de transdutores piezelétrico sob potências elevadas.

NOME DO BOLSISTA / RA: Guilherme Toniolo Barreto / 169177.

NOME DO ORIENTADOR: Prof. Francisco José Arnold.

LOCAL DE EXECUÇÃO: Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Tecnologia – Limeira, SP.

VIGÊNCIA DA BOLSA CNPq: 01/08/2017 à 31/07/2018.

CURSO: Engenharia de Telecomunicações.

Resumo

Os transdutores piezelétricos são, entre várias aplicações, usados para produzir ultrassom de potência elevada. O comportamento da impedância elétrica desses transdutores revela importantes características do mesmo voltadas para um projeto. A interação do transdutor com fatores externos modifica a impedância. Neste trabalho é investigado o comportamento da impedância em relação a amplitude da tensão excitadora. Um aparato experimental foi desenvolvido para determinar a impedância dos transdutores. Foram usadas duas frequências fixas próximas a ressonância e anti-ressonância para se medir as impedâncias. Os resultados mostram pequenas variações de impedância numa faixa de tensões elétricas entre 37 e 148V. Essas variações não podem ser lineares com o aumento da tensão aplicada no transdutor.

Sumário

I. Introdução.....	1
II. Teoria.....	1
III. Materiais e Métodos.....	5
III.1. Caracterização do Transdutor.....	5
III.2. Simulações feitas com o modelo BVD.....	5
III.3. Amplificador Classe D.....	5
III.4. Descrição do Experimento e Medições Realizadas.....	6
IV. Resultados e Discussões.....	7
IV.1. Caracterização do Transdutor.....	7
IV.2. Simulações feitas com o modelo BVD.....	8
IV.3. Amplificador Classe D.....	9
IV.4. Descrição do Experimento e Medições realizadas.....	12
IV.4.1 Experimento 1.....	12
IV.4.2 Experimento 2.....	13
IV.4.3 Experimento 3 – Transdutor Piezelétrico sob Elevadas Potências.....	15
IV.4.4 Experimento 4 – Transdutor Piezelétrico com L_0 em paralelo sob Elevadas Potências.....	19
V. Conclusões.....	24
VI. Referências Bibliográficas.....	24

I. Introdução

Os transdutores piezelétricos são dispositivos formados por cerâmicas piezelétricas e peças metálicas, capazes de realizar a conversão de pressão em eletricidade (efeito piezelétrico direto) e a conversão de eletricidade em pressão (efeito piezelétrico reverso). Seu nome vem do grego e significa “eletricidade por pressão” [1].

Atualmente, os transdutores piezelétricos são utilizados em várias áreas do conhecimento, tais como a área médica, militar e industrial, aplicando propagação de sinais ultrassônicos.

Quando operados em potências elevadas, os transdutores piezelétricos apresentam não linearidade em suas características eletromecânicas. Isso resulta, dentre outras coisas, em desvios na frequência de ressonância, alterando a curva de impedância do transdutor.

Embora os fabricantes de piezelétricos disponibilizem dados da impedância desse transdutor sob baixas potências, é de suma importância a caracterização dos mesmos sob elevadas potências.

Os objetivos deste trabalho são:

- Realizar um desenvolvimento experimental para medir tensões, correntes e diferença fase em transdutores piezelétricos sob potências elevadas, com tensões de excitação de até 200V;
- Determinar valores de impedância elétrica sob potências elevadas e compará-los com medições feitas sob baixas tensões, visando concluir sobre os efeitos da excitação elétrica no comportamento elétrico do transdutor;
- Determinar a eficiência do amplificador classe D ao alimentar uma carga piezelétrica.

II. Teoria

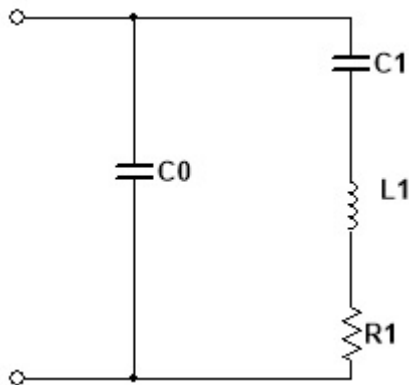


Figura 1: Modelo BVD para Transdutor Piezelétrico

O modelo BVD é um modelo para representação de um transdutor piezelétrico. Ele é composto pelo ramo elétrico (composto pelo capacitor C_0) e o ramo mecânico, composto pelo capacitor C_1 , o indutor L_1 e o resistor R_1 . Os componentes C_0 , C_1 , L_1 e R_1 representam, respectivamente, a capacitância intrínseca, os efeitos elásticos, os efeitos inerciais e os efeitos dissipativos do transdutor [1]. A Figura 1 apresenta o modelo BVD [2].

O módulo da impedância de um piezelétrico, para um dado modo de vibração, apresenta valores mínimo e máximo. A frequência que faz apresentar esse valor mínimo é chamada de frequência de ressonância f_R . A frequência que faz apresentar esse valor máximo é chamada de frequência de anti-ressonância f_A .

As Equações (1) e (2) mostram como calcular essas frequências, ambas em função dos componentes que definem um piezelétrico seguindo o modelo BVD [1].

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

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

A Equação (6) representa a equação para a impedância de um piezelétrico da Figura 1 (Modelo BVD para transdutores piezelétricos) em função da frequência f que o mesmo está sendo submetida (Equação (3)). A impedância do piezelétrico está em função do ramo elétrico e mecânico do mesmo (Equações (4) e (5)).

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (3)$$

$$Z_1 = (i \cdot \omega \cdot C_1)^{-1} + R_1 + i \cdot \omega \cdot L_1 \quad (4)$$

$$Z_2 = (i \cdot \omega \cdot C_0)^{-1} \quad (5)$$

$$Z = Z_1 // Z_2 \quad (6)$$

A Equação (6) pode ser separada em função do seu valor real e imaginário. Assim, as Equações (7), (8), (9), (10), (11), (12) e (13) mostram os valores reais e imaginários da impedância Z .

$$Z = a + i \cdot b \quad (7)$$

$$a = \frac{a_1}{a_2} \quad (8)$$

$$a_1 = (-\omega^2 \cdot L_1 \cdot C_1 + 1) \cdot (-\omega^2 \cdot R_1 \cdot C_0 \cdot C_1) + (\omega \cdot C_1 \cdot R_1) \cdot (\omega \cdot C_1 + \omega \cdot C_0 - \omega^3 \cdot L_1 \cdot C_0 \cdot C_1) \quad (9)$$

$$a_2 = (-\omega^2 \cdot R_1 \cdot C_0 \cdot C_1)^2 + (\omega \cdot C_1 + \omega \cdot C_0 - \omega^3 \cdot L_1 \cdot C_0 \cdot C_1)^2 \quad (10)$$

$$b = \frac{b_1}{b_2} \quad (11)$$

$$b_1 = (\omega \cdot C_1 \cdot R_1) \cdot (-\omega^2 \cdot R_1 \cdot C_0 \cdot C_1) - (-\omega^2 \cdot L_1 \cdot C_1 + 1) \cdot (\omega \cdot C_1 + \omega \cdot C_0 - \omega^3 \cdot L_1 \cdot C_0 \cdot C_1) \quad (12)$$

$$b_2 = (-\omega^2 \cdot R_1 \cdot C_0 \cdot C_1)^2 + (\omega \cdot C_1 + \omega \cdot C_0 - \omega^3 \cdot L_1 \cdot C_0 \cdot C_1)^2 \quad (13)$$

O modelo de Butterworth-Van Dyke pode ser acrescido de um indutor L_0 , de forma a funcionar como um filtro, como mostra a Figura 2:

A Equação (17) representa a equação para se caracterizar a impedância de um piezelétrico da Figura 2 (Modelo BVD para transdutores piezelétricos com L_0) em função da frequência f que o mesmo está sendo submetida (Equação (4)). A impedância do piezelétrico está em função do ramo elétrico e mecânico do mesmo (Equações (15) e (16)) e do ramo onde se localiza L_0 (Equação (14)).

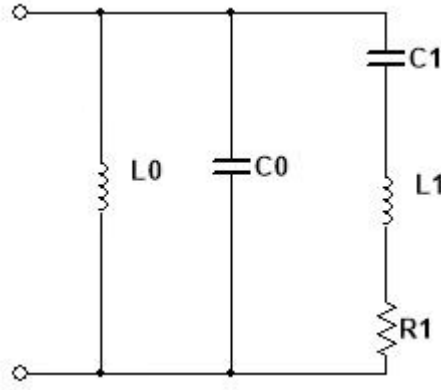


Figura 2: Modelo BVD para o transdutor piezelétrico com L_0

$$Z_1 = i \cdot \omega \cdot L_0 \quad (14)$$

$$Z_2 = (i \cdot \omega \cdot C_0)^{-1} \quad (15)$$

$$Z_3 = i \cdot \omega \cdot L_1 + (i \cdot \omega \cdot C_1)^{-1} + R_1 \quad (16)$$

$$Z = Z_1 // Z_2 // Z_3 \quad (17)$$

A Equação (17) pode ser separada em função do seu valor real e imaginário. Assim, as Equações (18), (19), (20), (21), (22), (23) e (24) mostram os valores reais e imaginários da impedância Z .

$$Z = a + i \cdot b \quad (18)$$

$$a = \frac{a_1}{a_2} \quad (19)$$

$$a_1 = (-\omega^2 \cdot L_0 \cdot C_1 \cdot R_1) \cdot (-\omega^2 \cdot L_1 \cdot C_1 + 1 - \omega^2 \cdot L_0 \cdot C_1 - \omega^2 \cdot L_0 \cdot C_0 + \omega^4 \cdot L_0 \cdot L_1 \cdot C_0 \cdot C_1) + (\omega \cdot L_0 - \omega^3 \cdot L_0 \cdot L_1 \cdot C_1) \cdot (\omega \cdot C_1 \cdot R_1 - \omega^3 \cdot L_0 \cdot C_0 \cdot R_1 \cdot C_1) \quad (20)$$

$$a_2 = (-\omega^2 \cdot L_1 \cdot C_1 + 1 - \omega^2 \cdot L_0 \cdot C_1 - \omega^2 \cdot L_0 \cdot C_0 + \omega^4 \cdot L_0 \cdot L_1 \cdot C_0 \cdot C_1)^2 + (\omega \cdot C_1 \cdot R_1 - \omega^3 \cdot L_0 \cdot C_0 \cdot R_1 \cdot C_1)^2 \quad (21)$$

$$b = \frac{b_1}{b_2} \quad (22)$$

$$b_1 = (\omega \cdot L_0 - \omega^3 \cdot L_0 \cdot L_1 \cdot C_1) \cdot (-\omega^2 \cdot L_1 \cdot C_1 + 1 - \omega^2 \cdot L_0 \cdot C_1 - \omega^2 \cdot L_0 \cdot C_0 + \omega^4 \cdot L_0 \cdot L_1 \cdot C_0 \cdot C_1) - (\omega^2 \cdot L_0 \cdot C_1 \cdot R_1) \cdot (\omega \cdot C_1 \cdot R_1 - \omega^3 \cdot L_0 \cdot C_0 \cdot R_1 \cdot C_1) \quad (23)$$

$$b_2 = (-\omega^2 \cdot L_1 \cdot C_1 + 1 - \omega^2 \cdot L_0 \cdot C_1 - \omega^2 \cdot L_0 \cdot C_0 + \omega^4 \cdot L_0 \cdot L_1 \cdot C_0 \cdot C_1)^2 + (\omega \cdot C_1 \cdot R_1 - \omega^3 \cdot L_0 \cdot C_0 \cdot R_1 \cdot C_1)^2 \quad (24)$$

