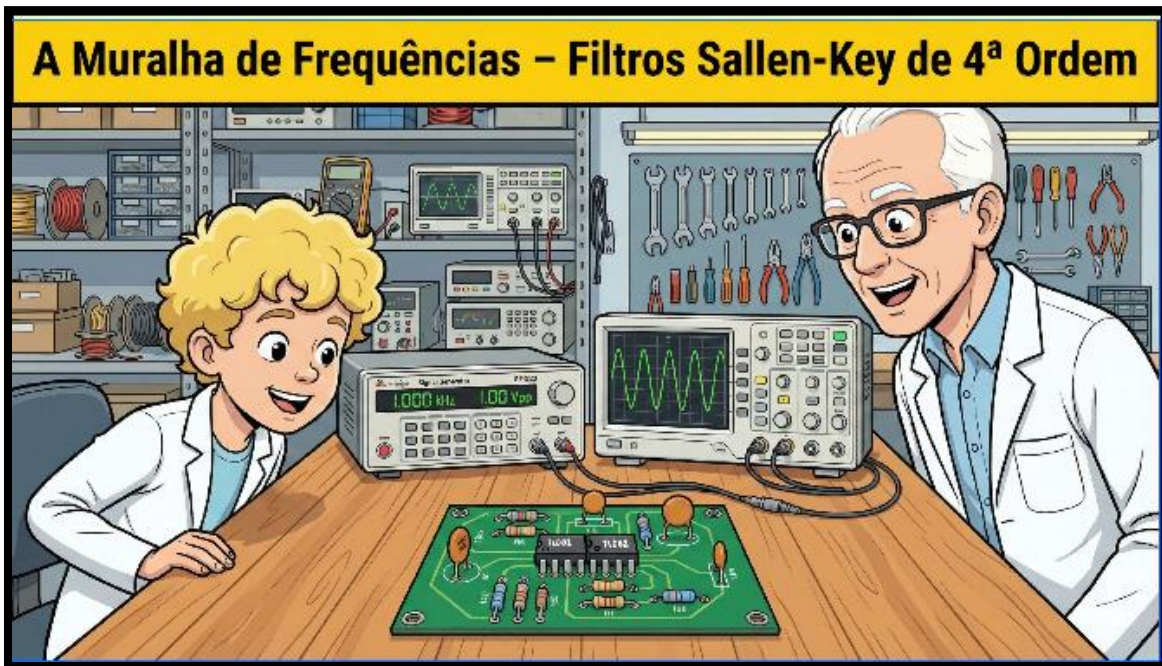


1. A Muralha de Frequências – Filtros Sallen-Key de 4ª Ordem



Descrição

Tutorial avançado sobre filtros Sallen-Key (PB e PA), detalhando equações de 2ª ordem, simplificações Butterworth e o segredo do cascadeamento para 4ª ordem.

#Eletrônica #SallenKey #FiltrosAtivos #ProfessorBairros #Engenharia

www.bairrospd.com

VISITE O SITE DO PROFESSOR BAIROS LÁ EM O PDF E
MUITO MAIS.

PARA AULAS ONLINE CONTATE VIA SITE.

