

*Esse documento mostra uma possível abordagem física e experimental para investigar o fenômeno, **mas não se limite a ela!** Há inúmeras formas diferentes de analisar qualquer problema da IYPT.*

Capacitor Cantante

Certos tipos de capacitores cerâmicos emitem um som audível quando uma tensão alternada é aplicada entre seus terminais. Investigue as características do som produzido e como elas dependem de parâmetros relevantes, como tensão, frequência e propriedades do capacitor.



1 Enunciado

O enunciado propõe a análise dos sons emitidos por um capacitor de cerâmica, ou MLCC¹, quando certos parâmetros são variados, a fim de encontrar a relação entre os parâmetros e o fenômeno. Dessa forma, espera-se que (a) os parâmetros relevantes sejam identificados, seguidos de (b) análises qualitativas e quantitativas sobre o fenômeno para que (c) a influência de cada variação seja encontrada.

1.1 Questionamentos Iniciais

De onde é originado o som audível? Quais são as características relevantes dos capacitores de cerâmica e da voltagem alternada para a ocorrência da emissão de som? Quais são os fatores limitantes para que o som seja audível?

1.2 Parâmetros

Para avaliar extensivamente o fenômeno, considere os seguintes parâmetros relevantes:

- **Condições do circuito**
 - Tensões AC e DC.
- **Caracterização do capacitor:**
 - Material do dielétrico;
 - Número de camadas do MLCC (relacionado à capacitância).
- **Condições iniciais:**
 - Forma de acoplamento do capacitor à PCB²;
 - Posição do capacitor em relação à PCB.

¹Em inglês, "Multilayer Ceramic Chip Capacitors". No português: Chip de capacitor de cerâmica multicamadas.

²Em inglês, "Printed Circuit Board". No português: placa de circuito impresso.

2 Análise Qualitativa

2.1 Conceitos Físicos Importantes

- **Piezeletricidade**

1. **Definição:** É a capacidade de gerar tensão elétrica em resposta à aplicação de uma tensão mecânica e vice-versa. Em uma aproximação de baixa ordem, é diretamente proporcional à tensão mecânica. Ocorre em cristais cujas redes cristalinas não possuem centro de simetria. A palavra vem do grego "piezo", que significa "apertar".
2. **Como afeta:** Os dielétricos dos capacitores de cerâmica multicamadas (MLCC) são compostos por um material piezoelétrico. Geralmente, o composto é o titanato de bário, o qual é ferroelétrico e piezoelétrico. Por conta disso, quando submetemos um MLCC a uma voltagem, há a geração de uma tensão mecânica, ou seja, vibrações. A transmissão da vibração do material dielétrico para a PCB forma o som audível (daí o nome "capacitor cantante").

- **Eletrostrição**

1. **Definição:** Mudança do tamanho de qualquer material dielétrico quando ele é submetido a um campo elétrico. Em uma aproximação de baixa ordem, há um comportamento quadrático em relação ao campo elétrico aplicado.
2. **Como afeta:** Causa deformação do material dielétrico. Junto com o efeito piezoelétrico, são responsáveis pela vibração dos capacitores de cerâmica e consequente emissão de um som audível.

- **Cristais Ferroelétricos**

1. **Definição:** São materiais dielétricos que possuem polarização elétrica espontânea. Essa polarização pode ser invertida ou alterada pela aplicação de um campo elétrico externo.
2. **Como afeta:** O titanato de bário, que compõe diversos capacitores de cerâmica, apresenta ferroeletricidade, devido também à estrutura assimétrica de sua rede cristalina. Isso possibilita a piezeletricidade.

- **Corrente Alternada (AC) e Contínua (DC)**

1. **Definição de AC:** Componente da corrente que varia ao longo do tempo, frequentemente periódica. Essa componente é causada por uma tensão alternada.
2. **Definição de DC:** Componente da corrente que se mantém fixa ao longo do tempo. Essa componente é causada por uma tensão constante.
3. **Como afeta:** A tensão aplicada ao capacitor pode ser descrita como a soma das componentes contínua (DC) e alternada (AC). A componente DC possui campo elétrico aproximadamente constante, enquanto a AC varia periodicamente com a frequência angular:

$$E(t) = E_{DC} + E_{AC} \cos(\omega t)$$

A ocorrência do segundo harmônico pode ser compreendida ao analisar a deformação eletrostritiva do material, a qual é proporcional ao quadrado do campo elétrico:

$$E^2(t) = E_{DC}^2 + \frac{E_{AC}^2}{2} + 2E_{DC}E_{AC} \cos(\omega t) + \frac{E_{AC}^2}{2} \cos(2\omega t).$$

O termo proporcional a $\cos(\omega t)$ corresponde à frequência fundamental. O outro termo proporcional a

$\cos(2\omega t)$ corresponde ao segundo harmônico. A presença da componente DC influencia a amplitude da resposta na frequência fundamental, por meio do termo $2E_{DC}E_{AC}$. Já o segundo harmônico pode surgir da própria componente AC, sendo proporcional a E_{AC}^2 .

3 Sugestão de Experimental

3.1 Materiais do Aparato

- **Capacitor de Cerâmica Multicamada (MLCC):** Recomenda-se a utilização de um capacitor de titanato de bário (amplamente estudado). É importante que informações como capacitância e número de camadas sejam conhecidas.
- **Placa de Circuito (PCB):** É a principal responsável por emitir um som audível para nós. Outra ideia é imprimir sua própria placa, obtendo maior controle de seu tamanho.
- **Objeto de Conexão entre Capacitor e Placa:** Ele é responsável por prender o capacitor à placa, de forma que o capacitor pode ter contato ou não com ela. Seu material (normalmente solda), formato e posição afetam a transmissão da vibração e consequente emissão do som audível.
- **Fonte Elétrica:** Permite o controle e a variação da tensão elétrica.
- **Cabos condutores e Resistor:** O resistor permite maior controle da constante de tempo e limitação da corrente.

3.2 Equipamentos e Forma de Extração de Dados

Existem diversas maneiras de analisar o fenômeno. Algumas analisam a vibração em si, enquanto outras, o som. Note que uma análise mais acurada pode ser realizada ao comparar a análise do som com a da vibração.

- **Nível de Pressão Sonora:** Mede a variação de pressão que o som exerce sobre um sensor. Um microfone, um analisador de FFT (Transformada Rápida de Fourier) e uma câmara anecoica podem ser utilizados.
- **Vibrômetro Laser Doppler:** Mede vibrações superficiais no capacitor/PCB sem haver contato. De forma geral, é mais preciso, porém, o equipamento é caro.
- **Sensor de Fibra Óptica:** Utiliza uma fibra de vidro (sensor) para iluminar a placa e coletar a luz refletida. Contudo, ainda há poucas informações na literatura sobre o uso desse equipamento para detectar vibrações no fenômeno do capacitor cantante.
- **Software de Transformada Rápida de Fourier (FFT):** Algoritmo matemático usado para decompor um sinal complexo em suas frequências constituintes. Permite a análise da vibração gerada pelo capacitor.

3.3 Metodologia

- **Preparo do sistema:** Monte o circuito, conectando a fonte ao capacitor e ao resistor. Sugerimos que você utilize um MLCC em formato de caixa (SMD) e solde suas extremidades laterais à placa. Há diversos estudos de formas de soldar visando minimizar a emissão de som. Na figura 1 há um exemplo retirado do artigo “Singing Multilayer Ceramic Capacitors and Mitigation Methods”, de Covaci e Gontean.
- **Medição do Som:** Posicione o dispositivo que você utilizará como medidor próximo ao capacitor. Evite ruídos e, se possível, crie uma câmara anecoica.
- **Análise do Som:** Importe a medição no software de FFT. Obtenha gráficos de frequência e amplitude em relação a variação do número de camadas, tensão, etc. Explore a sensibilidade da frequência fundamental e

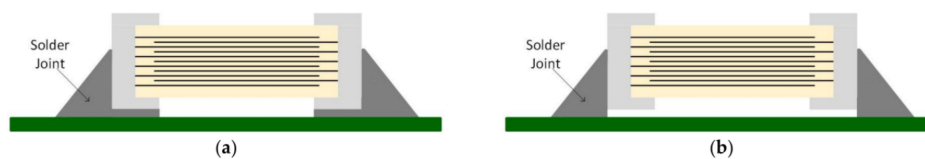


Figura 1: Duas maneiras diferentes de acoplamento do capacitor à placa utilizando a soldagem. Note que, em (a), a superfície de contato do capacitor com a solda é maior do que em (b), o que causa maior transmissão das vibrações à placa.

do segundo harmônico e tente relacionar os resultados com as tensões AC e DC.

- **Tratamento dos Dados:** Organize em uma planilha os resultados experimentais.

3.4 Cuidados Experimentais, Incertezas e Possíveis Erros

- **Influência de Sons Externos:** Realize o experimento em um ambiente fechado e mais isolado possível. Construa uma câmara anecoica.
- **Ambiente estável:** Mantenha os equipamentos de medição e o próprio aparato em posições estáticas, para que haja influência mínima de vibrações externas. O contato direto entre a mesa e a placa pode mascarar a vibração real do fenômeno. Utilize amortecedores.
- **Resistência Interna:** Não se esqueça de considerar as resistências internas dos capacitores e da própria fonte de alimentação. Analise outras possíveis alterações de resistências geradas, por exemplo, pelo aquecimento.
- **Solda:** Garanta que a solda esteja bem fixa à placa e ao capacitor.

3.5 Limites Experimentais

- **Contato com Outros Objetos:** Ainda que a prevenção de contato entre a placa e outros suportes seja efetuada, ainda haverá pequenos efeitos externos na vibração da placa e do capacitor.
- **Sensibilidade e Resolução dos Analisadores:** Microfones convencionais perdem a sensibilidade nos extremos do espectro audível. O FFT possui limitações de resolução combinada entre tempo e frequência.
- **Isolamento Acústico Perfeito:** Mesmo com o uso de câmaras anecoicas, ruídos externos de baixa frequência podem atravessar barreiras físicas.

3.6 Investigações Adicionais

Para analisar as diferentes grandezas relacionadas ao fenômeno e/ou contornar os diferentes limites experimentais, você pode tentar:

- Investigar utilizando diferentes equipamentos de medição experimental. Dessa forma, você pode comparar os resultados de uma análise do som com os de uma análise da vibração.
- Encontrar uma tensão ou capacitância limite para a emissão de um som audível.
- Investigar diferentes formas de acoplamento do capacitor à placa. Isso engloba mudar o formato ou material da junção e alterar a orientação e posição do capacitor na placa (teste geometrias variáveis).
- Realizar o mesmo experimento utilizando um capacitor convencional e verificar se há vibração e possível emissão de som.

4 Referências para Estudo

Esse problema explora fenômenos físicos específicos e não muito contemplados por livros de física conceituais. Dessa forma, o estudo é feito sobretudo com artigos.

- **Kit de Referência da IYPT** (inglês), material excelente para encontrar artigos e vídeos sobre o fenômeno;
- **“Singing” multilayer ceramic capacitors and mitigation methods—A review.** de C. Covaci e A. Gontean, um artigo fundamental para compreender a teoria e metodologias experimentais;
- **Eletrodinâmica (capítulos 2 e 4) de David J. Griffiths**, um livro de eletromagnetismo cujos capítulos mencionados são essenciais para compreender a eletrostática e campos elétricos na matéria.