ON4CRD

Volume 05

O cálculo dos filtros



Radio Club Durnal ON4CRD

https://on4crd.be

Volume 05 · 48 páginas

Informações legais

Volume 05 · O cálculo dos filtros

Editor do site : Radio Club Durnal ON4CRD

Gerente de publicação : Comité do Radio Club Durnal ON4CRD

https://on4crd.be

Informações legais

Propriedade intelectual

Textos, imagens, documentos, logotipos e materiais publicados no site permanecem propriedade de seus respectivos autores ou do clube. Qualquer reprodução ou reutilização deverá respeitar a fonte, os direitos aplicáveis e qualquer permissão do autor.

Responsabilidade

O clube trabalha para publicar informações úteis e verificadas, mas não garante a ausência de erros, omissões ou interrupções. As informações técnicas ou regulatórias devem ser verificadas em relação às fontes oficiais quando apoiam uma decisão.

Ilustrações criadas com assistência de inteligência artificial.

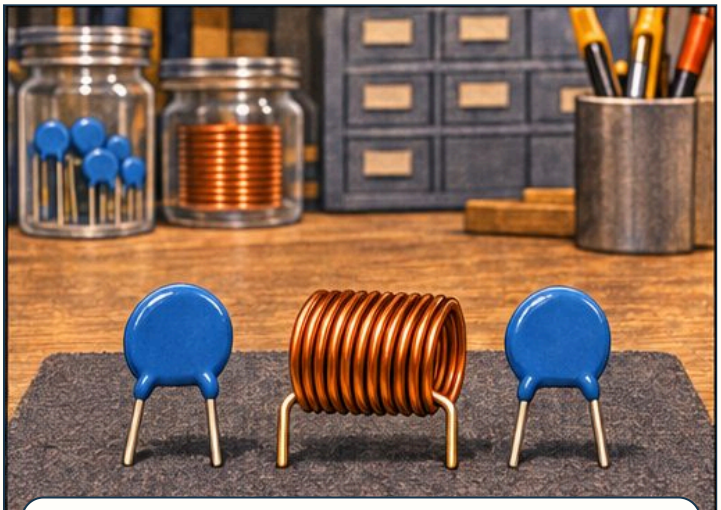
Uma nova missão



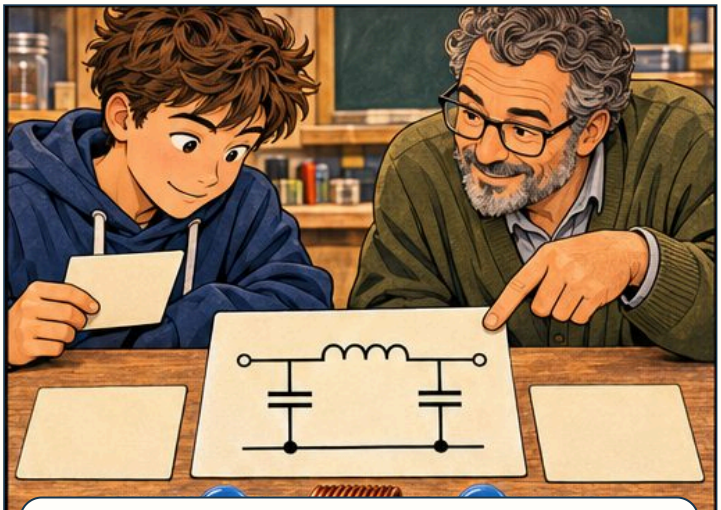
No clube, Lucas reencontra o caderno após a oficina de eletricidade.



Henri prepara uma demonstração sobre a qualidade dos sinais.



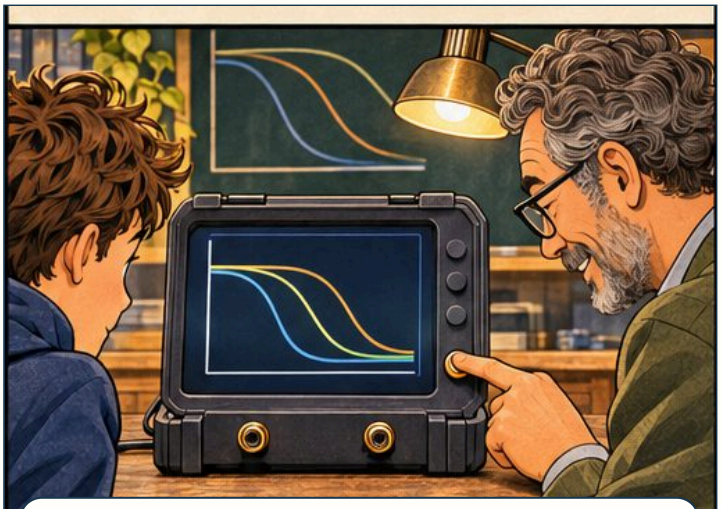
Na mesa esperam dois condensadores e uma bobina.



O desafio: compreender, calcular e medir um filtro passa-baixo.



O jovem quer saber como três componentes podem mudar tudo.

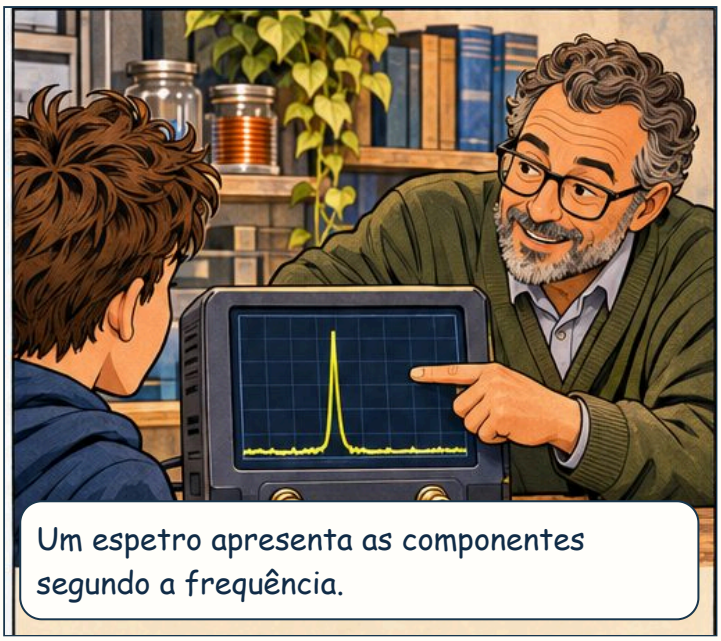


Começam por observar o que contém um sinal.

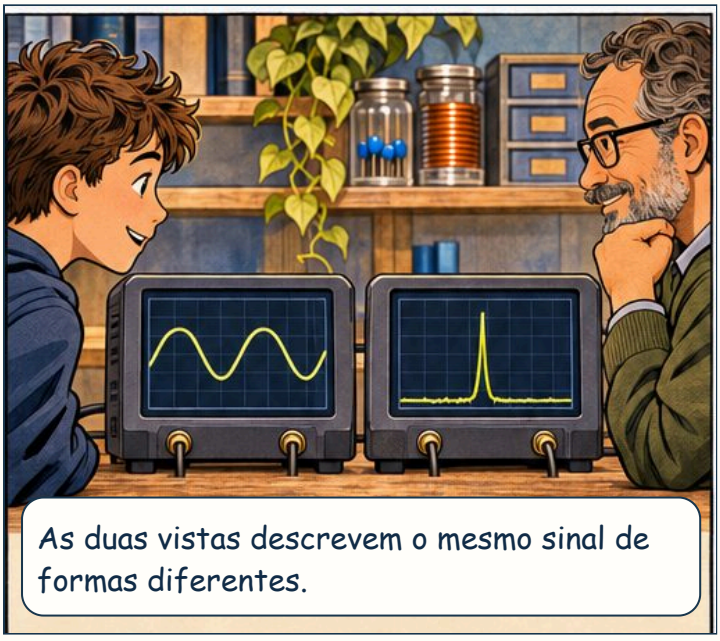
O sinal e o seu retrato



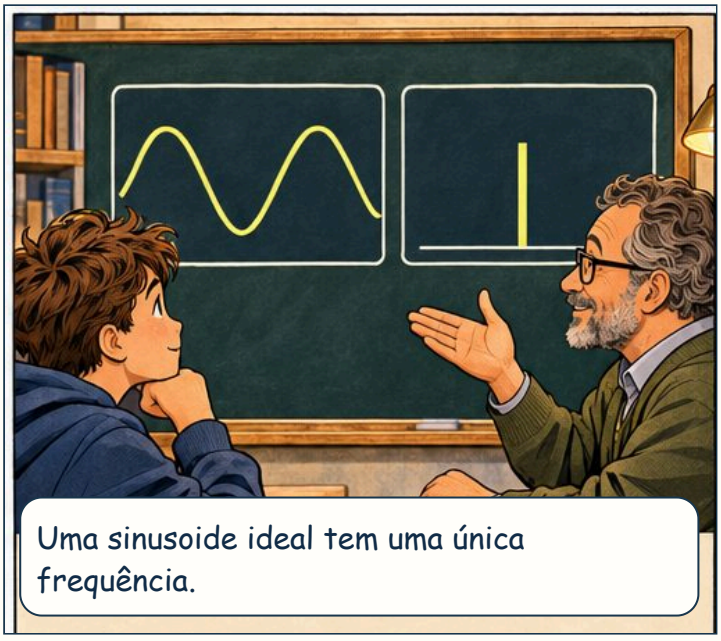
Uma curva no tempo mostra como um sinal evolui.



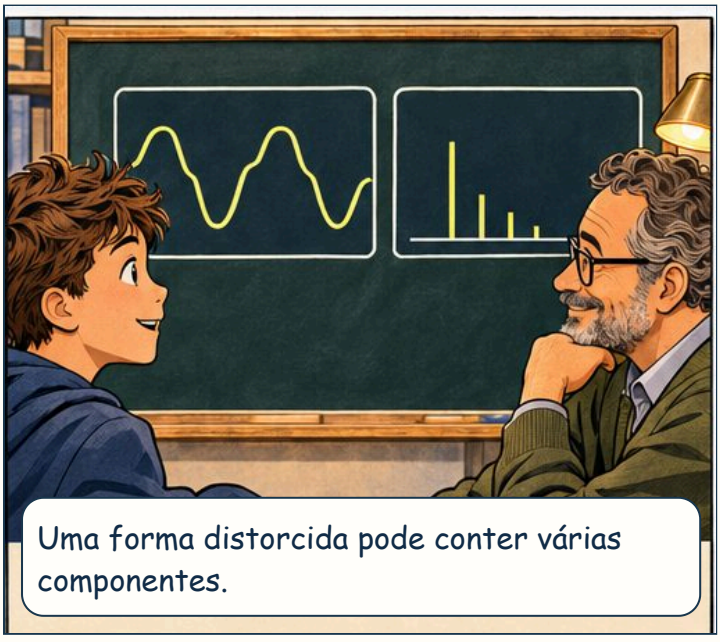
Um espetro apresenta as componentes segundo a frequência.



As duas vistas descrevem o mesmo sinal de formas diferentes.



Uma sinusoide ideal tem uma única frequência.

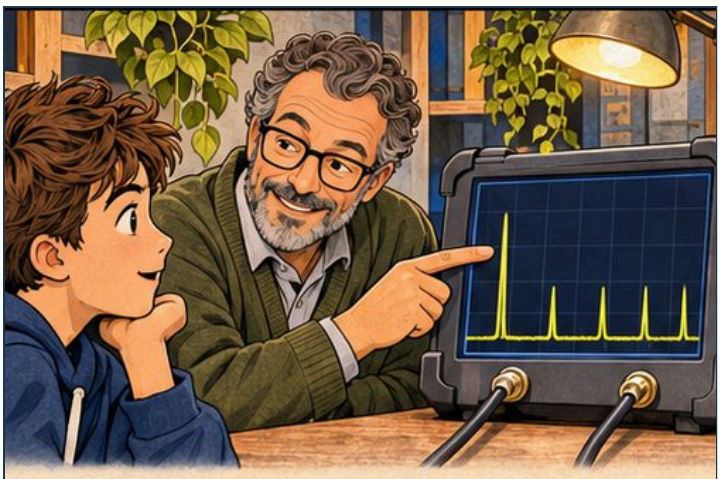


Uma forma distorcida pode conter várias componentes.



O jovem descobre um retrato que não sabia ler.

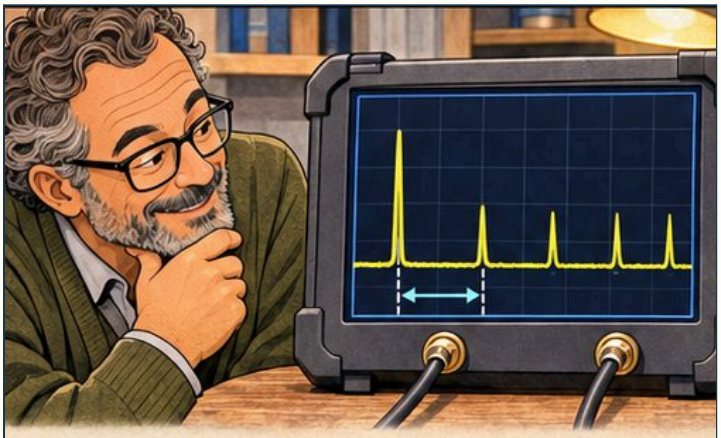
As harmónicas revelam-se



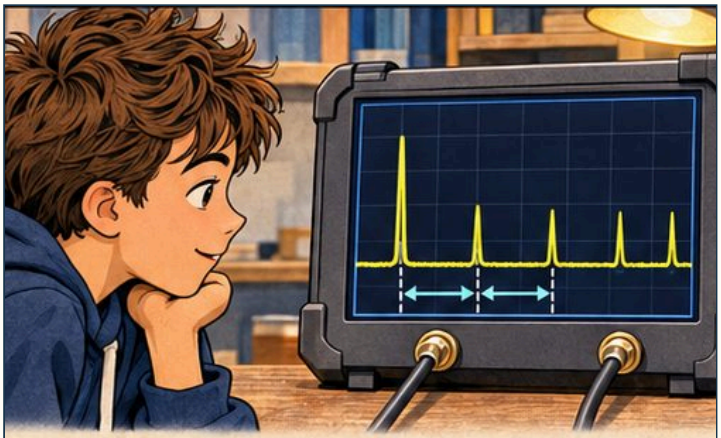
A frequência fundamental fornece a primeira referência do sinal periódico.



As suas harmónicas são múltiplos inteiros dessa frequência.



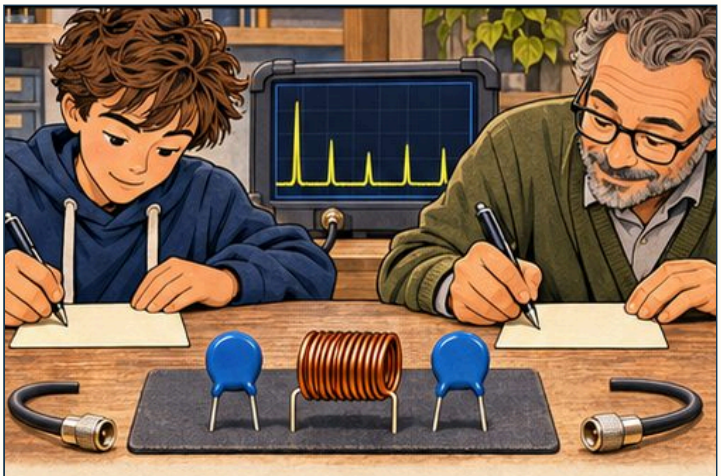
A segunda situa-se no dobro da fundamental.



A terceira situa-se no triplo dessa frequência.

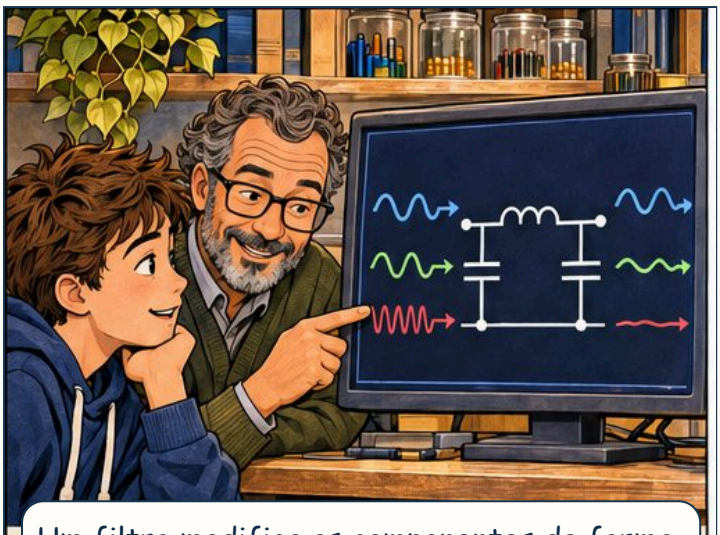


Nem todas as componentes indesejadas são, contudo, harmónicas.

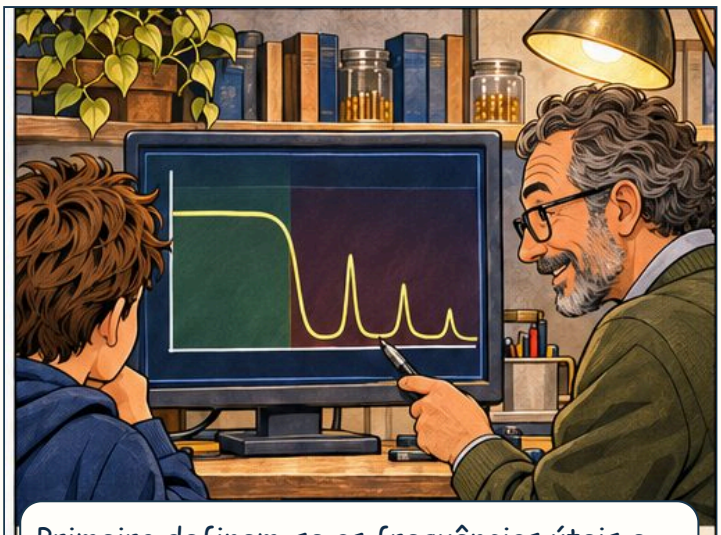


O filtro deverá responder a uma necessidade bem definida.

Escolher o que conservar



Um filtro modifica as componentes de forma diferente conforme a frequência.



Primeiro definem-se as frequências úteis e as perturbadoras.



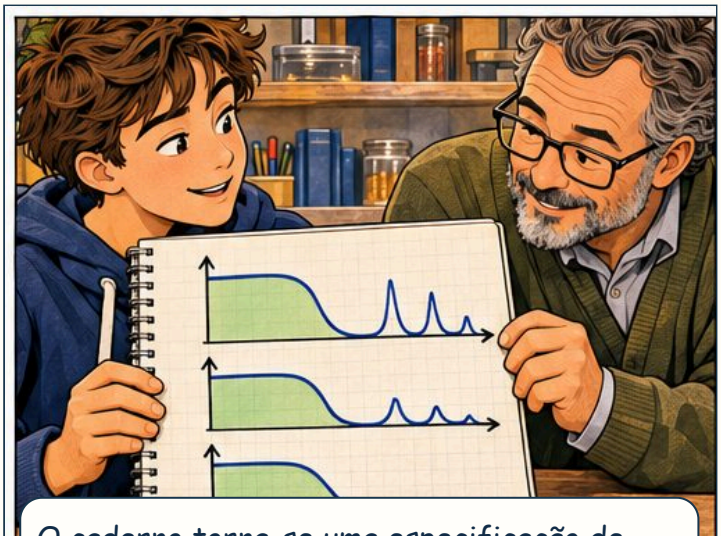
Fixam-se também as atenuações pretendidas.



Sem estes objetivos, calcular componentes faria pouco sentido.

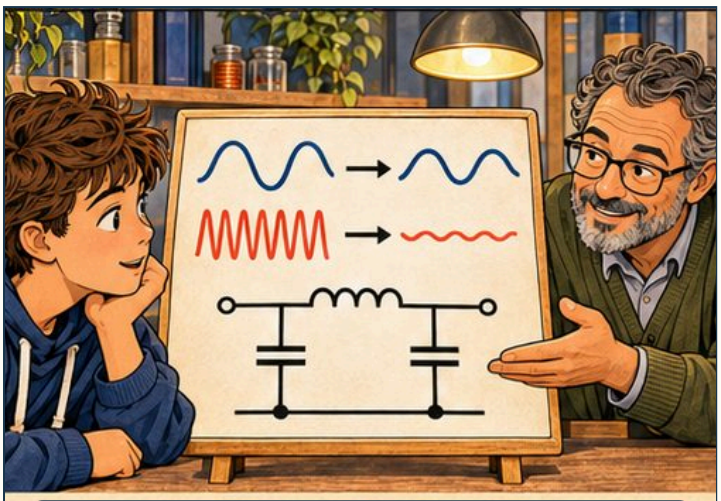


O jovem rodeia a zona útil de um espetro de exemplo.



O caderno torna-se uma especificação de projeto.

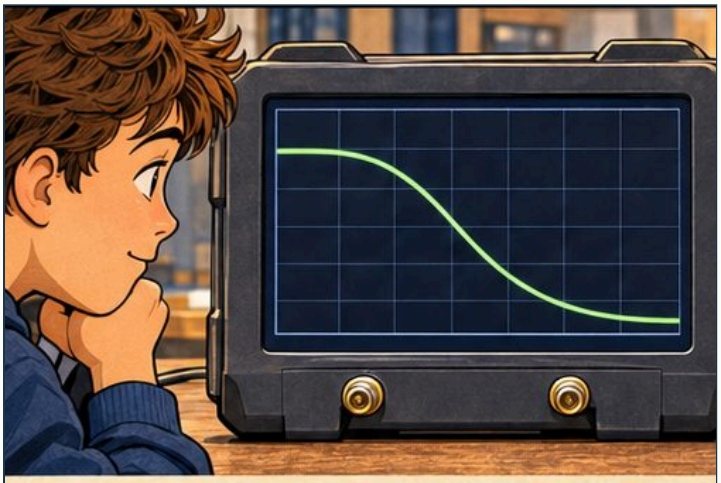
A escolha do passa-baixo



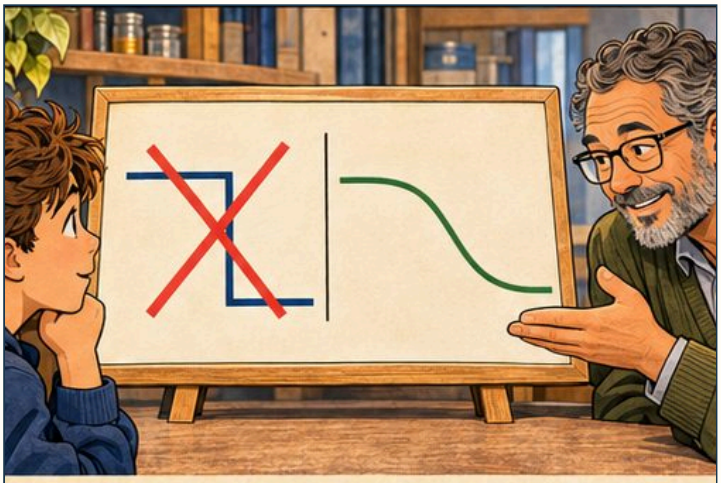
Um passa-baixo transmite melhor frequências baixas do que altas.



A sua banda passante ocupa o lado das baixas frequências.



Acima, a atenuação aumenta progressivamente.



A transição real nunca é uma parede vertical perfeita.



Este tipo serve para a demonstração de hoje.



O jovem desenha uma inclinação em vez de uma barreira.

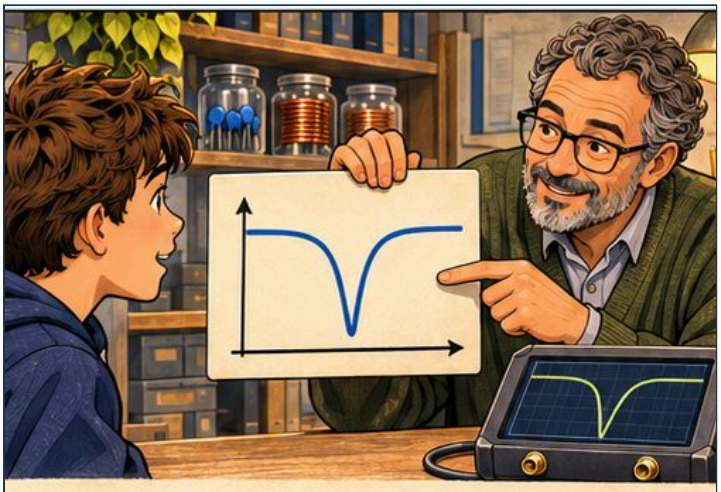
Outros caminhos possíveis



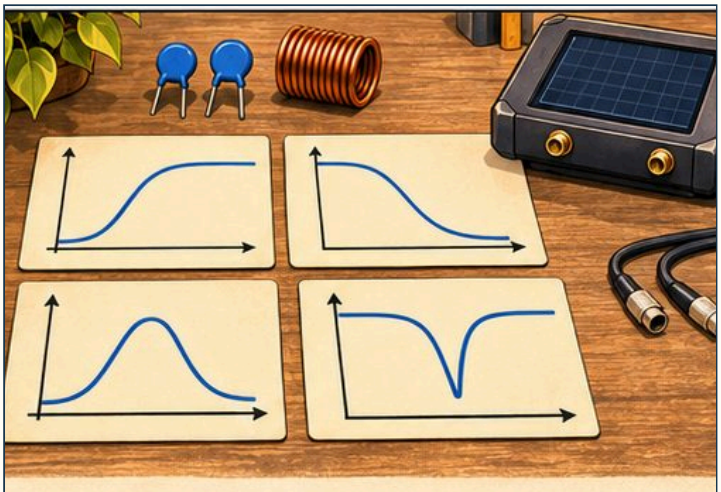
Um passa-alto atenua frequências baixas e conserva as altas.