www.bairrospd.com

<https://www.youtube.com/@professorbairros>



Sumário

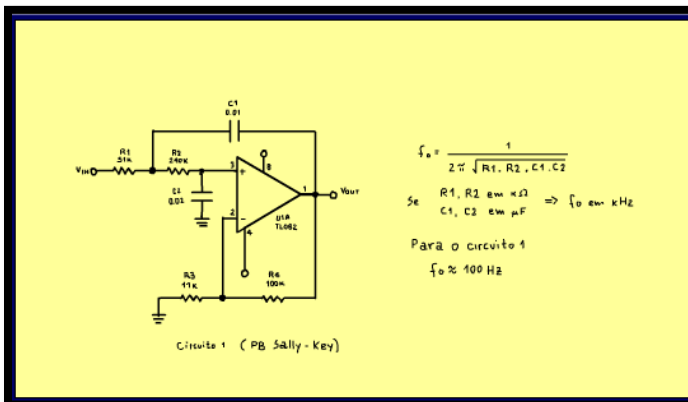
1.	A Muralha de Frequências – Filtros Sallen-Key de 4ª Ordem	1
1.1.	O Desafio do Arthurzinho	3
1.2.	Revisão de Mestre – O Filtro Passa-Baixas (PB)	3
1.3.	O Monstro do Q – Fator de Qualidade e Ganho	4
1.4.	A Dança da Curva (Gráfico do Q)	4
1.5.	O Espelho – O Filtro Passa-Altas (PA)	5
1.6.	Simplicidade Elegante (PB Butterworth Prático)	5
1.7.	A Versão Passa-Altas Butterworth	6
1.8.	A Muralha – 4ª Ordem (PB)	6
1.9.	A Muralha Passa-Altas	7
1.10.	O Dilema da Ordem – Quem vem primeiro?	7
1.11.	Quem Larga Primeiro? (Interação)	8
1.12.	A Anatomia Matemática (Os Polos)	9
1.13.	Analogia da Suspensão	10
1.14.	Conclusão	10
1.15.	Referências	11

1.1. O Desafio do Arthurzinho

Arthurzinho: "Professor, um filtro de segunda ordem já limpa muita coisa... mas e se eu quiser uma 'faxina' pesada? Posso colocar dois filtros em série, a mágica duplica?"

Professor Bairros: "Mais do que duplica, Arthurzinho! Você cria uma verdadeira muralha contra as frequências indesejadas. Chamamos isso de filtro de 4ª ordem. É fácil de fazer, mas o segredo não está só em empilhar componentes, mas em ajustar a 'personalidade' de cada estágio. Vamos abrir a caixa de ferramentas e ver como isso funciona!"

1.2. Revisão de Mestre – O Filtro Passa-Baixas (PB)



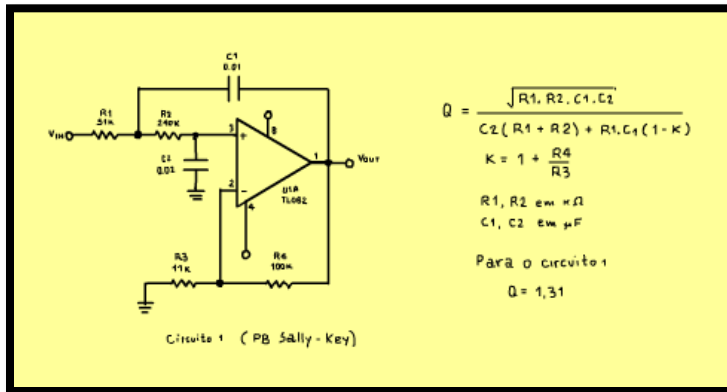
Professor Bairros: "Antes de subir a muralha, vamos revisar a base."

No Sallen-Key Passa-Baixas de 2ª ordem, a frequência onde o sinal começa a cair — nossa frequência de corte — é ditada por esta equação master:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

"Aqui vai o 'pulo do gato' para agilizar seu projeto: se você entrar com as resistências em kΩ e os capacitores em μF, o resultado da sua calculadora já sai direto em kHz! Sem sofrimento com potências de dez."