Utilizando dados reais de piezelétricos, pode-se realizar a caracterização de um piezelétrico. Os valores de impedância e frequência necessários para se fazer a caracterização são:

- Z_{\min} = Impedância mínima utilizada
- $Z(f = 1\text{kHz})$ = Impedância do Piezelétrico para a frequência igual a 1kHz

- f_R = Frequência de Ressonância
- f_A = Frequência de Anti-ressonância

A Equação (25) mostra a relação entre o valor de R_1 e a impedância mínima Z_{min} medida em um piezelétrico real. Já a Equação (29) mostra como que se calcula o valor de C_0 . Ele depende de parâmetros mostrados nas Equações (26), (27) e (28) [3].

$$R_1 = Z_{min} \quad (25)$$

$$k^2 = 1 - \left(\frac{f_R}{f_A} \right)^2 \quad (26)$$

$$X_{CO}^T = Z(f = 1 \text{ kHz}) \quad (27)$$

$$C_{0T} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{CO}^T} \quad (28)$$

$$C_0 = C_0^S = C_0^T \cdot (1 - k^2) \quad (29)$$

O cálculo de C_1 envolve a fórmula de f_R e f_A . Isolando L_1 da Equação (1):

$$L_1 = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_R^2 \cdot C_1} \quad (30)$$

Substituindo a Equação (30) na (2) e isolando C_1 :

$$C_1 = C_0 \cdot \frac{f_A^2 - f_R^2}{f_R^2} \quad (31)$$

Substituindo a Equação (31) na (30):

$$L_1 = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot C_0 \cdot (f_A^2 - f_R^2)} \quad (32)$$

O indutor L_0 deve estar em ressonância com C_0 . Assim, o cálculo de L_0 é feito utilizando a Equação (33):

$$L_0 = \frac{(L_1 \cdot C_1)}{C_0} \quad (33)$$

III. Materiais e Métodos

Os principais materiais utilizados nesse trabalho serão o piezelétrico, a ponte de MOSFETS e a fonte de alimentação CC. Outros instrumentos de medição como osciloscópio e multímetro também são de vital importância. O método adotado para se medir a impedância do piezelétrico se resume em calcular a relação entre a tensão e a corrente que o mesmo está sujeito, em função de f_R e f_A . O método adotado para calcular o rendimento do amplificador classe D envolve calcular a relação entre a potência dissipada no transdutor e na fonte de alimentação CC.

III.1. Caracterização do Transdutor

A caracterização de um transdutor piezelétrico (calcular o comportamento da impedância do mesmo em função da frequência) foi realizada utilizando a Equação (6) (no caso do piezelétrico da Figura 1) e a Equação (17) (no caso do piezelétrico com L_0 em paralelo ao mesmo, conforme a Figura 2).

Para a caracterização de um piezelétrico a partir de um piezelétrico real, foi necessário descobrir os valores de R_1 , C_0 , C_1 , L_1 e L_0 . Esses valores podem ser descobertos utilizando as Equações (25), (29), (31), (32) e (33) e utilizando dados específicos do transdutor piezelétrico em questão (Z_{min} , $Z(f = 1\text{kHz})$, f_R e f_A).

III.2. Simulações feitas com o modelo BVD

As simulações realizadas com o modelo BVD têm como base as equações para a caracterização do transdutor (Equações (6) e (17)). A Equação (6) corresponde a impedância do modelo de transdutor BVD da Figura 1. Já a Equação (17) corresponde a impedância do modelo de transdutor BVD com a inserção de L_0 no circuito equivalente, conforme a Figura 2. Em ambas as simulações, a impedância está em função da frequência de ressonância f_R e da frequência de anti-ressonância f_A .

A Equação (7) corresponde a um desenvolvimento da Equação (6), visto que a Equação (7) visa separar a Equação (6) em seu valor real e imaginário. A mesma relação é obtida com as Equações (18) e (17), respectivamente. Todas as equações citadas foram simuladas. O software utilizado para calcular o módulo da impedância do piezelétrico e sua fase foi o MatLab.

III.3. Amplificador Classe D

Os transdutores piezelétricos são geralmente excitados utilizando amplificadores Classe D, devido aos rendimentos superiores a 90% que o mesmo apresenta [4]. Uma das maneiras de se ligar uma carga piezelétrica com rendimentos em torno de 95% é utilizando um oscilador IRS2453D, uma ponte de MOSFETS e filtros passa baixa (Butterworth de 2ª ordem). Esse tipo de ponte de MOSFETS geram tensões quadradas de 3,6kHz a 80kHz, sendo ideais para se trabalhar com piezeletricidade sob elevadas potências.

A Figura 3 mostra o esquema elétrico de uma ponte de MOSFETS alimentando uma carga piezelétrica com filtro.

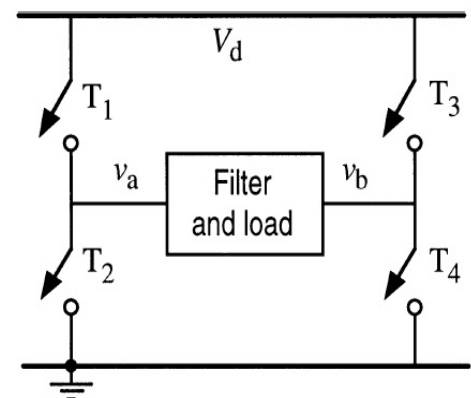


Figura 3: Ponte de MOSFETS alimentando o piezelétrico.
Fonte: [5]

O método utilizado no experimento para se medir o valor da tensão gerado pela ponte de MOSFETS e o oscilador IRS2453D é o de conectar pontas de prova do osciloscópio em v_a e v_b , assim como seus respectivos terras no terra do circuito central. Dessa forma, salvando esta informação de tensão num pendrive, é possível adicioná-las ao MatLab e equacionar a tensão gerada pela ponte.

A determinação da eficiência de um amplificador classe D é realizada calculando-se a relação entre a potência dissipada pelo piezelétrico e pela fonte CC que alimenta os amplificadores. Para o cálculo da potência da fonte de alimentação, deve-se, no experimento, medir os valores de corrente CC que circula na fonte. Com eles, pode-se calcular a potência da fonte utilizando a Equação (34).

Para se calcular a potência dissipada no piezelétrico, deve-se encontrar o valor V_{RMS} do mesmo (isso porque o transdutor se submete a uma tensão quadrática da ponte de MOSFETS). Com esse valor e o módulo da impedância do piezelétrico $|Z|$, pode-se calcular a potência dissipada no mesmo utilizando a Equação (35).

$$P_{Vcc} = V_{fonte} \cdot I_{fonte} \quad (34)$$

$$P_{Vcc} = \frac{V_{RMS}^2}{|(Z)|} \quad (35)$$

III.4. Descrição do Experimento e Medições Realizadas

O experimento consistiu primeiramente em medir dados de tensão e corrente do piezelétrico e da fonte Vd (Figura 3) utilizando o circuito equivalente do piezoelétrico (Butterworth-Van Dyke) utilizando décadas resistiva, capacitiva e indutiva. O objetivo desse primeiro experimento é de determinar um procedimento experimental de medição de tensão e corrente no piezelétrico, para que o mesmo seja aplicado sob altas potências.

A segunda parte do experimento consistiu em medir dados de tensão e corrente de um piezelétrico real e sob altas potências, considerando-se, nesses casos, os dois modelos BVD de piezelétricos apresentados na Figura 1 e Figura 2. O objetivo do segundo experimento é de determinar valores de impedância elétrica sob potências elevadas.

Um resistor de baixo valor foi colocado em série com o piezelétrico, de forma a medir a diferença de potencial entre o mesmo e, com cálculos realizados pelo MatLab, poder calcular a corrente que circula sobre o piezelétrico. Além disso, um amperímetro de fonte Vd (Vd é mostrado na Figura 3) foi inserido, para acompanharmos o quanto de potência que a fonte CC entrega a ponte de MOSFETS e ao piezelétrico.

A partir dos dados coletados do osciloscópio, é possível calcular a impedância do piezelétrico em função da frequência que o mesmo está sendo excitado pela ponte de MOSFETS. As frequências que mais interessam nesse experimento são a f_R e a f_A . A Equação (36) mostra o cálculo do módulo da impedância de um piezelétrico a partir de valores máximos e mínimos de tensão e corrente medidos.

$$|Z| = \frac{V_{max} - V_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (36)$$

- V_{max} = a tensão máxima de pico que o piezelétrico é submetido;
- V_{min} = a tensão mínima de pico que o piezelétrico é submetido;
- I_{max} = a corrente máxima de pico que o piezelétrico é submetido;
- I_{min} = a corrente mínima de pico que o piezelétrico é submetido.

IV. Resultados e Discussões

Os resultados mostraram que é possível caracterizar um transdutor (obter os valores de C_0 , L_0 , C_1 , L_1 e R_1 do modelo BVD) utilizando valores específicos de um transdutor real (Z_{\min} , $Z(f = 1\text{kHz})$, f_R e f_A). Além disso, as simulações feitas com o modelo BVD foram realizadas e, quando possível, tiveram seus gráficos comparados com gráficos reais de impedância.

O amplificador Classe D, na configuração de ponte de MOSFETS, apresentou inesperadas dificuldades (presença de ruídos quando a carga conectada a ponte era de alta impedância) e a presença de um dead time nas bordas de subida e descida. Esta última descoberta levou o orientador e o bolsista a estudar mais sobre o efeito do dead time em um circuito RL e compará-lo com outros geradores de função utilizados em laboratórios de ensino e de pesquisa.

Os experimentos realizados mostraram que foi possível desenvolver uma metodologia experimental para a medição tensão e correntes em piezelétricos sob elevadas potências, sendo submetidos a tensões de até 272Vpp. Além disso, as impedâncias dos piezelétricos foram calculadas com base nos valores de tensão medidos. Contudo, o aumento linear da tensão aplicada ao transdutor não fez com que a impedância medida aumentasse de forma linear. A justificativa para a não regularidade está associada a oscilações de frequência presentes na ponte de MOSFETS e na presença de ruídos na mesma. Por fim, por conta de dificuldades técnicas associadas a saída da ponte de MOSFETS, não foi possível medir a eficiência do amplificador Classe D.