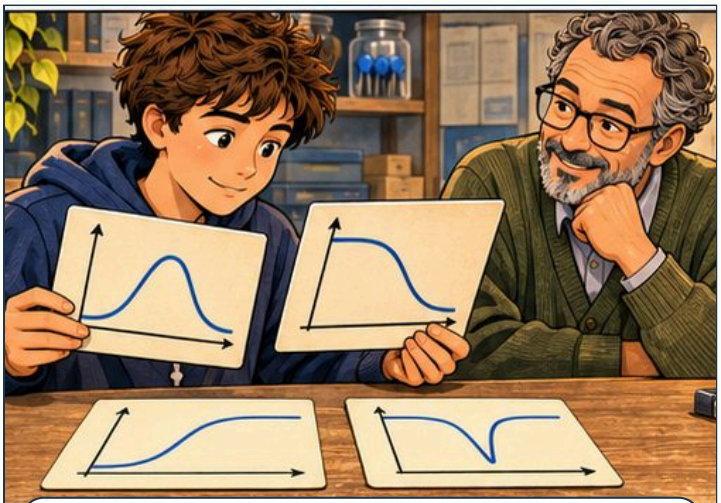
Um passa-banda privilegia um intervalo entre dois limites.



Um rejeita-banda atenua, pelo contrário, um intervalo escolhido.



Estas famílias respondem a necessidades diferentes.

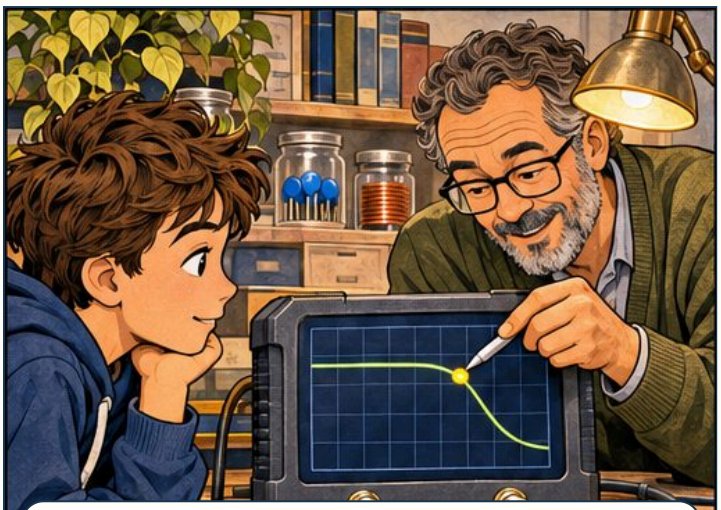


O nome descreve uma resposta, não uma qualidade universal.



O jovem guarda três cartões para outra oficina.

Um corte que deixa passar



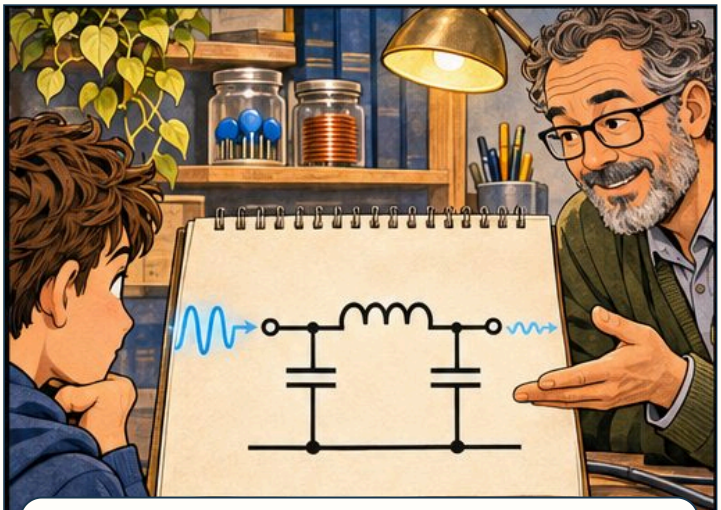
A frequência de corte marca aqui um nível de referência.



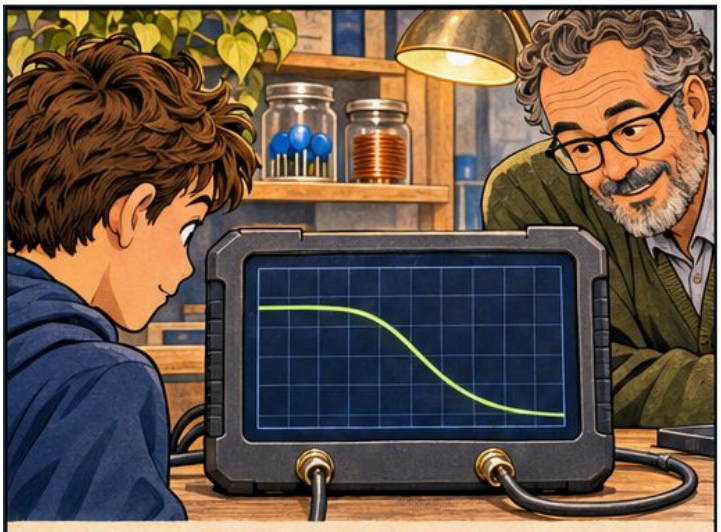
Não significa o desaparecimento repentino do sinal.



No Butterworth ideal, corresponderá a cerca de −3 dB.



O filtro ainda transmite energia nessa frequência.



Acima, a atenuação continuará a aumentar.

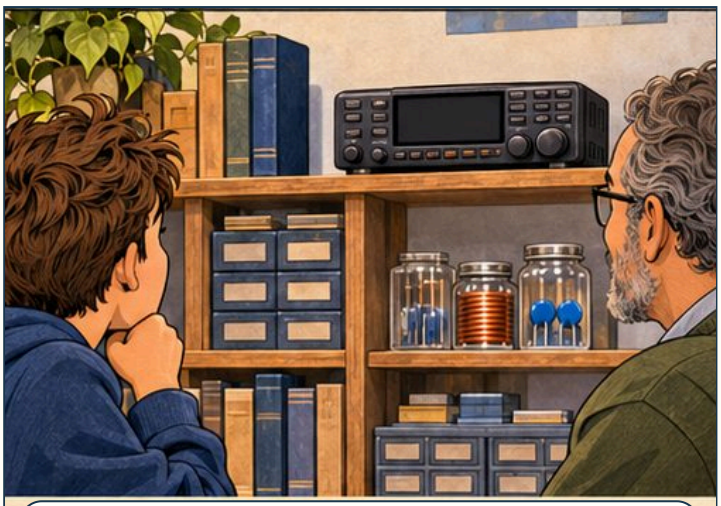


Esta precisão evita uma primeira ideia errada.

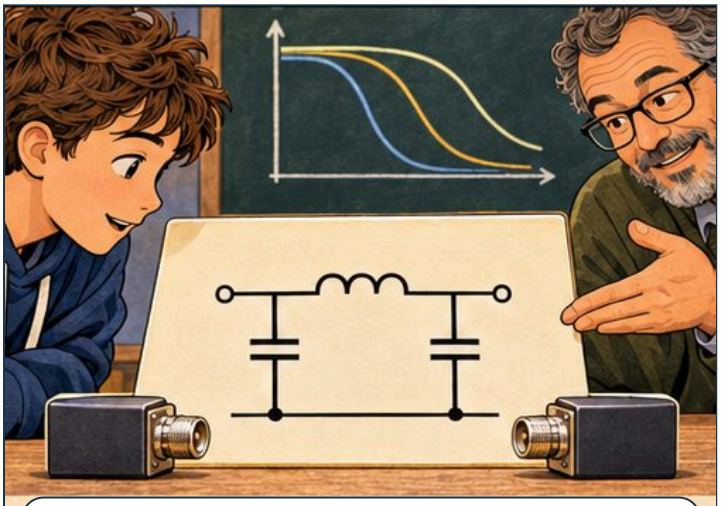
Um exemplo de laboratório



Escolhem um corte teórico de 10 MHz.



Este valor didático não define uma frequência de emissão.



A fonte e a carga de referência serão de 50 Ω.



Estudarão o circuito na bancada, com um sinal fraco.



Não será ligada qualquer antena ou emissor.

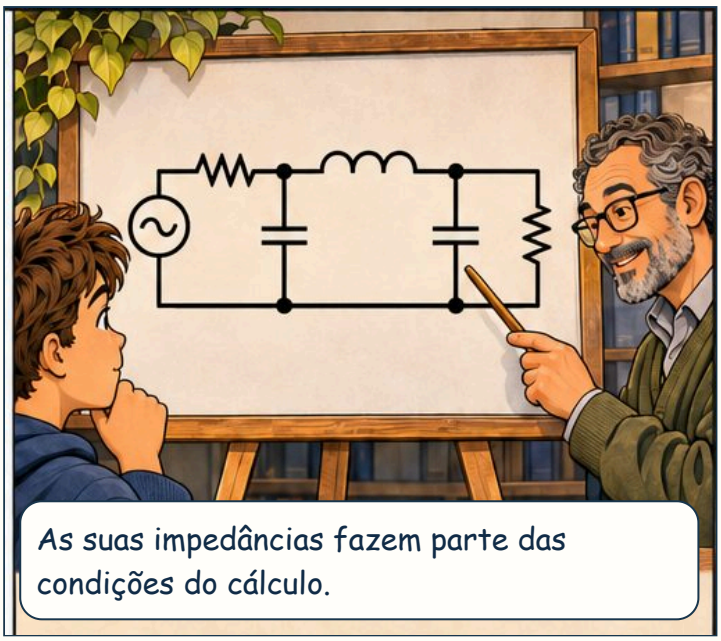


O objetivo é uma resposta mensurável, não um contacto de rádio.

Porquê especificar 50 ohms?



Um filtro trabalha entre uma fonte e uma carga.



As suas impedâncias fazem parte das condições do cálculo.



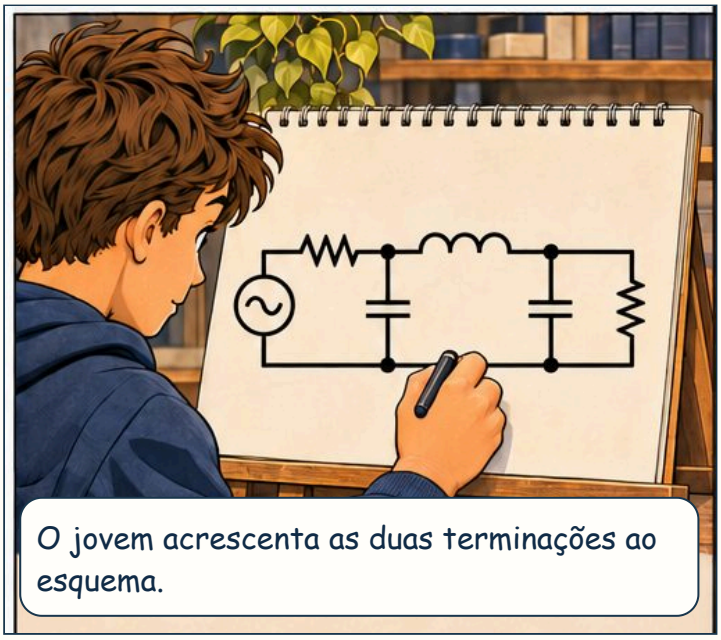
Aqui, cada uma vale idealmente 50 Ω, puramente resistivos.



Alterar estas condições modifica a resposta obtida.

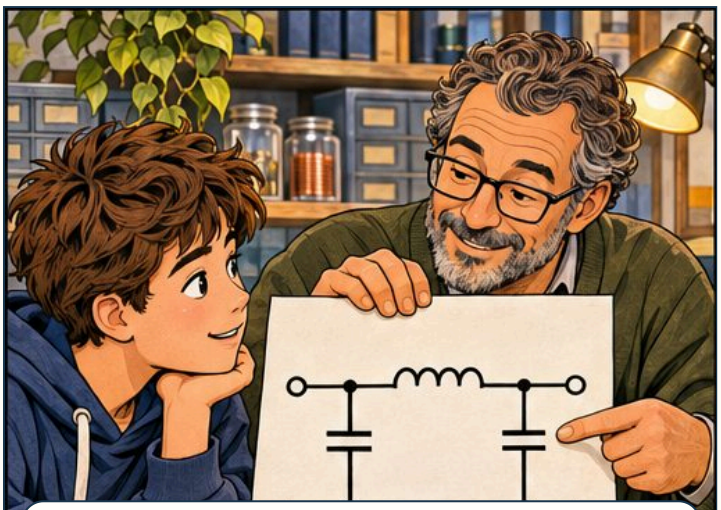


Não basta, portanto, copiar três valores.



O jovem acrescenta as duas terminações ao esquema.

O modelo e o circuito



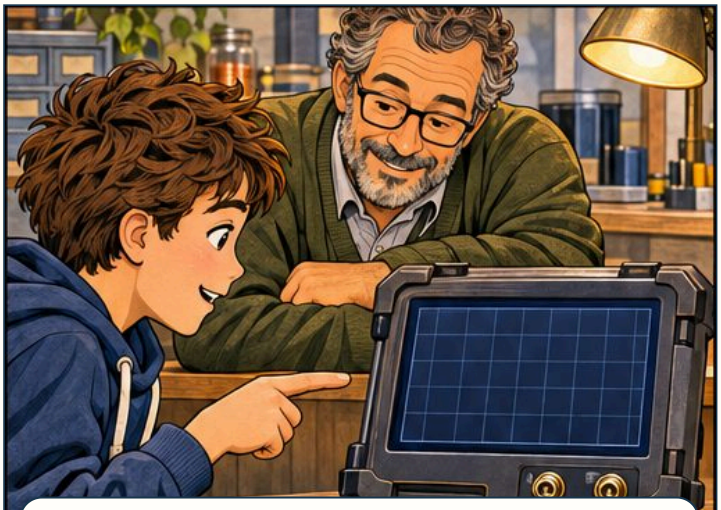
O cálculo começará com componentes ideais, sem perdas.



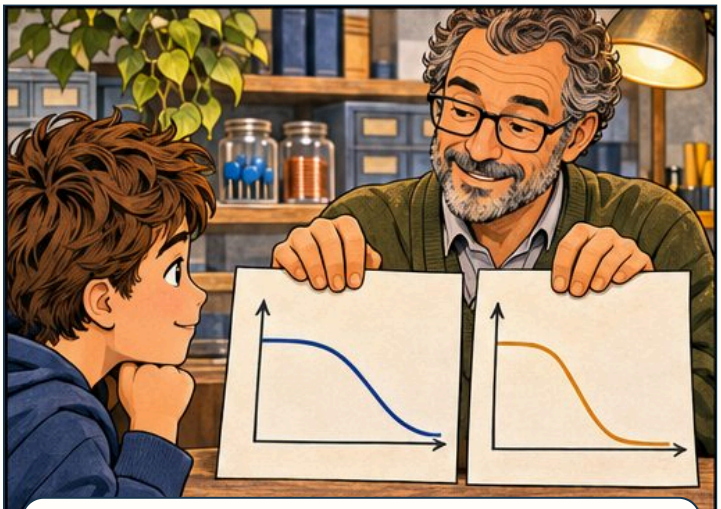
O circuito real terá resistências e efeitos parasitas.



O modelo permite prever uma primeira resposta.



As medições permitirão depois examinar as diferenças.

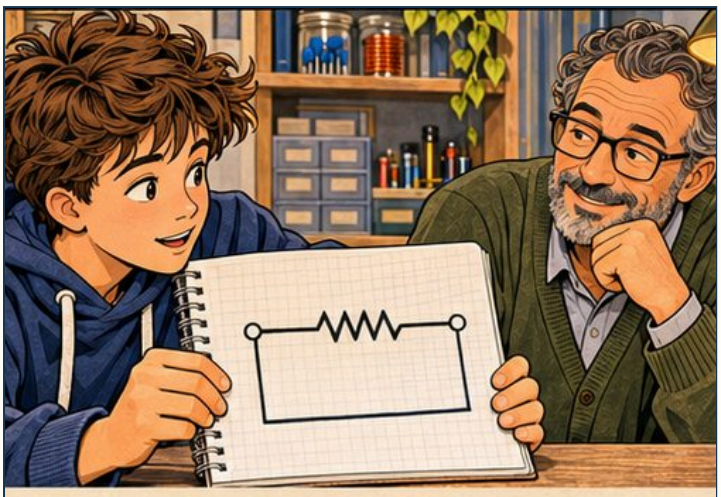


Confundir previsão e resultado impediria compreender esses desvios.

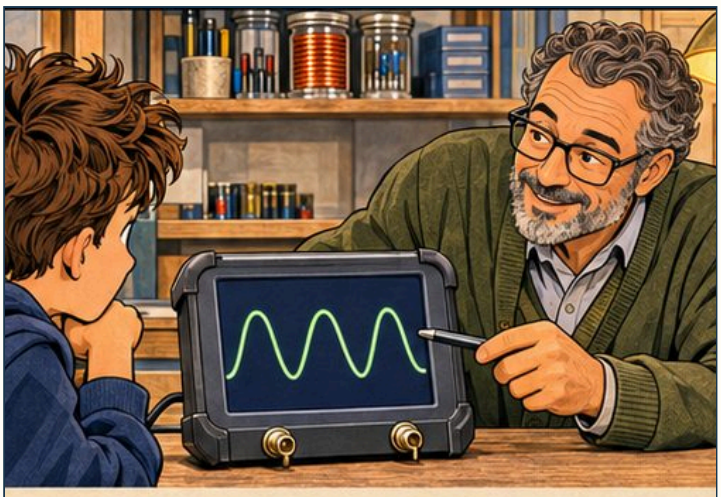


O caderno reserva um espaço distinto para cada um.

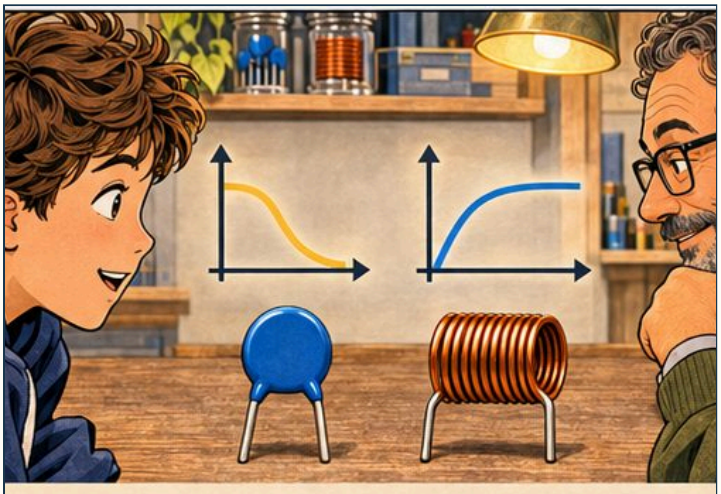
Uma resistência já não basta



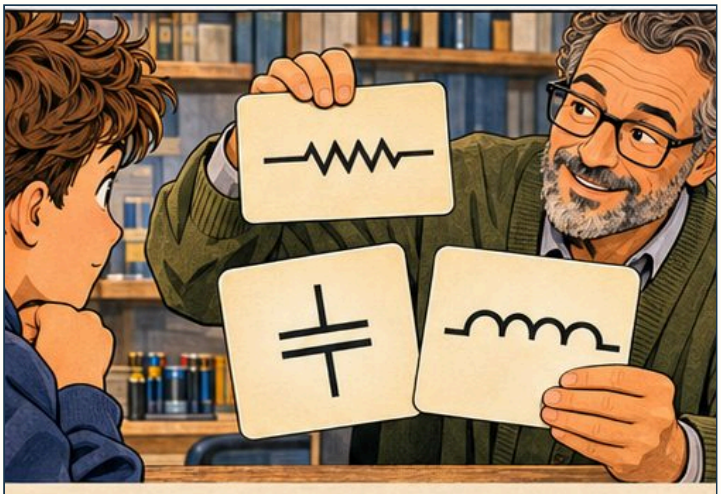
O volume anterior relacionava tensão, corrente e resistência em contínua.



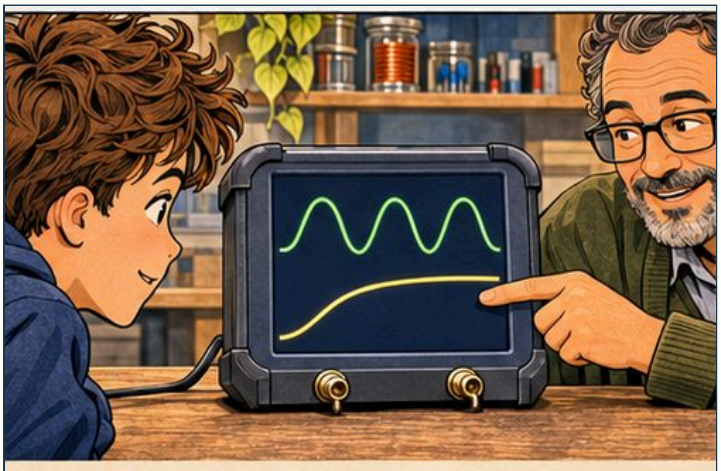
Aqui, o sinal varia rapidamente e a frequência conta.



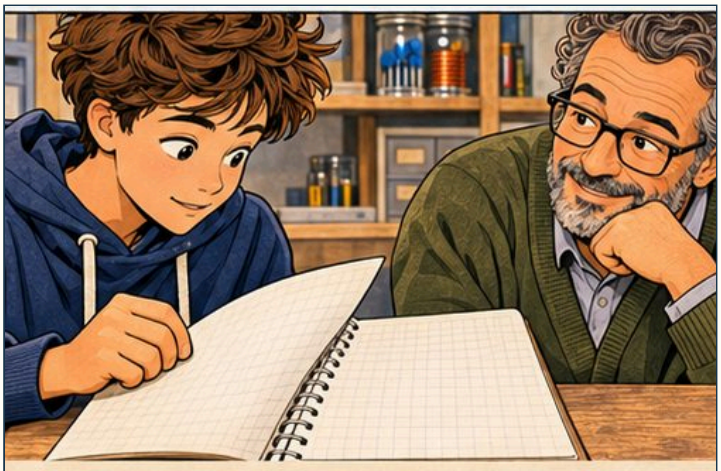
Condensadores e bobinas apresentam oposição dependente da frequência.



Esta reatância distingue-se de uma simples resistência.



A impedância descreve mais amplamente o comportamento elétrico em alternada.

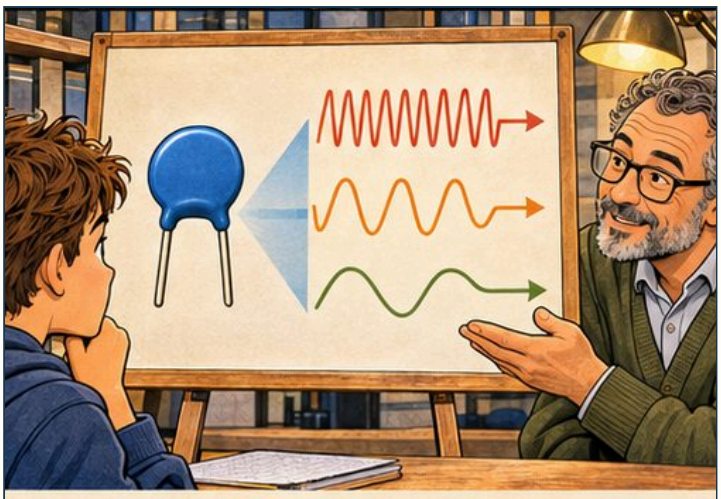


O jovem compreende por que é necessário outro modelo.

O papel do condensador



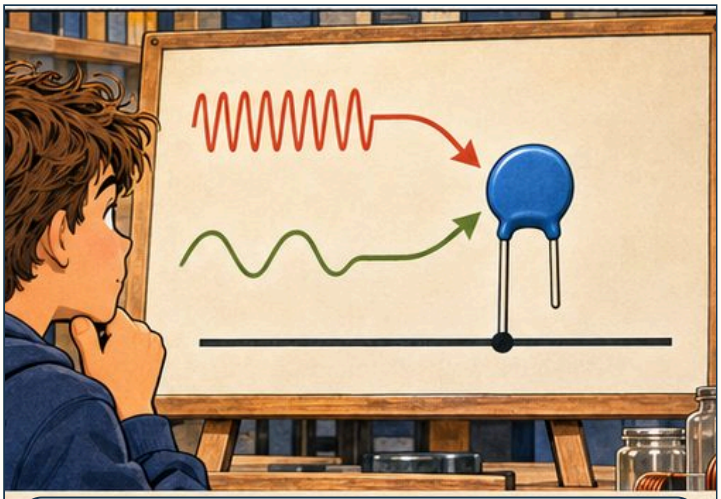
A capacidade representa-se por C e exprime-se em farads, F.



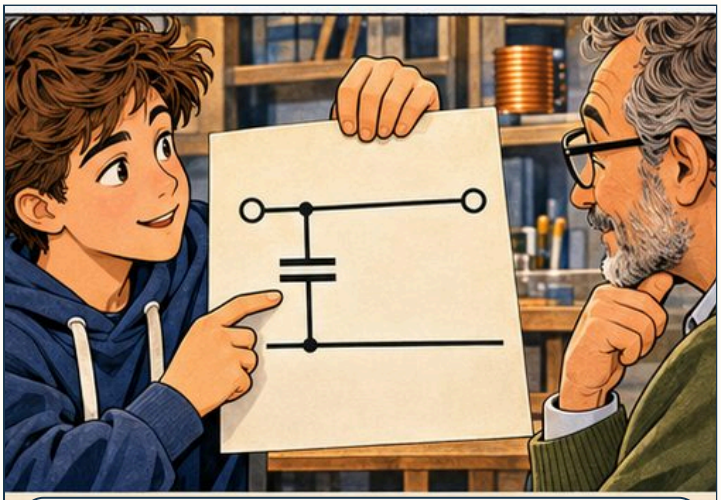
Num condensador ideal, a reatância diminui quando a frequência aumenta.



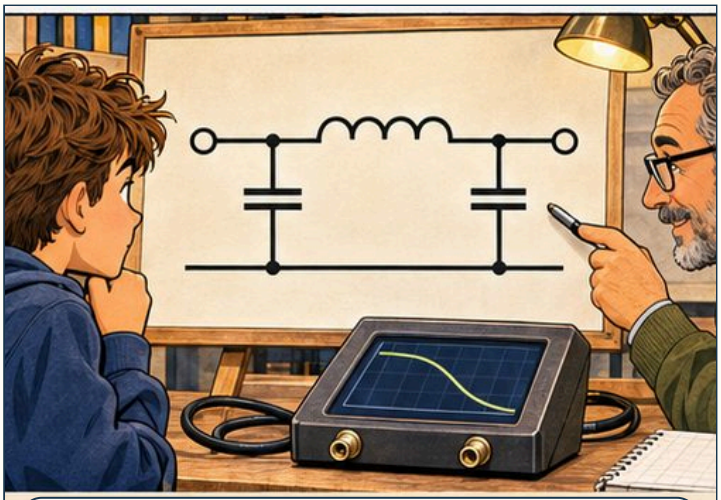
O seu valor absoluto é Xc = 1/(2πfC).



Com a mesma capacidade, frequências altas encontram menos reatância.



No filtro, os condensadores serão ligados à massa.

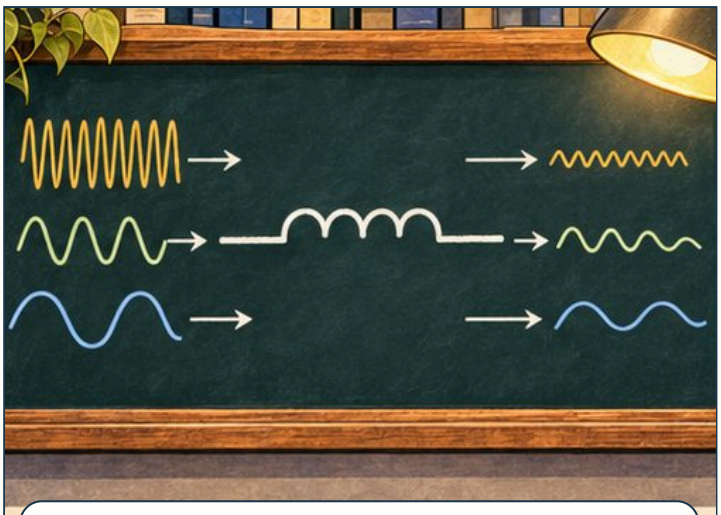


O seu papel também depende do restante circuito.

O papel da bobina



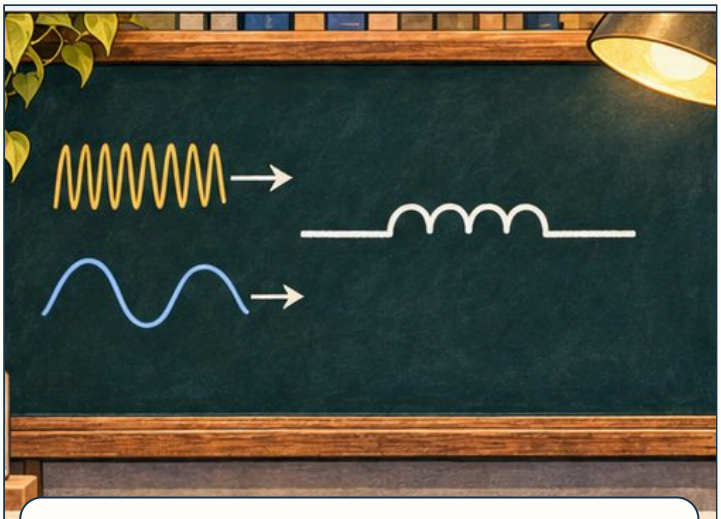
A indutância representa-se por L e exprime-se em henrys, H.



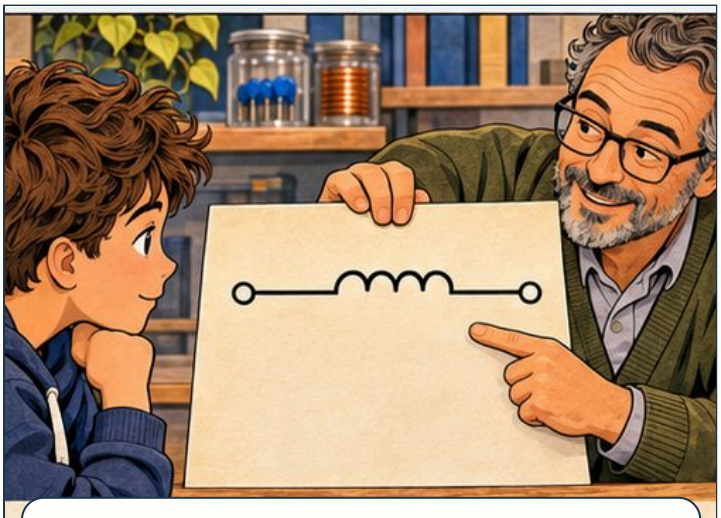
Numa bobina ideal, a reatância aumenta com a frequência.



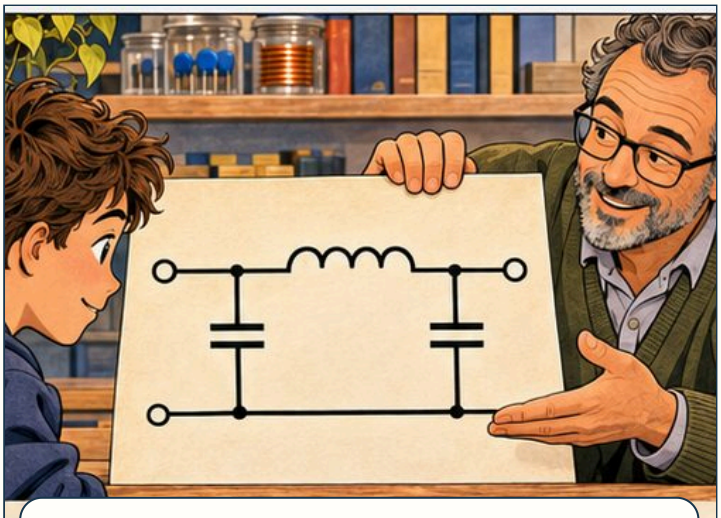
O seu valor absoluto é XL = 2πfL.



Com a mesma indutância, frequências altas encontram mais reatância.

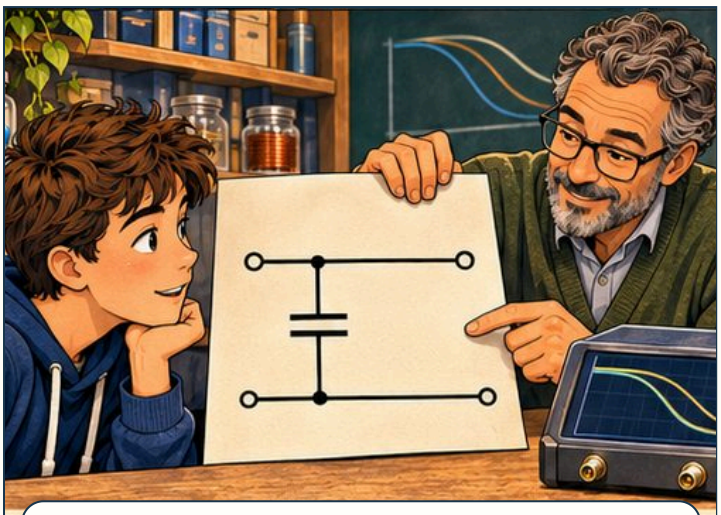


No filtro, a bobina estará no percurso do sinal.

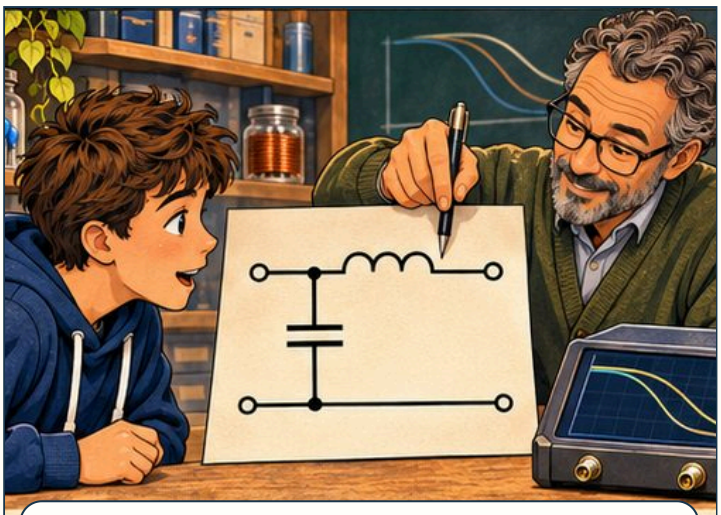


Os dois tipos de componentes atuarão em conjunto.

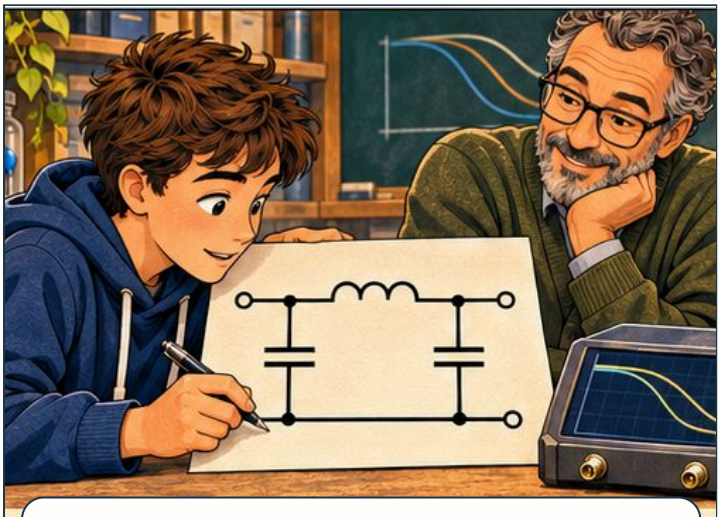
O esquema ganha forma de π



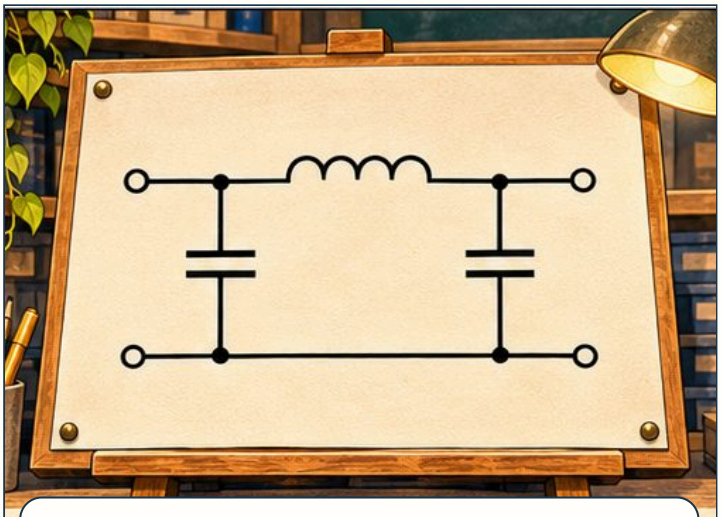
A entrada chega a um primeiro condensador ligado à massa.



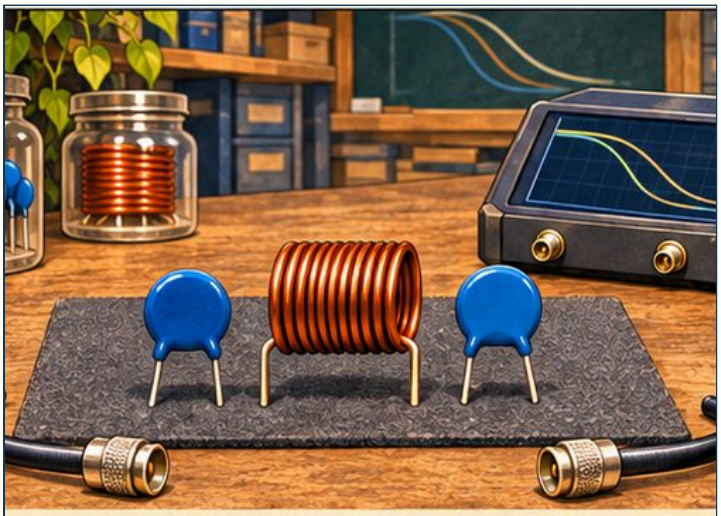
Uma bobina liga depois entrada e saída em série.



Um segundo condensador liga a saída à mesma massa.



Dois ramos descem de ambos os lados da bobina.

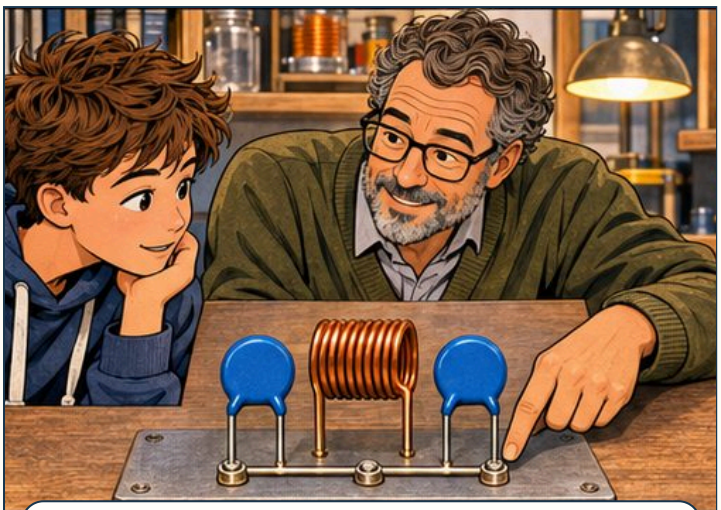


Esta disposição lembra a letra grega π.

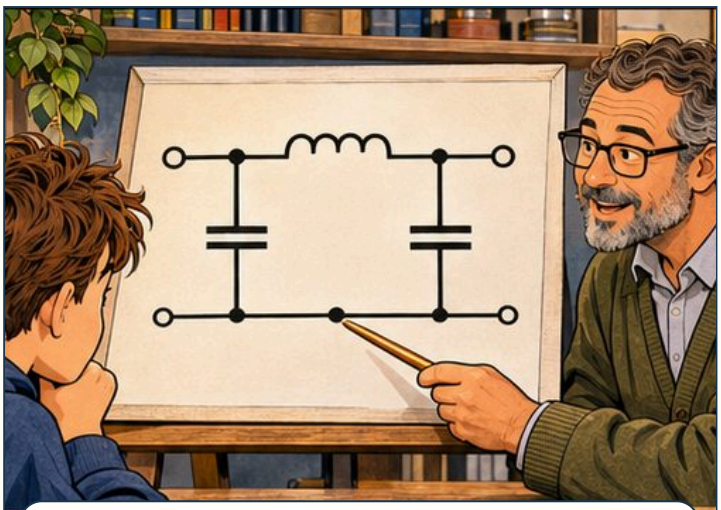


O jovem segue cada ligação com o lápis.

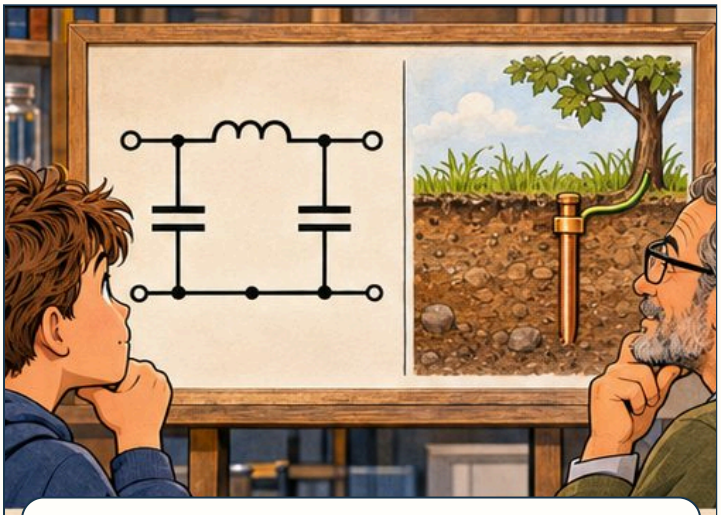
A massa do esquema



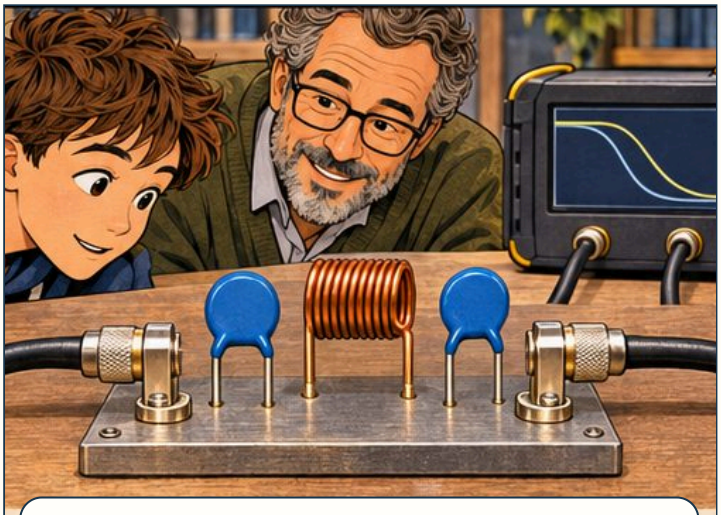
Os dois condensadores partilham uma referência elétrica comum.



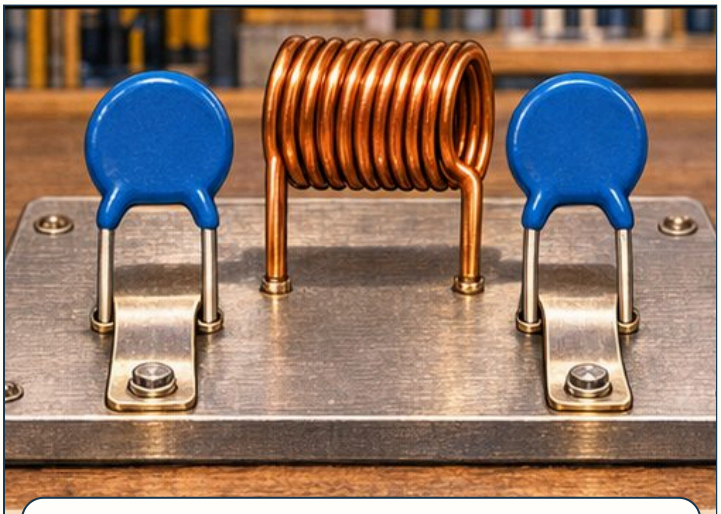
O símbolo de massa representa aqui essa referência do circuito.



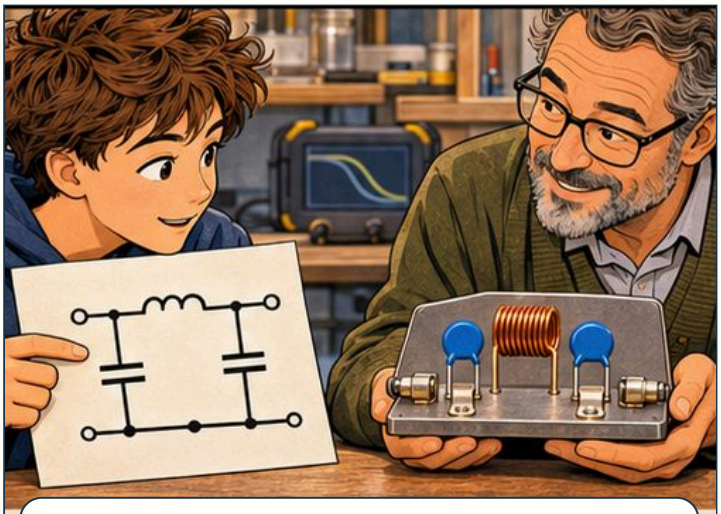
Não significa automaticamente uma ligação à terra.



As blindagens coaxiais ligam a esta massa conforme o projeto.



Uma ligação curta limita certos efeitos parasitas.

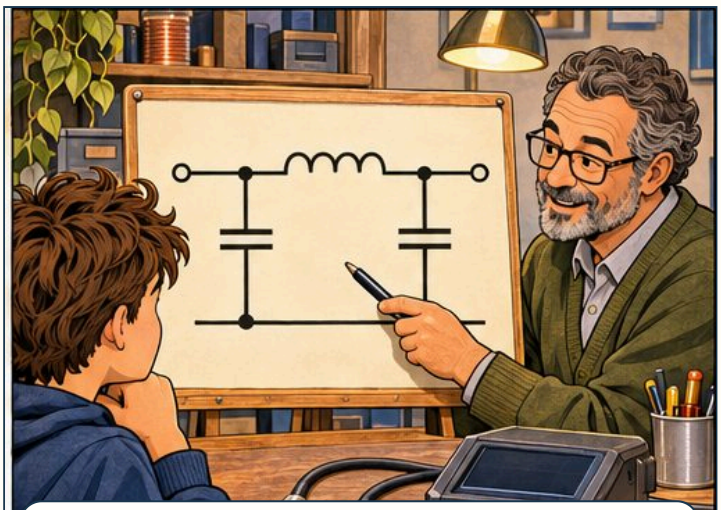


O jovem distingue o símbolo da realização concreta.

Três elementos, uma ordem



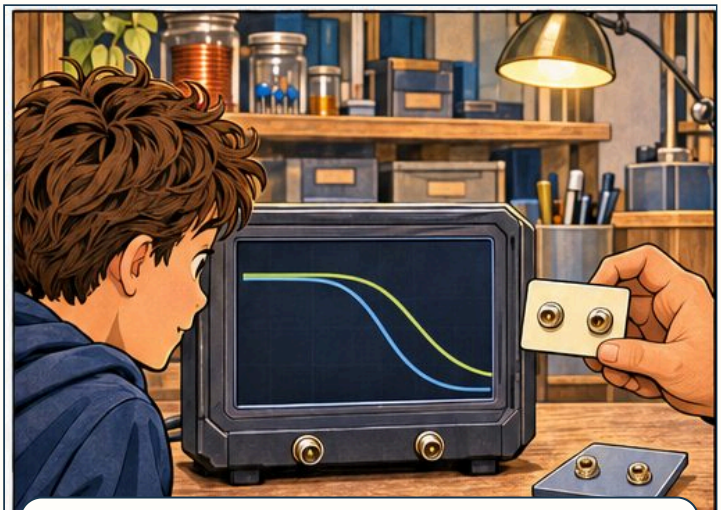
Esta rede ideal tem três elementos reativos: C, L e C.



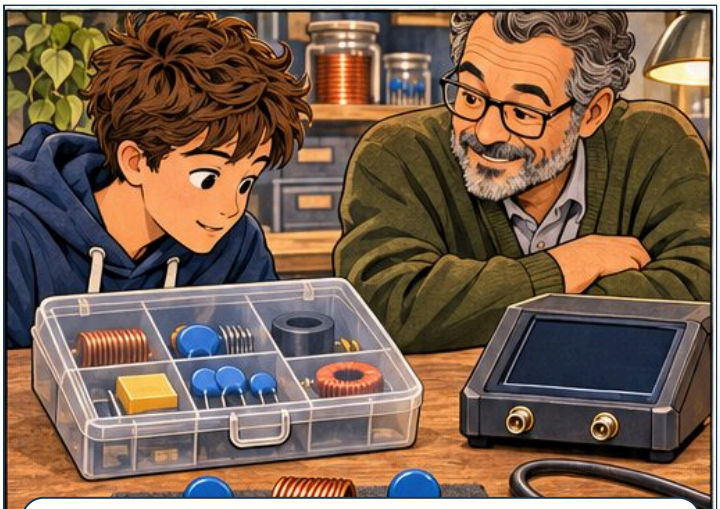
Aqui realizam um filtro passa-baixo de terceira ordem.



A ordem caracteriza, entre outros aspetos, a inclinação distante do modelo.



Uma impedância inadequada alteraria, contudo, a resposta.



Acrescentar componentes ao acaso não cria o filtro desejado.

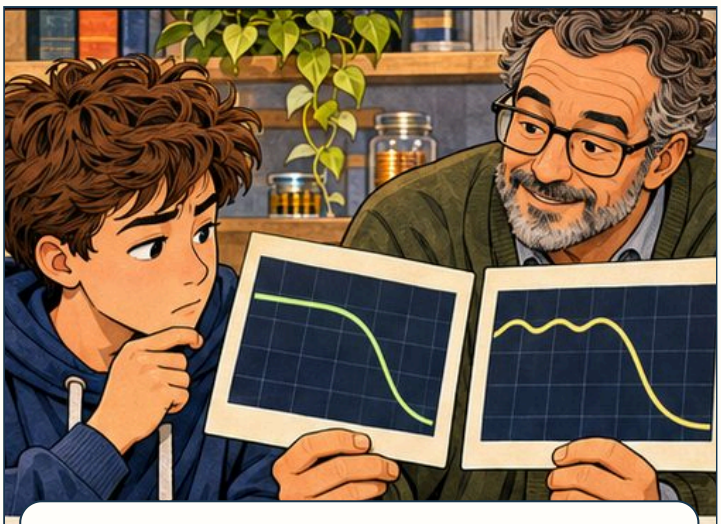


A topologia do esquema deve acompanhar o cálculo.

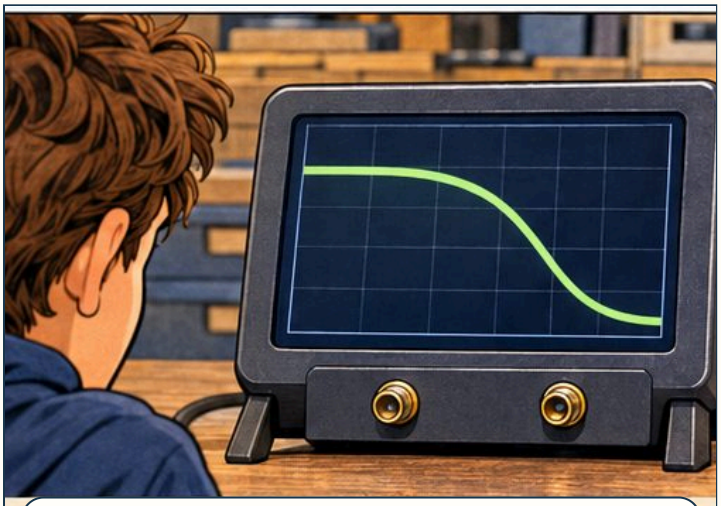
Porquê Butterworth?



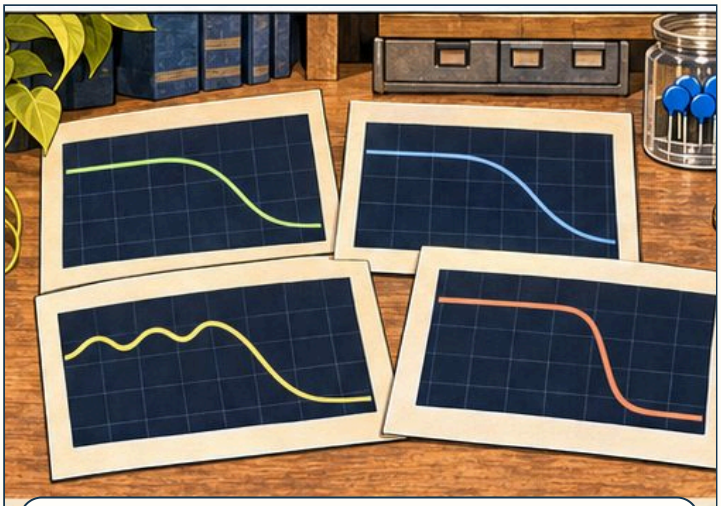
A resposta Butterworth é maximamente plana na banda passante.



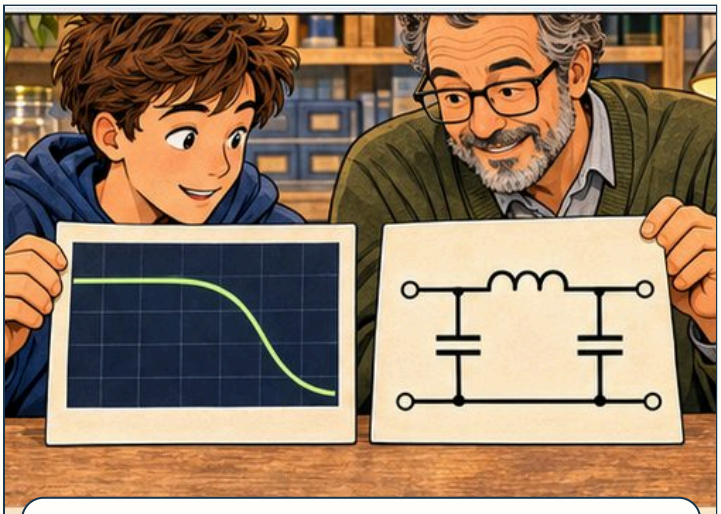
O modelo ideal não apresenta ondulações nessa banda.



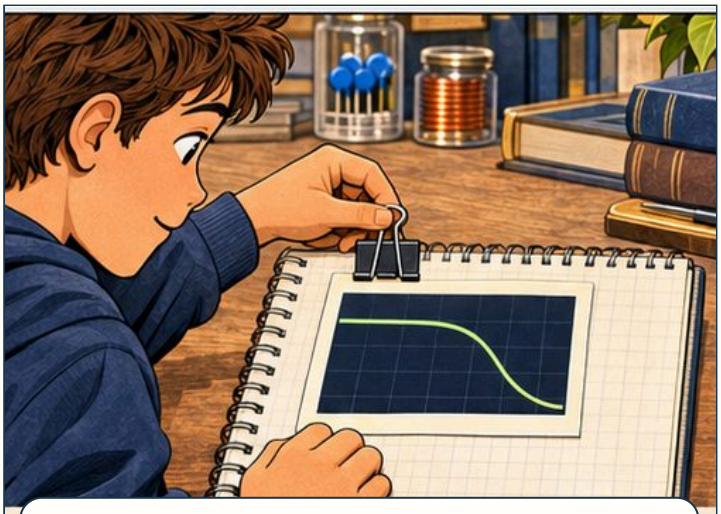
A transição mantém-se progressiva, com uma curvatura característica.



Outras respostas aceitam compromissos diferentes.



Escolhem esta família para um primeiro projeto claro.



O nome diz, portanto, mais do que apenas passa-baixo.

Um protótipo para começar



Um protótipo normalizado fornece os coeficientes do projeto.



Para este Butterworth de terceira ordem, são 1, 2 e 1.



Correspondem, pela ordem, a condensador, bobina e condensador.



Estes coeficientes ainda não são valores de componentes para comprar.

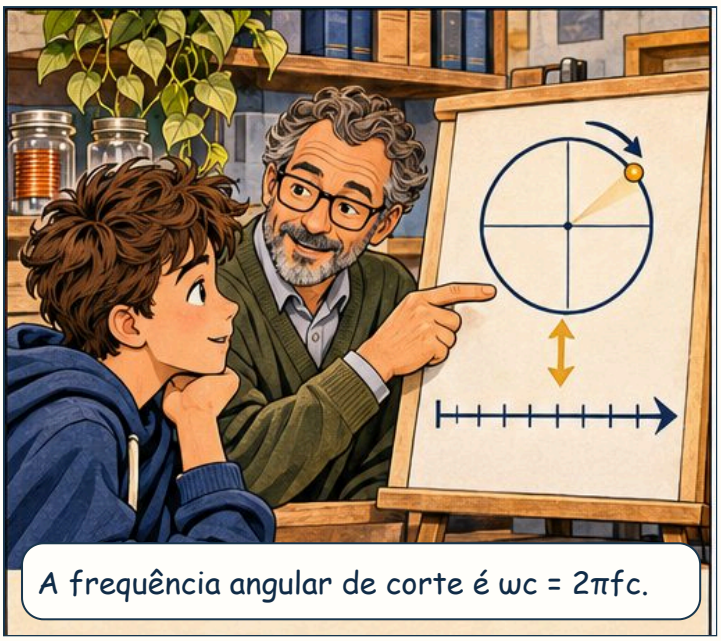


Pressupõem o protótipo e as terminações adequados.

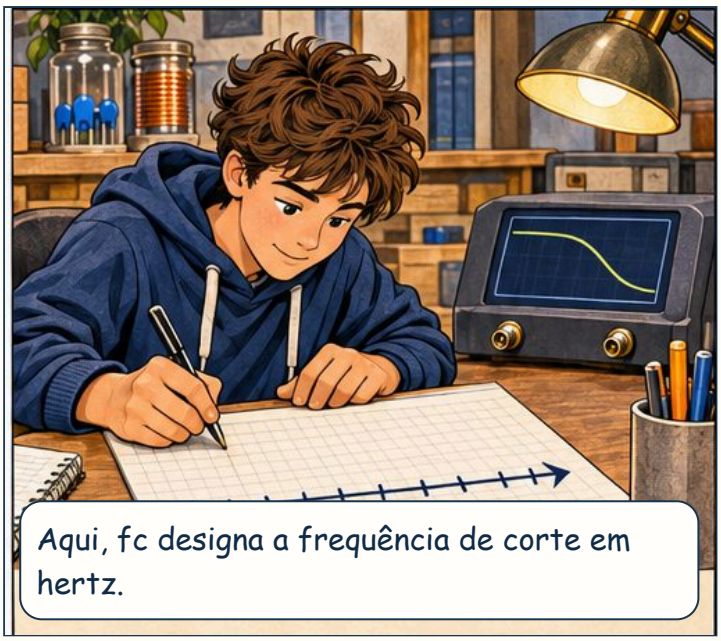


Falta definir as escalas de frequência e impedância.

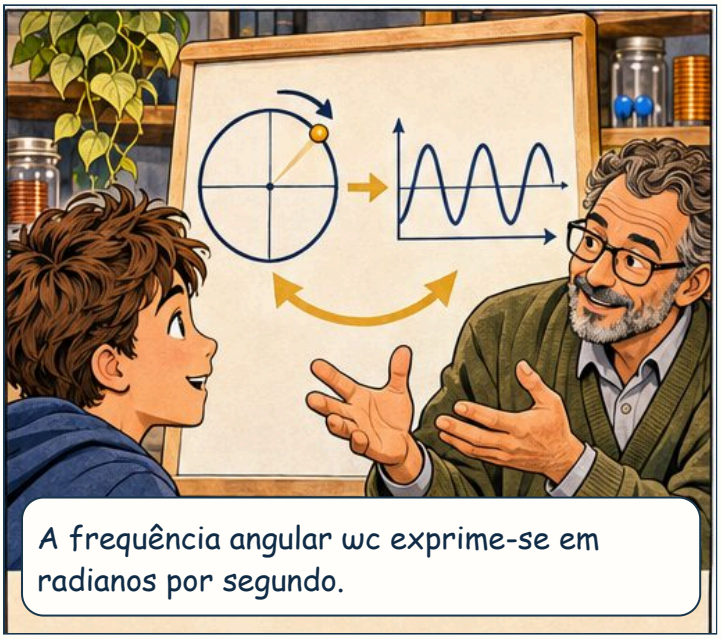
Mudar de escala



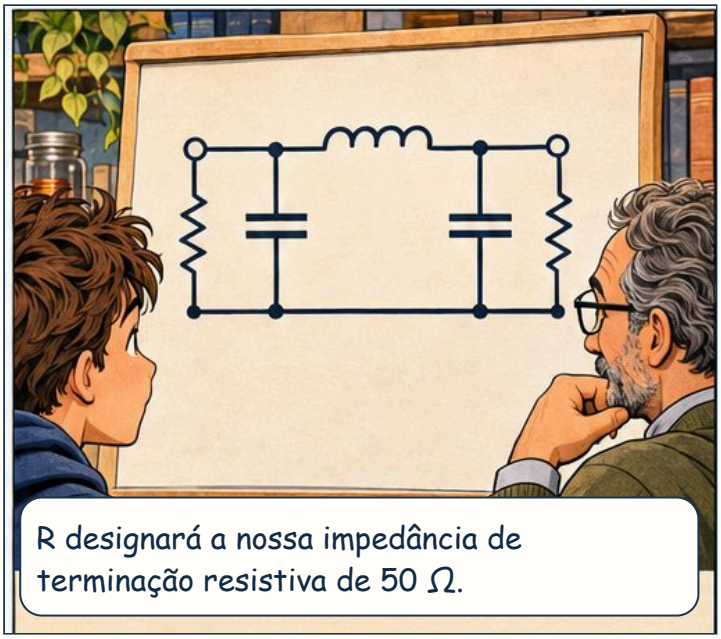
A frequência angular de corte é ωc = 2πfc.



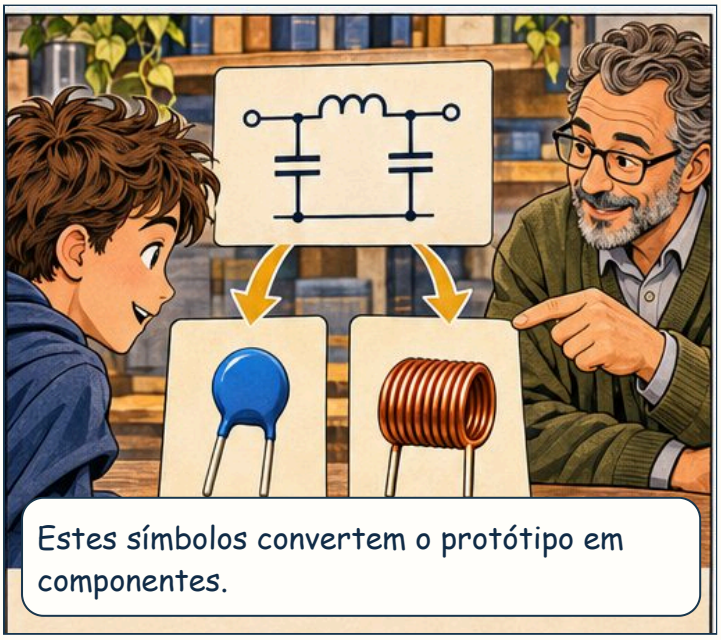
Aqui, fc designa a frequência de corte em hertz.



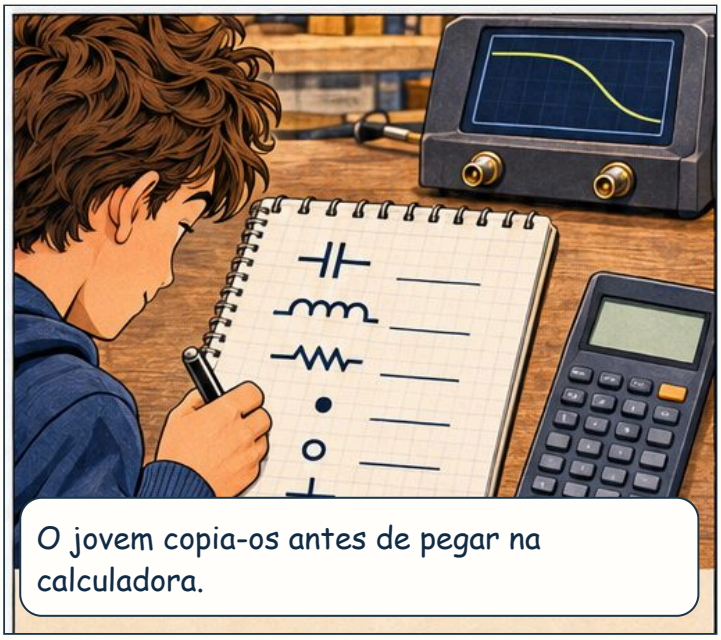
A frequência angular ωc exprime-se em radianos por segundo.



R designará a nossa impedância de terminação resistiva de 50 Ω.



Estes símbolos convertem o protótipo em componentes.

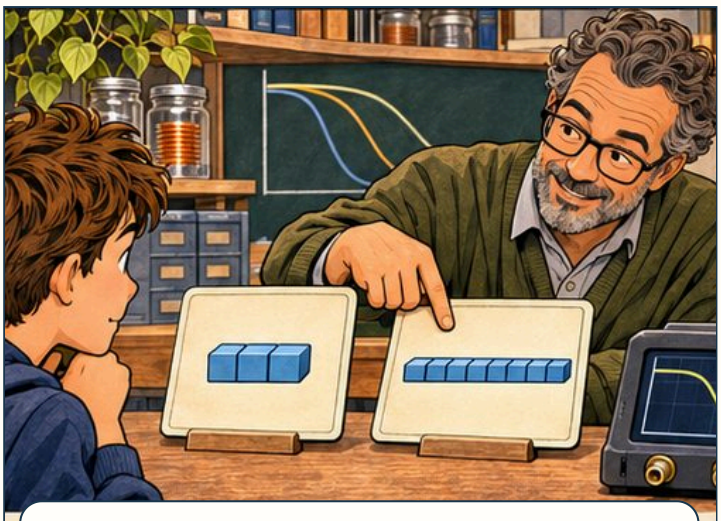


O jovem copia-os antes de pegar na calculadora.

As unidades antes dos números



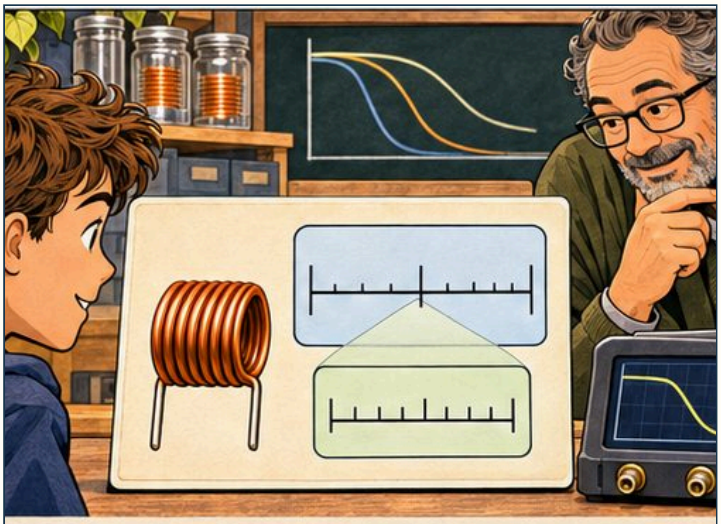
Um megahertz vale um milhão de hertz.



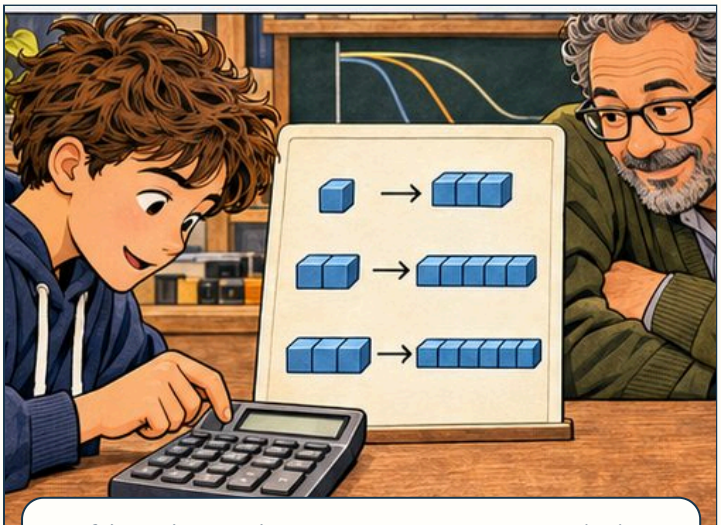
O corte de 10 MHz vale, portanto, 10 000 000 Hz.



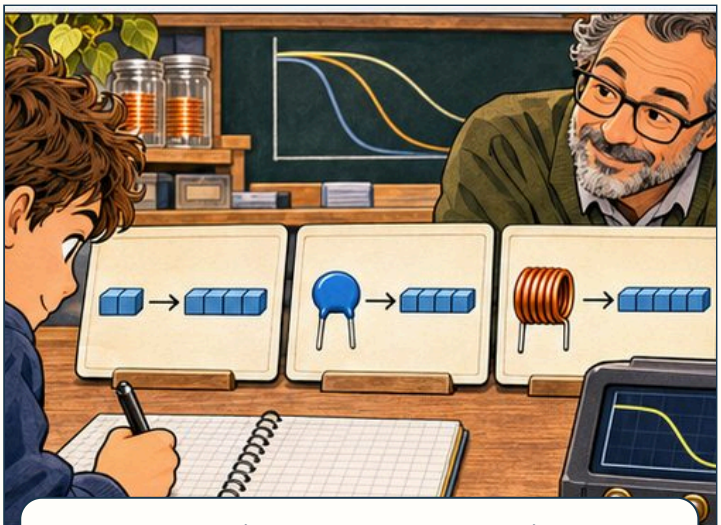
Um picofarad vale 10^{-12} F.



Um microhenry vale 10^{-6} H.



As fórmulas utilizarão primeiro as unidades de base.

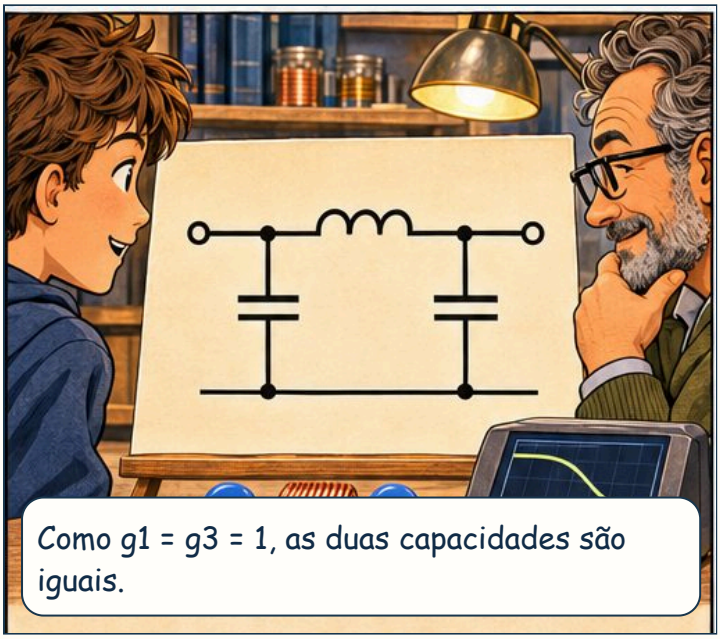


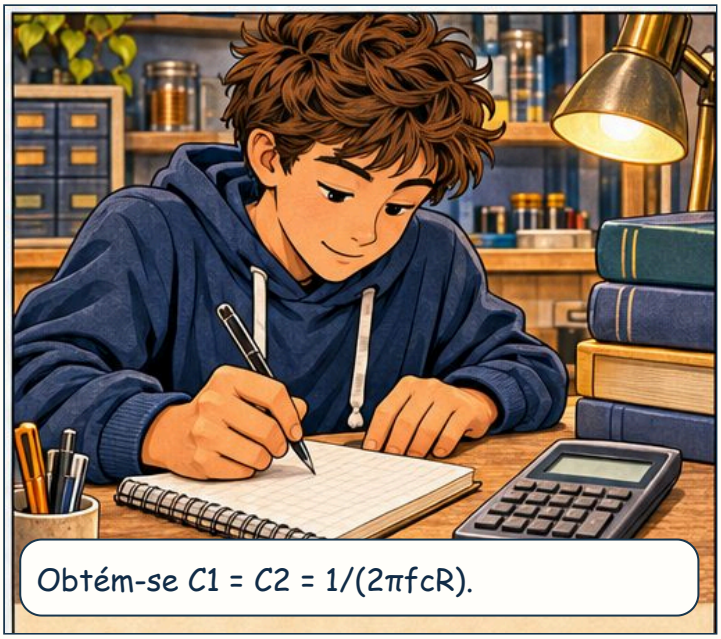
O jovem mantém as conversões visíveis junto dos cálculos.

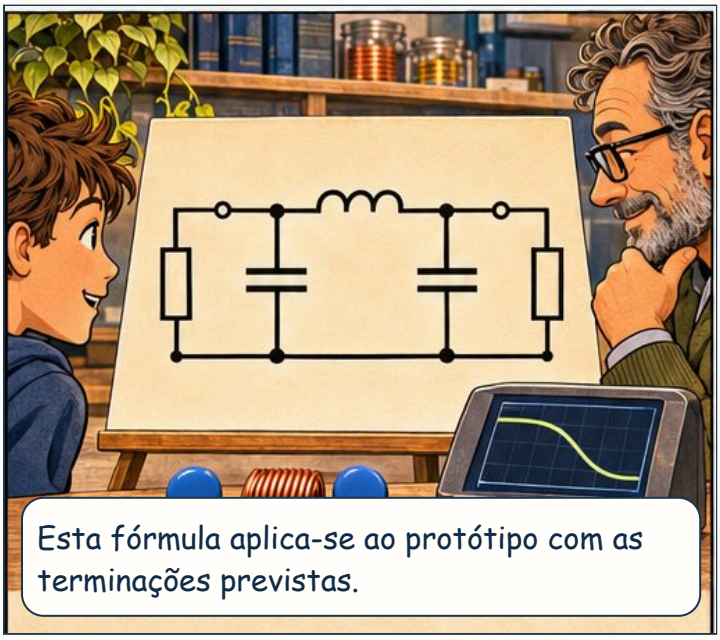
As fórmulas dos condensadores













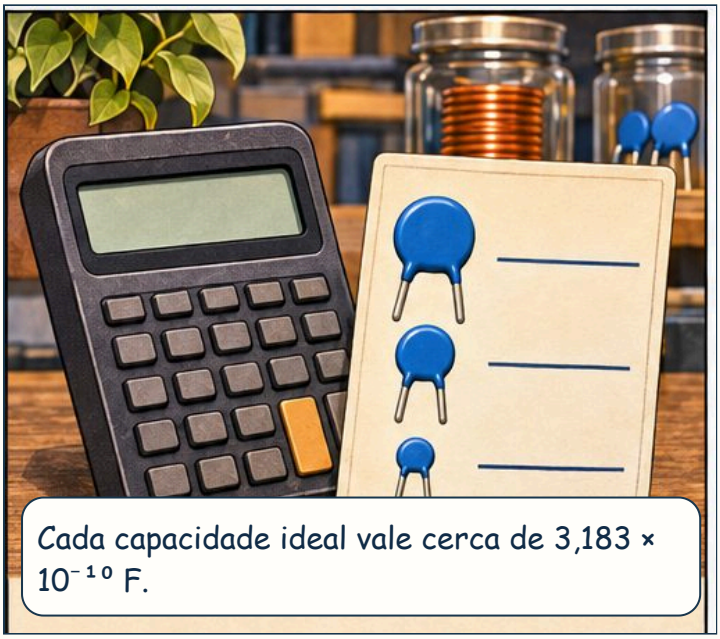
Calcular as capacidades



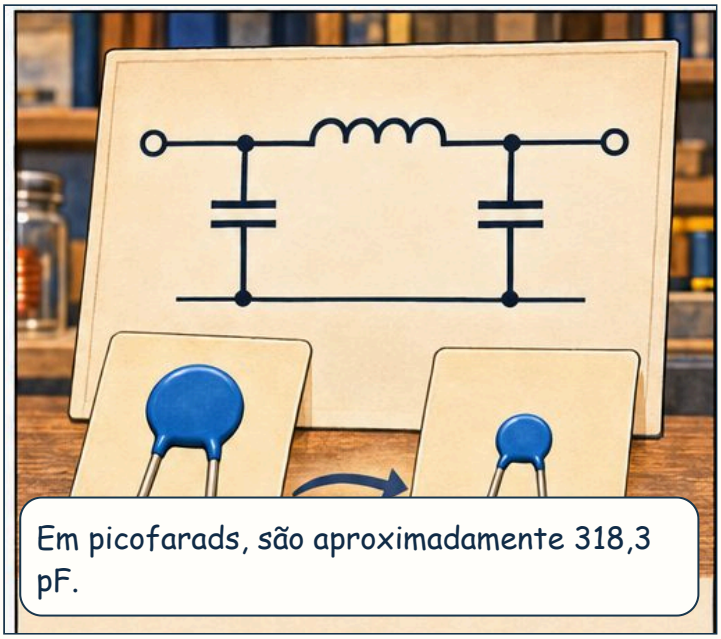
Substituem fc por 10 000 000 Hz e R por 50 Ω.



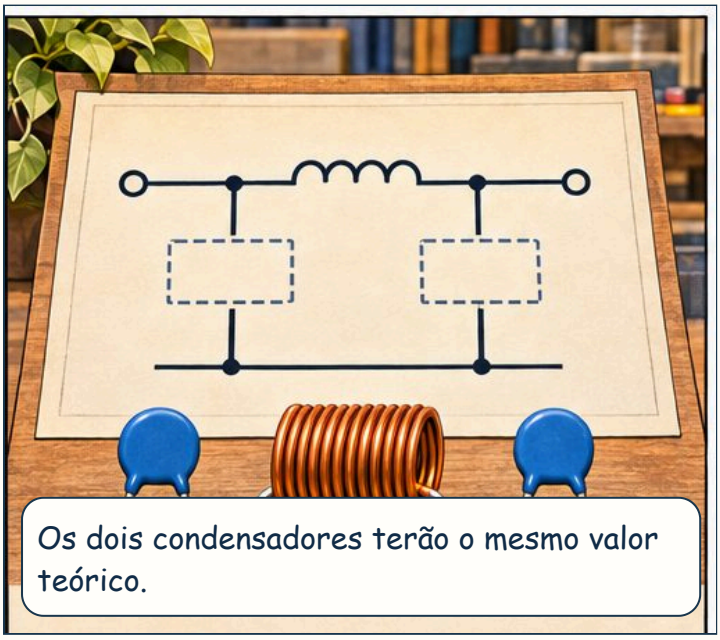
O denominador vale cerca de 3,142 × 10⁹.



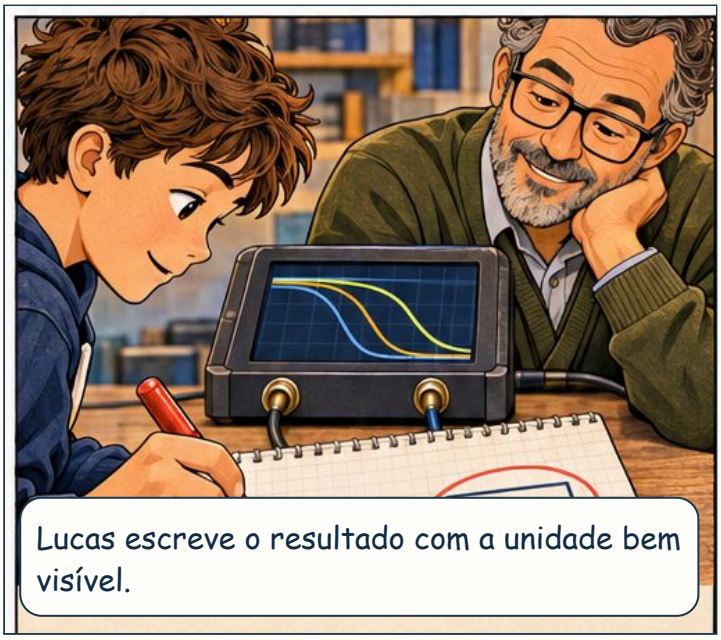
Cada capacidade ideal vale cerca de 3,183 × 10^{-10} F.



Em picofarads, são aproximadamente 318,3 pF.

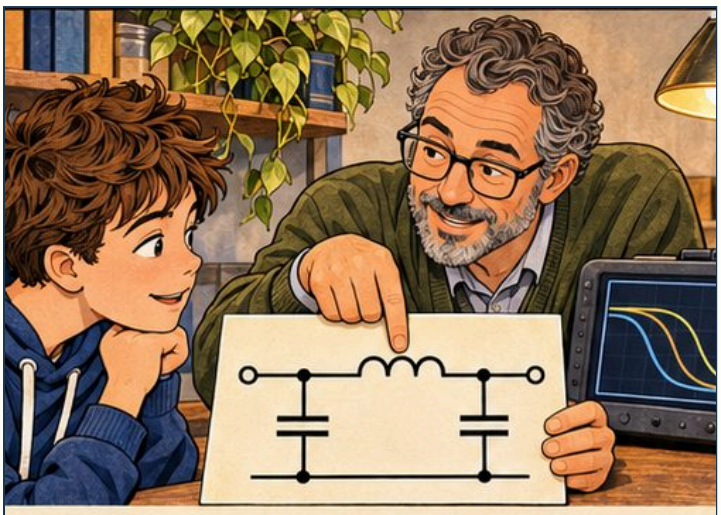


Os dois condensadores terão o mesmo valor teórico.



Lucas escreve o resultado com a unidade bem visível.

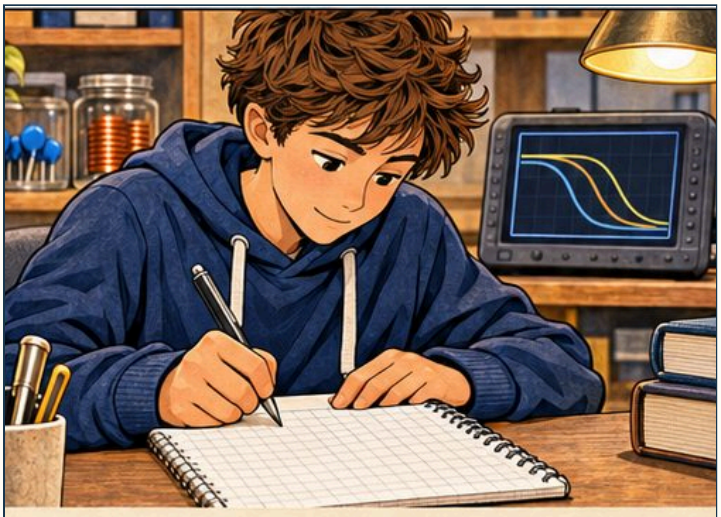
A fórmula da bobina



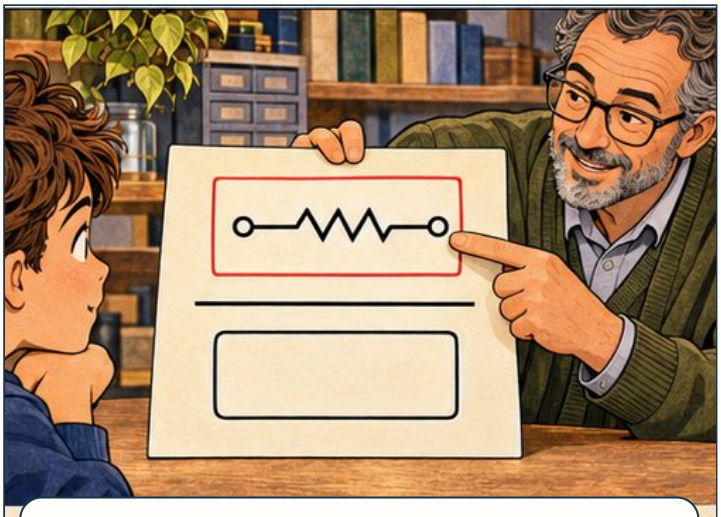
Para a bobina em série, L = g2R/ωc.



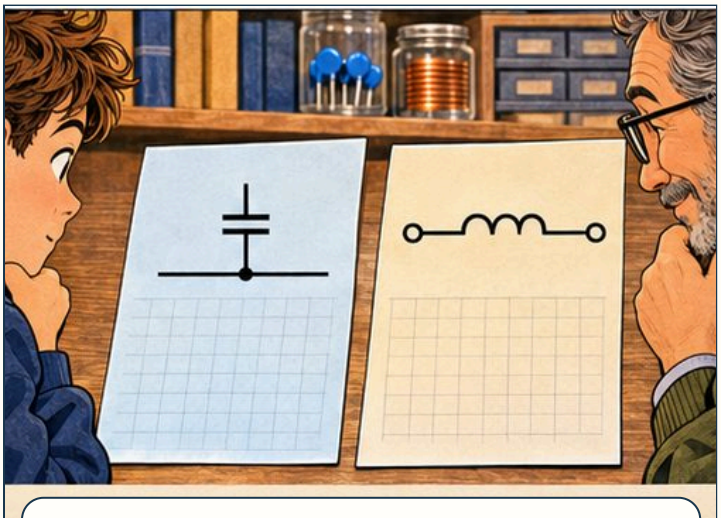
O coeficiente central vale aqui g2 = 2.



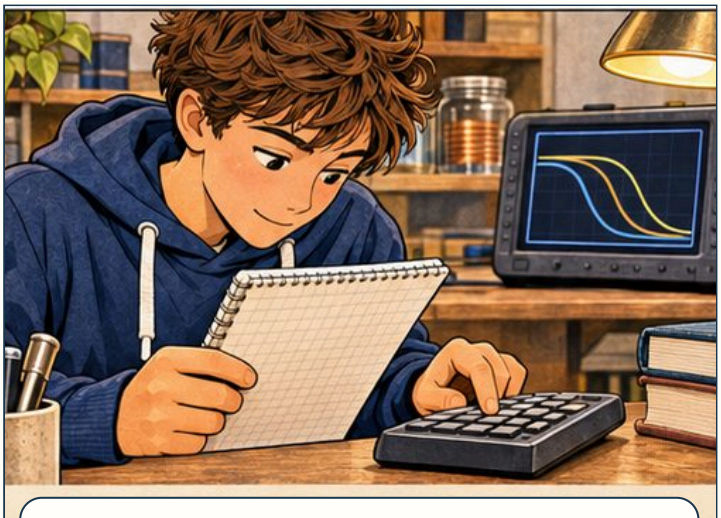
Obtém-se, portanto, L = 2R/(2πfc).



A resistência de terminação está agora no numerador.



O jovem compara esta fórmula com a dos condensadores.

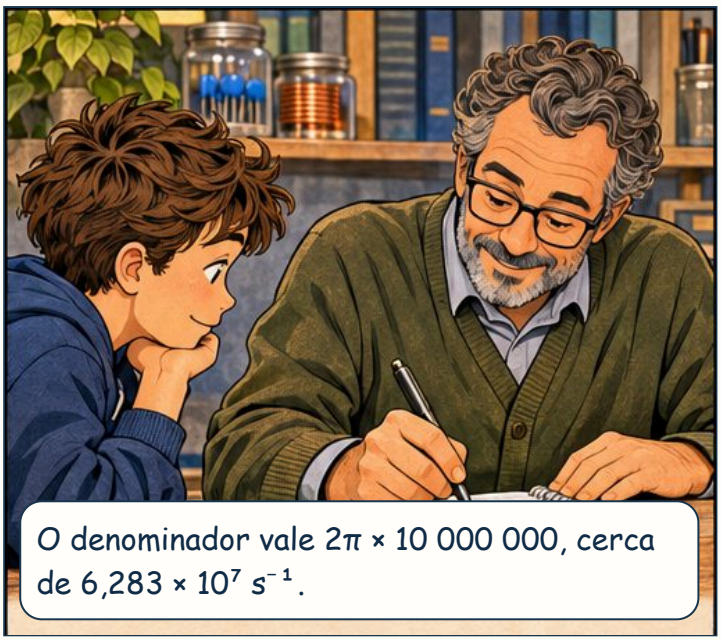


A semelhança visual não dispensa uma releitura.

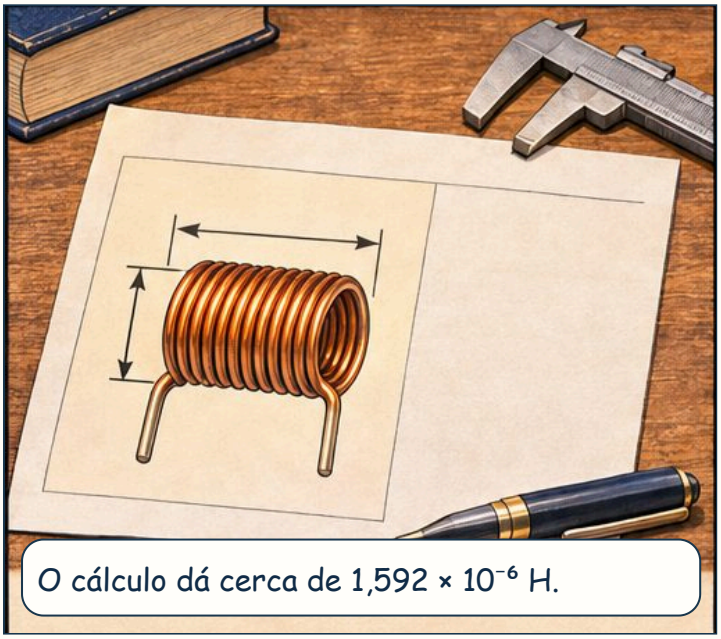
Calcular a indutância



O numerador vale 2 × 50, ou seja, 100 Ω.



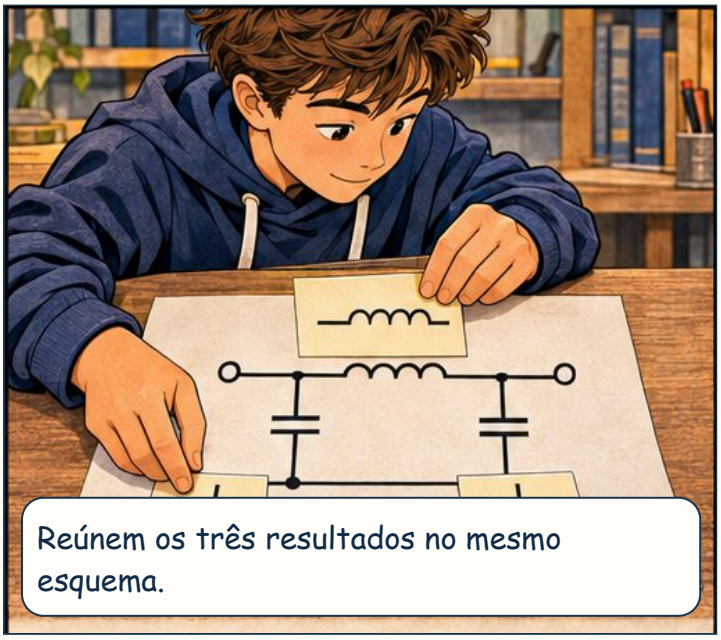
O denominador vale 2π × 10 000 000, cerca de 6,283 × 10^{7} s^{-1}.



O cálculo dá cerca de 1,592 × 10^{-6} H.



A bobina ideal terá aproximadamente 1,59 μH de indutância.



Reúnem os três resultados no mesmo esquema.



O projeto tem agora uma primeira definição completa.

O erro do milhão



O jovem tenta voltar a introduzir rapidamente o cálculo.



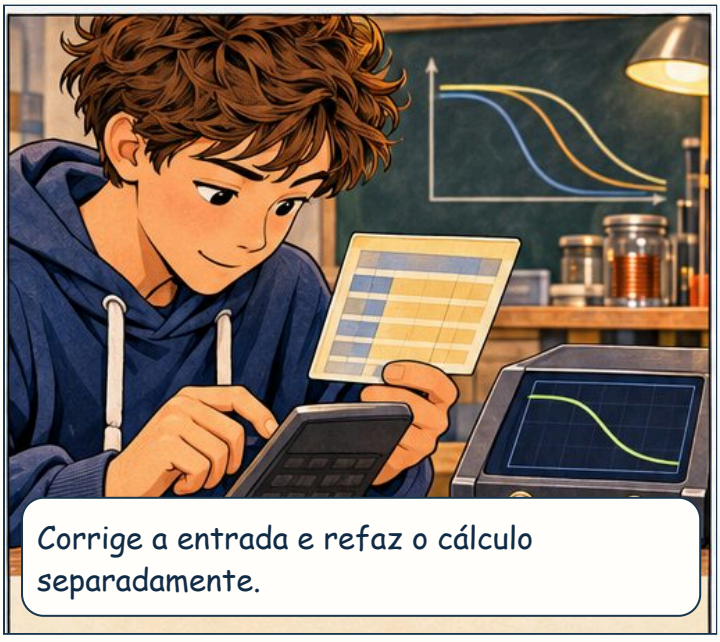
Escreve 10 em vez de 10 000 000.



O resultado fica um milhão de vezes demasiado grande.



A comparação com os componentes esperados revela logo o problema.



Corrige a entrada e refaz o cálculo separadamente.

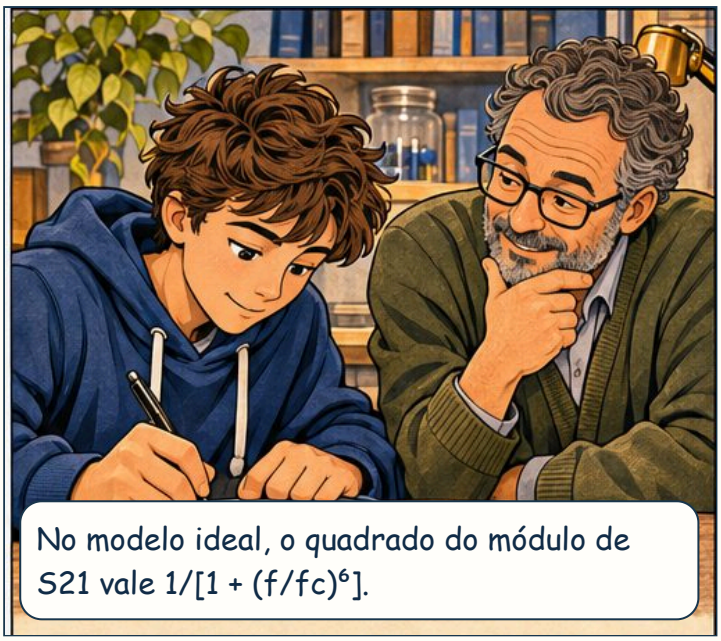


Verificar a ordem de grandeza torna-se um hábito útil.

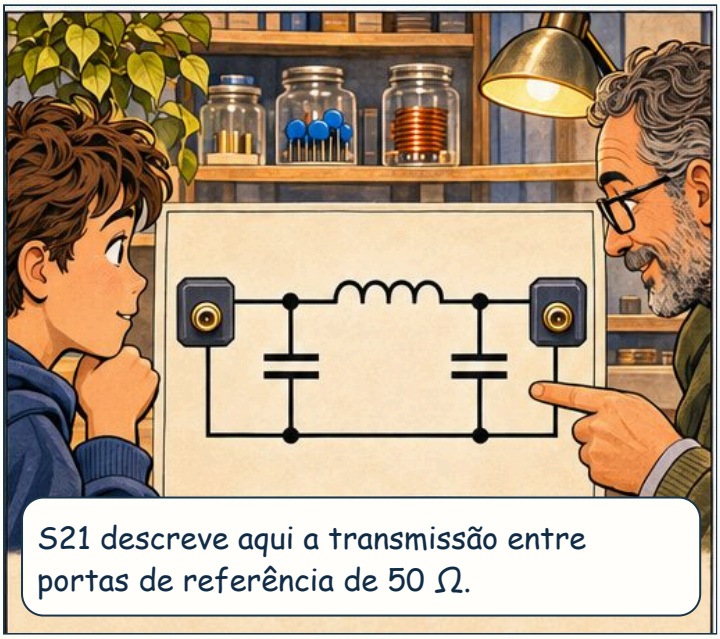
Prever uma curva inteira



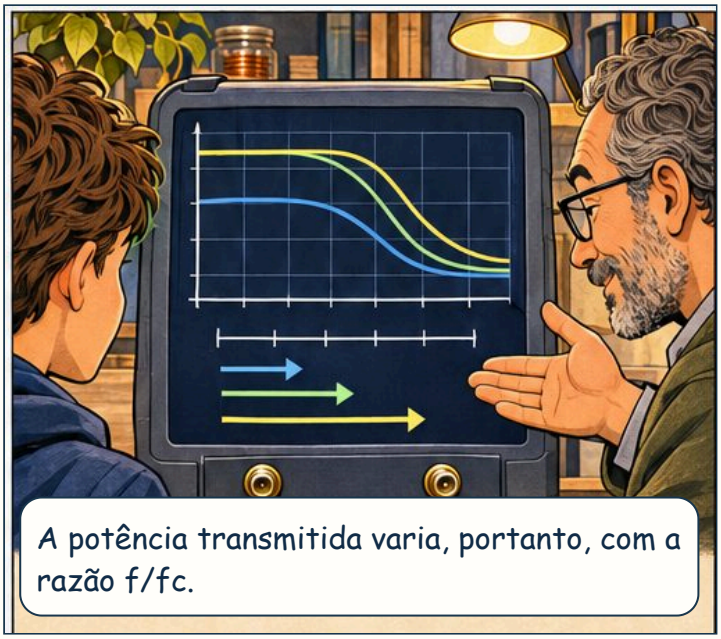
Três valores ainda não contam toda a resposta.



No modelo ideal, o quadrado do módulo de S21 vale $1/[1 + (f/fc)^6]$.



S21 descreve aqui a transmissão entre portas de referência de 50 Ω.



A potência transmitida varia, portanto, com a razão f/fc.



A curva teórica serve de referência antes da medição.



O jovem prepara várias frequências de comparação.

O que significa menos três decibéis?



A f = fc, a razão ideal de potência transmitida vale 1/2.



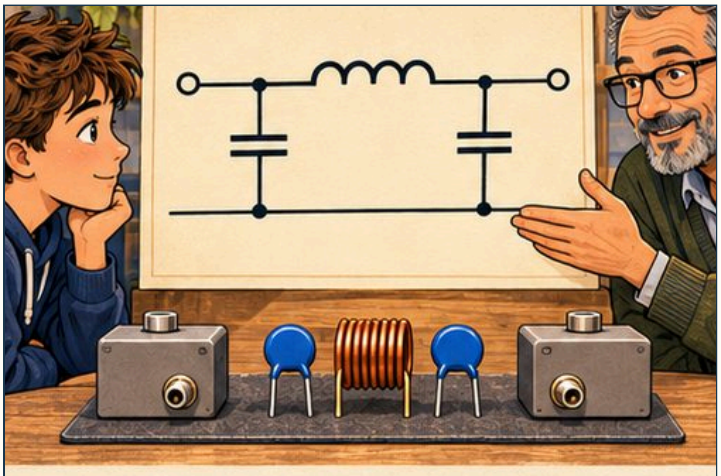
Em decibéis, 10 log10(1/2) dá cerca de −3,01 dB.



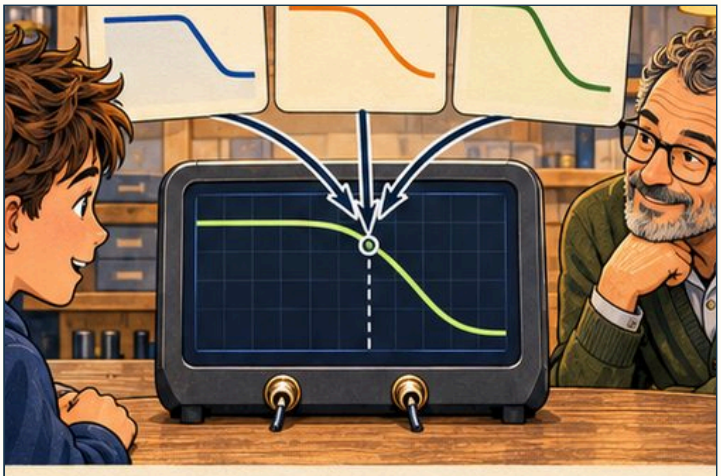
O módulo de S21 vale então cerca de 0,707.



Esta amplitude não vale, portanto, metade.



O cálculo utiliza as referências adequadas de 50 Ω.

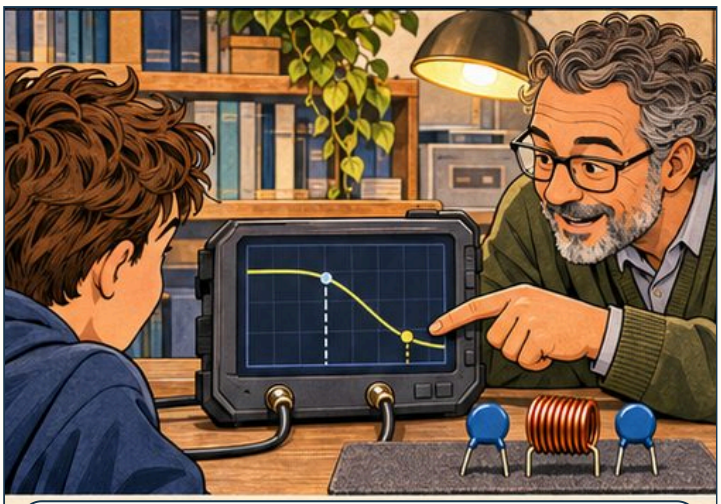


O jovem relaciona três expressões do mesmo ponto da curva.

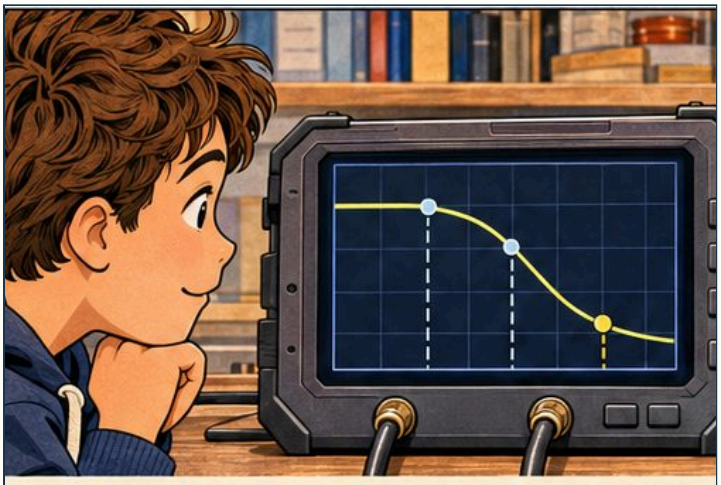
Para lá do corte



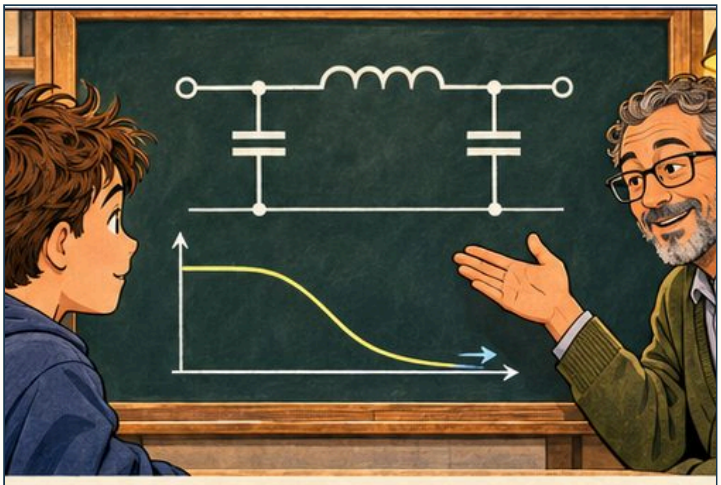
A 20 MHz, f/fc vale 2.



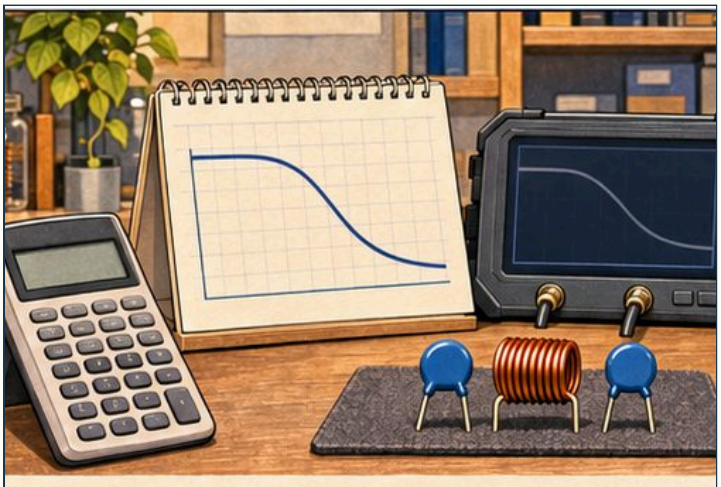
A transmissão ideal passa a cerca de −18,13 dB.



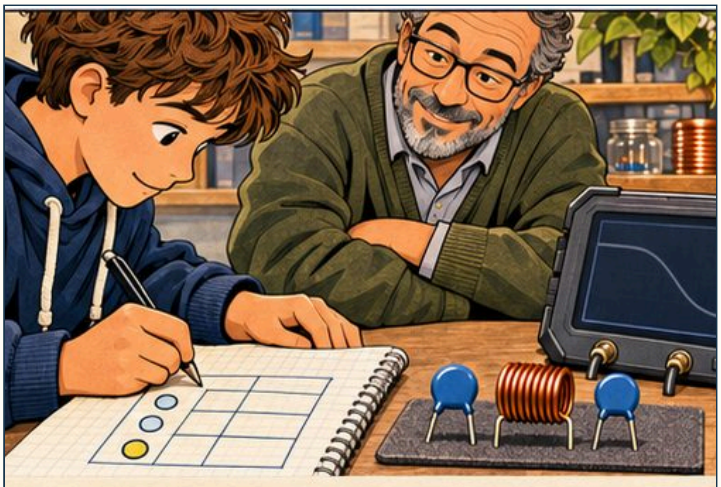
A 30 MHz, f/fc vale 3: cerca de −28,63 dB.



A atenuação aumenta, mas permanece finita.



Estes números são calculados, não medidos no circuito.

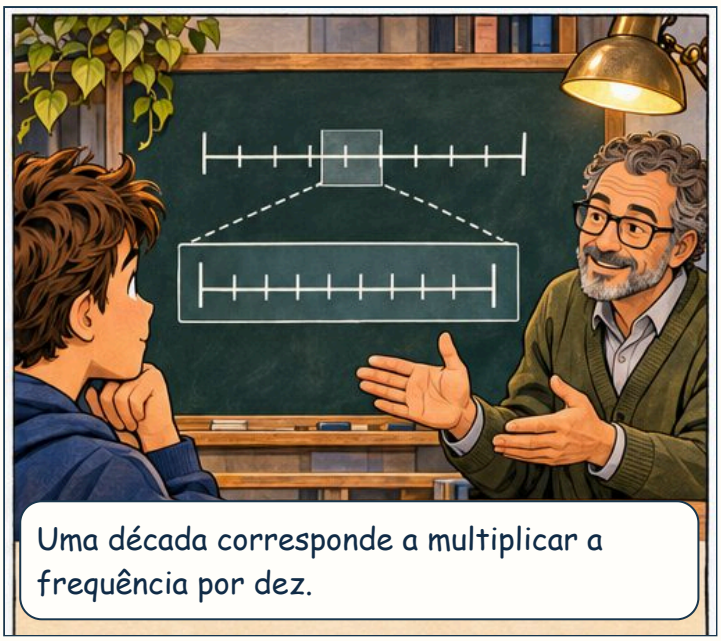


O jovem coloca-os na coluna das previsões.

A inclinação não é uma promessa



Longe do corte, a atenuação ideal tende para 60 dB por década.



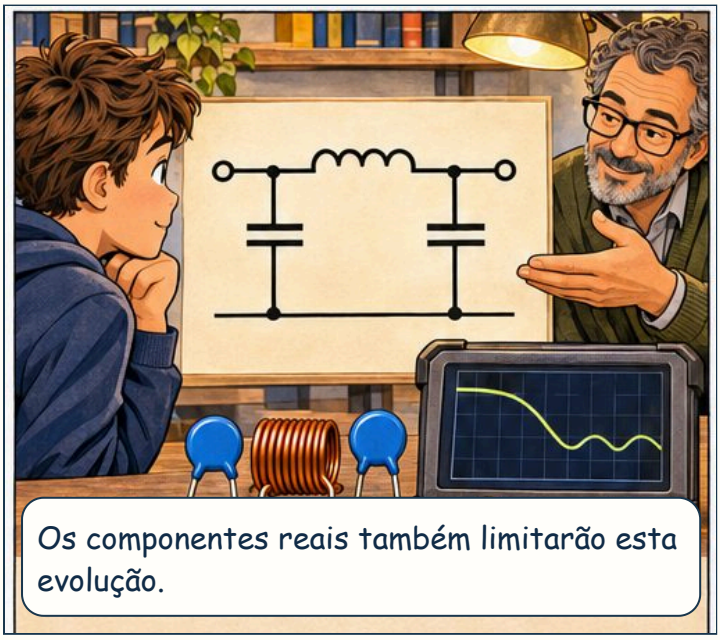
Uma década corresponde a multiplicar a frequência por dez.



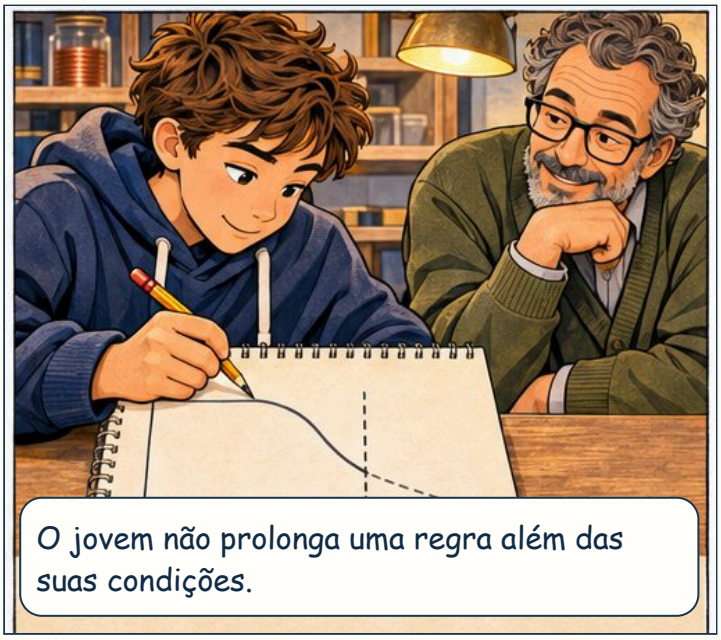
Esta inclinação assintótica pertence ao modelo de terceira ordem.



Perto do corte, a curva não é uma reta.

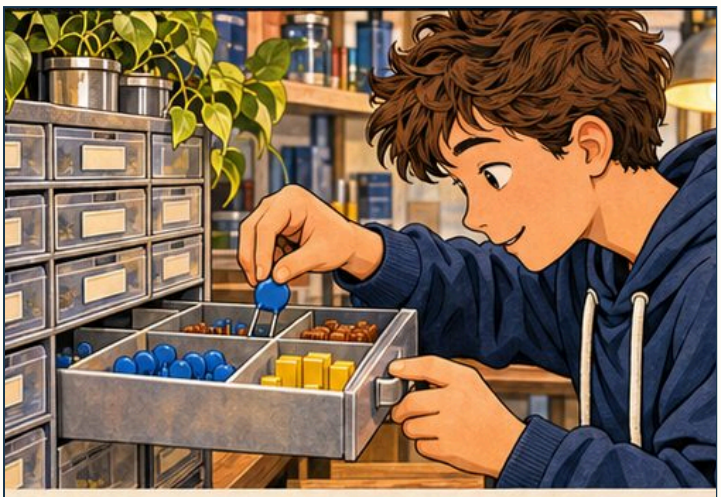


Os componentes reais também limitarão esta evolução.

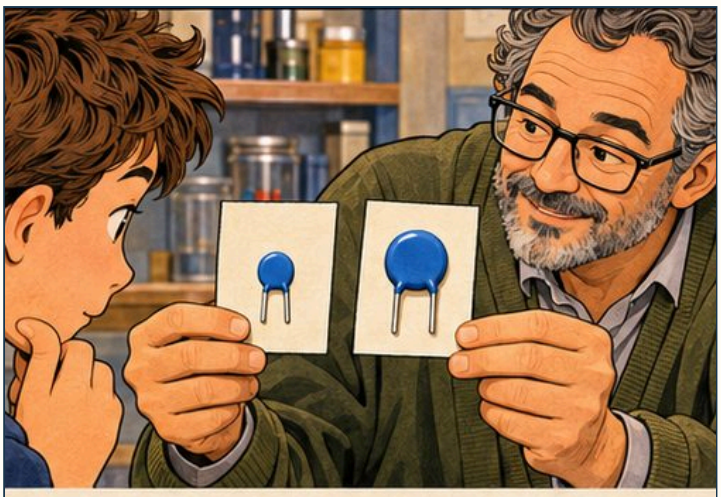


O jovem não prolonga uma regra além das suas condições.

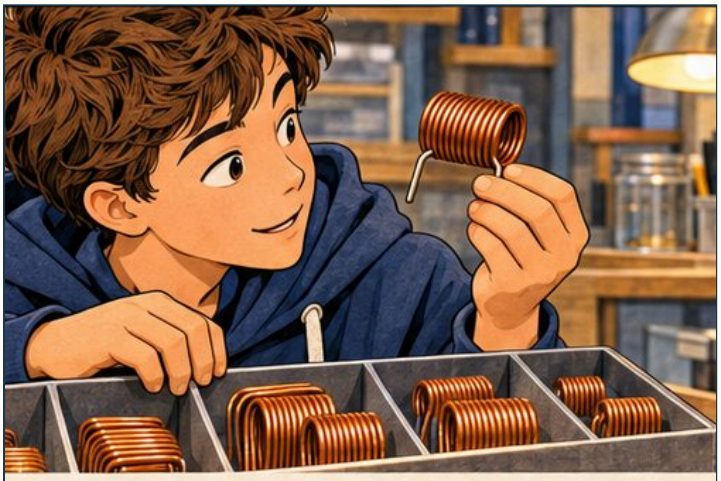
Os valores disponíveis



A gaveta não contém necessariamente condensadores de 318,3 pF.



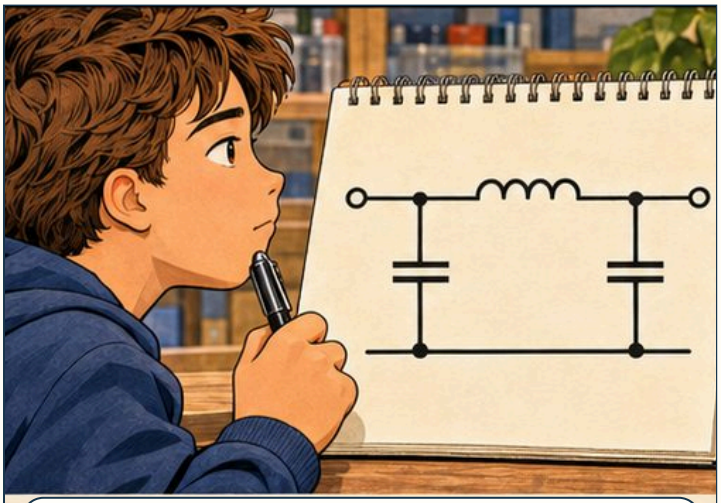
O valor corrente de 330 pF não é idêntico.



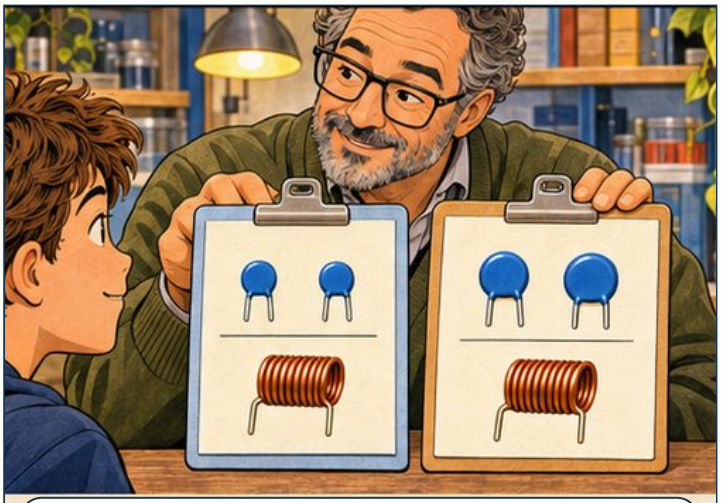
Uma bobina de 1,6 µH aproxima-se do valor calculado.



Escolher estes valores exige recalcular ou simular a resposta.

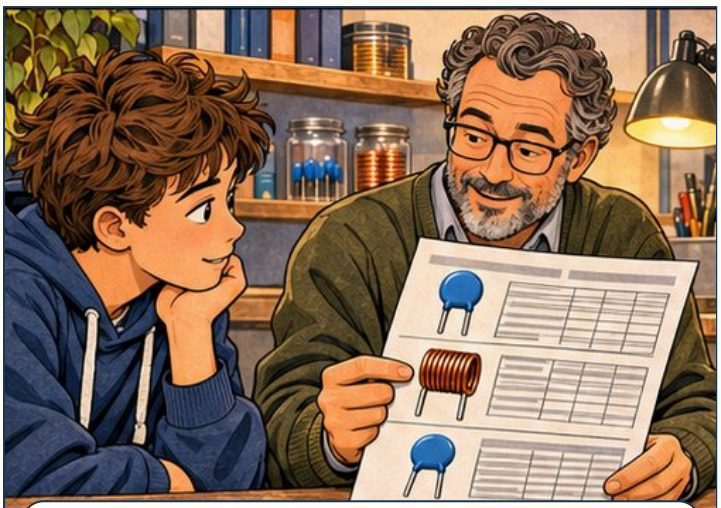


O circuito não passa automaticamente a ser «exatamente 10 MHz».



O jovem separa os valores ideais dos escolhidos.

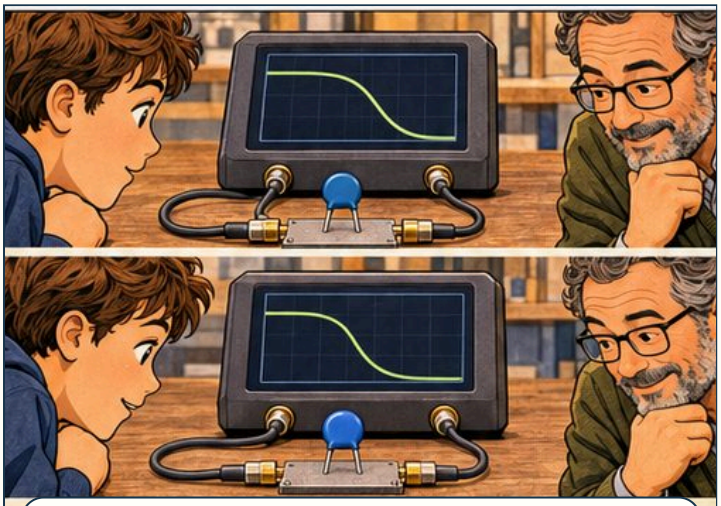
Cada peça tem tolerância



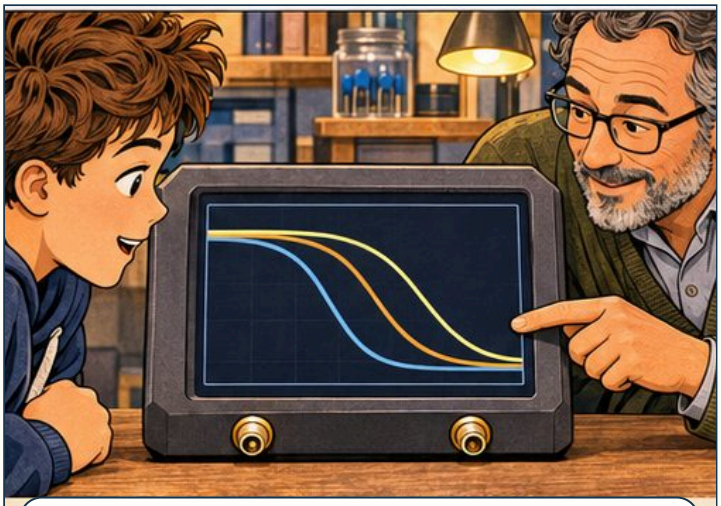
Um valor nominal não é um valor exato garantido.



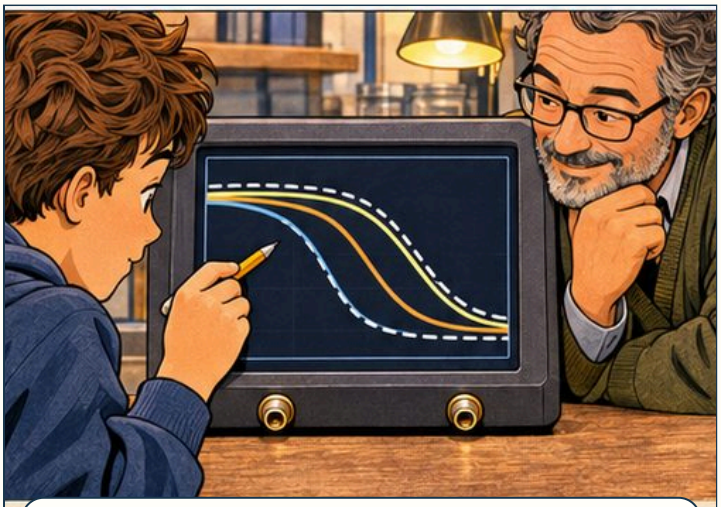
As tolerâncias dos condensadores e da bobina contam.



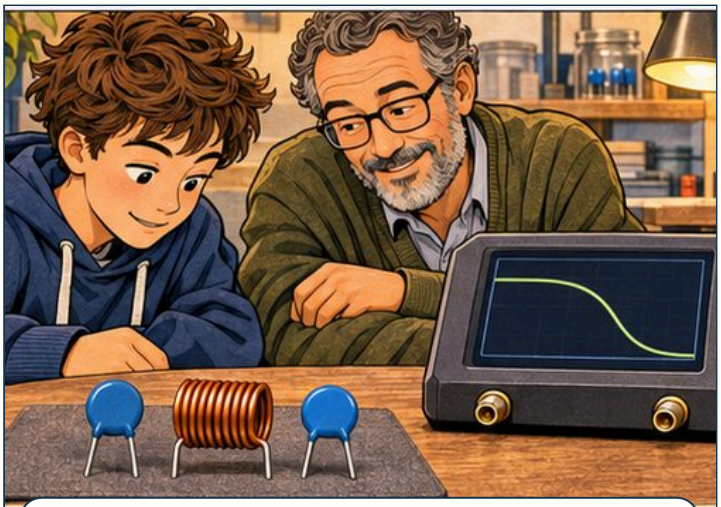
Componentes com a mesma inscrição podem diferir ligeiramente.



Uma simulação pode explorar várias combinações de valores.



Ajuda a prever um intervalo de respostas possíveis.



A medição examinará depois as peças realmente usadas.

Os componentes escondidos



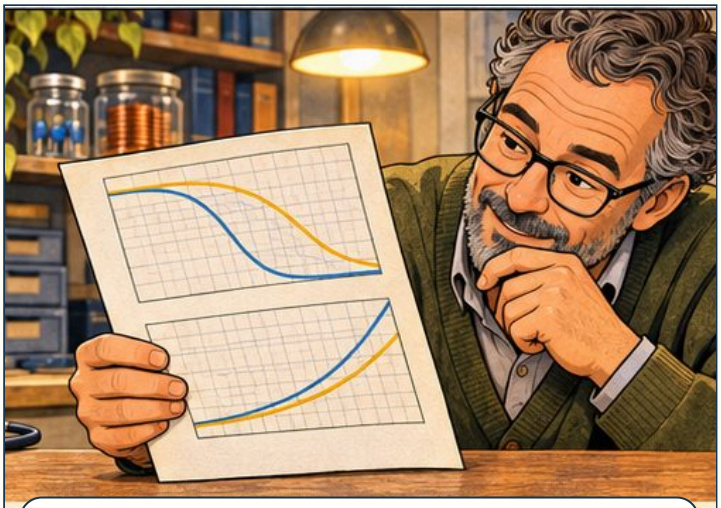
Uma bobina real tem também resistência e capacidade parasita.



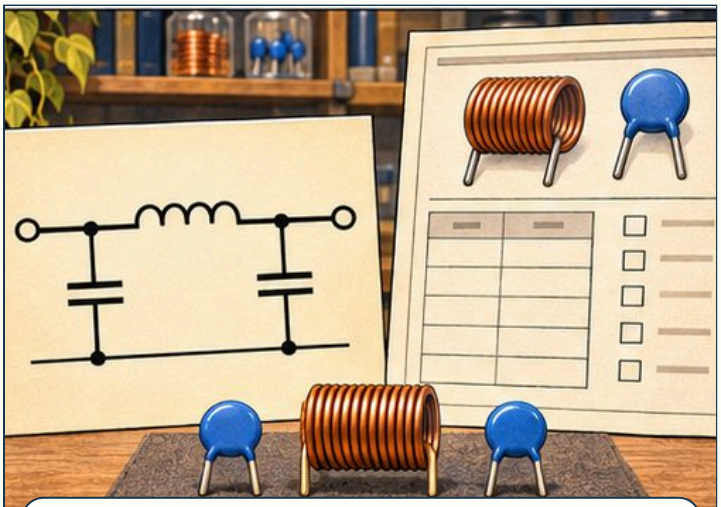
Um condensador tem, entre outros efeitos, perdas e indutância parasita.



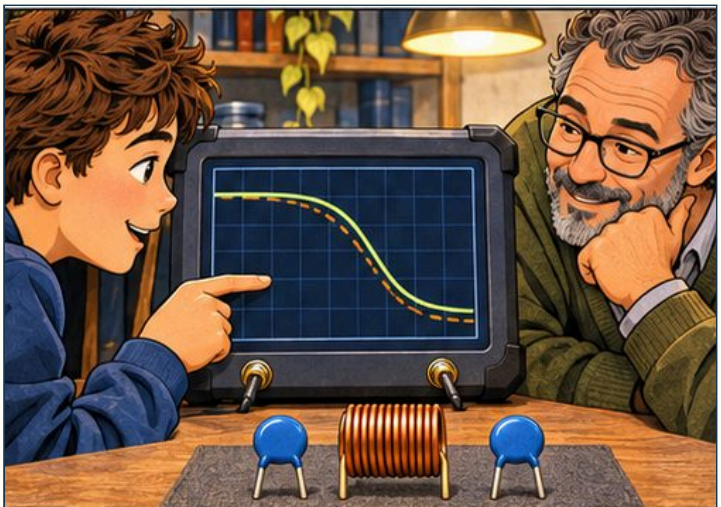
O seu comportamento muda perto de certas ressonâncias.



As fichas técnicas indicam limites a examinar.



O valor em picofarads ou microhenrys não basta.



O jovem aprende a ler além da primeira linha.

A bancada não qualifica um emissor



O demonstrador recebe apenas o sinal fraco previsto pelo analisador.



Uma utilização em emissão exigiria outras verificações.



Seria necessário estudar tensões, correntes, aquecimento e potência admissível.



A tensão suportada por um condensador não qualifica todo o filtro.

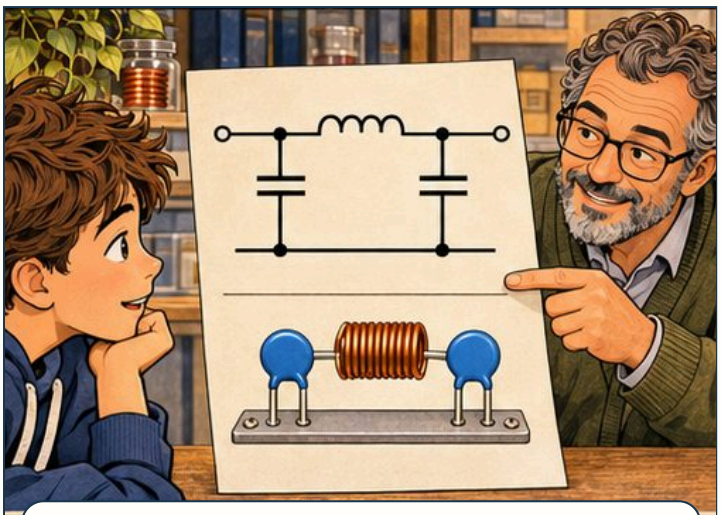


Esta oficina não inclui ensaios de potência.

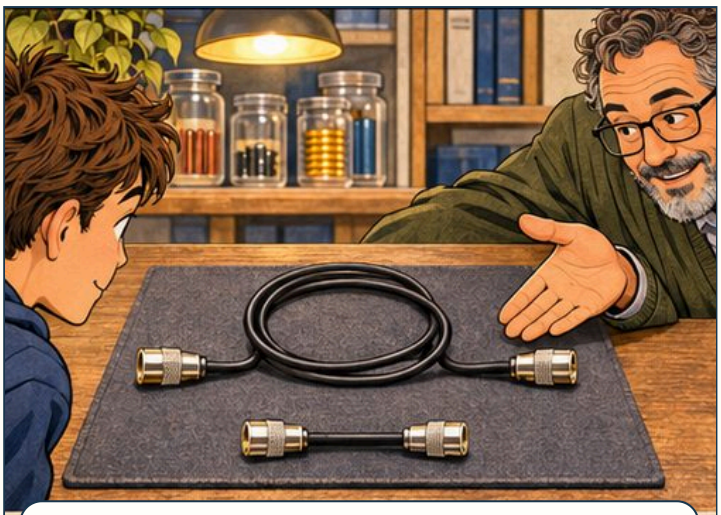


O jovem escreve claramente os limites da realização.