1.3. O Monstro do Q – Fator de Qualidade e Ganho



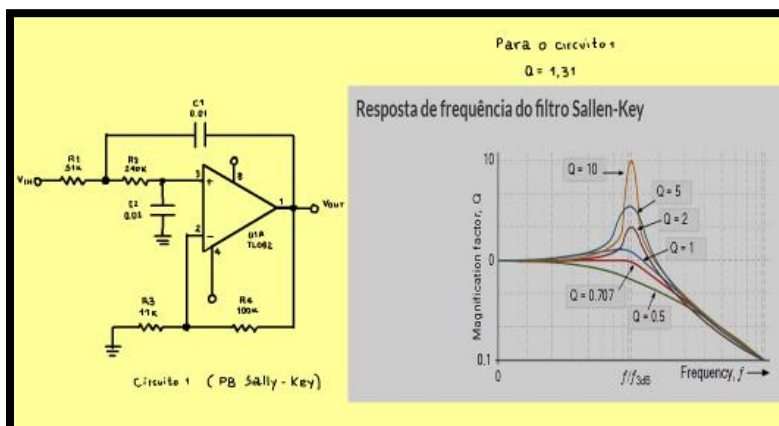
Professor Bairros: "Mas um filtro não vive só de frequência. Temos o Fator de Qualidade, o famoso ' Q '. Ele define se a curva será suave ou terá aquele 'pico' nervoso antes de cair."

Como estamos usando um amplificador não-inversor, o ganho ' K ' entra na conta e bagunça o coreto do fator de qualidade Q :

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_2 (R_1 + R_2) + R_1 C_1 (1 - K)}$$

Esse ganho K é definido por $1 + \frac{R_4}{R_3}$, o ganho do amplificador não inversor. Se você mudar esses resistores, você não muda só o volume, você muda a 'alma' do filtro!"

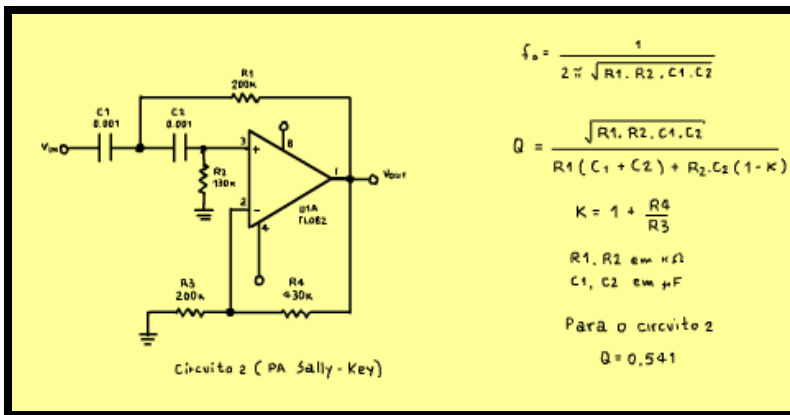
1.4. A Dança da Curva (Gráfico do Q)



Professor Bairros: "Olhem para esse gráfico. Quanto maior o Q , mais 'bicuda' e instável é a resposta perto do corte. Se o Q for muito baixo, o filtro fica 'preguiçoso' e amortece rápido demais." "E qual o ponto ideal?"

Para áudio, buscamos o padrão **Butterworth**, com $Q = 0,707$. É a resposta mais plana possível, sem picos e sem lérdeza. É a perfeição da engenharia de filtros!"

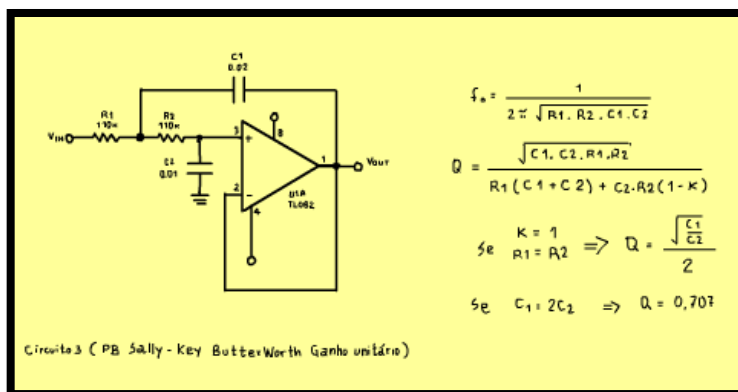
1.5. O Espelho – O Filtro Passa-Altas (PA)



Professor Bairros: "E para o Passa-Altas? A lógica é um espelho! Trocamos a posição dos resistores pelos capacitores."