IV.1. Caracterização do Transdutor

A partir de características de um piezelétrico real e das Equações (25), (29), (31), (32) e (33), foram calculadas os componentes C_0 , L_0 , C_1 , L_1 e R_1 do modelo BVD. Os dados específicos do transdutor necessários para se caracterizar o transdutor (Z_{\min} , $Z(f = 1\text{kHz})$, f_R e f_A) foram obtidos através do analisador de impedância do laboratório. Considerando-se que, no piezelétrico real utilizado:

- $Z_{\min} = 24,267\Omega$
- $Z(f = 1\text{kHz}) = 44,8\text{k}\Omega$
- $f_R = 27,22\text{kHz}$
- $f_A = 28,795\text{kHz}$

Foi obtido os seguintes valores de componentes:

- $R_1 = 24,267\Omega$
- $C_0 = 3,1746\text{nF}$
- $C_1 = 378,0052\text{pF}$
- $L_1 = 90,4412\text{mH}$

A comparação entre o gráfico do módulo da impedância teórico (com os componentes dimensionados) e o gráfico experimental (obtido em laboratório) se encontra na Figura 4, obtida no MatLab, em que a curva azul corresponde ao módulo da impedância medido em laboratório; já a curva vermelha refere-se ao módulo da impedância baseada nos valores dos componentes dimensionados:

O resultado do experimento (Figura 4) mostra que a impedância experimental e a teórica (dimensionada utilizando as Equações (25), (29), (31) e (32)) são idênticas e, portanto, que os valores obtidos para C_0 , C_1 , L_1 e R_1 correspondem ao modelo de BVD de piezelétrico e ao piezelétrico analisado em questão.

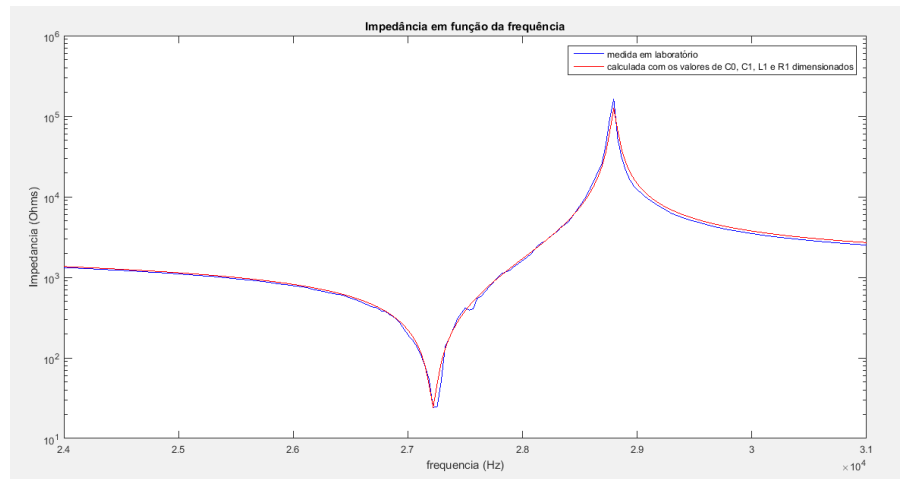


Figura 4: Gráfico teórico vs Gráfico Experimental

IV.2. Simulações feitas com o modelo BVD

A partir dos valores de impedância das Equações (6) e (17), pode-se realizar simulações do módulo da impedância e a fase do piezelétrico, considerando valores de componentes reais ao piezelétrico.

Com os valores de componentes abaixo, é possível obter com a Equação (6) o módulo da impedância do piezelétrico (Figura 5) e a fase do mesmo (Figura 6).

- $C_0 = 3,12 \text{ nF}$;
- $L_1 = 113,4 \text{ mH}$;
- $C_1 = 341,25 \text{ pF}$;
- $R_1 = 39,7 \text{ } \Omega$;

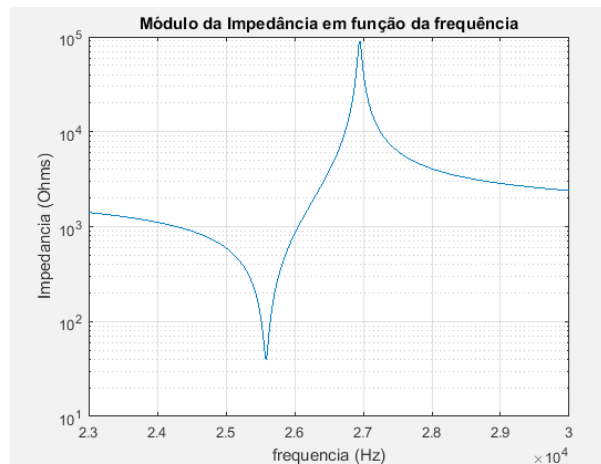


Figura 5: Módulo da Impedância de um Piezoelétrico

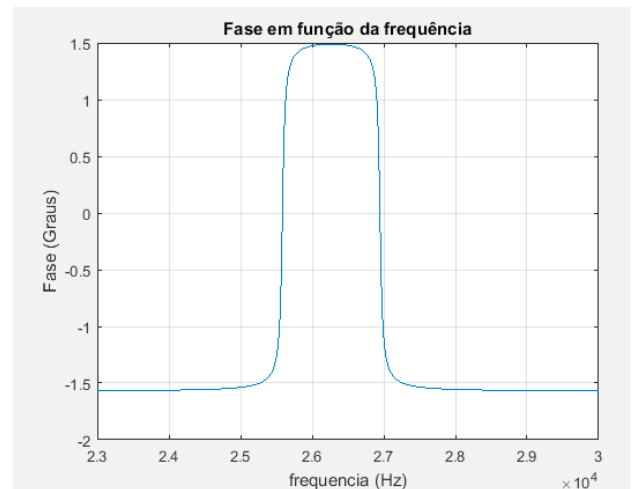


Figura 6: Fase de um Piezelétrico

Na Figura 5, é possível observar um valor mínimo de impedância (pico de baixo). A frequência a qual o módulo da impedância atinge esse valor mínimo é chamada de Frequência de Ressonância (f_R).

Ainda na Figura 5, é possível observar um valor máximo de impedância (pico de cima). A frequência a qual o módulo da impedância atinge esse valor máximo é chamada de Frequência de Antirressonância (f_A).

Já com os valores de componentes apresentados anteriormente e acrescidos de $L_0 = 12,4\text{mH}$, é possível obter com a Equação (17) o módulo da impedância do piezelétrico (Figura 7) e a fase do mesmo (Figura 9).

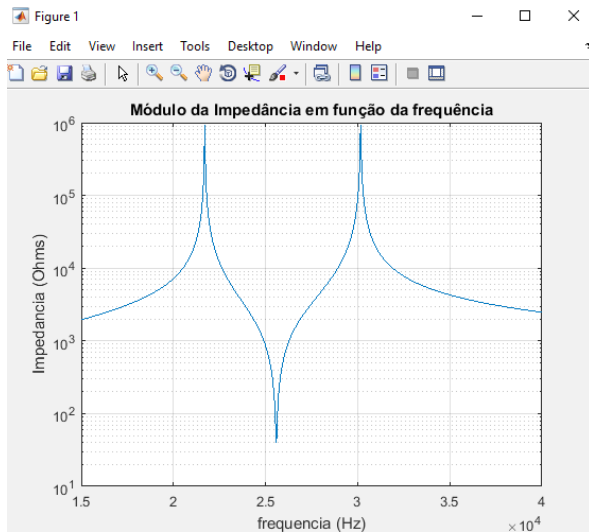


Figura 7: Módulo da Impedância de um Piezelétrico com L_0

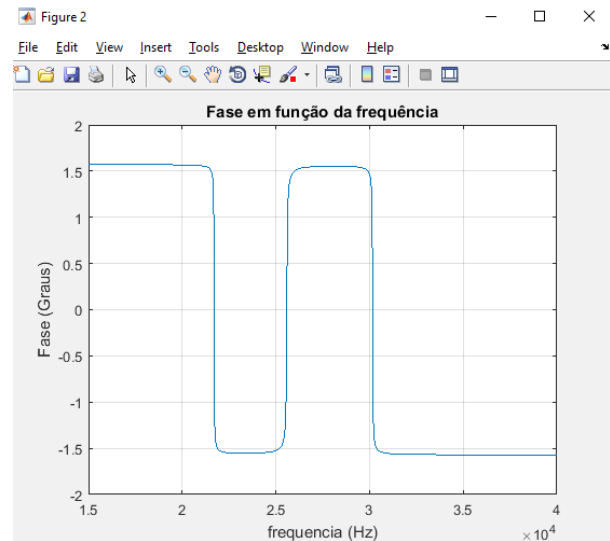


Figura 8: Fase de um Piezelétrico com L_0

Na Figura 7, é possível observar um valor mínimo de impedância (pico de baixo). A frequência a qual o módulo da impedância atinge esse valor mínimo é chamada de Frequência de Ressonância (f_R).

Ainda na Figura 7, é possível observar dois valores máximos de impedância (pico de cima). O valor que se encontra anterior a frequência de ressonância é chamado de frequência de anti-ressonância inferior. Já o que se encontra posterior a frequência de ressonância é chamado de frequência de anti-ressonância superior.

Comparando a Figura 5 e Figura 6 com os gráficos do módulo da impedância e da fase de um piezelétrico obtidos experimentalmente por um analisador de impedância, pode-se concluir que a Equação (6) caracteriza a impedância de um transdutor piezelétrico.

Na ocasião em que foi caracterizado a impedância do piezelétrico no analisador de impedância, não foi pensado em colocar o indutor L_0 em paralelo para se caracterizar a impedância do mesmo junto com o indutor. Contudo, as Equações (14), (15), (16) e (17) foram integralmente colocadas no MatLab (de forma similar às Equações (2), (3), (4), (5) e (6), referentes a impedância do piezelétrico da Figura 1). Como foi mostrado Equação (6) caracteriza de fato a impedância de um transdutor piezelétrico e a metodologia utilizada está correta, pode-se concluir que a Equação (17) também caracteriza a impedância de um transdutor piezelétrico (com L_0 , conforme a Figura 2).

IV.3. Amplificador Classe D

A ponte de MOSFETS (formada pelo amplificador classe D) foi primeiramente testado em um circuito RL. Um circuito similar tinha sido simulado no Multisim, Proteus e MatLab (Figura 9).

