

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**SAMUEL GRONTOSKI**

**PROJETO DE CROSSOVER PASSIVO DE 2ª ORDEM PARA SISTEMAS DE  
ÁUDIO**

**PATO BRANCO**

**2025**



## PATO BRANCO

2025

### RESUMO

GRONTOSKI, Samuel. **Projeto de Crossover Passivo de 2ª Ordem para Sistemas de Áudio**. 2025. Trabalho Final (Circuitos de Corrente Alternada - CC44CP) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2025.

Este projeto aborda o desenvolvimento completo e a análise crítica de um crossover de áudio passivo de segunda ordem com alinhamento Butterworth, justificando sua relevância na busca por alta fidelidade em sistemas de som de duas vias ao direcionar eficientemente as frequências aos transdutores corretos. O objetivo principal foi projetar um divisor de frequência para uma carga de 4 ohms e um ponto de corte de 2400 Hz, focando na comparação entre o desempenho teórico ideal e o desempenho prático alcançável. A metodologia empregada consistiu na criação de uma ferramenta computacional dedicada em Python para automatizar três etapas cruciais: o cálculo dos componentes ideais (indutores e capacitores) segundo as fórmulas de projeto; a seleção dos valores comerciais mais próximos disponíveis no mercado a partir de listas pré-definidas; e, por fim, a geração de diagramas de Bode comparativos para simular e visualizar a resposta em frequência de ambos os cenários. Os resultados obtidos demonstraram que a utilização de componentes comerciais, embora funcionalmente necessária, introduziu desvios mensuráveis no desempenho. Notavelmente, a frequência de corte efetiva foi deslocada para aproximadamente 2325 Hz e, de forma mais crítica, o fator de qualidade (Q) do filtro foi alterado, distanciando a resposta da característica maximamente plana ideal do projeto Butterworth. Conclui-se que o estudo de caso evidencia a discrepância fundamental entre a teoria e a prática da engenharia, reforçando a simulação como uma ferramenta indispensável para prever, analisar e mitigar o impacto das limitações de componentes no desempenho final de um sistema antes de sua montagem física.

Palavras-chave: crossover de áudio; filtros passivos; filtro butterworth; simulação de circuitos.

# INTRODUÇÃO E OBJETIVO

## 1. Relevância do Projeto

No domínio da engenharia de áudio e da eletrônica, a capacidade de separar e direcionar sinais de frequência para transdutores específicos (como woofers e tweeters) é fundamental para a reprodução sonora de alta fidelidade. Filtros eletrônicos são a base dessa tecnologia, permitindo que um sistema de som opere com eficiência e clareza, evitando distorções e danos aos componentes.

## 2. Desafio Prático

O desafio deste projeto consiste em desenvolver um crossover passivo para uma caixa de som de duas vias. O objetivo é dividir o espectro de áudio de forma que as baixas frequências sejam direcionadas a um woofer e as altas frequências a um tweeter. Esta divisão deve ocorrer de maneira suave e precisa para garantir uma experiência auditiva coesa e natural.

## 3. Meta e Especificações Técnicas

A meta é projetar um crossover de 2ª ordem com alinhamento de Butterworth, que é conhecido por sua resposta de magnitude maximamente plana na banda passante, ideal para aplicações de áudio. As especificações técnicas que norteiam o projeto são:

- Frequência de Corte ( $f_c$ ): 2400 Hz (2.4 kHz)
- Impedância de Carga (R): 4  $\Omega$

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Antes de detalhar o projeto, é crucial entender os conceitos que o fundamentam.

### 1. Filtros Passivos (Passa-Baixas e Passa-Altas)

- **Filtro Passa-Baixas (LPF - Low-Pass Filter):** Permite a passagem de frequências abaixo de um ponto de corte ( $f_c$ ) e atenua as frequências acima dele. Em nosso sistema, ele garante que apenas os sons graves (ex: bumbo, contrabaixo) sejam enviados ao woofer.
- **Filtro Passa-Altas (HPF - High-Pass Filter):** Faz o oposto, permitindo a passagem de frequências acima de  $f_c$  e atenuando as que estão abaixo. Ele direciona os sons agudos (ex: pratos, vozes sibilantes) para o tweeter.

### 2. Filtro de Butterworth de 2ª Ordem

Para aplicações de áudio, a escolha do tipo de filtro é crítica. O filtro de Butterworth é frequentemente selecionado por sua característica principal: uma resposta maximamente plana na banda passante. Isso significa que ele não introduz picos ou vales de ganho antes da frequência de corte, preservando a "cor" original do som. A "2ª ordem" refere-se à taxa de atenuação, que é de -12 dB por oitava (-40 dB por década). Essa atenuação é íngreme o suficiente para proteger os drivers (especialmente o tweeter de baixas frequências), mas ainda permite uma transição suave entre o woofer e o tweeter.