A equação da frequência continua a mesma, mas a fórmula do Q inverte seus termos. No exemplo do nosso circuito 3, o Q resultou em 1,31 — o que significa que ele NÃO é um Butterworth ainda. Ele teria um pequeno pico antes de deixar as altas frequências passarem."

1.6. Simplicidade Elegante (PB Butterworth Prático)

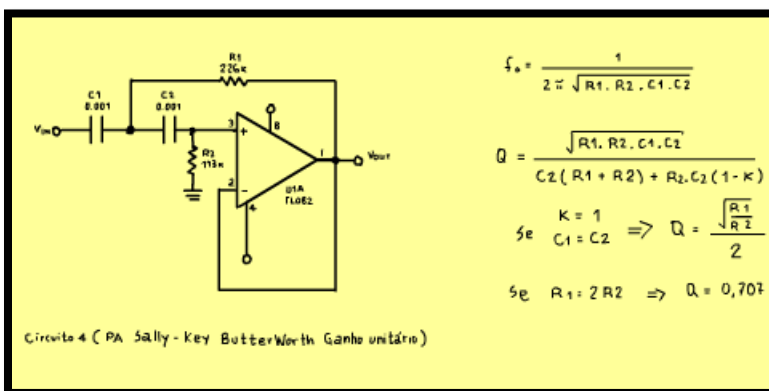


Professor Bairros: "Quer facilitar a vida? Use ganho unitário ($K=1$).

A saída vai direto para a entrada inversora. Se fizermos resistores iguais ($R_1=R_2$), a equação do Q encolhe e fica puramente dependente dos capacitores!"

Professor Bairros: "Aqui está o segredo: faça $C_1 = 2 \cdot C_2$. Boom! Você tem um filtro Butterworth perfeito de 0,707 sem precisar de calculadora científica!"

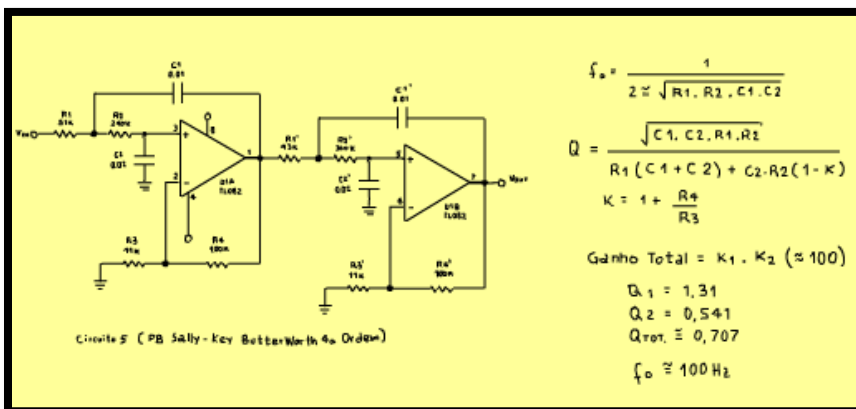
1.7. A Versão Passa-Altas Butterworth



Professor Bairros: "No Passa-Altas, a regra inverte: usamos capacitores iguais e fazemos o primeiro resistor ser o dobro do segundo ($R_1 = 2 \cdot R_2$).

No nosso exemplo 1 kHz, isso nos dá a curva Butterworth com a mesma elegância, mas agora deixando passar as altas frequências."

