

Relatório de Laboratório – EE522

Vitor Bergamaschi Dos Santos - 248212

Vinicius De Lima Quadrado - 225357

Leonardo Souza Boaventura - 250417

EXPERIMENTO IV: Crosstalk

Data: 30/05/2025

1 Objetivos

Nas seções abaixo seguem os objetivos de cada seção do experimento.

1.1 Crosstalk

Nesta seção será tratada a interferência de campos elétricos e magnéticos entre trilhas de circuito impresso, também conhecido como crosstalk, avaliando a influência da distância e da orientação entre as trilhas na indução de tensão em trilhas e circuitos vizinhos. Também será comparada a diferença na tensão induzida quando usado sinais de ondas senoidais e quadradas, em diferentes frequências. Por fim discutiremos a razão do ganho de tensão em função da frequência para três circuitos, dentre eles dois com trilhas paralelas e outro com trilhas perpendiculares.

1.2 Casamento de impedância

Será discutido o fenômeno de reflexão de sinais em linhas de transmissão e com isso avaliar a importância do casamento de impedâncias entre fonte, linha e carga. Iremos observar também que existem situações em que o casamento de impedância é desejado ou indesejado.

2 Procedimento Experimental

Nas seções abaixo seguem os procedimentos experimentais de cada seção do experimento.

2.1 Seção I - Crosstalk em Placa de Circuito Impresso

Abaixo seguem as seções que descrevem a montagem, equipamentos utilizados e procedimento de execução do Crosstalk em Placa de Circuito Impresso.

2.1.1 Montagem

Utilizou-se a placa com esquemático mostrado na figura 1, com quatro trilhas, uma de alimentação (A), P1, P2 e P \perp . As trilhas com orientação paralela em relação a trilha A são as trilhas P1 e P2, com distância entre A de 1 e 2 milímetros, respectivamente. A trilha perpendicular a A é a trilha P \perp .