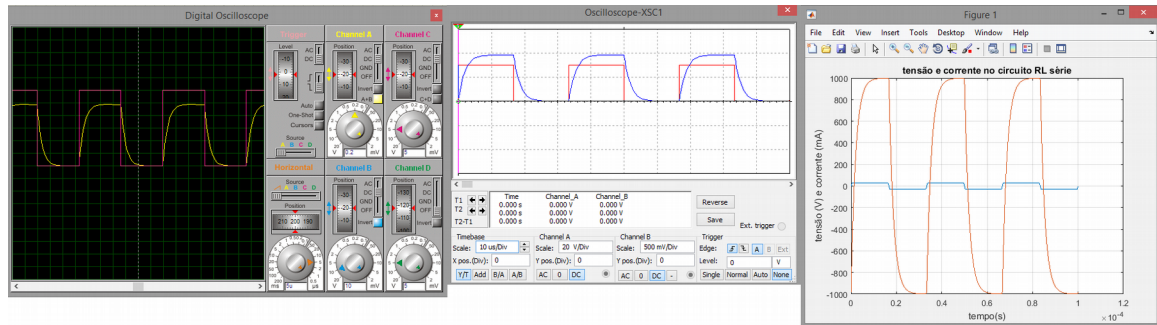


Figura 9: Simulação circuito RL no Proteus (à esquerda), Multisim (no centro) e no MatLab (à direita)

A Figura 11 mostra o circuito RL conectado a ponte de MOSFETS e montado experimentalmente.

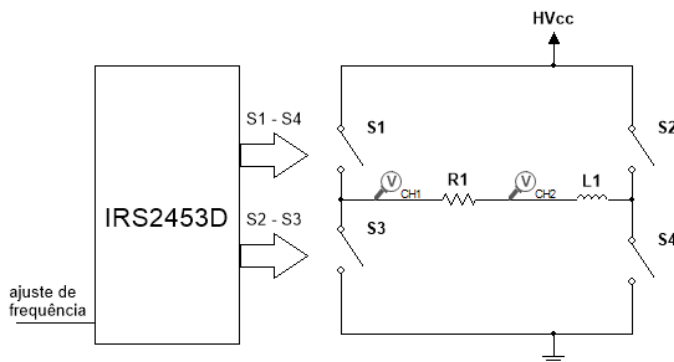


Figura 11: Circuito RL conectado a ponte de MOSFETS

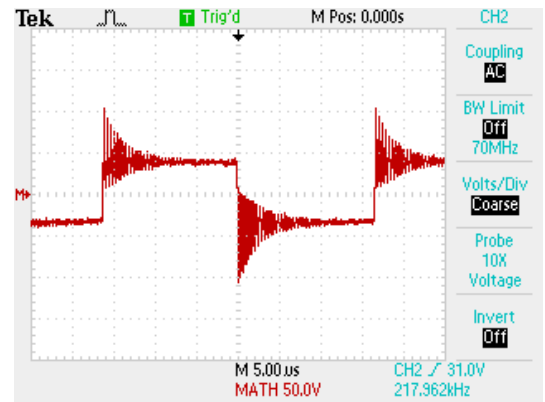


Figura 10: Tensão no indutor no circuito RL

O resultado do circuito RL observado experimentalmente foi inicialmente divergente com o resultado simulado (Figura 9). A Figura 10 mostra a tensão encontrada num indutor num circuito RL com $R = 1,56\text{M}\Omega$ e $L = 16,3\text{mH}$.

Após vários testes experimentais, foram detectados duas coisas:

- Colocando-se uma carga de alta impedância entre a ponte de MOSFETS (resistor de $1,56\text{M}\Omega$), observa-se que a tensão medida apresentava ruído (Figura 14). Entretanto, ao se colocar uma carga de baixa impedância entre a ponte de MOSFETS (resistor de 100Ω), não se observava o ruído anteriormente presente (Figura 15).

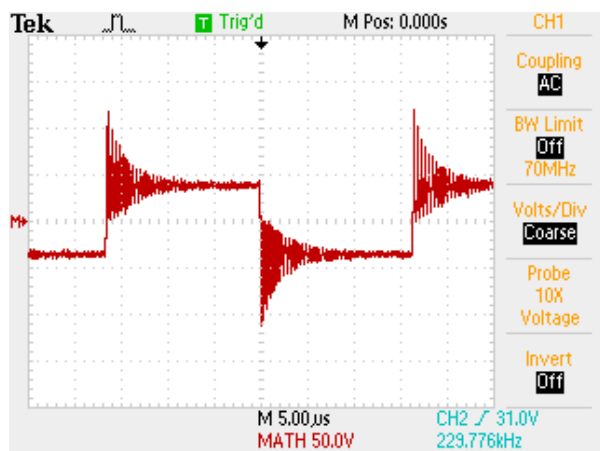


Figura 12: Tensão na ponte de MOSFETS aplicada a uma carga de alta impedância

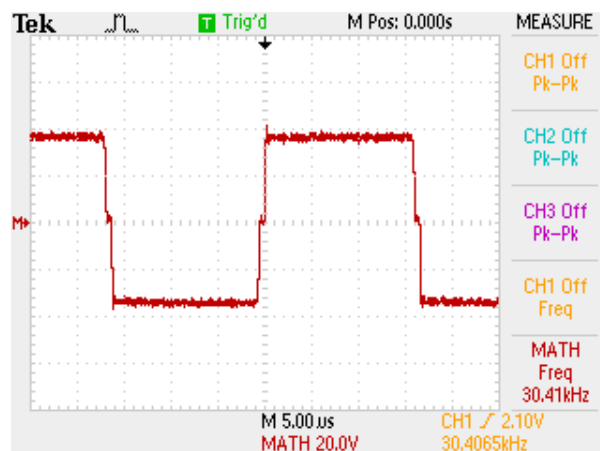


Figura 13: Tensão na ponte de MOSFETS aplicada a uma carga de baixa impedância

- A tensão quadrada produzida pela ponte de MOSFETs apresentava um Dead Time entre a tensão máxima e a tensão mínima da mesma (e vice versa). O Dead Time pode ser visualizado na Figura 14, Figura 14 e Figura 15.

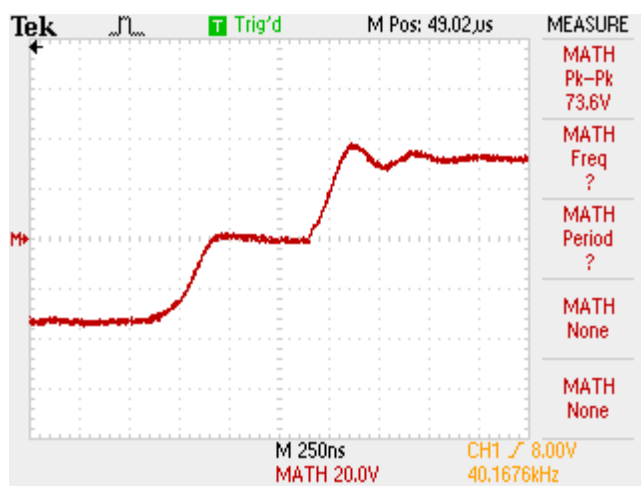


Figura 14: Dead Time na borda de subida ponte de MOSFETS

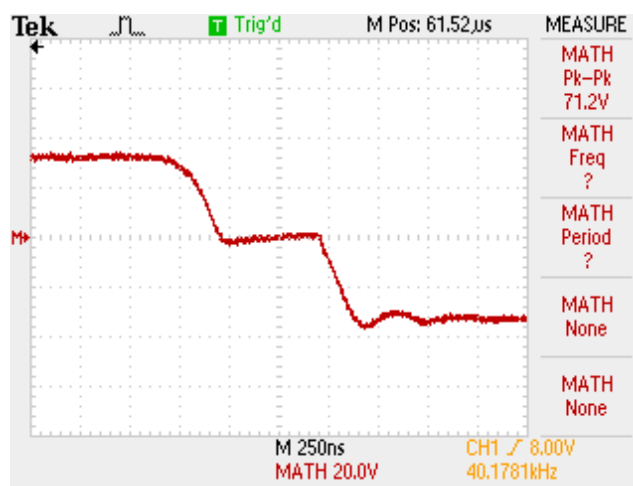


Figura 15: Dead Time na borda de descida ponte de MOSFETS

Dessa forma, para que não ocorresse mais ruídos por conta da alta impedância da carga RL, foi colocado um resistor de baixa resistência (100Ω) em paralelo com o circuito RL. Essa solução foi adotada em todos os circuitos reproduzidos posteriormente. O valor do resistor de 100Ω foi inicialmente utilizado por ser um dos resistores que suportava maiores potências no laboratório (resistor com 50W de potência) e por estar fixado em uma madeira de proteção (Figura 16).

Com as descobertas até então apresentadas, veio a curiosidade do orientador e do aluno bolsista de saber qual era o efeito do Dead Time produzido em uma ponte de MOSFETS em um circuito RL comparando-se com outros geradores de onda quadrada, disponíveis no laboratório de ensino e no laboratório de pesquisa da Faculdade de Tecnologia (FT).

Dessa forma, foi acordado entre o orientador e o bolsista em utilizar os meses de fevereiro e abril para se realizar medições em um circuito RL utilizando três geradores de onda quadrada: a ponte de MOSFETS (citada anteriormente), o gerador comum (Politem POL-40 – utilizado no laboratório de graduação) e o gerador Tectronics (AFG3021C – utilizado no laboratório de pesquisa).

As medições utilizaram três faixas de frequências: 3,6kHz (a frequência mínima fornecida pela ponte de MOSFETS); 40 kHz e 80kHz (a frequência máxima fornecida pela ponte de MOSFETS). Foram utilizados dez configurações de resistores e indutores (utilizando décadas resistivas), de forma que as frequências de cortes variassem entre 100Hz e 50kHz. No total, foram realizadas 207 medições.

O resultado dessas pesquisas serão futuramente divulgados em um artigo.

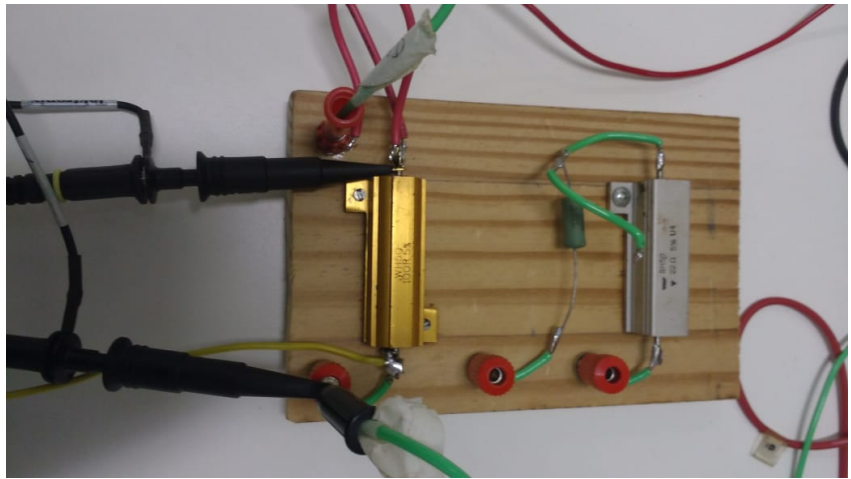


Figura 16: Resistor de 100Ω/50W fixado numa madeira de proteção

IV.4. Descrição do Experimento e Medições realizadas

IV.4.1 Experimento 1

A Figura 17 mostra o circuito elétrico equivalente ao piezelétrico com os resistores R_2 e R_3 . O objetivo deste experimento foi estudar alternativas de se medir a corrente de um piezelétrico alimentado por uma ponte de MOSFETS. Nesse primeiro experimento, a tensão HVcc adotada foi valor de 37V, com frequência de 3,6kHz. Além disso, foram utilizadas décadas resistivas para controlar o valor de C_0 , C_1 , R_1 e L_1 .

Os valores dos componentes utilizados para C_0 , C_1 , R_1 e L_1 foram baseados nas Equações (26), (30), (32) e (33). Os valores calculados foram:

- $C_0 = 3,1726\text{nF}$

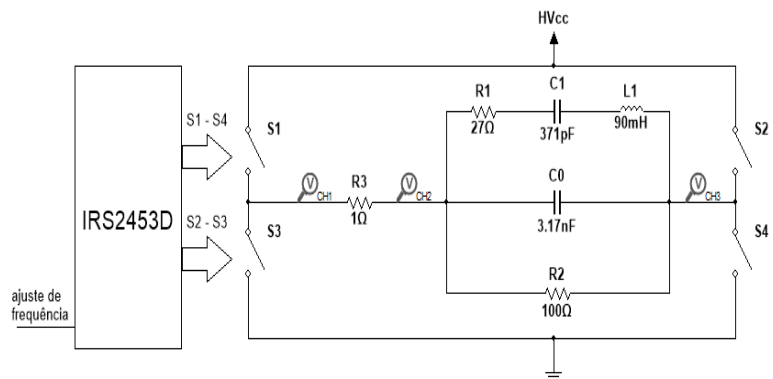


Figura 17: Circuito Equivalente ao piezelétrico com R_2 e R_3

- $C_1 = 371,5346\text{pF}$
- $L_1 = 91,9825\text{mH}$
- $R_1 = 27,773\Omega$

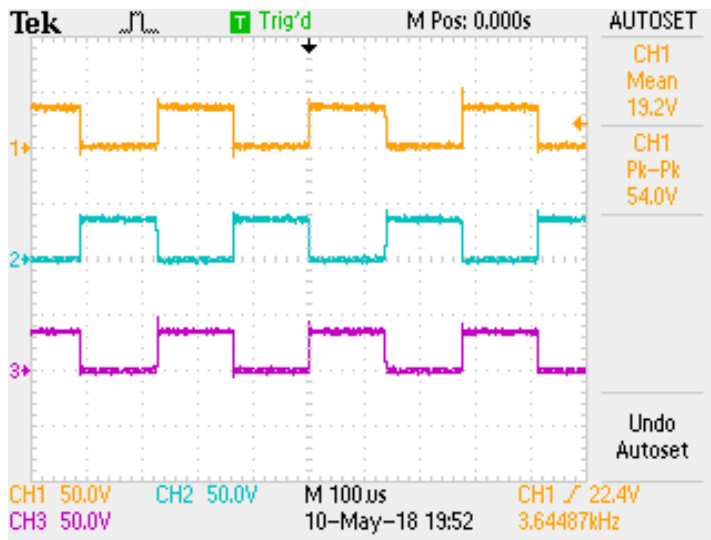


Figura 18: Tensões em CH1 (amarelo), CH2 (azul) e CH3 (rosa)

A primeira solução pensada em se medir a corrente do piezelétrico foi de colocar um resistor em série com o piezelétrico e ligar os terminais do osciloscópio entre o resistor em questão. Entretanto, o ligando dessa maneira, o terminal terra do osciloscópio curto circuitaria o circuito do piezelétrico.

Para contornar essa situação, foi pensando em colocar três canais do osciloscópio (CH1, CH2 e CH3), conforme a Figura 17, e conectar os terminais terras desses três canais junto com o terminal terra do circuito em si. Dessa forma, coletando essas tensões dos canais do osciloscópio e tratando-as adequadamente no MatLab, pode-se obter a corrente que circula em um piezelétrico.

A Figura 18 mostra as tensões de CH1, CH2 e CH3 obtidas no osciloscópio. O tratamento matemático neste caso é dispensado, já que a corrente que percorre um piezelétrico é significativa em sua f_R e f_A , e o experimento está trabalhando com uma frequência de 3,6kHz.

Os resultados desse experimento mostraram que as tensões que são medidas nos canais CH1, CH2 e CH3 do osciloscópio podem ser tratadas no MatLab e, assim, pode-se medir a tensão e a corrente que circula no piezelétrico. Ou seja, o objetivo desse experimento foi alcançado.

IV.4.2 Experimento 2

A Figura 19 mostra o circuito elétrico equivalente ao piezelétrico em série com R_2 , e ambos em paralelo a R_3 . Dessa forma, com um valor suficientemente pequeno para R_3 , pode-se garantir que a impedância total do circuito seja baixa, fazendo com que a tensão oriunda da ponte de MOSFETS não apresente ruído. Além disso, colocando-se R_2 em série com o circuito elétrico do piezelétrico, pode-se medir a corrente que circula no mesmo.

Nesse experimento, a tensão HV_{cc} adotada foi de 37V e as frequências utilizadas na onda quadrada oriunda da ponte de MOSFETS foram a $f_R = 27,225\text{kHz}$ e $f_A = 28,775\text{kHz}$.

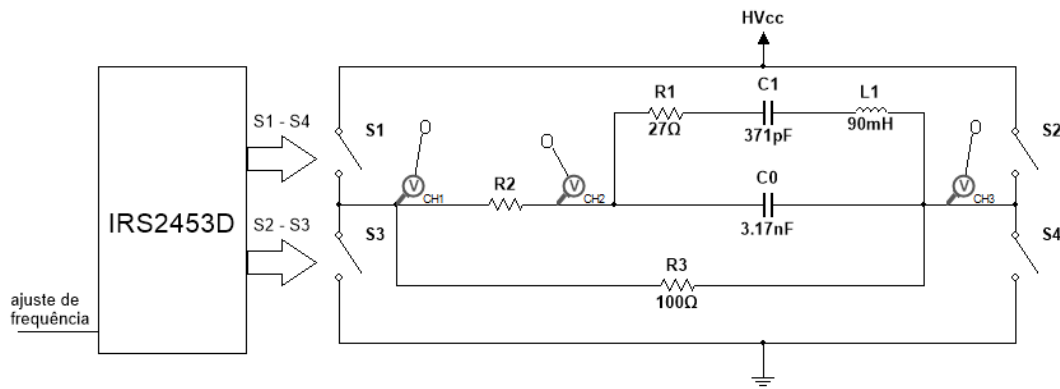


Figura 19: Circuito Equivalente ao piezelétrico com R_2 e R_3

O valor de R_3 definido foi de 100Ω . A razão para a escolha desse valor foi devido ao mesmo ter sido utilizado em experimentos anteriores com o circuito RL, além de apresentar baixa impedância e suportar altas potências (50W).

O objetivo desse experimento foi de testar valores variados de R_2 (valores disponíveis no laboratório e que suportassem altas potências) e escolher o que mais tornava precisa as medições. Os valores testados de R_2 foram de 1Ω (Figura 20), 50Ω , 100Ω , 200Ω e 470Ω .

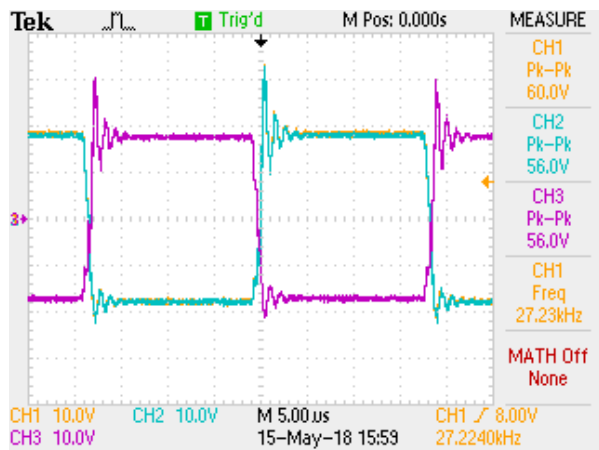


Figura 20: Tensões em CH1 (amarelo), CH2 (azul) e CH3 (rosa) para $R_2 = 1\Omega$ e na frequência de ressonância

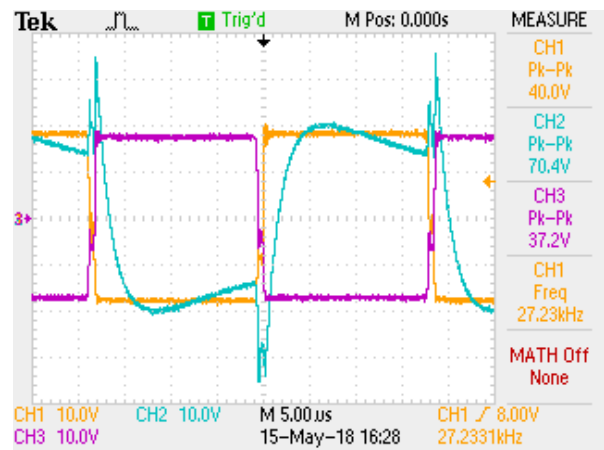


Figura 21: Tensões em CH1 (amarelo), CH2 (azul) e CH3 (rosa) para $R_2 = 470\Omega$ e na frequência de ressonância

Após 10 experimentos, os resultados dos mesmos mostraram que o resistor que apresentou menos ruído (repare no ruído encontrado CH1, CH2 e CH3 para $R_2 = 1\Omega$ na Figura 20) na carga foi o resistor de $470\Omega/20W$. Além disso, percebeu-se que, quanto maior a resistência, maior a diferença de potencial entre o resistor e, consequentemente, maior precisão na leitura da tensão nos canais CH1 e CH2. Isso proporciona maior precisão para o cálculo da corrente que circula o piezelétrico no MatLab. O objetivo deste experimento foi alcançado.

O circuito elétrico equivalente ao piezelétrico da Figura 17 e da Figura 19 foram montados utilizando resistores, capacitores e indutores de década. No ajuste desses equipamentos, não foi possível colocar com precisão os valores dos componentes, em especial o de C_1 (por conta do capacitor de década não ter precisão suficiente para colocar o valor correto de $371,5346pF$). Além disso, pode-se

perceber que a cada pequena mudança no valor de C_1 (por conta dos ajustes realizados em seu valor), a forma de onda do canal CH2 do osciloscópio mudava significativamente.

Deste modo, nos experimentos seguintes, o circuito elétrico equivalente ao piezelétrico foi substituído pelo próprio transdutor piezelétrico.

IV.4.3 Experimento 3 – Transdutor Piezelétrico sob Elevadas Potências

A Figura 22 mostra o transdutor piezelétrico P_1 em série com R_2 , e ambos os componentes em paralelo com R_1 . Já a Figura 31 mostra uma foto do experimento realizado em laboratório. Os objetivos desse experimento são medir a impedância do piezelétrico sob altas potências, compará-las com a impedância medida em baixa potência e medir a eficiência do amplificador classe D utilizado.

Nesse experimento, as tensões HV_{cc} adotadas foram de 37V, 74V, 110V e 148V. Isso gerou uma tensão quadrática entre os terminais da ponte de MOSFETS de 70Vpp, 140Vpp, 204Vpp e 272Vpp, respectivamente. As frequências utilizadas na onda quadrada oriunda da ponte de MOSFETS foram a $f_R = 27,225\text{kHz}$ e $f_A = 28,775\text{kHz}$.

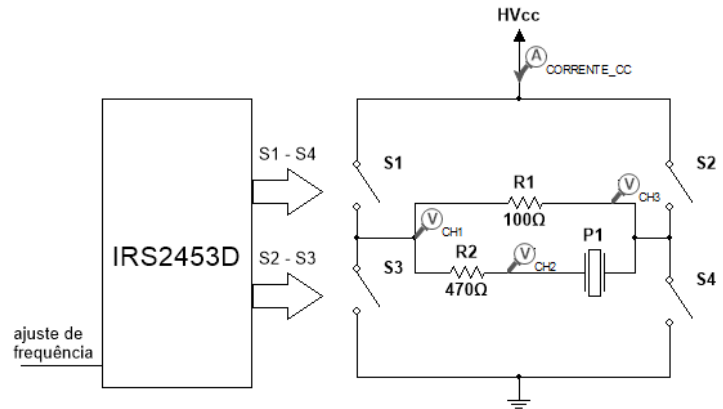


Figura 22: Circuito Piezelétrico

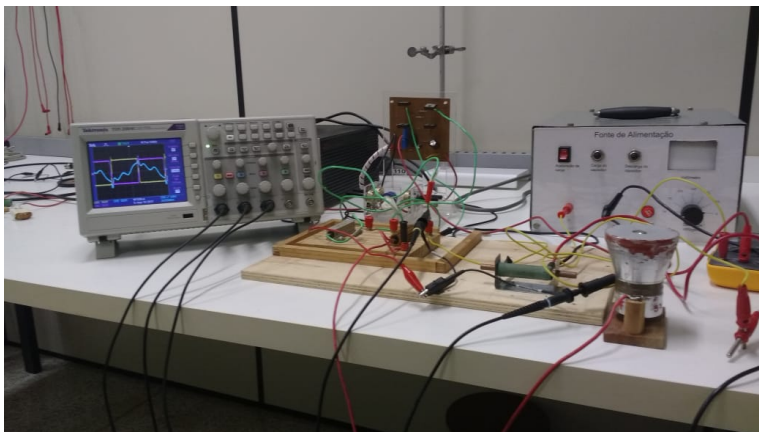


Figura 23: Foto do experimento realizado em laboratório

Os resultados do experimento mostraram a existência de uma frequência de ressonância experimental ($f_R = 26,75\text{kHz}$), cujo valor diverge da frequência de ressonância teórica ($f_R = 27,225\text{kHz}$). Essa afirmação é constatada observando-se a diferença da tensão no canal CH2 utilizando a frequência de ressonância teórica (Figura 24) e a frequência de ressonância experimental (Figura 25), ambas utilizando $HV_{cc} = 37\text{V}$.

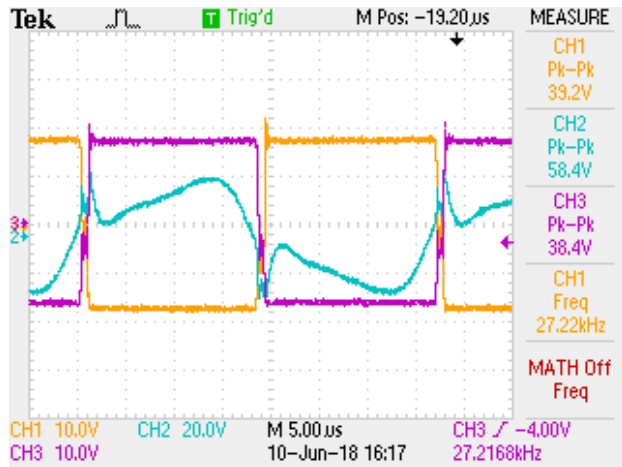


Figura 24: Tensões em CH1 (amarelo), CH2 (azul) e CH3 (rosa) utilizando a frequência de ressonância teórica

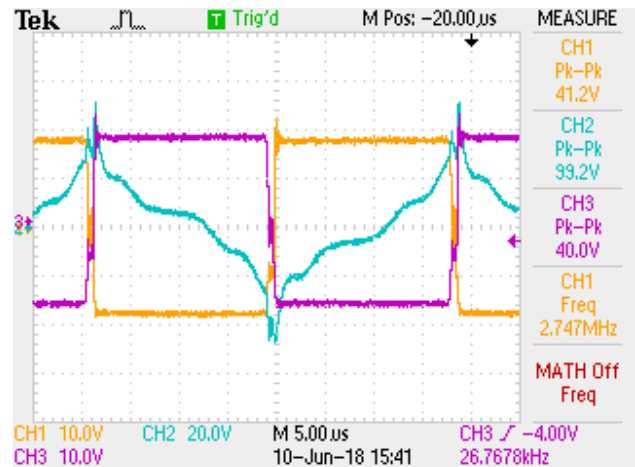


Figura 25: Tensões em CH1 (amarelo), CH2 (azul) e CH3 (rosa) utilizando a frequência de ressonância experimental

O método utilizado para descobrir a frequência de ressonância experimental foi de configurar a ponte de MOSFETS com uma frequência ligeiramente menor que f_R teórico e aumentando-a gradativamente até que se encontre a máxima tensão de pico em CH2 (Figura 25), antes que, com o constante do aumento da frequência, a tensão caia bruscamente (Figura 24).

Analisando o resultado dos experimentos, pode-se concluir que não é possível realizar uma inspeção visual no osciloscópio para descobrir a frequência de anti-ressonância. A Figura 26 mostra as tensões em CH1, CH2 e CH3, com $HV_{cc} = 37V$ e utilizando com frequência na saída da ponte de MOSFETS a frequência de anti-ressonância teórica ($f_A = 28,775kHz$). Observando o canal CH2, percebe-se que a tensão não obedece um padrão definido (como se tinha observado para a f_R experimental).

Para se obter uma f_A experimental, foi analisado o amperímetro localizado em série com a fonte de tensão HV_{cc} . A frequência de oscilação da ponte de MOSFETS variou entre os valores de f_A teórico, para se descobrir em qual frequência a corrente era a menor. Como a f_A apresenta a maior impedância de um piezelétrico, quando o amperímetro apontasse a menor corrente, significa que o piezelétrico se encontra com a maior impedância possível.

Utilizando o método acima, descobriu-se que a f_A experimental é igual a 28,775kHz, ou seja, a f_A teórica e a f_A experimental apresentam o mesmo valor.

Para fins de análise de resultados, foi decidido adotar os valores de f_R experimental ($f_R = 26,75kHz$) e de f_A experimental ($f_A = 28,775kHz$).

Os valores do amperímetro colocado em série a fonte de tensão HV_{cc} estão apresentados na Tabela 1.

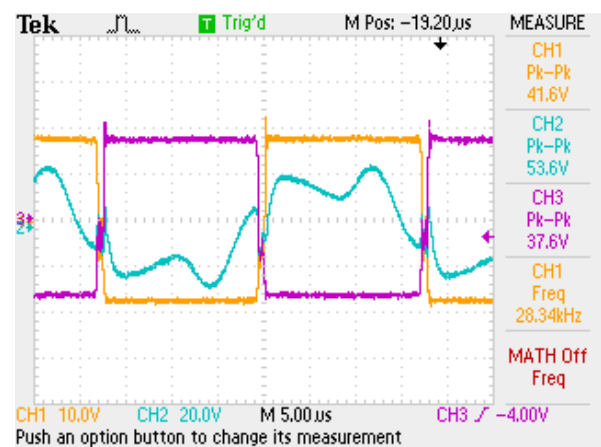


Figura 26: Tensões em CH1 (amarelo), CH2 (azul) e CH3 (rosa) utilizando a frequência de anti-ressonância

Tabela 1: Corrente CC da fonte HVcc

HVcc (V)	Corrente na f_R (A)	Corrente na f_A (A)
37	0,364	0,319
74	0,725	0,640
110	1,057	0,940
148	1,384	1,230

A Figura 27 e Figura 28 mostram, respectivamente, o comportamento da corrente de um piezelétrico na f_R experimental e f_A experimental para HVcc = 148V. Já a Figura 29 e Figura 30 mostram, respectivamente, o comportamento da tensão de um piezelétrico na f_R experimental e f_A experimental para HVcc = 148V. Todas essas medidas foram realizadas com HVcc = 37V, 74V, 110V e 148V.

Em relação as medidas envolvendo HVcc = 110V e 148V, é importante ressaltar que, por conta da alta potência incidida sobre os componentes, foi necessário realizar as medições de forma rápida. Era necessário conectar HVcc ao circuito, salvar os dados dos canais do osciloscópio no pendrive e verificar o valor do amperímetro muito rapidamente (em torno de 5 segundos). Caso passasse desse tempo, o resistor de 470 Ω já começava a apresentar sinais de que a potência incidida nele era maior do que ele suportava (cheiro de queimado e fumaça). Sendo assim, algumas pequenas variações na frequência fornecida pela ponte de MOSFETS que ocorriam casualmente no experimento não podiam ser modificadas.

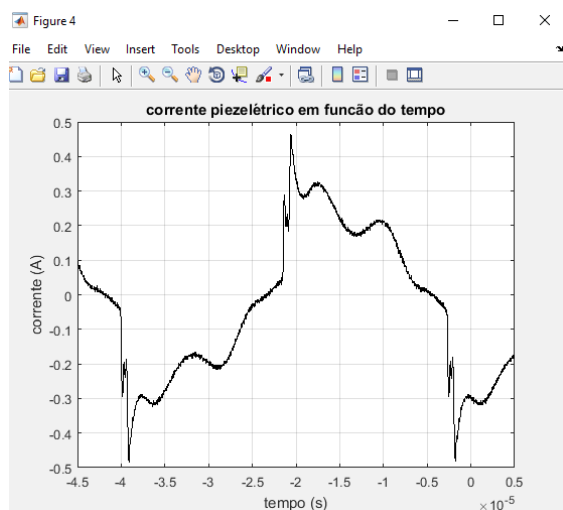


Figura 27: Corrente em função do tempo para HVcc = 148V e usando a frequência de ressonância

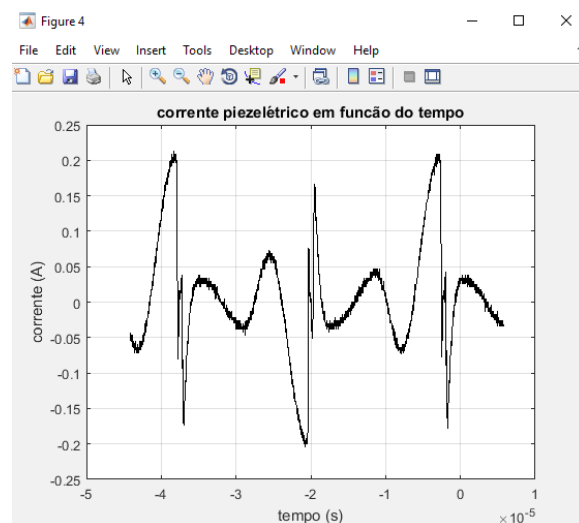


Figura 28: Corrente em função do tempo para HVcc = 148V e usando a frequência de anti-ressonância

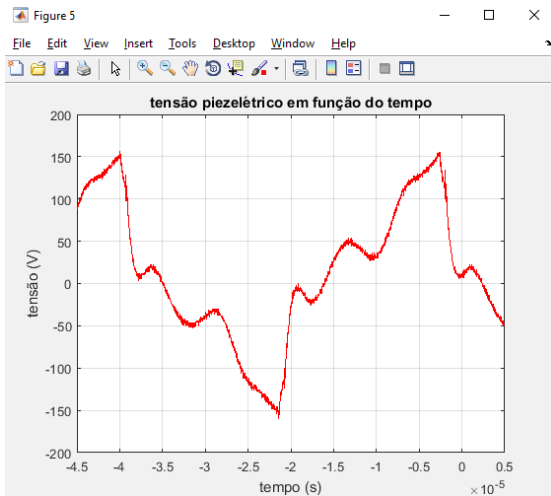


Figura 29: Tensão em função do tempo para $HV_{cc} = 148V$ e usando a frequência de ressonância

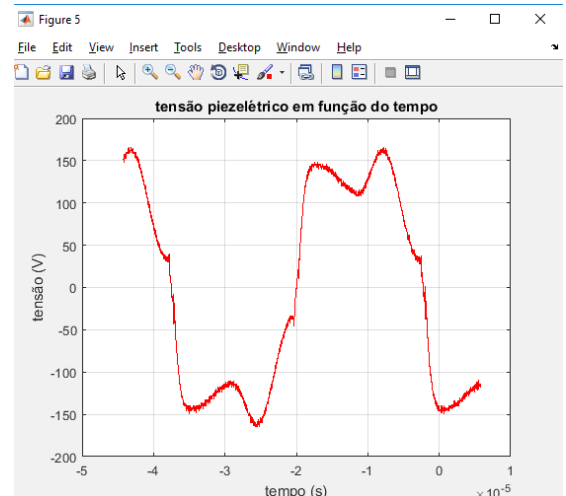


Figura 30: Tensão em função do tempo para $HV_{cc} = 148V$ e usando a frequência de anti-ressonância

No MatLab, os valores de tensões obtidos nos canais do CH1, CH2 e CH3 do osciloscópio foram importados e o cálculo da corrente foi feito utilizando a Equação (37). Já o cálculo da tensão submetida no piezométrico foi calculada utilizando a Equação (38).

$$i = \frac{V_{CH1} - V_{CH2}}{R_2} \quad (37)$$

$$v = V_{CH2} - V_{CH3} \quad (38)$$

Sendo:

- V_{CH1} = A tensão medida com o canal CH1 do osciloscópio;
- V_{CH2} = A tensão medida com o canal CH2 do osciloscópio;
- V_{CH3} = A tensão medida com o canal CH3 do osciloscópio;
- R_2 = resistência de 470Ω , ligada em série com o piezométrico P_1 .

O cálculo do módulo da impedância do piezométrico em f_R e f_A experimental foi realizado no MatLab, utilizando a Equação (3). Utilizando a Equação (3) para os quatro valores de HV_{cc} , obtém-se o módulo da impedância $|Z|$ em f_R e f_A experimentais (Tabela 2).

Tabela 2: Módulo da impedância $|Z|$ em f_R e f_A experimentais.

Hvcc (V)	$ Z $ ressonância (Ω)	$ Z $ anti-ressonância (Ω)
37	310,1	764,6
74	337,7	780,3
110	338,7	784,1
148	333,0	791,3

Os resultados obtidos na Tabela 2 mostram que o aumento da tensão quadrática em f_R experimental no piezelétrico (por conta do aumento da tensão HVcc) implicou em mudanças na impedância do piezelétrico, mas não apresentou regularidade na mudança. Ainda de acordo com a Tabela 2, o aumento da tensão quadrática em f_A faz aumentar impedância do piezelétrico, mas esse aumento não é linear.

Uma das possíveis razões para que não tenha se apresentado regularidade na impedância do piezelétrico em f_R é a oscilação na frequência quadrática que a ponte de MOSFETS mostrou no experimento e, em tensões de HVcc = 110V e 148V, essa frequência era inviável de ser regulada.

Outra possível causa que pode estar interferindo nos resultados é o ruído que a ponte de MOSFETS apresenta. Por mais que tenha um resistor R_1 de 100Ω em paralelo com o piezelétrico (garantindo uma baixa impedância no circuito), um pequeno ruído ainda era identificado no osciloscópio (Figura 24). Estes ruídos podem ter influenciado significativamente o valor da tensão medida no osciloscópio, alterando, assim, a tensão original a qual o piezelétrico estava sendo submetida.

O uso do resistor de R_1 de 100Ω aumentou consideravelmente o consumo de potência da fonte HVcc. Por conta dessa variável não prevista no começo do experimento, não foi possível obter a potência do piezelétrico e, conseqüentemente, o rendimento do amplificador Classe D.

Contudo, foi possível calcular a potência da fonte HVcc (Equação (34)). A potência da fonte se encontra na Tabela 3.

Tabela 3: Potência na fonte HVcc

HVcc (V)	Potência em f_R (W)	Potência em f_A (W)
37	13,5	11,8
74	53,7	47,4
110	116,3	103,4
148	204,8	182

O módulo da impedância em f_A é maior do que em f_R (conforme Figura 5). Dessa forma, a corrente que circula no piezelétrico quando a onda quadrática tem frequência igual a f_A é menor do que em f_R . Conseqüentemente, a potência em f_A é menor do que em f_R , conforme mostrado experimentalmente na Tabela 3.

Embora os resultados não tenham apresentado regularidades, foi possível medir a impedância do piezelétrico sob altas potências e compará-las com as medições em baixas potências. Além disso, como discutido anteriormente, não foi possível medir a eficiência do amplificador classe D. Desta forma, os objetivos do experimento foram parcialmente alcançados.

IV.4.4 Experimento 4 – Transdutor Piezelétrico com L_0 em paralelo sob Elevadas Potências

A Figura 31 mostra o transdutor piezelétrico P_1 em paralelo com L_0 . Ambos estão em série com R_2 , e, estes, em paralelo com R_1 . Os objetivos desse experimento são medir a impedância do piezelétrico sob altas potências, compará-las com a impedância medida em baixa potência e medir a eficiência do amplificador classe D utilizado.

Assim como no experimento anterior, as tensões HVcc adotadas foram de 37V, 74V, 110V e 148V. As frequências utilizadas na onda quadrada oriunda da ponte de MOSFETS foram a $f_R = 27,225\text{kHz}$ e $f_A = 28,775\text{kHz}$.

De acordo com a Equação (36), o valor ideal de L_0 é igual a $L_0 = 10,772\text{mH}$. Para fins experimentais, os valores utilizados no experimento (encontrados no laboratório) foram:

- $L_0 = 3\text{mH}$
- $L_0 = 11,5\text{mH}$
- $L_0 = 16,3\text{mH}$

Os resultados dos experimentos mostraram que, assim como na Figura 22, existe um f_R experimental que diverge do f_R teórico = $27,225\text{kHz}$. O método utilizado para se descobrir o f_R experimental é similar ao método adotado no subtópico “anterior”.

No circuito da Figura 22 (piezelétrico sem L_0), a frequência experimental apresentava valor igual a $26,75\text{kHz}$.

Entretanto, no circuito da Figura 31, os resultados experimentais mostraram que, para $L_0 = 3\text{mH}$, f_R experimental = 27kHz e, para $L_0 = 11,5\text{mH}$ e $L_0 = 16,3\text{mH}$, f_R experimental = $26,77\text{kHz}$.

Dessa forma, a inserção de L_0 em paralelo ao piezelétrico (Figura 31) faz com que f_R experimental se desloque. Para se descobrir um padrão nos valores experimentais de f_R , foi colocado um indutor de década em L_0 , para que seu valor fosse alterado para valores menores e maiores que $L_0 = 10,772\text{mH}$.

Os resultados desse experimento mostraram que:

- Para $L_0 < 10,772\text{mH} \Rightarrow f_R \text{ experimental} = 27\text{kHz}$;
- Para $L_0 > 10,772\text{mH} \Rightarrow f_R \text{ experimental} = 26,77\text{kHz}$.

Assim como no experimento anterior, pode-se concluir da análise dos resultados que não é possível realizar uma inspeção visual no osciloscópio para descobrir a frequência de anti-ressonância.

Dessa forma, o método adotado para se encontrar a frequência de anti-ressonância para cada valor de L_0 foi de observar o gráfico do módulo da impedância em função da frequência.

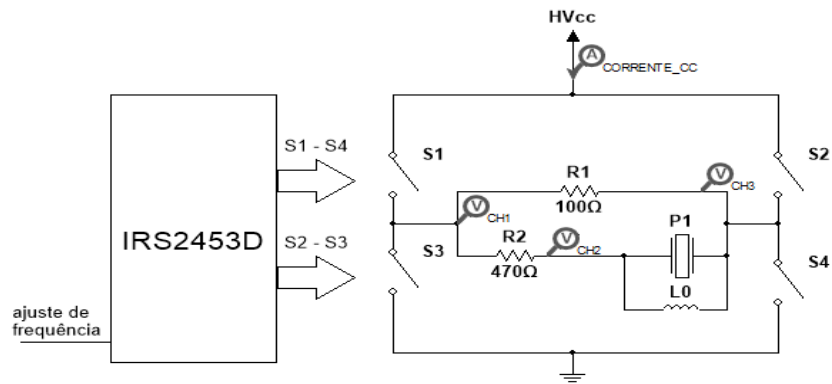


Figura 31: Circuito Piezelétrico com L_0

A Figura 32 mostra o módulo da impedância do piezelétrico com $L_0 = 3\text{mH}$. Comparando com a Figura 6 ($L_0 = 10,772\text{mH}$), observa-se que há um grande deslocamento da f_A superior. Isso mostra que f_A superior depende do valor de L_0 .

- Para $L_0 = 3\text{mH} \Rightarrow f_A$ superior = 50,42kHz
- Para $L_0 = 11,5\text{mH} \Rightarrow f_A$ superior = 31,87kHz
- Para $L_0 = 16,3\text{mH} \Rightarrow f_A$ superior = 30,42kHz

Dessa forma, para cada valor de L_0 , foi adotado um valor distinto para a f_A superior.

Foram realizados três experimentos: O primeiro experimento consistiu em encontrar f_R experimental da Figura 22 (gerando um f_R experimental de 26,75kHz) e, em seguida, inserir L_0 no circuito (conforme a Figura 31).

O segundo experimento consistiu em encontrar f_R experimental da Figura 31 (gerando um f_R experimental igual a 27kHz para $L_0 = 3\text{mH}$ e 26,77kHz para $L_0 = 11,5\text{mH}$ e $L_0 = 16,3\text{mH}$).

No terceiro experimento, a ponte de MOSFETS foi configurada para emitir a frequência de anti-ressonância superior da Figura 31 ($f_A = 50,42\text{kHz}$ para $L_0 = 3\text{mH}$, $f_A = 31,87\text{kHz}$ para $L_0 = 11,5\text{mH}$ e $f_A = 30,42\text{kHz}$ para $L_0 = 16,3\text{mH}$).

Em todos os três experimentos, foram medidas as tensões apresentadas nos canais CH1, CH2 e CH3 do osciloscópio, para, assim, calcular a corrente que percorre o piezelétrico.

Nos três experimentos, foi medida a corrente que circula na fonte de tensão HVcc. Os valores do amperímetro colocado em série a fonte de tensão HVcc estão apresentados na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6.

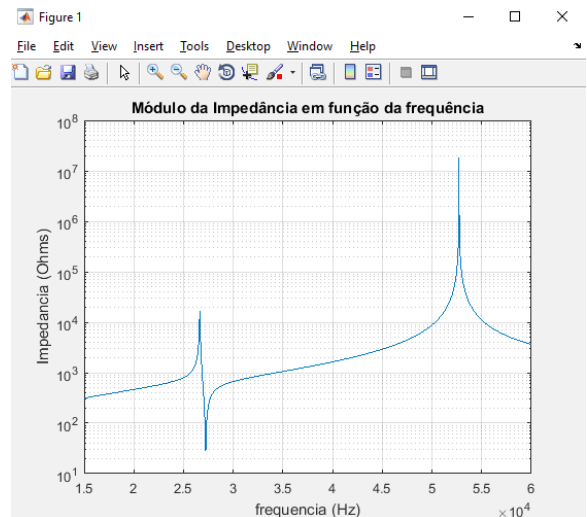


Figura 32: Módulo da Impedância de um Piezoelétrico com $L_0 = 3\text{mH}$

Tabela 4: Corrente CC da fonte HVcc para $L_0 = 3\text{mH}$

HVcc (V)	Corrente (A) em $f_R = 26,75\text{kHz}$	Corrente (A) em $f_R = 27\text{kHz}$	Corrente (A) em $f_A = 50,42\text{kHz}$
37	0,346	0,366	0,320
74	0,693	0,730	0,641
110	1,013	1,068	0,931
148	1,330	1,404	1,219

Tabela 5: Corrente CC da fonte HVcc para $L_0 = 11,5\text{mH}$

HVcc (V)	Corrente (A) em $f_R = 26,75\text{kHz}$	Corrente (A) em $f_R = 26,77\text{kHz}$	Corrente (A) em $f_A = 31,87\text{kHz}$
37	0,357	0,375	0,335
74	0,712	0,708	0,665
110	1,027	0,995	0,994
148	1,340	1,340	1,349

Tabela 6: Corrente CC da fonte HVcc para $L_0 = 16,3\text{mH}$

HVcc (V)	Corrente (A) em $f_R = 26,75\text{kHz}$	Corrente (A) em $f_R = 26,77\text{kHz}$	Corrente (A) em $f_A = 30,42\text{kHz}$
37	0,357	0,359	0,334
74	0,711	0,715	0,669
110	1,035	1,039	0,97
148	1,345	1,306	1,316

Assim como ocorreu com o circuito da Figura 22, em relação as medidas envolvendo HVcc = 110V e 148V, por conta da alta potência incidida sobre os componentes, foi necessário realizar as medições de forma rápida. Sendo assim, algumas pequenas variações na frequência fornecida pela ponte de MOSFETS que ocorriam casualmente no experimento não podiam ser modificadas.

O cálculo do módulo da impedância do piezelétrico foi realizado utilizando a Equação (3). O módulo da impedância $|Z|$ para os três tipos de experimentos se encontra na Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 7: Módulo da impedância para $L_0 = 3\text{mH}$

HVcc (V)	$ Z $ (Ω) em $f_R = 26,75\text{kHz}$	$ Z $ (Ω) em $f_R = 27\text{kHz}$	$ Z $ (Ω) em $f_A = 50,42\text{kHz}$
37	328,3	322,7	450,8
74	330,0	354,7	447,0
110	325,8	328,5	397,7
148	316,2	324,0	385,6

Tabela 8: Módulo da impedância para $L_0 = 11,5\text{mH}$

HVcc (V)	$ Z $ (Ω) em $f_R = 26,75\text{kHz}$	$ Z $ (Ω) em $f_R = 26,77\text{kHz}$	$ Z $ (Ω) em $f_A = 31,87\text{kHz}$
37	315,8	320,9	447,5
74	330,6	359,5	548,8
110	335,1	402,1	423,3
148	325,8	359,1	371,1

Tabela 9: Módulo da impedância para $L_0 = 16,3\text{mH}$

HVcc (V)	$ Z $ (Ω) em $f_R = 26,75\text{kHz}$	$ Z $ (Ω) em $f_R = 26,77\text{kHz}$	$ Z $ (Ω) em $f_A = 30,42\text{kHz}$
37	325,1	320,2	428,2
74	344,7	352,5	479,5
110	342,8	377,1	642,0
148	337,1	691,1	361,9

Os resultados obtidos na Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9 mostram que, assim como no experimento anterior, o aumento da tensão quadrática em f_R e f_A no piezelétrico implicou em mudanças na impedância do piezelétrico, mas não apresentou regularidade na mudança.

Como discutido anteriormente, as possíveis razões para que não te tenha apresentado regularidade na impedância do piezelétrico é:

- A oscilação na frequência quadrática que a ponte de MOSFETS mostrou no experimento;
- A inviabilidade de corrigir essa oscilação de frequência em $HV_{cc} = 110V$ e $148V$;
- O ruído que a ponte de MOSFETS apresentou em sua saída.

Ainda discutido anteriormente, por conta do uso do resistor R_1 de 100Ω , não foi possível obter o rendimento do amplificador Classe D. A potência da fonte HV_{cc} (Equação (34)) pôde ser obtida e ela se encontra na Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 10: Potência na fonte HV_{cc} com $L_0 = 3mH$

HV_{cc} (V)	Potência (W) em $f_R = 26,75kHz$	Potência (W) em $f_R = 27kHz$	Potência (W) em $f_A = 50,42kHz$
37	12,8	13,5	11,8
74	51,3	54	47,4
110	111,4	117,5	102,4
148	196,8	207,8	180,4

Tabela 11: Potência na fonte HV_{cc} com $L_0 = 11,5mH$

HV_{cc} (V)	Potência (W) em $f_R = 26,75kHz$	Potência (W) em $f_R = 26,77kHz$	Potência (W) em $f_A = 31,87kHz$
37	13,2	13,9	12,4
74	52,7	52,4	49,2
110	113	109,5	109,3
148	198,3	198,3	199,7

Tabela 12: Potência na fonte HV_{cc} com $L_0 = 16,3mH$

HV_{cc} (V)	Potência (W) em $f_R = 26,75kHz$	Potência (W) em $f_R = 26,77kHz$	Potência (W) em $f_A = 30,42kHz$
37	13,2	13,3	12,4
74	52,6	53	49,5
110	113,9	114,3	106,7
148	199	193,3	194,8

O módulo da impedância em f_A superior é maior do que em f_R (conforme Figura 7). Dessa forma, a corrente que circula no piezelétrico quando a onda quadrática tem frequência igual a f_A superior é menor do que em f_R . Consequentemente, a potência em f_A superior é menor do que em f_R , conforme mostrado experimentalmente na Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12.

Devido à similaridade nos valores de f_R encontrados na Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12, as potências f_R encontradas ($f_R = 26,75kHz$, $f_R = 26,77kHz$ e $f_R = 27kHz$) são similares.

Assim como no experimento anterior, os resultados referentes a impedância do piezelétrico não apresentaram regularidades. Contudo, foi possível medir a impedância do piezelétrico sob altas potências e compará-las com as medições em baixas potências. Além disso, como discutido anteriormente, não foi possível medir a eficiência do amplificador classe D. Desta forma, os objetivos do experimento foram parcialmente alcançados.

V. Conclusões

Com base nos objetivos do trabalho, pode-se concluir que foi desenvolvido um aparato experimental para a medição de tensões, corrente e diferença de fase em transdutores piezelétricos sob potências elevadas. Embora não se tenha abordado a questão da diferença de fase no trabalho (o enfoque foi a medição do módulo da impedância do piezelétrico), os valores de tensões medidos são suficientes para se medir a fase em que o piezelétrico se encontra. A tensão máxima de excitação do piezelétrico foi de 272Vpp, superando a tensão de excitação de 200V previamente planejada.

Os valores de impedância elétrica sob potências elevadas foram obtidos e esses valores foram comparados com impedância obtidas sob baixas potências. Não foi detectado regularidade na impedância, com o aumento da tensão aplicada ao piezelétrico. As justificativas para essa não regularidade concernem aos ruídos e as oscilações de frequência que a ponte de MOSFETS emitia e a impossibilidade de se fazer ajustes na frequência da ponte, quando alimentado sob altas potências. Para trabalhos futuros, uma alternativa para se diminuir a interferência do ruído no piezelétrico seria colocar a função Average no osciloscópio.

Por conta de dificuldades técnicas associadas a saída da ponte de MOSFETS, não foi possível aferir a eficiência do amplificador Classe D ao alimentar uma carga piezelétrica. Entretanto, com o valor da corrente medida na fonte de tensão contínua HVcc, foi possível medir a potência que a fonte fornecia, e comparar as potências da mesma quando o piezelétrico estava submetido a frequência de ressonância e a frequência de anti-ressonância.

VI. Referências Bibliográficas

- [1] - BATTILANA R.B. **Uma nova técnica de correção de frequência em transdutores piezelétricos utilizando inteligência artificial**. Limeira, 2017. Dissertação (Mestrado em Sistemas da Informação e Comunicação). Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Tecnologia
- [2] - PROKIC, M. **Piezoelectric Transducers Modeling and Characterization**. Suíça: MPI, 2004
- [3] – The Institute of Electrical and Electronic Engineers. **Standard Definitions und Methods of Measurement for PIEZOELECTRIC VIBRATORS**. 345 East 47. Street, New York, N.Y. 1966.
- [4] - ANAIS DO XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 35, 2017. **Correção dinâmica de frequência de transdutores piezelétricos utilizando um sistema computacional inteligente**. São Pedro. 2017. 1034-1038
- [5] - AGBOSSOU, K. et al. Class D Amplifier for a Power Piezoelectric Load. **IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control**. v. 4, n. 4, p. 1036-1041, julho. 2000