1.8. A Muralha – 4ª Ordem (PB)

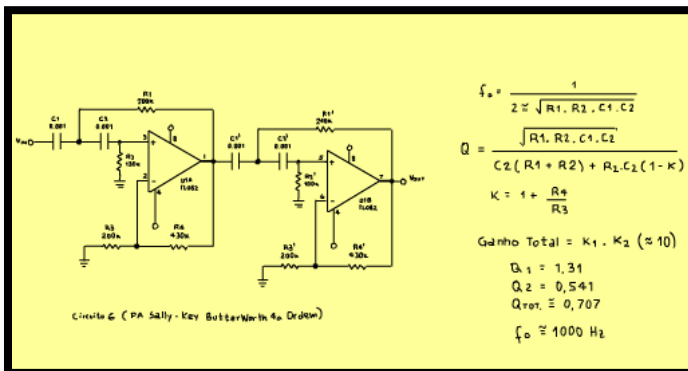


Professor Bairros: "Agora, vamos empilhar! Para uma muralha de 4ª ordem, ligamos dois filtros de 2ª ordem em série, como se diz na eletrônica, em cascata.

A frequência de corte permanece a mesma em ambos, mas os fatores de qualidade de cada estágio devem ser diferentes para que, no final, a soma resulte em um Butterworth

perfeito. O padrão de ouro é: O fator de qualidade do filtro da entrada seja $Q_1 = 1,31$ e o fator de qualidade do segundo filtro seja $Q_2 = 0,54$. Não é só multiplicar! Esses valores são calculados para que um estágio compense o outro, resultando no Q final é de 0,707 o fator de qualidade Q dos sonhos para áudio."

1.9. A Muralha Passa-Altas

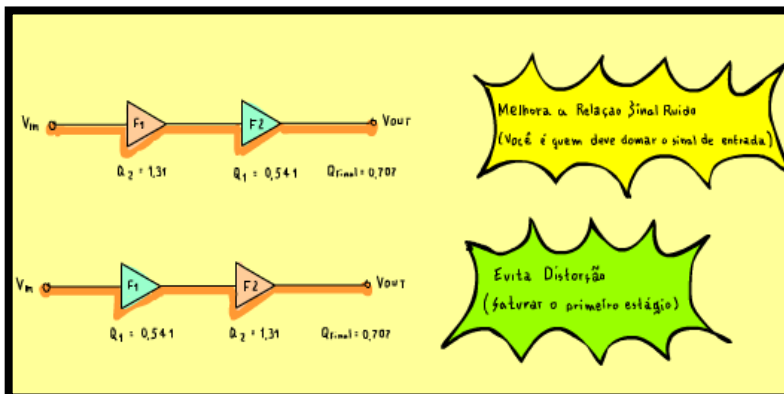


Professor Bairros: "Para o Passa-Altas, o raciocínio é idêntico. Nesse exemplo ajustamos os dois estágios para a frequência de 1 kHz, mas mantemos os Q s em 1,31 e 0,54.

Note um detalhe importante, nesses filtros o ganho total não é unitário; cada filtro amplifica o sinal do seu jeito e esse ganho k de cada filtro entra na equação do fator de qualidade de cada filtro.

O importante é que o fator de qualidade total será exatamente 0,707, o Butterworth perfeito!"

1.10. O Dilema da Ordem – Quem vem primeiro?



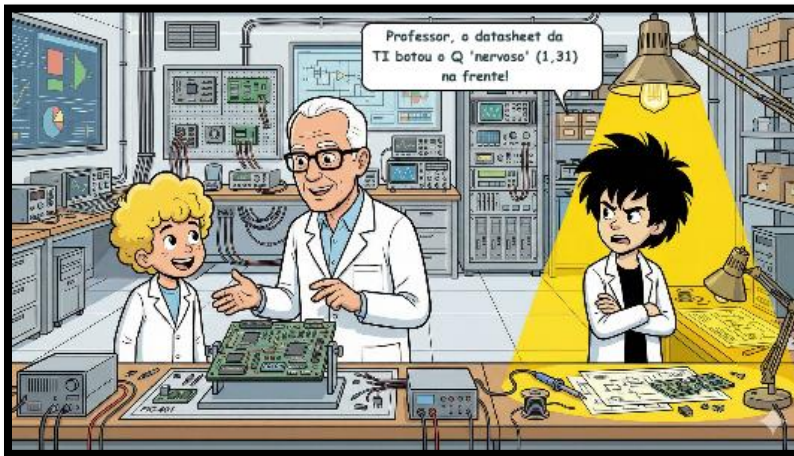
Professor Bairros: "Mas afinal, será que importa a ordem dos fatores de qualidade, quem vem primeiro?