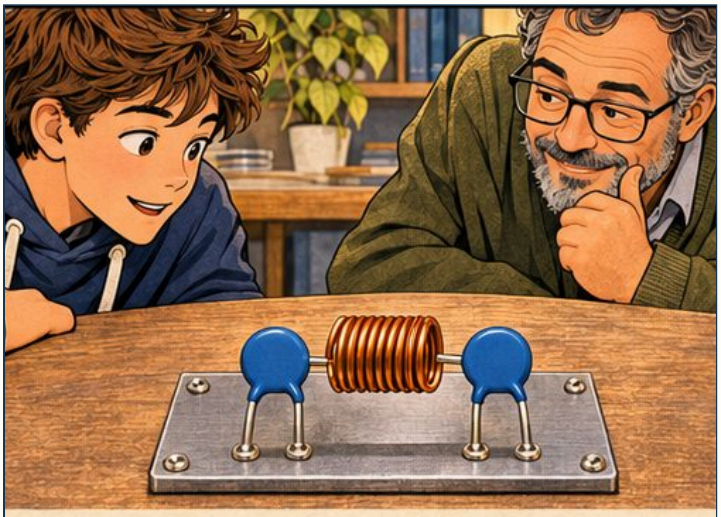
Desenhar a disposição



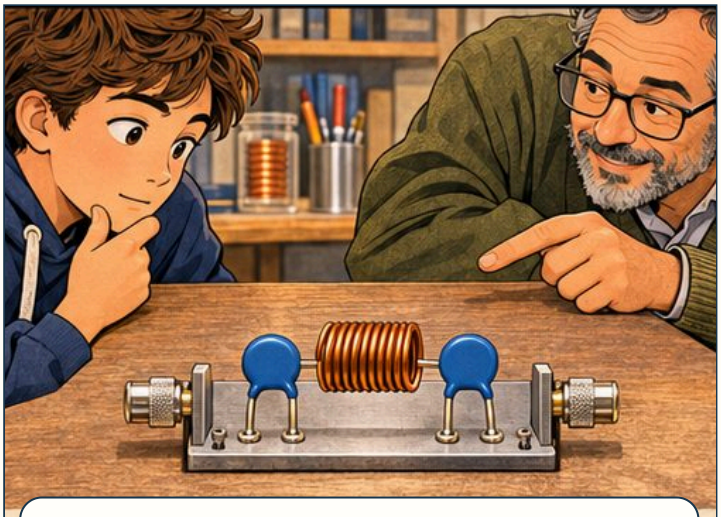
O esquema indica ligações, mas não toda a sua geometria.



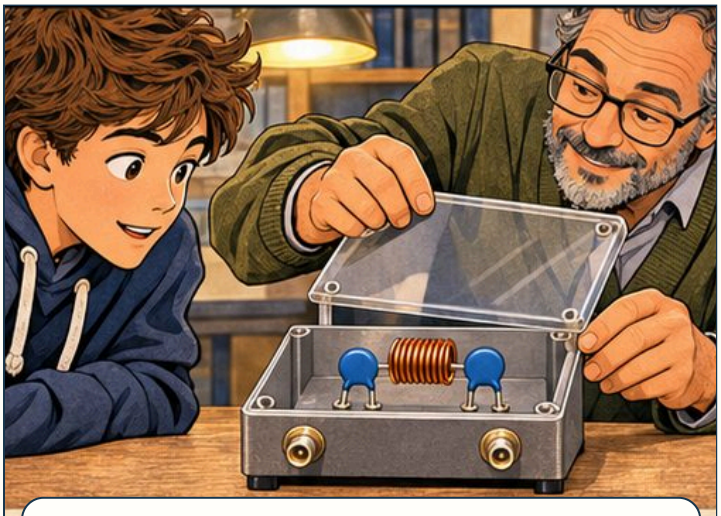
A estas frequências, comprimentos e disposição podem contar.



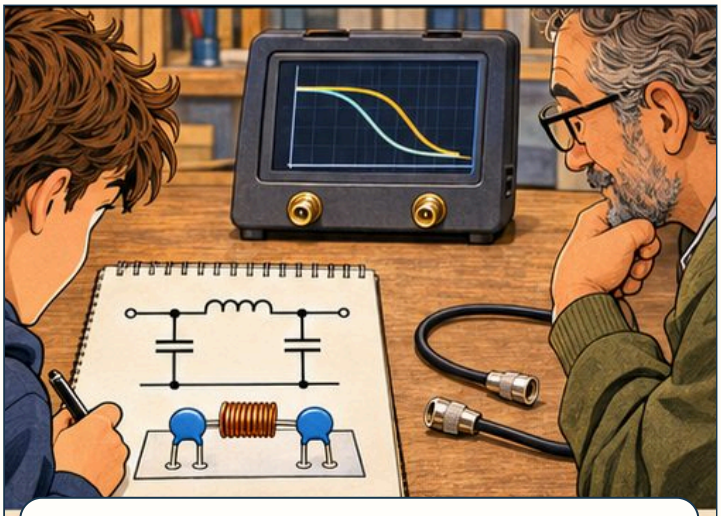
Preveem uma massa comum e ligações curtas.



Afastam também percursos que possam acoplar diretamente.



Henri prepara um demonstrador adequado à medição.

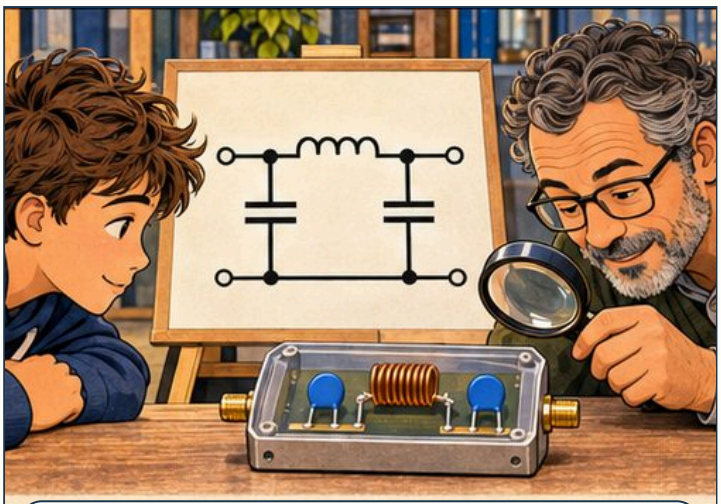


Lucas compara disposição e esquema, ligação a ligação.

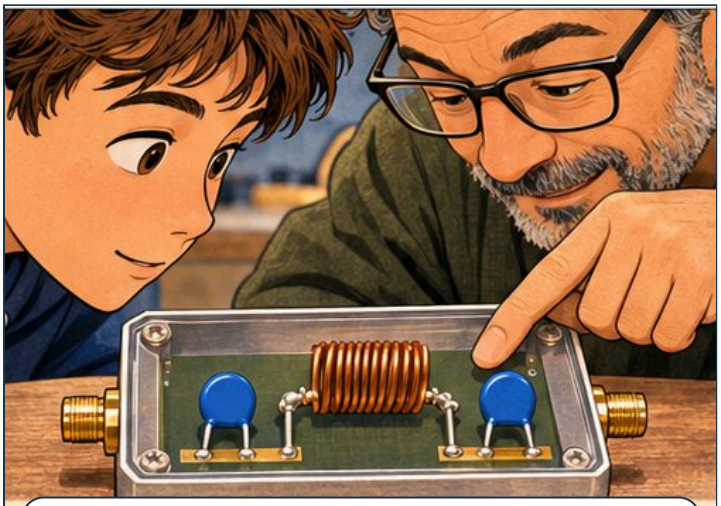
Verificar antes de ligar



A fonte de medição permanece desligada durante a preparação.



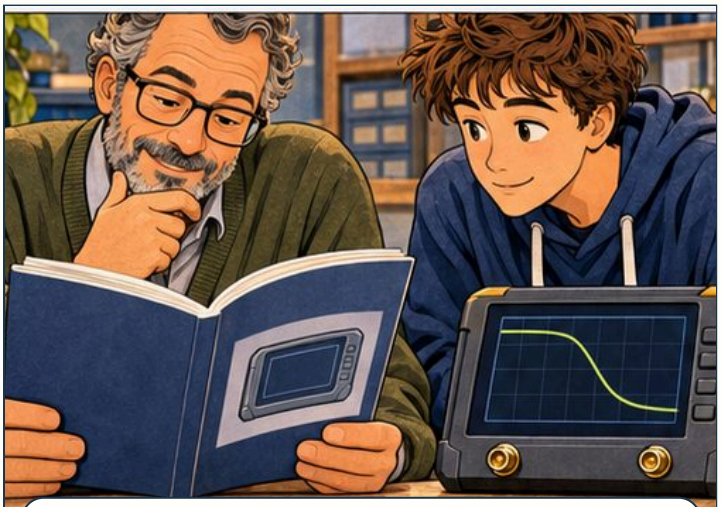
Verificam ligações, componentes e massa comum.



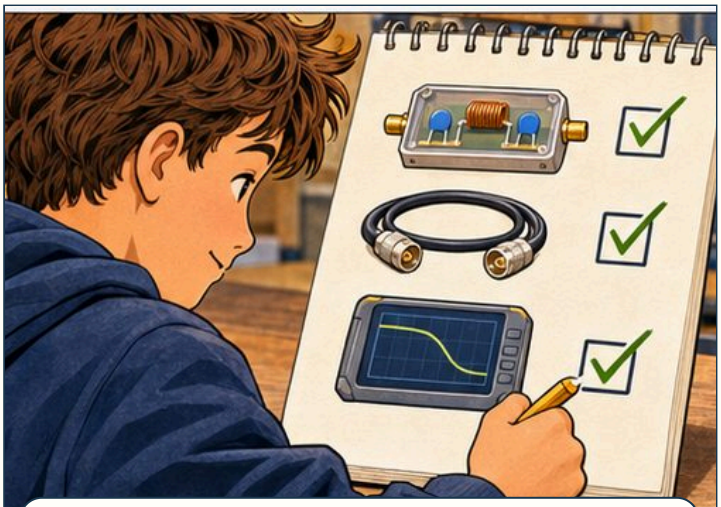
Procuram curtos-circuitos, erros de ligação e peças danificadas.



Inspecionam depois conectores e cabos.



O mentor verifica os limites de entrada do aparelho.

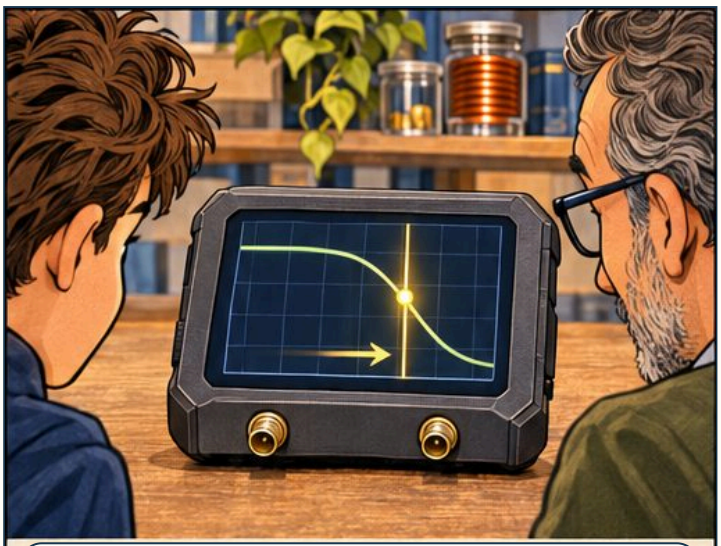


O jovem termina a lista antes do primeiro varrimento.

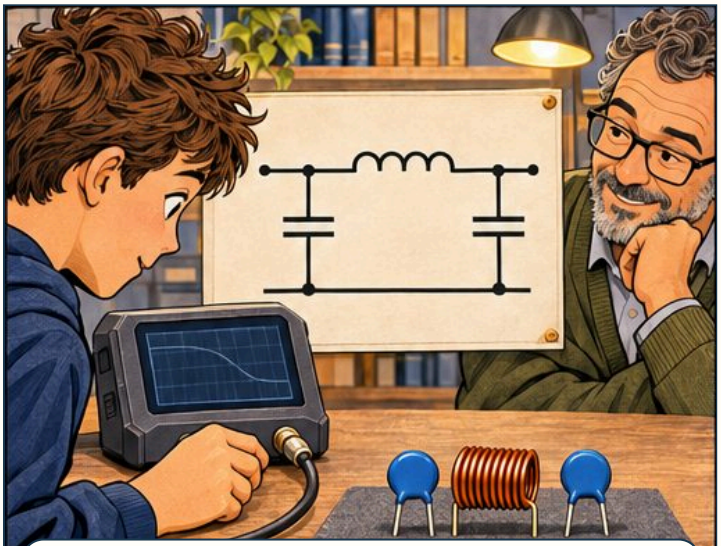
O analisador faz perguntas



O analisador de redes envia um sinal fraco conhecido.



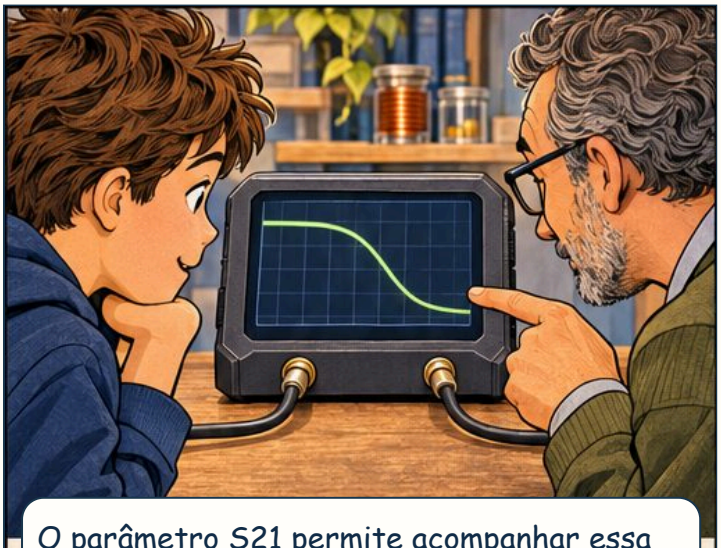
Varre um intervalo de frequências escolhido.



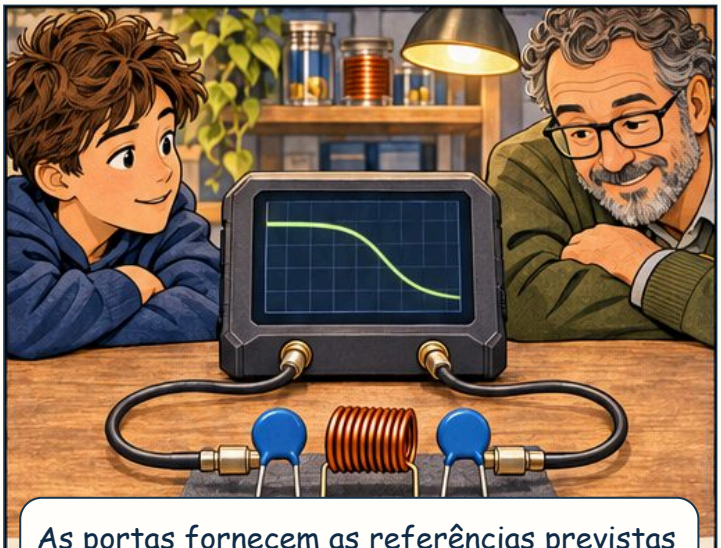
A porta 1 alimenta a entrada do filtro.



A porta 2 observa a transmissão na saída.



O parâmetro S21 permite acompanhar essa transmissão.



As portas fornecem as referências previstas de 50 Ω.

Calibrar no sítio certo



Cabos e adaptadores participam na medição.



Seguem, por isso, o procedimento de calibração do aparelho.



Os padrões adequados são ligados segundo o manual.



Os planos de referência situam-se nas extremidades dos cabos.



Depois da calibração conservam estas ligações tanto quanto possível.



O jovem anota a configuração e os ajustes do varrimento.

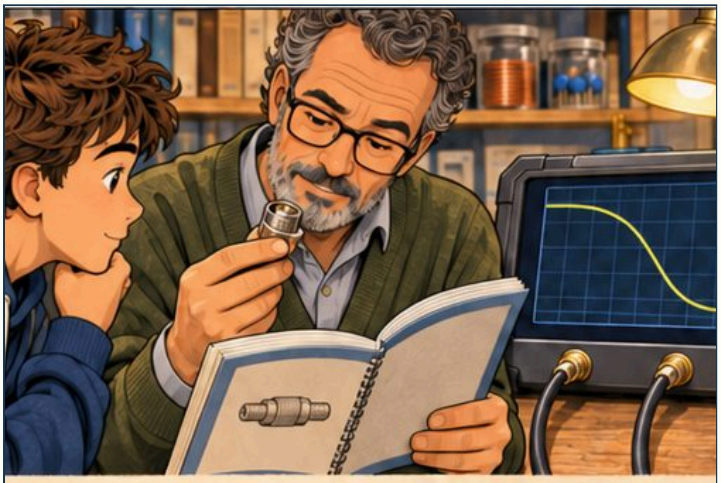
Verificar o caminho direto



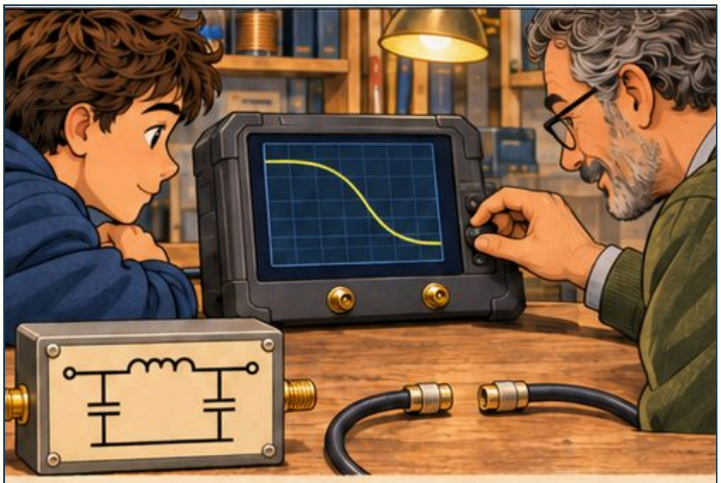
Antes do filtro, uma ligação direta permite verificar a referência.



A transmissão esperada deve ser compatível com essa ligação.



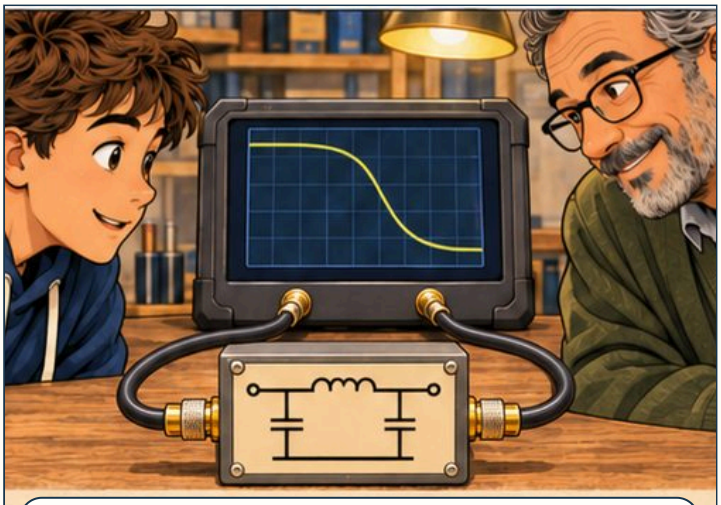
Uma anomalia exige examinar cabos, calibração e ajustes.



Não se corrige um filtro para esconder uma falha da bancada.



Concluída a verificação, param a fonte para ligar.

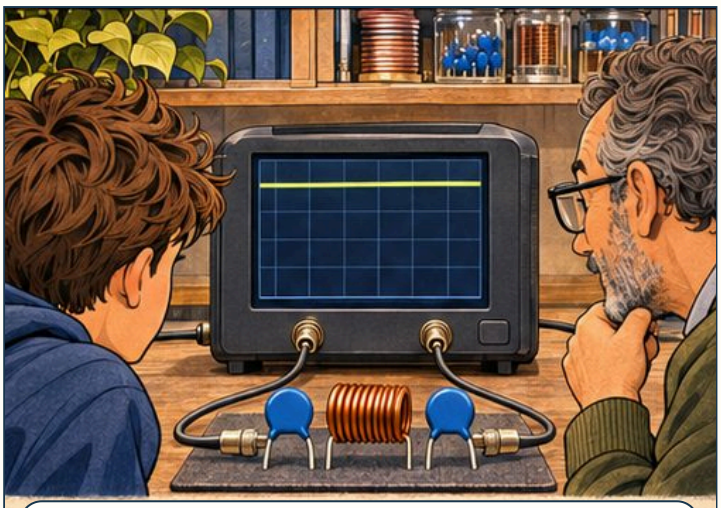


O filtro ocupa depois o lugar entre os dois cabos.

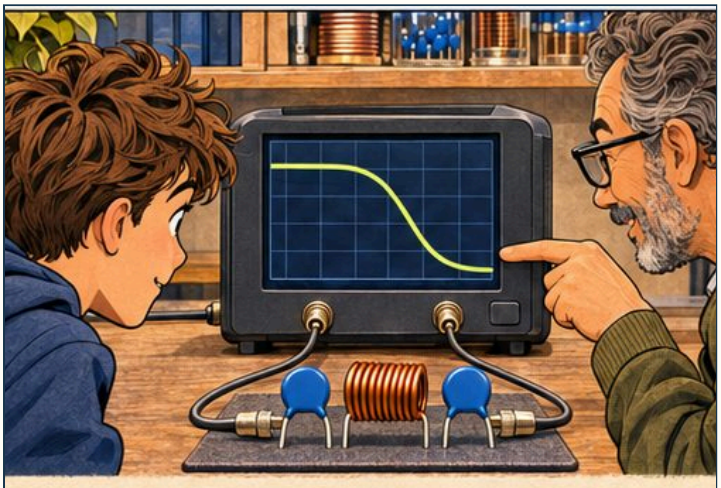
O primeiro varrimento



Iniciam um varrimento que cobre a banda útil e a transição.



O traço permanece mais alto nas baixas frequências.



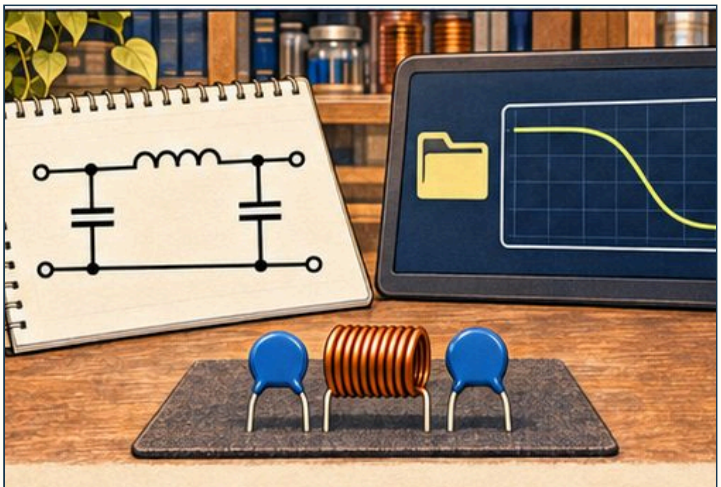
Depois desce quando a frequência aumenta.



O jovem reconhece a forma prevista sem supor igualdade perfeita.

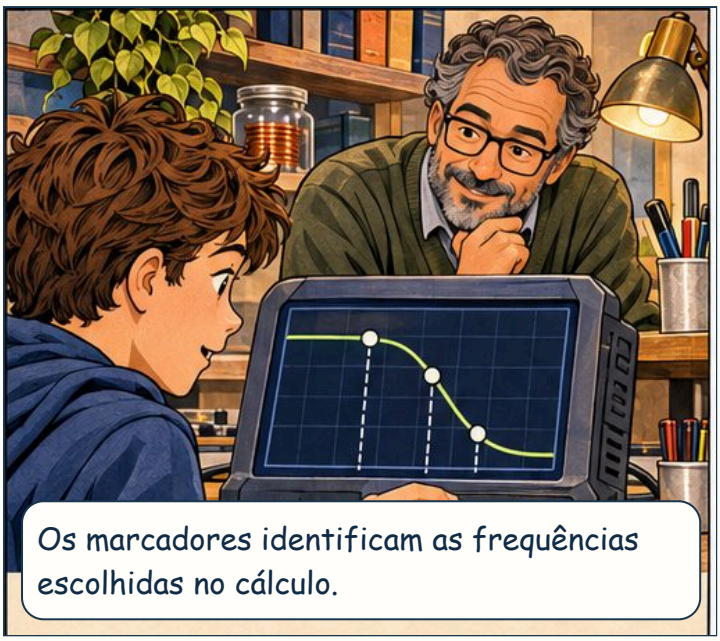


Guarda o traço e as condições de medição.



Um resultado guardado permite comparar após cada alteração.

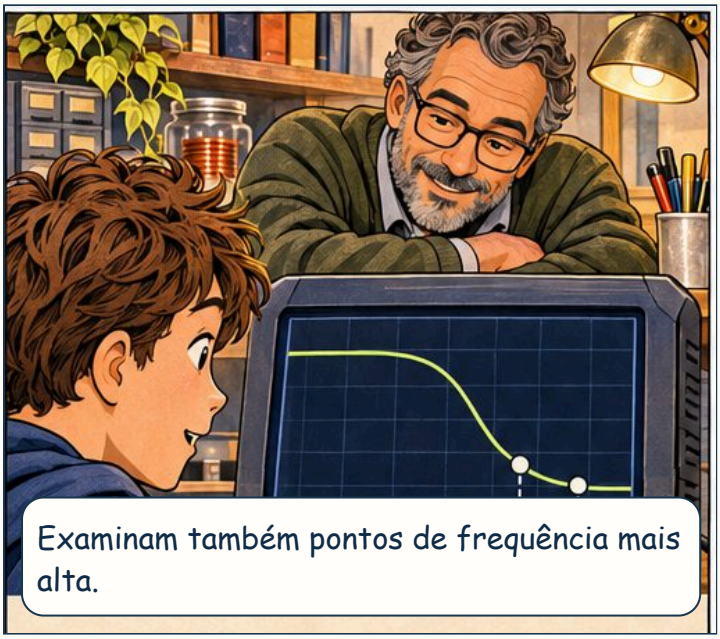
Ler pontos precisos



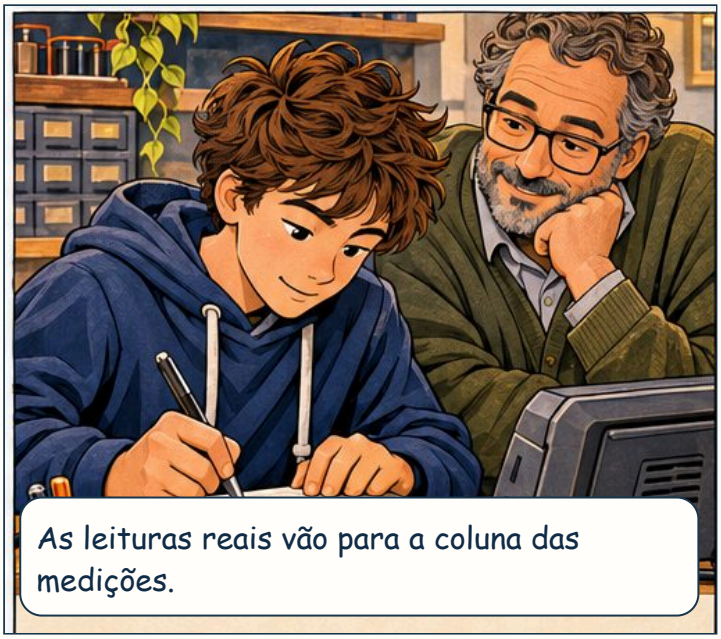
Os marcadores identificam as frequências escolhidas no cálculo.



Leem a transmissão perto do corte esperado.



Examinam também pontos de frequência mais alta.



As leituras reais vão para a coluna das medições.



Conservam a leitura obtida, mesmo que difira da previsão.



O jovem indica também a data e a configuração.

Compreender um desvio



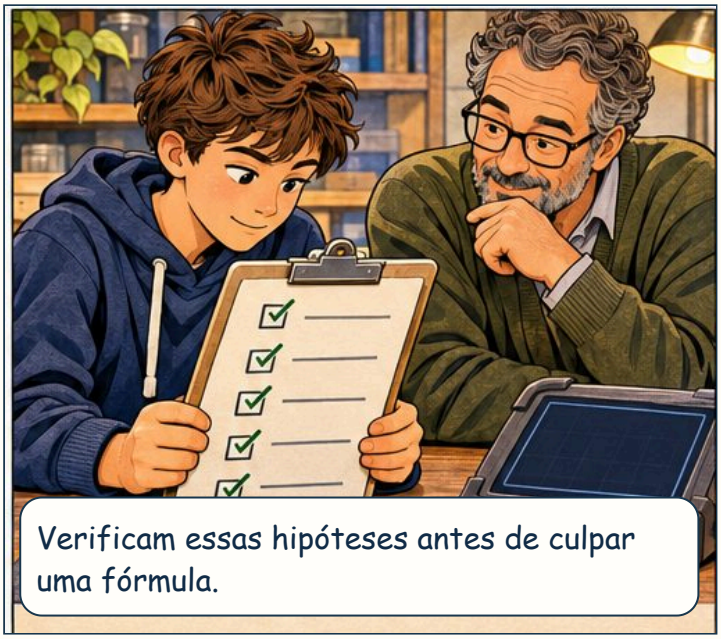
O corte observado pode diferir do calculado.



Os valores escolhidos e as tolerâncias dão primeiras pistas.



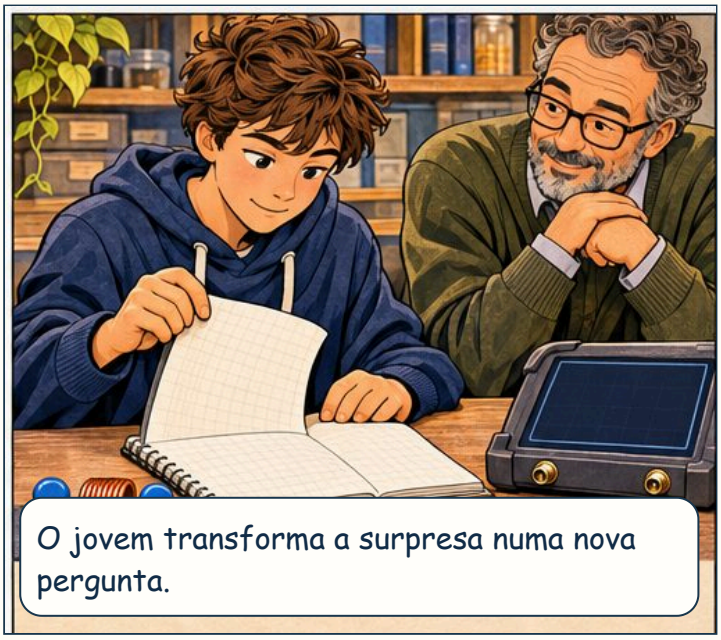
Perdas, disposição e calibração também merecem exame.



Verificam essas hipóteses antes de culpar uma fórmula.

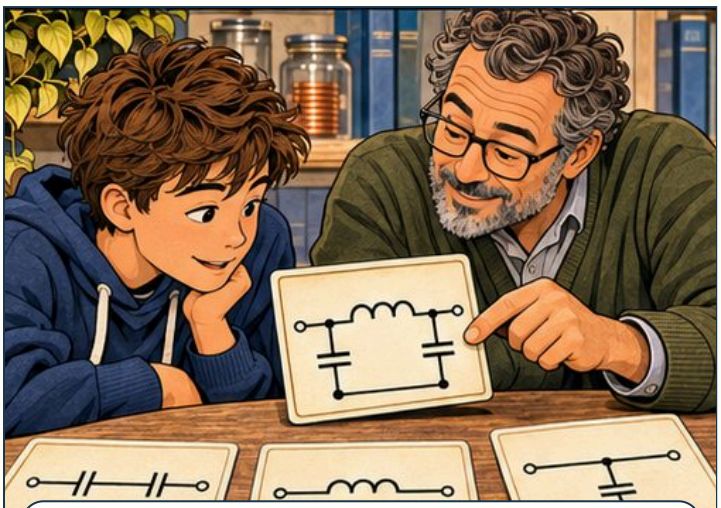


Uma curva diferente não explica por si só a origem.

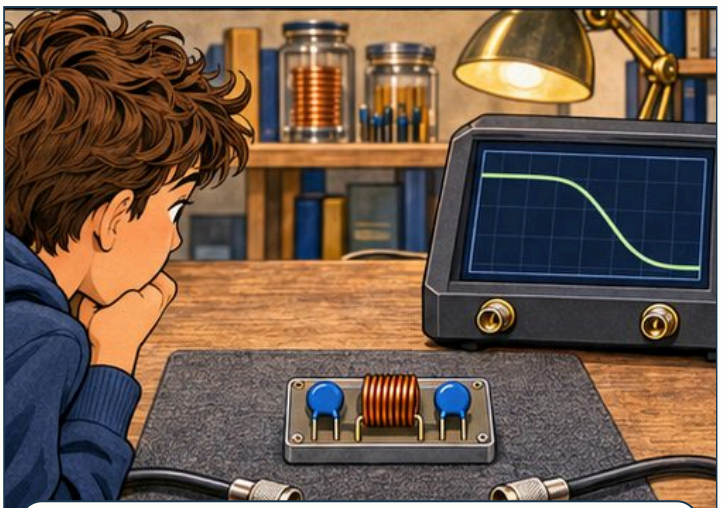


O jovem transforma a surpresa numa nova pergunta.

Uma alteração de cada vez



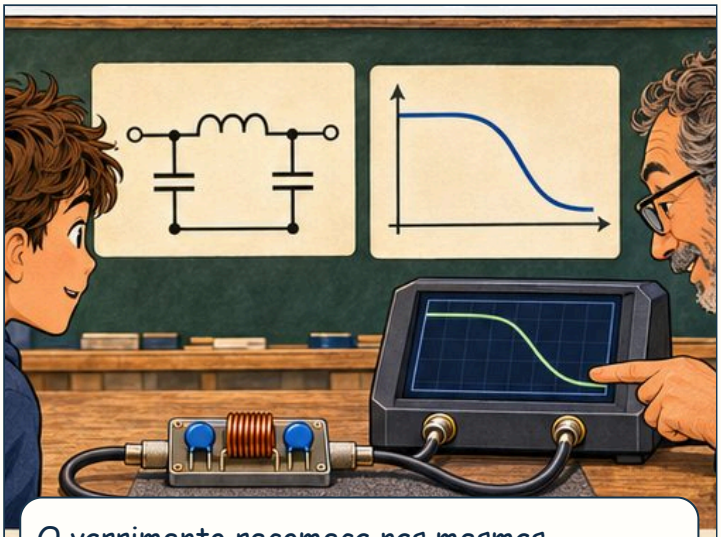
Escolhem uma hipótese e preparam uma alteração justificada.



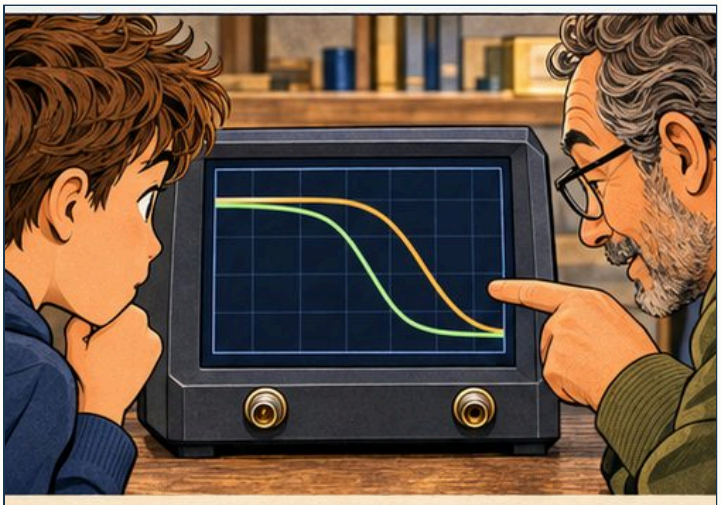
Param a fonte e desligam o módulo antes da intervenção.



Henri faz a alteração e verifica o circuito.



O varrimento recomeça nas mesmas condições documentadas.

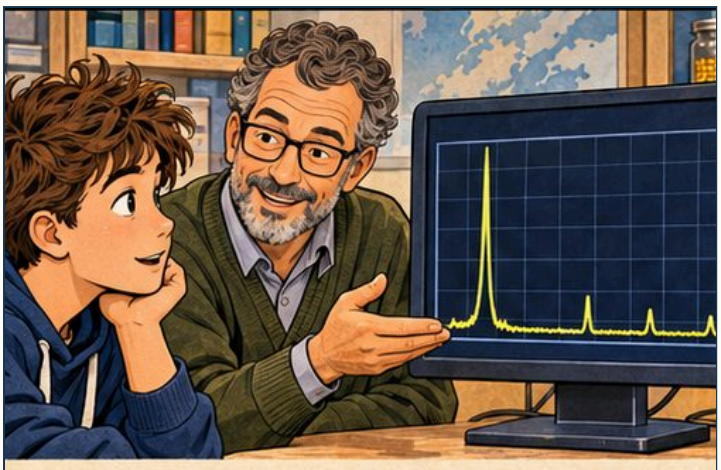


Comparam o traço antigo com o novo.

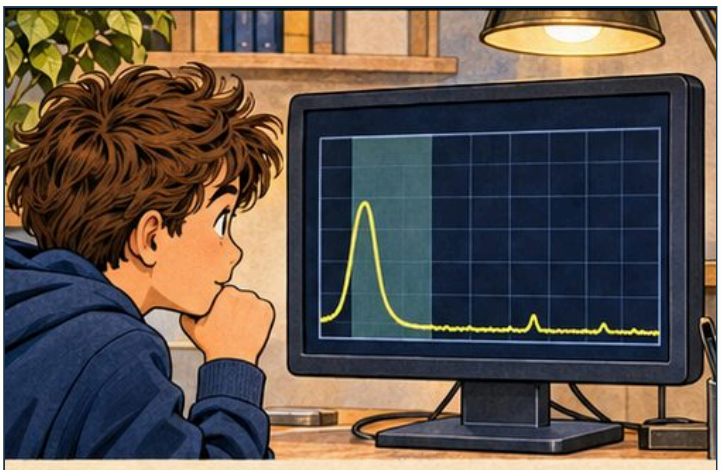


O método evita misturar várias causas possíveis.

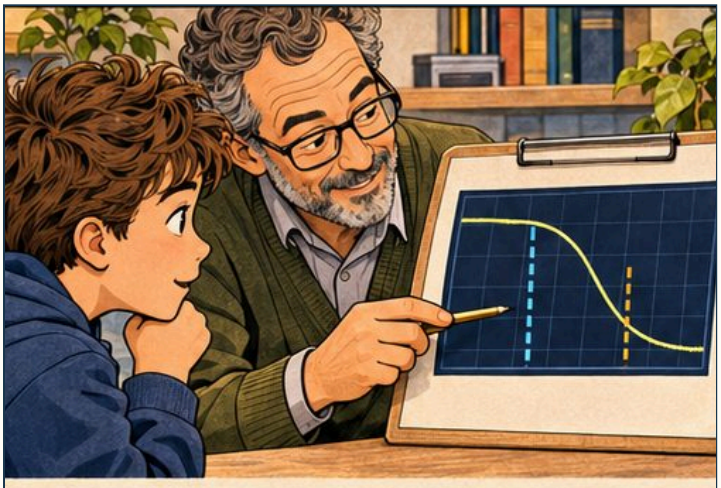
A atenuação tem limites



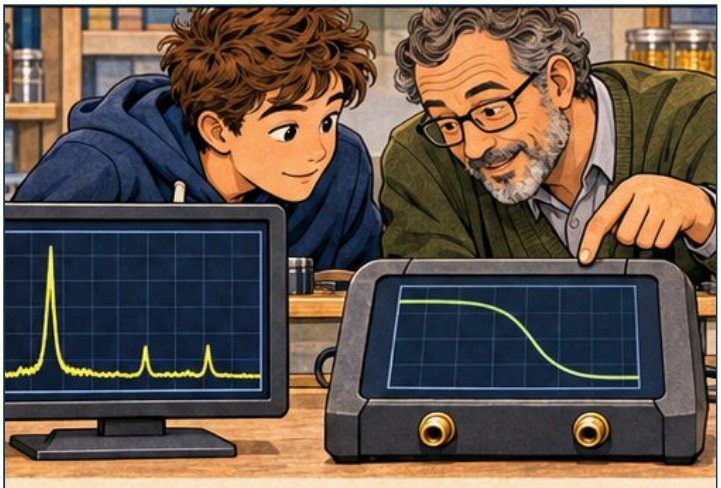
Um passa-baixo não apaga todas as componentes indesejadas.



Uma componente na banda passante será pouco atenuada.



A rejeição depende da frequência e da realização.



Um controlo espetral completo exigiria outras medições adequadas.



A presença do filtro não prova a conformidade da estação.



O jovem distingue uma função útil de uma garantia geral.

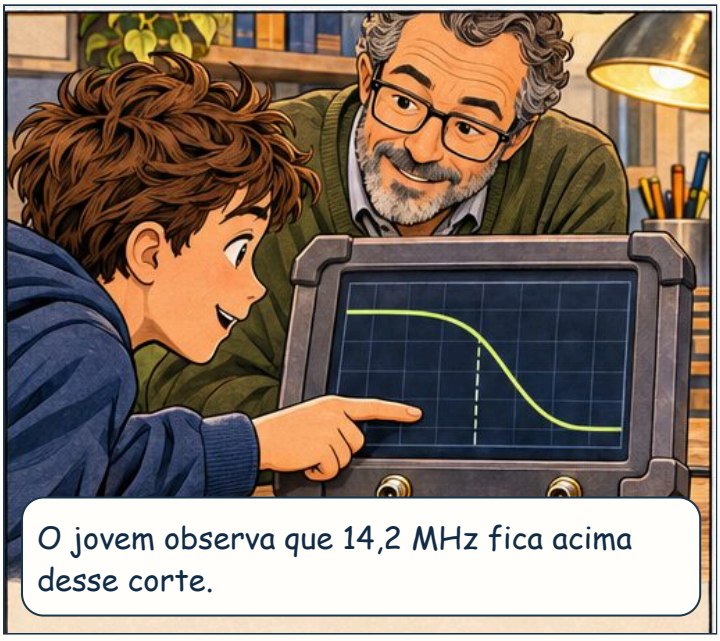
A frequência útil deve passar



Por fim, o mentor propõe uma armadilha num desenho de estação.



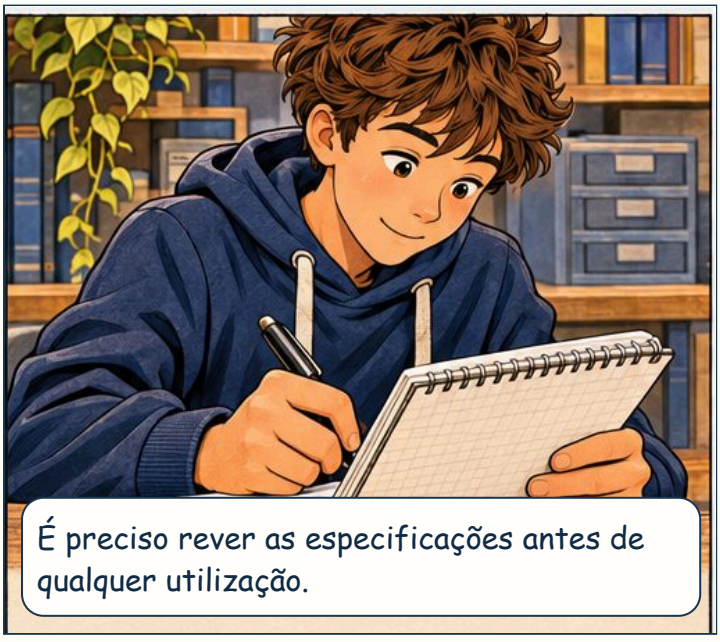
O desenho associa 14,2 MHz ao seu corte de 10 MHz.



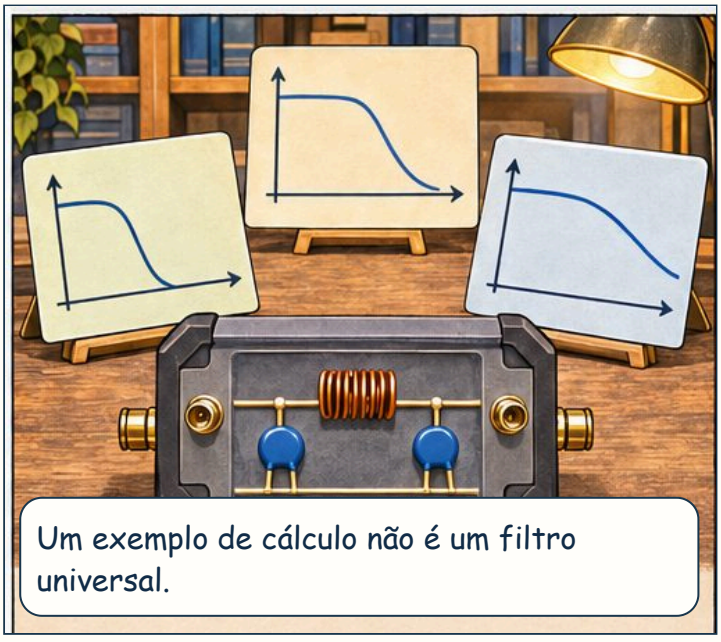
O jovem observa que 14,2 MHz fica acima desse corte.



Essa escolha atenuaria também o sinal que se pretende conservar.

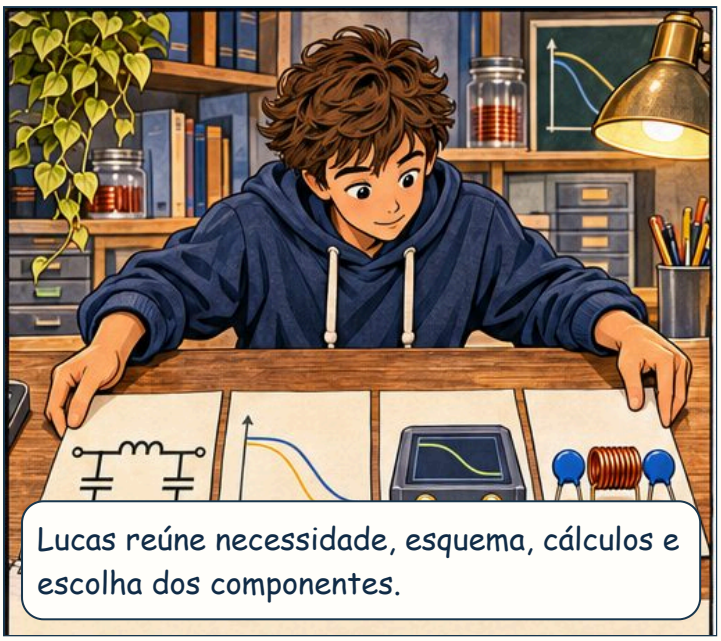


É preciso rever as especificações antes de qualquer utilização.



Um exemplo de cálculo não é um filtro universal.

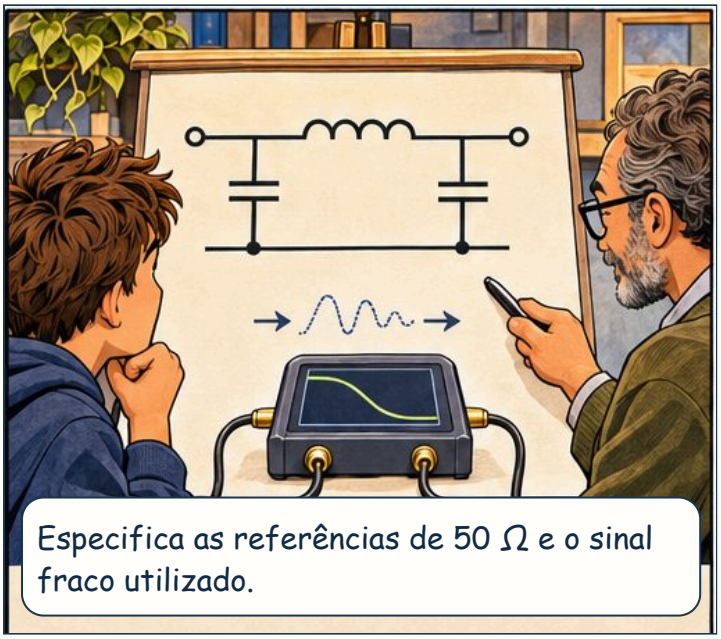
Preparar uma explicação partilhável



Lucas reúne necessidade, esquema, cálculos e escolha dos componentes.



Distingue previsões de resultados realmente observados.



Especifica as referências de 50 Ω e o sinal fraco utilizado.



Conserva traços, calibração e limites da experiência.



Henri faz de visitante e coloca uma última pergunta.



Agora o jovem explica por que conta cada condição.

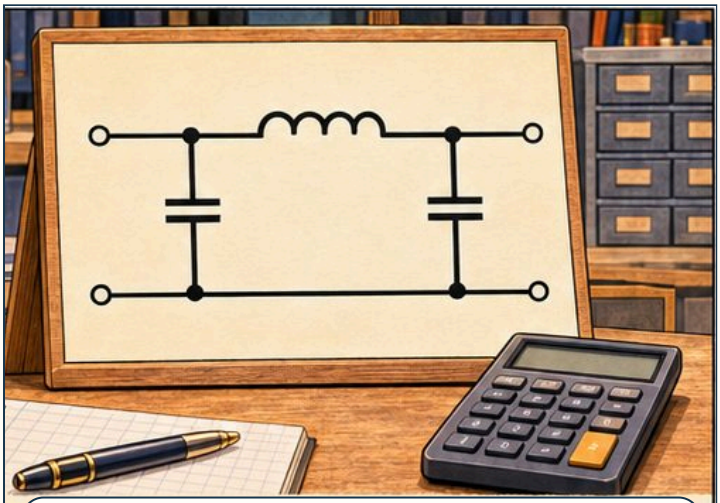
Compreender, calcular, medir



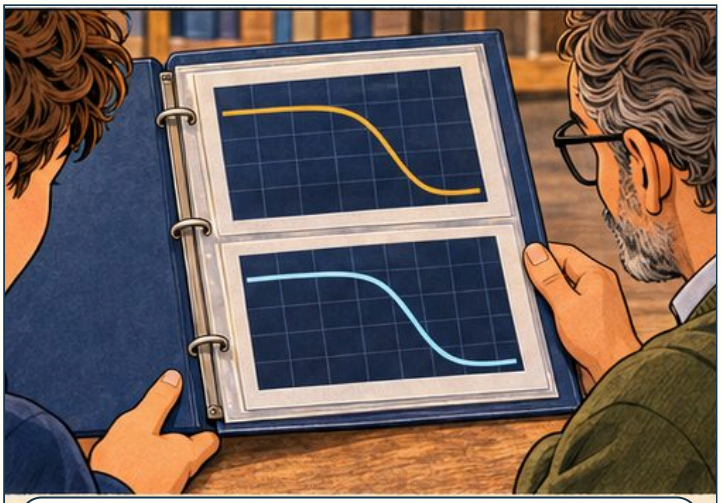
Os três componentes regressam à caixa didática.



O jovem sabe relacionar uma necessidade com uma resposta de filtro.



Sabe calcular este Butterworth em π e verificar as unidades.



Sabe também medir, comparar e questionar desvios.



O caderno conserva um método com hipóteses e limites.



No clube, a próxima descoberta já começa com uma pergunta.