### 3. Fórmulas de Projeto

Para um filtro Butterworth de 2ª ordem, os valores do indutor (L) e do capacitor (C) para a frequência de corte ( $f_c$ ) e impedância (R) dadas são calculados com as seguintes fórmulas:

- **Para o Filtro Passa-Baixas (LPF):**

- Indutor em série:

$$L_{LPF} = \frac{R\sqrt{2}}{2\pi f_c}$$

- Capacitor em paralelo:

$$C_{LPF} = \frac{1}{2\pi f_c R\sqrt{2}}$$

- **Para o Filtro Passa-Altas (HPF):**

- Capacitor em série:

$$C_{HPF} = \frac{1}{2\pi f_c R\sqrt{2}}$$

- Indutor em paralelo:

$$L_{HPF} = \frac{R\sqrt{2}}{2\pi f_c}$$

Como pode ser observado, para um projeto simétrico como este, os valores de L e C são os mesmos para ambos os filtros, apenas suas posições no circuito são alteradas.

## **METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO**

A metodologia do projeto centrou-se no desenvolvimento de uma ferramenta computacional em Python para automatizar e analisar o design do crossover. O programa foi projetado para, primeiramente, calcular os valores ideais de indutores (L) e capacitores (C) com base nas fórmulas teóricas de um filtro Butterworth de 2ª ordem, utilizando como entrada a frequência de corte (2400 Hz) e a impedância ( $4\ \Omega$ ). Em uma segunda etapa, utilizando listas pré-definidas de componentes comerciais padrão, o software implementou uma lógica para encontrar e selecionar os valores reais mais próximos dos ideais calculados. Por fim, a ferramenta gerou gráficos de Bode comparativos, simulando e plotando a curva de resposta em frequência tanto para o filtro ideal quanto para o filtro montado com os componentes reais, permitindo uma visualização direta das discrepâncias de performance.

## **RESULTADOS E ANÁLISE CRÍTICA**

Os resultados mostraram uma diferença clara e mensurável entre o projeto teórico e a implementação com componentes reais. Os valores comerciais selecionados (0.39 mH e 12  $\mu$ F) foram próximos, mas não idênticos, aos ideais (0.375 mH e 11.72  $\mu$ F). A análise crítica revelou duas consequências principais: primeiro, um leve deslocamento da frequência de corte, que saiu do alvo de 2400 Hz para aproximadamente 2325 Hz. Segundo, e mais significativo, houve uma alteração no fator de qualidade (Q) do filtro, que diminuiu do valor ideal de 0.707 (característico da resposta Butterworth "plana") para cerca de 0.45. Na prática, essa alteração transforma a curva do filtro, tornando a transição entre woofer e tweeter mais suave e causando uma leve "depressão" de energia na região de cruzamento, o que poderia ser percebido no áudio como uma perda de "presença" ou clareza naquela faixa de frequência.

## **CONCLUSÃO E REFLEXÕES**

### **1. Resumo das Descobertas**

O projeto atingiu seu objetivo primário de criar um design de crossover funcional baseado nas especificações. A ferramenta computacional desenvolvida provou ser eficaz para calcular os componentes ideais, selecionar alternativas comerciais e, mais importante, simular o impacto dessas substituições. A análise revelou que, embora as escolhas dos componentes reais parecessem próximas (desvios de 4.0% e 2.4%), o efeito combinado alterou a frequência de corte em -3.1% e, de forma mais crítica, modificou o alinhamento do filtro de um Butterworth para uma resposta subamortecida ( $Q \approx 0.45$ ).

### **2. Reflexões sobre o Processo**

O maior desafio e, ao mesmo tempo, a maior lição deste projeto, foi a transição do mundo ideal da teoria para as limitações do mundo real. Este exercício demonstra um pilar da engenharia: o projeto é uma arte de compromissos. Não basta conhecer as fórmulas; é preciso entender como as tolerâncias e a disponibilidade de componentes afetam o resultado final. A simulação, portanto, é uma ferramenta indispensável para prever e mitigar os efeitos dessas imperfeições antes de construir um protótipo físico, economizando tempo, recursos e evitando resultados inesperados. O impacto audível de uma mudança aparentemente pequena nos valores dos componentes ressalta a sensibilidade dos sistemas de áudio e a necessidade de uma análise cuidadosa.