A matemática diz que não, mas a engenharia real diz que SIM! É um cabo de guerra técnico

entre ruído e distorção. Se você colocar o fator de qualidade alto primeiro, você amplifica muito o sinal logo de cara, melhorando a relação sinal-ruído. Mas cuidado: aquele 'pico' do fator de qualidade alto pode fazer o Amp-Op saturar se o sinal de entrada for muito forte!

Se colocar o filtro com o fator de qualidade baixo primeiro evita a saturação do primeiro estágio, evita distorções, eu prefiro essa configuração, aí... eu não preciso me preocupar com o que vem antes."

1.11. Quem Larga Primeiro? (Interação)

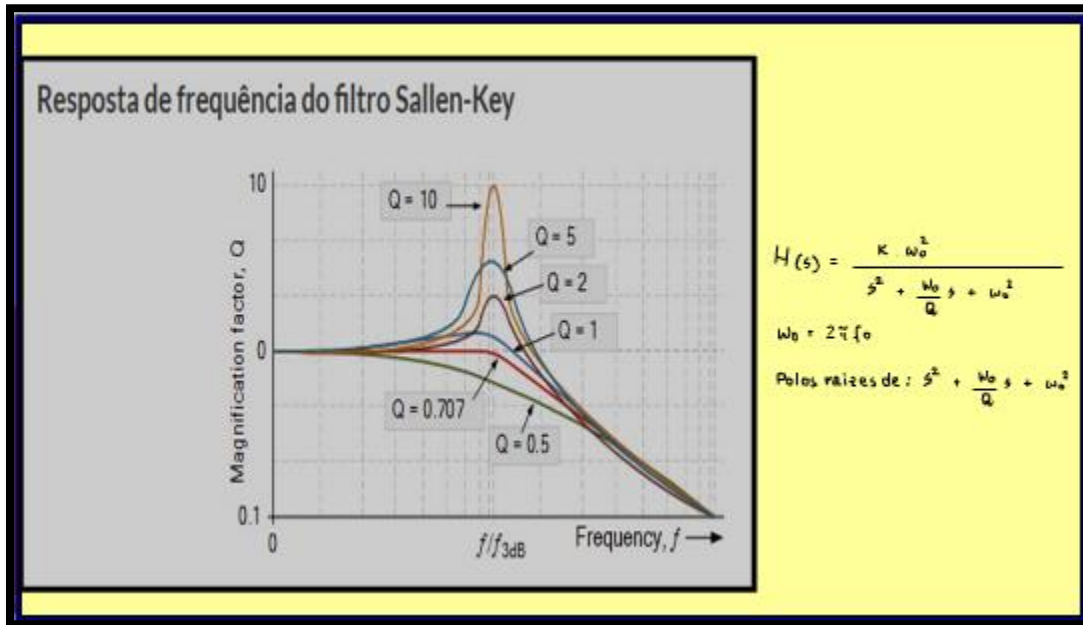


Negativino: "Professor, o datasheet da TI botou o Q 'nervoso' (1,31) na frente! O senhor disse que prefere o suave primeiro. Afinal, qual o melhor?"

Professor Bairros: "Calma, Negativino! Na verdade não tem o melhor ou pior. O datasheet quer a melhor relação sinal ruído (SNR). Eu prefiro começar com suavidade (baixo Q) para ter mais 'margem de segurança para não saturar o ampop' e evitar distorções. Engenharia é escolher qual problema você prefere resolver!"