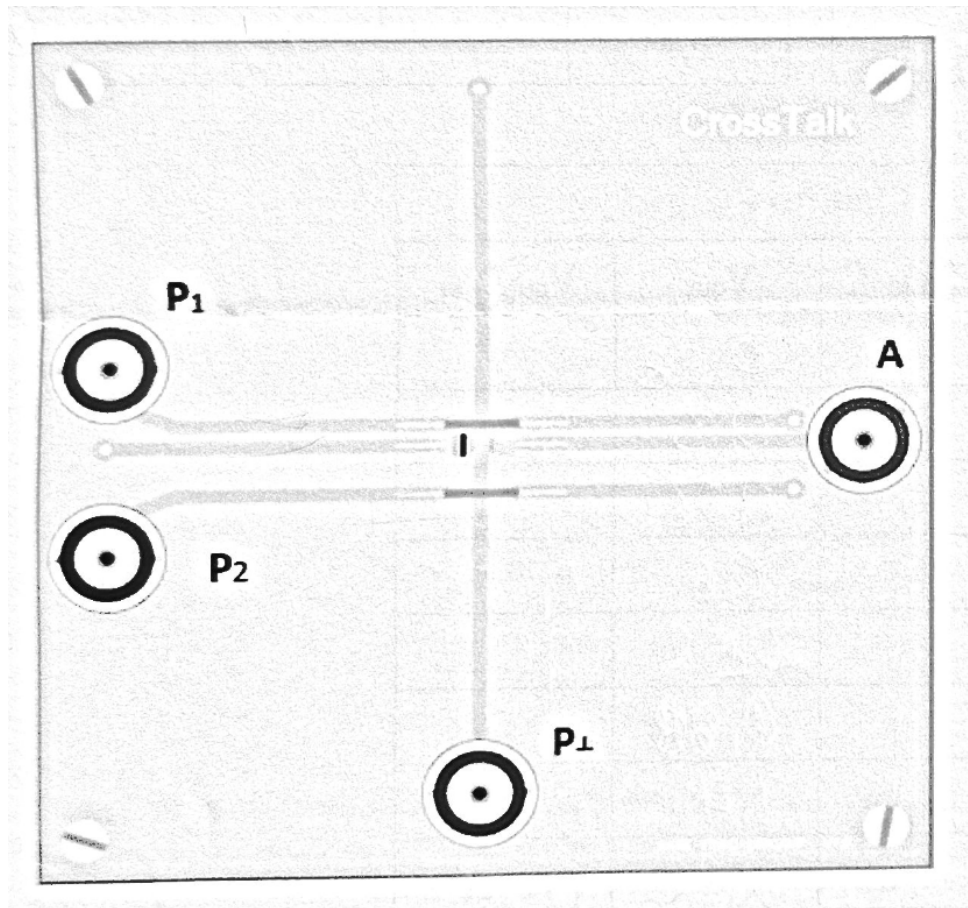


Figura 1: Esquemático da placa de circuito impresso utilizada no experimento

Liga-se o gerador de sinais ao conector A e liga-se a trilha de interesse ao osciloscópio, ambas conexões são feitas via cabo coaxial.

2.1.2 Equipamentos utilizados

Foram usados um gerador de sinais configurado com output de 10 Vpp e frequência variável, um osciloscópio, dois cabos coaxiais e uma placa de circuito impresso customizada.

2.1.3 Execução

Fixou-se a nível da tensão de entrada em 10Vpp, e iniciamos o processo de aumentar a frequência do gerador em conectado a trilha A. Para cada trilha de medição (p1, p2, P \perp) foi colhido o valor vpp da tensão induzida dada uma frequência definida. Na sequência medimos também a tensão induzida em P1 e P \perp para o caso de onda quadrada, em função de um rol menor de frequências. Por fim calculou-se a razão do ganho de tensão V_{out}/V_{in} para cada ponto de cada circuito.

2.2 Seção II - Casamento de Impedâncias / Reflexão de Sinais em Linhas de Transmissão

Abaixo seguem as seções que descrevem a montagem, equipamentos utilizados e procedimento de execução do experimento de Casamento de Impedâncias e Reflexões de Sinais em Linhas de Transmissão.

2.2.1 Montagem

O aparato experimental desta seção do estudo consiste em um cabo BNC conectando diretamente um gerador de sinais a um osciloscópio, conforme diagrama esquemático da figura 2.

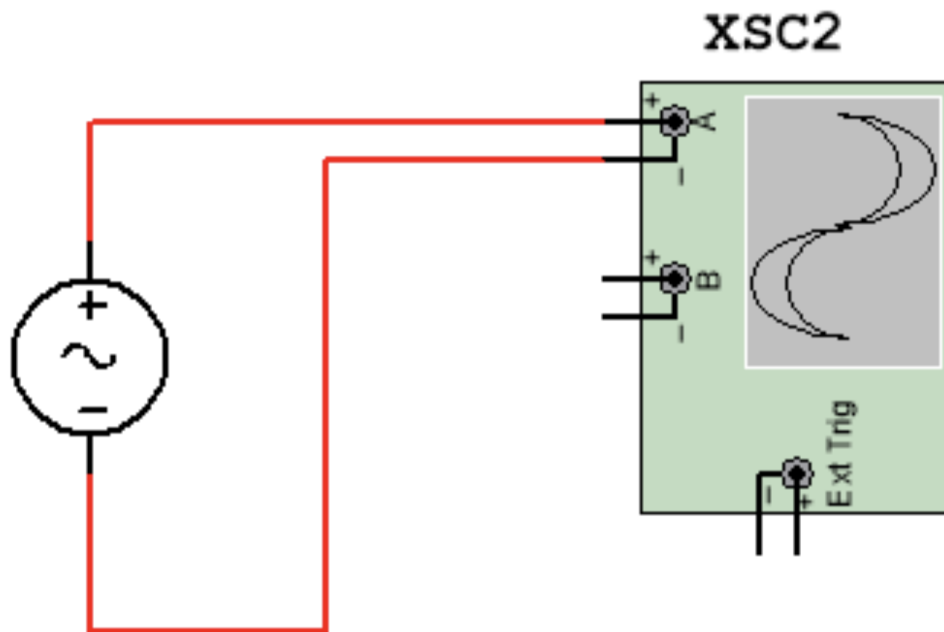


Figura 2: Esquemático do experimento de Casamento de Impedâncias

2.2.2 Equipamentos utilizados

Nesta parte do experimento, foram utilizados um cabo BNC curto, um osciloscópio e um gerador de sinais configurado para produzir sinais de onda senoidal e onda quadrada de 10 Vpp.

2.2.3 Execução

O objetivo desta seção é analisar a amplitude do sinal lido pelo osciloscópio nesta configuração apresentada e qual o efeito de se conectar uma resistência de 50 ohm em paralelo a entrada A do osciloscópio. Com base em conhecimento prévio de circuitos elétricos, espera-se que a baixa resistência conectada na entrada do osciloscópio diminua a impedância de entrada do mesmo, para valores próximos de 50 ohm, pela própria regra de associação de resistores. Uma menor impedância de entrada no osciloscópio acarreta em menos sinal recebido pelo mesmo, isto é, uma parte do sinal é dispersada em outra parte do circuito.

Na sequência, utilizou-se um conector T a saída do gerador de sinais para fornecer um sinal de onda quadrada de 10 Vpp e frequência 100 kHz, valores definidos arbitrariamente durante o experimento. O diagrama da figura 3 elucida o modo de conexão do circuito, onde o Canal 1 do osciloscópio é conectado diretamente na saída do gerador e o Canal 2 é conectada na carga:

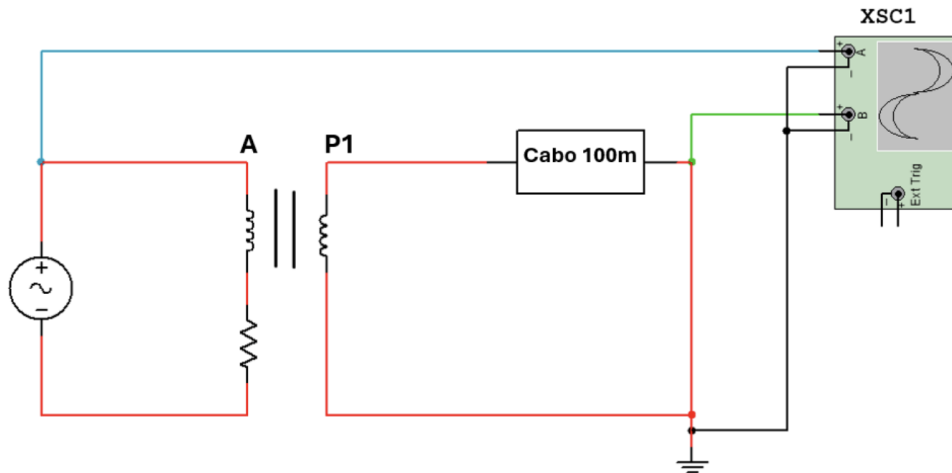


Figura 3: Esquemático do experimento de Casamento de Impedâncias com conector T

A carga, neste caso, é um cabo BNC de 100 m, que liga o conector P1 da placa ao Canal 2 do osciloscópio, que está conectado por indução a trilha do conector A da placa que é alimentada pela fonte.

Aqui, deseja-se observar e comparar as formas de onda obtidas em cada canal, a fim de estudar o fenômeno de reflexão de sinais em circuitos. Ainda sem as medições, podemos inferir que o circuito montado é equivalente ao circuito esquematizado na figura 4.

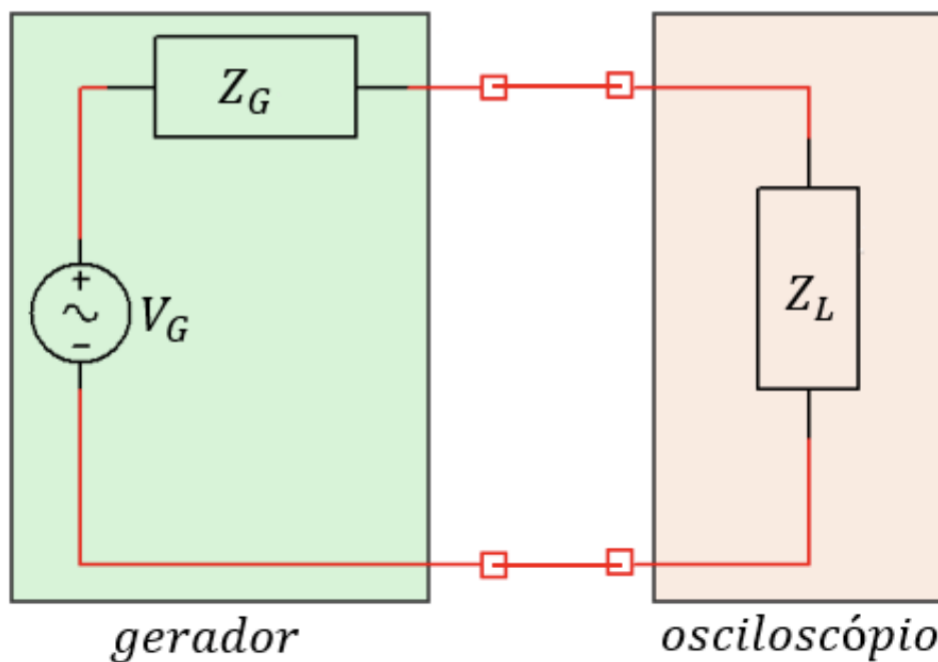


Figura 4: Circuito equivalente ao experimento de Casamento de Impedâncias

Isto é, apesar de não haver conexão galvânica entre o gerador e o osciloscópio, o sinal é transmitido como se houvesse uma, devido a indução do sinal aplicado na trilha A na trilha P1. É possível calcular a relação entre o sinal de saída e o sinal de entrada:

$$\eta = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_L}{Z_L + Z_G} \quad (1)$$

Aqui temos que a impedância de entrada do osciloscópio é de aproximadamente $Z_L = 1M\Omega$, e a resistência a ser conectada em paralelo a entrada do osciloscópio é de 50Ω . Assim, podemos essa relação nos casos sem e com a resistência Z_G conectada:

- Sem resistência conectada:

$$Z_L = Z_L \quad (2)$$

$$\eta = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_L}{Z_L + Z_G} = \frac{10^6}{10^6 + 50} \approx 1 \quad (3)$$

- Com resistência conectada:

$$Z_L = \frac{Z_L \cdot 50}{Z_L + 50} = \frac{10^6 \cdot 50}{10^6 + 50} \approx 50 \quad (4)$$

$$\eta = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_L}{Z_L + Z_G} = \frac{50}{50 + 50} = \frac{1}{2} \quad (5)$$

Nota-se então que o efeito da conexão da resistência de 50Ω em paralelo ao osciloscópio é uma redução em 50% do sinal de entrada. Avaliando isso na prática, obtêm-se as medições conforme as das figuras 5 e 6.

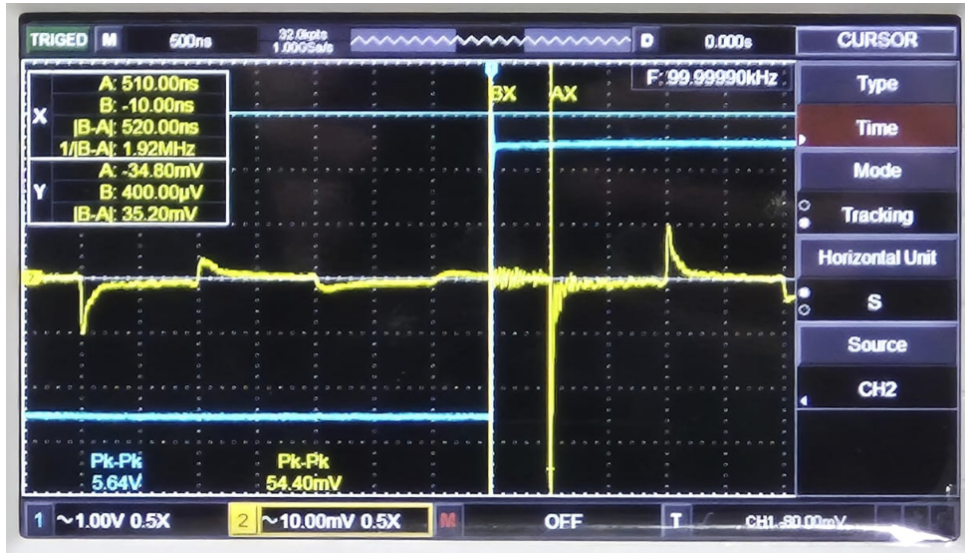


Figura 5: Sinal de entrada sem resistência de 50Ω conectada

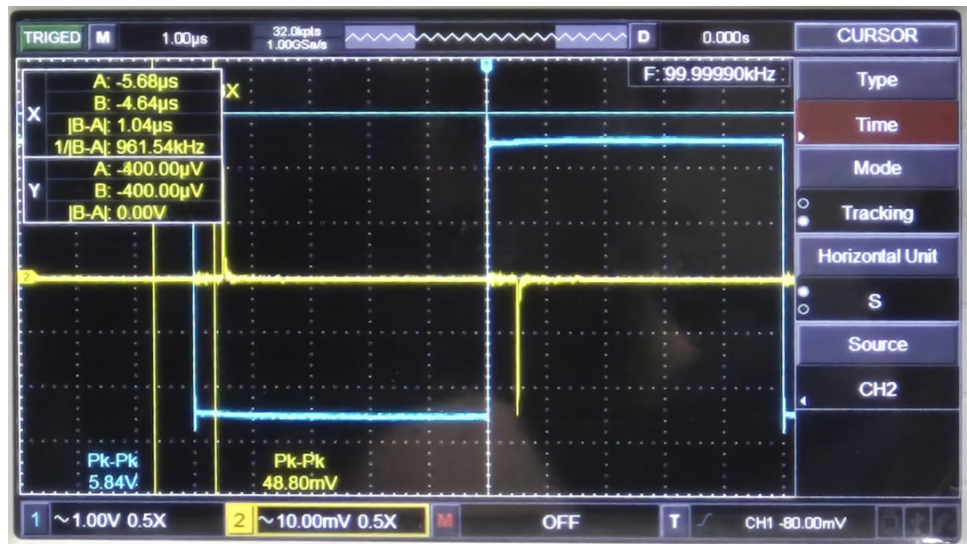


Figura 6: Sinal de entrada com resistência de 50Ω conectada

Além da redução da amplitude do sinal, ao conectar uma resistência de 50Ω paralela ao osciloscópio, o que se está fazendo é casando a impedância da carga com a da fonte, de forma a eliminar a reflexão do sinal, tanto é que não se observam mais as oscilações após o primeiro pico, o que significa um sinal mais fidedigno à aquele produzido na fonte.

3 Resultados

Nas seções abaixo seguem as discussões dos resultados de cada seção do experimento.

3.1 Seção I - Crosstalk em Placa de Circuito Impresso

Nestas seções apresentaremos os dados, os equipamentos utilizados e o método de execução desta seção

3.1.1 Apresentação de dados

Os gráficos 7, 8 e 9 representam respectivamente os ganhos de tensão de entrada em A e tensão induzida em P1, P2 e P \perp , em função da frequência da tensão de entrada. As tabelas dos dados obtidos no experimento estão disponíveis no anexo A.

Já a tabela 1 mostra os ganhos de tensão de entrada em A e tensão induzida em P1 e P \perp , para o caso de onda quadrada, em três frequências distintas.

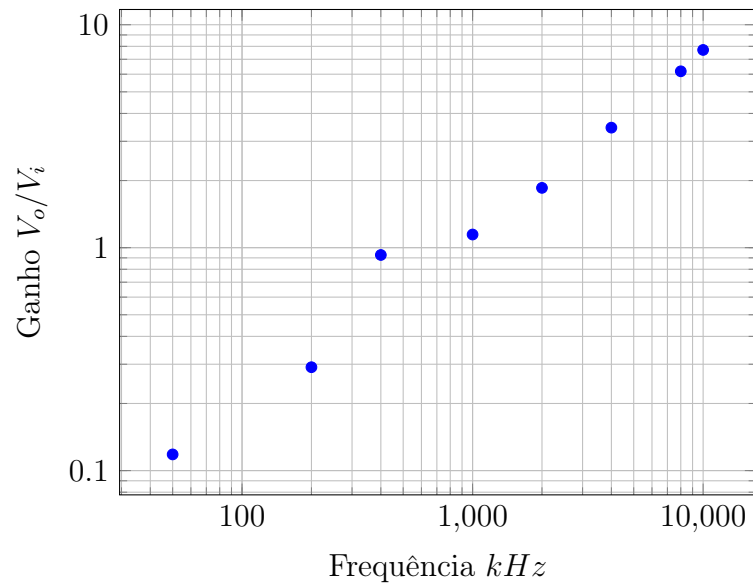


Gráfico 7: Ganho em função da frequência para o circuito P1

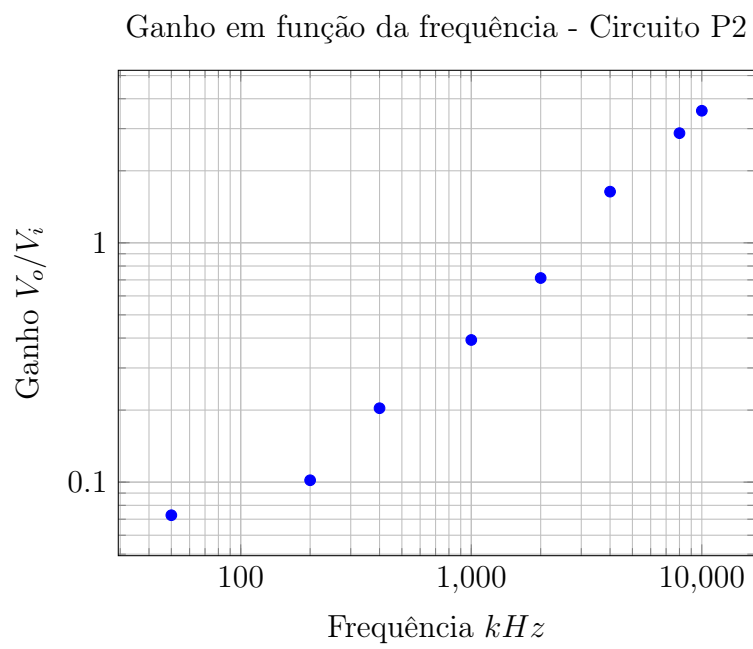


Gráfico 8: Ganho em função da frequência para o circuito P2

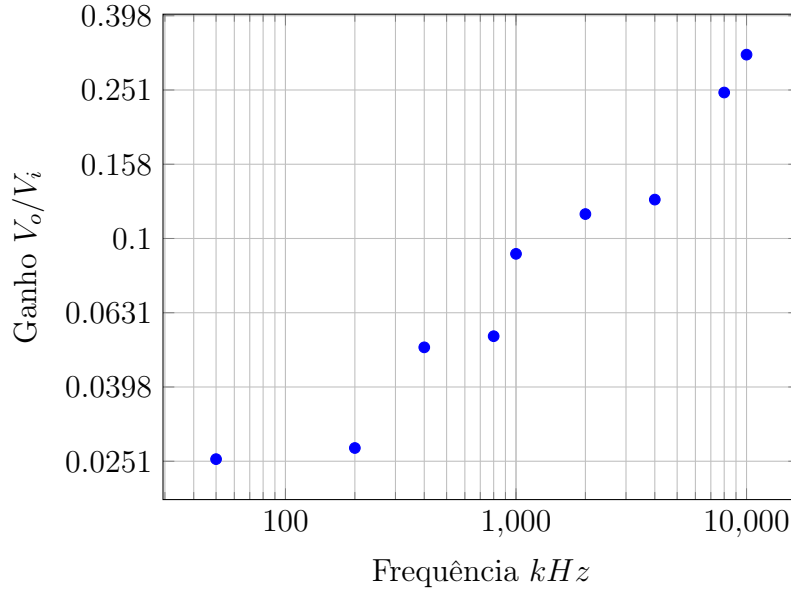


Gráfico 9: Ganho em função da frequência para o circuito P⊥

| freq (kHz) | Circuito P1 | | Circuito P | |
|------------|-------------|----------------|------------|----------------|
| | V_{in} | V_{out} (mV) | V_{in} | V_{out} (mV) |
| 50 | 11 | 1.5 | 10 | 0.24 |
| 1000 | 11 | 21.6 | 10 | 20 |
| 10000 | 11 | 200 | 10 | 30 |

Tabela 1: Ganho em função da frequência - Onda Quadrada

3.1.2 Análise qualitativa

A lei de Faraday 6 nos diz que a força eletromotriz induzida em um circuito fechado é igual ao negativo da variação no tempo do fluxo magnético através da área limitada pelo circuito fechado.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{S} \quad (6)$$

Com isto verificamos que a tensão induzida (força eletromotriz) na bobina dos circuitos P1, P2 e P⊥ é diretamente proporcional ao fluxo magnético que as atravessa. O campo magnético gerado pela corrente que está no circuito fechado A gera o fluxo magnético necessário para ocorrer a indução magnética.

Através dos resultados obtidos, nota-se que a proximidade entre bobinas A e P1 ou A e P2 é inversamente proporcional à tensão induzida: P1 com distanciamento de 1mm de A possui maior tensão induzida que P2 com distanciamento de 2mm de A.

Também como resultado do experimento, notou-se maior ganho de tensão conforme o aumento da frequência de alimentação, e isso está previsto na Lei de Faraday. O fluxo magnético cresce quando a variação do campo magnético cresce, então aumentar a frequência causa a derivada temporal do campo magnético aumentar. Por isso, em todos os casos vistos a tensão induzida é sempre maior quando a frequência é maior.

A Lei de Faraday da forma enunciada acima prevê que o circuito fechado descrito esteja perpendicular à direção do fluxo magnético. Todavia, quando temos um fluxo magnético em direção qualquer, o dA é multiplicado pelo cosseno do ângulo entre a direção do fluxo magnético e o vetor de área de A , vemos isso na equação 7.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{S} \cdot \cos(\theta) \quad (7)$$

Então foi montada uma espira perpendicular a outra, portanto $\theta=90^\circ$, o cosseno de θ é nulo e temos uma tensão induzida nula, segundo a Lei de Faraday.

Através dos resultados obtidos com as bobinas A e $P \perp$ notamos uma tensão induzida baixíssima e proporcional a frequência. Apesar do resultado esperado ser tensão induzida nula, temos que levar em consideração que as bobinas não estão perfeitamente perpendiculares e isso é suficiente para induzir tensão em $P \perp$.

Por fim testamos os circuitos P1 e $P \perp$ com ondas quadradas nas frequências de 50, 1000 e 10.000 KHz, em ambos os casos tivemos um ganho de tensão substancialmente maior do que para as ondas senoidais. Isso se deve a termos variações abruptas no sinal, na região de degrau da onda, onde temos uma maior derivada temporal da corrente em A, consequentemente uma maior derivada do campo magnético e um maior fluxo de campo magnético.

3.2 Seção II - Casamento de Impedâncias / Reflexão de Sinais em Linhas de Transmissão

Nestas seções apresentaremos os dados, os equipamentos utilizados e o método de execução desta seção

3.2.1 Análise qualitativa

A reflexão de sinais em linhas de transmissão ocorre quando um sinal elétrico, ao se propagar por um cabo ou trilha, encontra uma descontinuidade de impedância (como por exemplo a diferença entre a impedância da linha e a impedância da carga). Parte da energia do sinal é refletida então de volta à fonte, interferindo no sinal original. Esse fenômeno é particularmente crítico em circuitos de linhas de transmissão longas, circuitos que operam em altas frequências ou até mesmo que operam com sinais de onda quadrada, o que quer dizer lidar com variações abruptas de sinal, circuitos onde tais reflexões causam distorções como oscilações e sobressinal (overshooting), comprometendo a integridade do sinal.

No experimento realizado, essas teorias foram validadas ao utilizar um cabo BNC de 100 m conectado a uma placa de circuito impresso com acoplamento indutivo entre as trilhas A (transmissora) e P1 (receptora). Quando o sinal de onda quadrada (10 Vpp, 100 kHz) foi transmitido:

- Sem casamento de impedância (carga = $1M\Omega$ do osciloscópio):

Observou-se reflexão significativa, evidenciada pelo ringing no Canal 2. A amplitude medida (-48 mV) foi reduzida e instável, pois a alta impedância da carga refletiu quase toda a energia, impedindo sua dissipação eficiente.

- Com casamento de impedância (resistor de 50Ω em paralelo com a carga):

As reflexões foram eliminadas, resultando em um sinal estável no Canal 2. A amplitude reduziu para -32 mV, não por reflexão, mas pelo efeito de divisor de tensão entre a impedância do gerador (50Ω) e a carga casada (50Ω).

Este comportamento confirma que o casamento de impedâncias em circuitos elétricos é essencial para garantir a integridade do sinal transmitido, embora o preço a se pagar por isso é sacrificar parte da amplitude do sinal.

4 Conclusão

Conclui-se, para o experimento de crosstalk, que a proximidade de trilhas em uma placa de circuito impresso geram tensão induzida nas trilhas vizinhas, e que a tensão induzida é proporcional a frequência de operação e inversamente proporcional à distância, logo devemos projetar placas de circuito impresso que levem em consideração estes fatores.

Para o experimento de casamento de impedâncias, conclui-se que a ausência de casamento entre impedâncias resulta em reflexões dos sinais, causando perdas de potência e integridade do sinal. Para transmissão de potência o casamento é importante, porém para situações onde desejamos medir o sinal, devemos ter no instrumento de medição uma impedância muito maior que a do circuito, evitando que o instrumento interfira no circuito, modificando o sinal.

5 Bibliografia

WIKIPÉDIA. Lei de Faraday-Neumann-Lenz. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Faraday-Neumann-Lenz . Acesso em: 29/05/2025.

Anexo A - Tabelas de dados do experimento de Crosstalk

| Frequência (kHz) | V_{in} (mV) | V_{in} (mV) | V_{out}/V_{in} |
|------------------|---------------|---------------|------------------|
| 50 | 11 | 1.3 | 0.11818 |
| 200 | 11 | 3.2 | 0.29091 |
| 400 | 11 | 10.2 | 0.92727 |
| 1000 | 11 | 12.6 | 1.14545 |
| 2000 | 11 | 20.4 | 1.85455 |
| 4000 | 11 | 38 | 3.45455 |
| 8000 | 11 | 68 | 6.18182 |
| 10000 | 11 | 84.8 | 7.70909 |

Tabela 2: Ganho de tensão induzida em P1 por A

| Frequência (kHz) | V_{in} (mV) | V_{in} (mV) | V_{out}/V_{in} |
|------------------|---------------|---------------|------------------|
| 50 | 11 | 0.8 | 0.07273 |
| 200 | 11 | 1.12 | 0.10182 |
| 400 | 11 | 2.24 | 0.20364 |
| 1000 | 11 | 4.32 | 0.39273 |
| 2000 | 11 | 7.84 | 0.71273 |
| 4000 | 11 | 18 | 1.63636 |
| 8000 | 11 | 31.6 | 2.87273 |
| 10000 | 11 | 39.2 | 3.56364 |

Tabela 3: Ganho de tensão induzida em P2 por A

| Frequência (kHz) | V_{in} (mV) | V_{in} (mV) | V_{out}/V_{in} |
|------------------|---------------|---------------|------------------|
| 50 | 11 | 0.28 | 0.02545 |
| 200 | 11 | 0.3 | 0.02727 |
| 400 | 11 | 0.56 | 0.05091 |
| 800 | 11 | 0.6 | 0.05455 |
| 1000 | 11 | 1 | 0.09091 |
| 2000 | 11 | 1.28 | 0.11636 |
| 4000 | 11 | 1.4 | 0.12727 |
| 8000 | 11 | 2.72 | 0.24727 |
| 10000 | 11 | 3.44 | 0.31273 |

Tabela 4: Ganho de tensão induzida em P_{\perp} por A