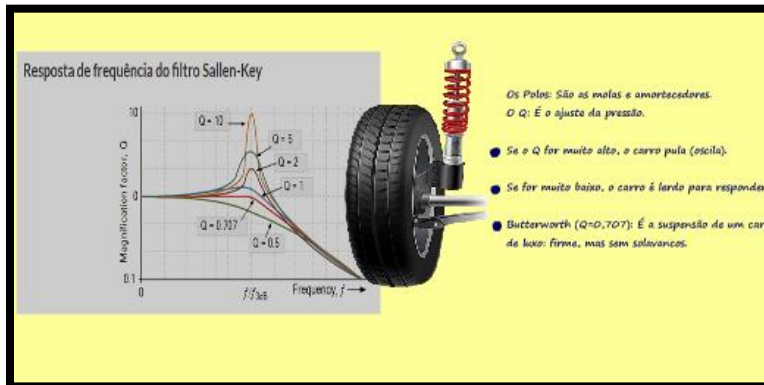
Arthurzinho: "Entendi! É como uma corrida: você pode botar o corredor mais rápido na largada para abrir distância, ou no final para garantir a vitória!"

1.12. A Anatomia Matemática (Os Polos)



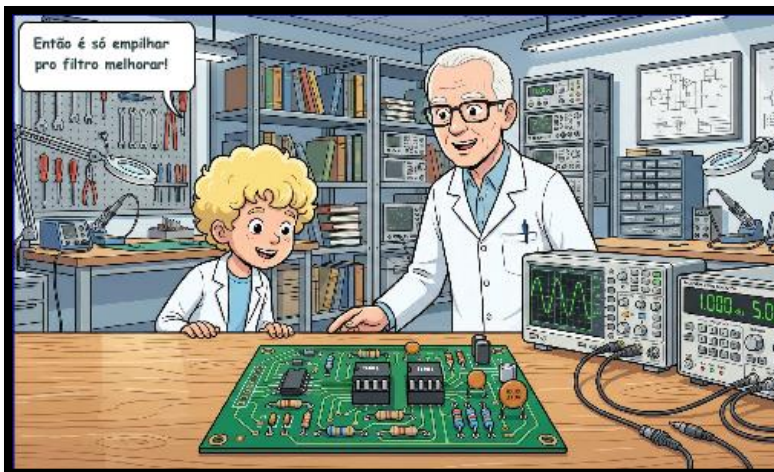
Professor Bairos: "Matematicamente, tudo se resume aos polos da nossa função de transferência. O Q nada mais é do que o 'amortecimento'. Se $Q = 0,5$, os polos estão travados no eixo real — resposta morta, veja no gráfico a curva do ganho começa a cair muito antes da frequência de corte. No Butterworth ($Q=0,707$), é a forma mais rápida de cortar as frequências, tecnicamente os polos formam um ângulo perfeito de 45 graus. Passou disso, eles se aproximam do eixo imaginário e o filtro começa a querer virar um oscilador! No gráfico a curva começa a ficar bicuda."

1.13. Analogia da Suspensão



O Q é o ajuste da pressão. Q muito alto, o carro pula e oscila a cada buraco. Q muito baixo, o carro é lerdo e parece uma barca. O Butterworth (Q=0,707) é aquela suspensão de carro de luxo: firme, estável e sem solavancos!"

1.14. Conclusão



Arthurzinho: "Então é só empilhar pro filtro melhorar! "

Professor Bairros: "Isso mesmo, Arthurzinho! Passamos da segunda para a quarta ordem e criamos nossa muralha de frequências. No próximo tutorial, vamos ver como rejeitar faixas específicas. Até lá, bons projetos e bons filtros!"

1.15. Referências

A Muralha de Frequências – Filtros Sallen-Key de 4ª Ordem

Tutorial avançado sobre filtros Sallen-Key (PB e PA), detalhando equações de 2ª ordem, simplificações Butterworth e o segredo do cascadeamento para 4ª ordem.

#Eletrônica #SallenKey #FiltrosAtivos #ProfessorBairros #Engenharia

YOUTUBE: <https://youtu.be/GNMVGzS8Qmo>

Publicação: