



UNICAMP

Circuitos de Corrente Alternada

Hugo L. Fragnito
Gustavo S. Wiederhecker

Campinas, SP
2011

Sumário

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Experimento I - Filtros | 3 |
| 1.1 | Objetivos | 3 |
| 1.2 | Introdução | 3 |
| 1.2.1 | Diodo demodulador ou detector | 3 |
| 1.3 | Preparação | 3 |
| 1.4 | Roteiro A - Circuito RC | 3 |
| 1.5 | Roteiro B - Circuito RLC | 4 |
| 1.6 | Relatório | 4 |
| 2 | Experimento II - Transientes | 5 |
| 2.1 | Objetivos | 5 |
| 2.2 | Introdução | 5 |
| 2.2.1 | Diodo demodulador ou detector | 5 |
| 2.3 | Preparação | 5 |
| 2.4 | Roteiro A - Circuito RC | 5 |
| 2.5 | Roteiro B - Circuito RLC | 5 |
| 2.6 | Relatório | 5 |
| 3 | Diodo semicondutor e receptor AM | 6 |
| 4 | Linhas de transmissão | 11 |
| 5 | Interferômetros | 14 |

1 Experimento I - Filtros

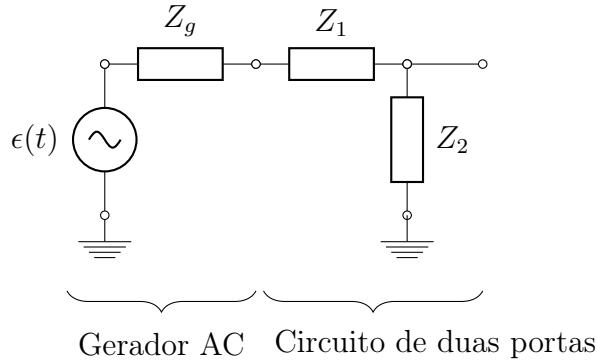


Fig. 1: Generic two-port circuit setup. Z_g represents the internal impedance of the AC generators, Z_1, Z_2 are any generic linear circuit components. The arrows V_1 and V_2 indicate where we connect oscilloscope channels to the circuit.

1.1 Objetivos

Entender o papel ...

1.2 Introdução

Introduction goes here...

1.2.1 Diodo demodulador ou detector

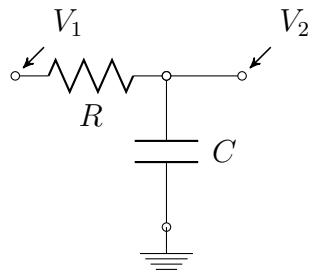
1.3 Preparação

1. Calcule a função...

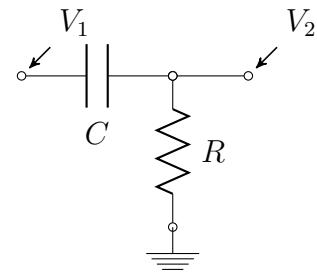
1.4 Roteiro A - Circuito RC

Material

- Díodo de silício.



(a) Circuito RC com tensão de saída medida no capacitor, $V_2 = \frac{1}{j\omega C} i$

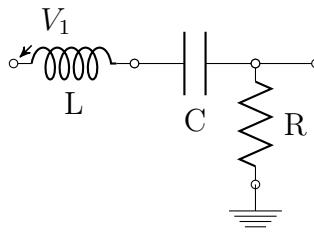


(b) Circuito RC com tensão de saída medida no resistor, $V_2 = Ri$

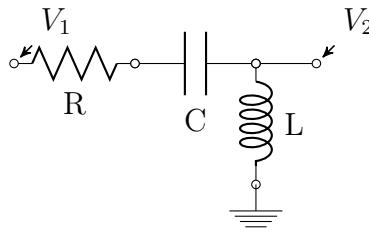
Caracterização do circuito LC

1.5 Roteiro B - Circuito RLC

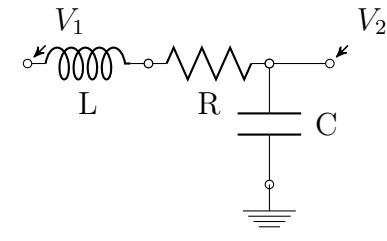
Nesta etapa desejamos estudar experimentalmente o fenômeno de ressonância em circuitos RLC. Iremos determinar a resposta em frequência deste circuito (amplitude e fase) e investigar suas principais características, frequência de ressonância, largura de banda e potência dissipada.



(c)



(d)



(e)

Fig. 2: Diferentes configurações de um filtro RLC.

Caracterização da curva IV do diodo

1.6 Relatório

2 Experimento II - Transientes

2.1 Objetivos

Entender o papel ...

2.2 Introdução

Introduction goes here...

2.2.1 Diodo demodulador ou detector

2.3 Preparação

1. Calcule a função...

2.4 Roteiro A - Circuito RC

Material

- Diodo de silício.

Caracterização do circuito LC

2.5 Roteiro B - Circuito RLC

Caracterização da curva IV do diodo

2.6 Relatório

3 Diodo semicondutor e receptor AM

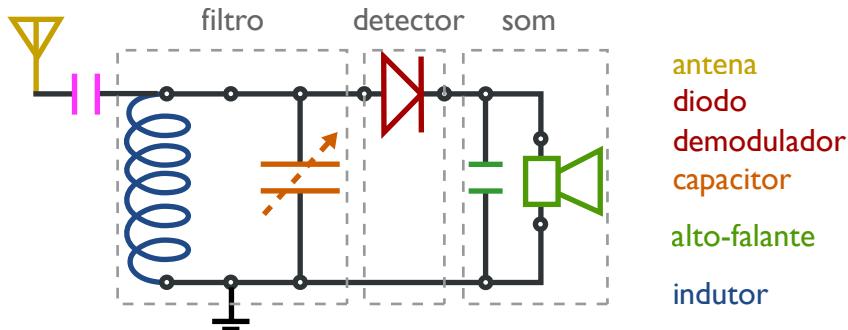


Fig. 3: Diagrama de um receptor de rádio AM.

Objetivos

Entender o papel dos componentes de um receptor AM (*amplitude modulation*) e montar um receptor de ondas AM. Para tanto iremos estudar experimentalmente a curva IV (corrente-tensão) de um diodo e também a resposta do filtro de sintonia.

Introdução

Diodo demodulador ou detector

A transmissão de informação por ondas de rádio é feita através da modulação de uma onda portadora (*carrier*) de alta frequência, $0.8 < f_c < 1.1$ MHz para AM (*amplitude modulation*) ou $88 < f_c < 105$ MHz para FM (*frequency modulation*), com o sinal de audio que deseja ser transmitido, tipicamente com frequência entre 20 Hz e 10 KHz. Na figura 5 ilustramos estes dois tipos de modulação. A

modulação permite que a informação seja transmitida através de uma portadora em uma frequência mais alta que a frequência do sinal; na frequência da portadora espera-se melhores características de propagação, i.e., menor atenuação, dispersão. Também é possível utilizar outro tipo de onda, por exemplo, ondas eletromagnéticas para transmitir a informação, por

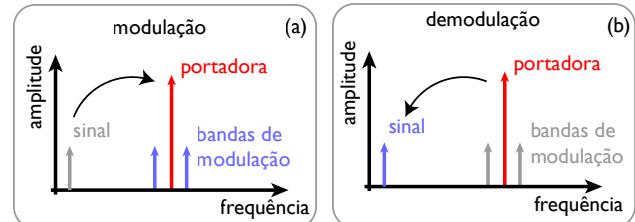


Fig. 4: Princípio de modulação de demodulação de um sinal.

exemplo, rádios AM exploram a alta refletividade da ionosfera para transmitir ondas eletromagnéticas por longas distâncias.

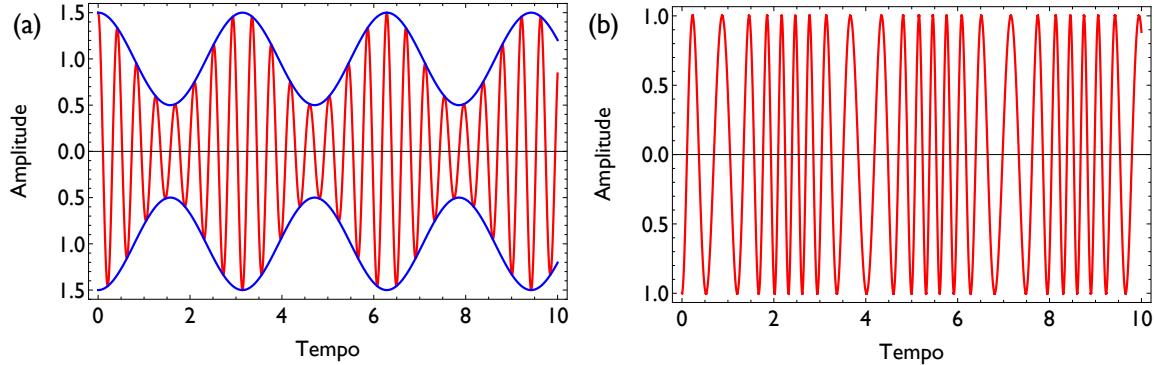


Fig. 5: **Modulação de ondas.** (a) Modulação de amplitude (AM), $A(t) = (1 + \delta \cos[\Omega t]) \cos[\omega_c t]$. (b) Modulação de frequência (FM), $A(t) = \cos[\omega_c t + \delta \cos[\Omega t]]$

Antena

Quando uma onda eletromagnética com frequência f_c e comprimento de onda $\lambda = c/f_c$ incide sobre uma antena, um dipolo oscilante é induzido na antena. O dipolo induzido gera uma corrente no circuito no qual a antena está conectada. Para que a excitação do dipolo seja eficiente na mesma, é importante que o comprimento da antena L seja, aproximadamente, uma fração inteira do comprimento de onda. No nosso laboratório $L \approx 17$ m, aproximadamente, $\lambda/10$ para as frequências de rádio AM.

Filtro ressonante

Como existem diversas estações de rádio AM, é necessário também filtrar o sinal recebido pela antena. Para tanto utilizaremos um circuito LC em paralelo, como mostra a Fig. 3, este filtro funciona como um passa-banda, selecione a estação de rádio que desejamos ouvir.

Diodo demodulador ou detector

Da mesma forma que modulamos a portadora para transmitir o sinal é necessário demodular a onda recebida para podermos escutá-la no alto-falante. Este é o papel do diodo neste circuito, devido a sua curva IV não-linear este componente recupera o sinal de audio que foi modulado na onda portadora.

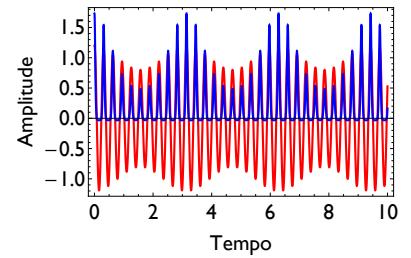


Fig. 6: **Demodulação por um diodo**

Preparação

1. Calcule a função de transferência $H(\omega)$ do filtro LC mostrado na figura 3. Mostre que a transmitância ($|H|^2$) é dada por $T(\omega) = \frac{L^2\omega^4 C_{in}^2}{(L\omega^2(C_{in}+C_v)-1)^2}$.
2. Qual é a frequência de ressonância deste filtro?
3. Assumindo que o indutor possui $L = 62\mu\text{H}$ e o capacitor variável pode variar entre $30 \text{ pf} < C_v < 350 \text{ pf}$, calcule a faixa de frequências que este filtro poderá sintonizar. Descubra na internet quais rádios de Campinas estão nesta faixa.
4. Assuma que a curva IV de um diodo pode ser aproximada pela expressão $i(t) = a_1 v(t) + a_2 v^2(t)$, onde a_1 e a_2 são constantes. Calcule a corrente quando a tensão for na forma $v(t) = v_0(1 + m(t)) \cos[\omega_c t]$. Mostre que existe um termo proporcional à $m(t)$. Pense no que acontece com os demais termos ao passar pelo capacitor do alto-falante?

Material

- Díodo de silício.
- Díodo de germânio tipo Schotky (Nunca aplicar um sinal do gerador neste diodo, ele é sensível e pode queimar!).
- Indutor e capacitor sintonizável ($30 \text{ pf} < C_v < 350 \text{ pf}$) (Estes componentes já estão montados!).
- Resistores: $1\text{k } \Omega$.

Roteiro

Caracterização do circuito LC

Para caracterizar o filtro iremos utilizar a montagem da Fig. 14. Acople o sinal do gerador no terminal **verde** do filtro, meça o sinal de saída no terminal **vermelho**. Estime a frequência de ressonância esperada e depois encontre-a experimentalmente para 4 diferentes posições das placas do capacitor sintonizável. Com a maior capacidade possível, meça 10 pontos das amplitudes V_{pp1}/V_{pp2} na faixa de 50 KHz em torno da ressonância. No relatório estime a largura de banda do filtro.

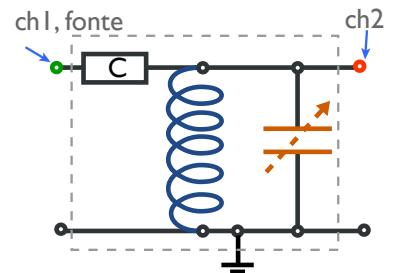


Fig. 7: Esquema do circuito para caracterizar o filtro LC. Utilize o gerador de funções no canal 1.

Caracterização da curva IV do diodo

Em teoria poderíamos medir a curva IV de um diodo simplesmente introduzindo um resistor R em série com o diodo. A queda de tensão no resistor seria proporcional à corrente, portanto $I = V_R/R$. Para obter V_D basta medirmos a queda de tensão no diodo. Contudo, no laboratório precisamos conectar o canal 1 do osciloscópio entre os terminais do diodo e o canal 2 entre os terminais de resistor. Como o terra de ambos canais é o mesmo, tal conexão implicaria no resistor (ou o diodo) em curto-circuito, portanto a queda de tensão medida seria nula. Para resolver este problema de aterrramento iremos explorar o transformador de tensão pois neste o enrolamento primário (conectado à rede elétrica) está isolado do secundário (conectado ao circuito), consequentemente podemos impor um ponto de terra entre o resistor e o diodo, como ilustra a Fig. 15¹. Como invertemos o sentido que estamos medindo a tensão no resistor, é também necessário **inverter** o sinal do canal 2 do osciloscópio.

1. Monte o circuito da Fig. 15.
2. No modo YT do osciloscópio centralize ambas (canais 1 e 2) ondas em $Y = 0$ e grava no seu cartão de memória.
3. No modo XY salve 2 versões da curva IV, uma em que a curva toda possa ser visualizada (ajuste as escalas horizontais e verticais) e outra em que a origem ($V_R = 0, V_D = 0$) esteja ampliada.

No seu relatório inclua as três curvas. Para as curvas IV indique a escala vertical como corrente em mA e o eixo horizontal em V. Extraia destas curvas a corrente de saturação e também a inclinação da curva dI/dV , para polarização reversa ($V < 0$) e três pontos distintos para polarização direta ($V > 0$). Calcule a resistência diferencial nestes pontos $R = (dI/dV)^{-1}$

¹Note que se fizéssemos esta conexão utilizando o gerador sem o transformador, o resistor conectado ao terminal central do indutor estaria em curto-circuito.

Ouvindo o rádio

Chegou finalmente o momento de ouvirmos alguma música (ou notícias). Monte o circuito da Fig. 3 utilizando como detetor o diodo schotky. A motivo de usarmos este diodo, ao invés do diodo de silício, é que a tensão crítica na qual este diodo deixa passar corrente ($V_0 \approx 30$ mV) é muito menor que o diodo de silício ($V_0 \approx 700$ mV). Isto o torna ideal para demodular sinais de pequena amplitude, como o que recebemos da antena. Muito cuidado com este diodo pois ele é sensível e não temos muitos sobrando. Descreva no relatório quais rádios você consegui sintonizar. Em Campinas existem duas rádios nesta faixa de frequências, a rádio Central e a rádio Bandeirantes

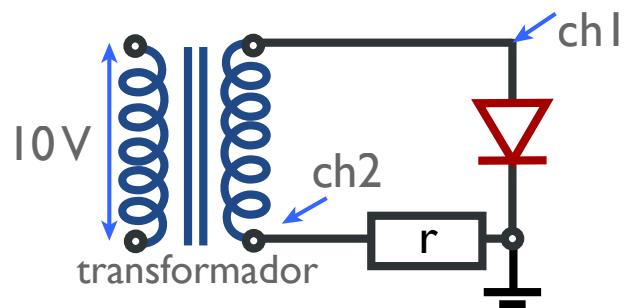


Fig. 8: **Esquema do circuito para caracterizar a curva IV.** Utilize o transformador de 9 V de saída e $R = 1K\Omega$ e um diodo de silício (encapsulamento preto!).

4 Linhas de transmissão

Objetivos

Estudar experimentalmente o funcionamento de uma linha de transmissão e determinar a impedância característica, o coeficiente de reflexão e a velocidade de propagação de pulsos.

Material

- Cabo coaxial RG-58U (ou cabo de par trançado ou cabo de antena de TV) de comprimento (conhecido) $x \approx 100$ m.
- Acoplador BNC "T"
- Gerador de pulsos de duração menor que $1 \mu\text{s}$. No lugar de um gerador de pulsos pode ser utilizado um gerador de funções de pelo menos 2 MHz com duty-cycle variável (por exemplo, o Tektronix CFG 250): Selecione o modo de onda quadrada e ajuste o duty-cycle ao mínimo.
- Osciloscópio de pelo menos 50 MHz
- Resistores: 10, 22, 33, 47, 56, 75, 100, 220, 330 e 470Ω .

Roteiro

1. Monte o circuito da figura 9a). Ajuste a taxa de repetição de pulsos em 500 kHz ou menos e a duração do pulso entre 100 e 200 ns. Se não tiver um gerador de pulsos, pode utilizarizar um gerador de funções de 2 MHz com duty-cycle variável (por exemplo, o Tektronix CFG 250): ajuste a frequência em 1 MHz ou menos; selecione o modo de onda quadrada e ajuste o duty-cycle ao mínimo. No canal 1 do osciloscópio verá o pulso de entrada e o refletido . No canal 2 verá o pulso no fim da linha (utilize um cabo curto para ligar Z_T ao canal 2). Para uma melhor estabilidade, utilize o sinal de sincronismo do gerador para disparar o osciloscópio pelo canal 3 (o sincronismo com o canal 1 também funciona bem).
2. Meça o atraso temporal entre o pulso lançado e o refletido e determine a velocidade de propagação do pulso. (Utilize o comprimento medido, L , escrito na etiqueta do cabo). Compare este resultado com a velocidade a luz! Quanto é o índice de refração, n , do

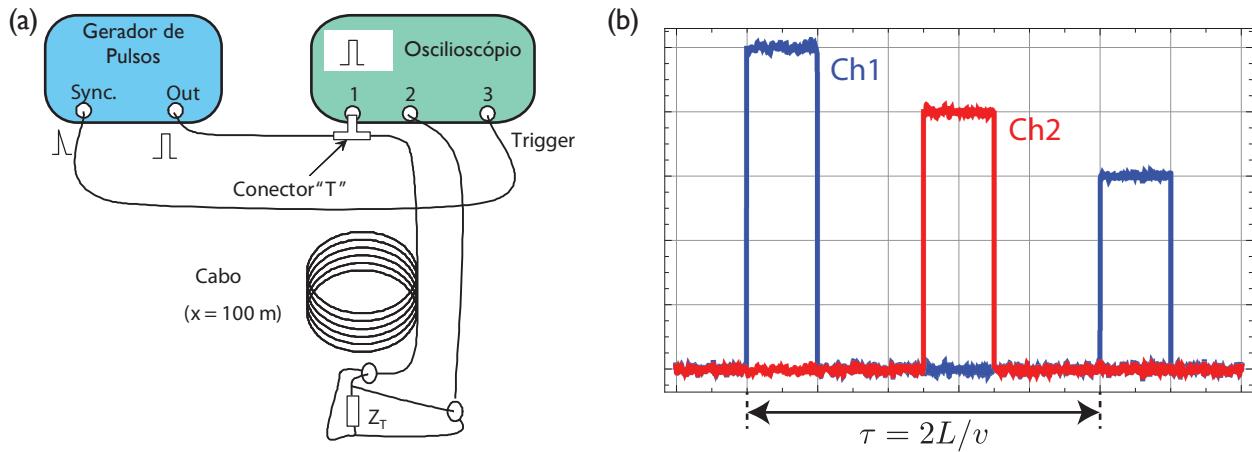


Fig. 9: a) Esquema de montagem. b) Pulsos observados no osciloscópio quando a linha não é terminada ($Z_T = \infty$).

dielétrico do cabo? Quanto é a constante dielétrica relativa ($\epsilon_r \equiv \epsilon/\epsilon_0 = n^2$). Com este valor de n você poderia medir o comprimento de um cabo idêntico com L desconhecido.

3. Para valores fixos de amplitude ($V_0 = V^+(0)$), duração e periodicidade do pulso, meça a amplitude do pulso de retorno $V_r = V^-(2L)$ para vários valores de Z_T (utilize resistores fixos, não a resistência de décadas) entre 10 e 330 Ω , inclusive para o caso $Z_T = 0$ (curto circuito) e $Z_T = \infty$ (circuito aberto). Construa uma tabela com os valores de Z_T e do coeficiente de reflexão normalizado $\rho_n = V_R/V_0$. O pulso refletido se deve anular quando $Z_T = Z_0$. Determine, assim, Z_0 experimentalmente. Utilize resistores em série e/ou em paralelo para obter mais valores de Z_T . Por exemplo, para obter 75 Ω (o valor nominal de Z_0 do cabo coaxial de TV a cabo) utilize dois de 150 Ω em paralelo.
4. Aumente a duração do pulso gradualmente até alguns microssegundos e veja se entende o que acontece no osciloscópio.
5. Se $Z_T = \infty$ o pulso refletido tem amplitude $V_0 \exp(-\alpha L)$. Utilizando este fato, determine o coeficiente de atenuação ? (expresse o resultado em dB/100m: $\alpha[\text{dB}/100\text{m}] = 10^3 \alpha[\text{m}^{-1}] / \log(10) \approx 434\alpha[\text{m}^{-1}]$).
6. Meça o atraso e a amplitude entre o pulso lançado e o pulso refletido (com $Z_T = 0$) para um cabo diferente do utilizado nos itens anteriores . Dispomos de cabos de rede de par trançado, ou UTP, cabo coaxial para TV a cabo e cabo coaxial de instrumentação RG-58

— veja a Fig. 10. Calcule o valor do índice de refração n e α) Compare os coeficientes de atenuação obtidos para os diferentes cabos (quanto menor é α , melhor sua qualidade).

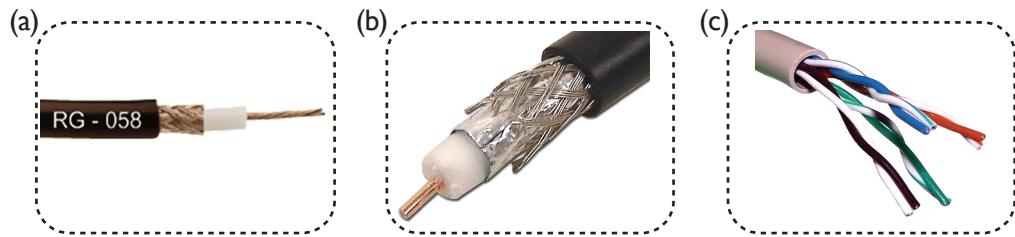


Fig. 10: (a) Cabo de instrumentação (RG-58). (b) Cabo de TV a cabo (CATV: Cable TV).
(c) Cabo de par trançado para redes de informática (UTP - Unshielded Twisted Pair).

5 Interferômetros

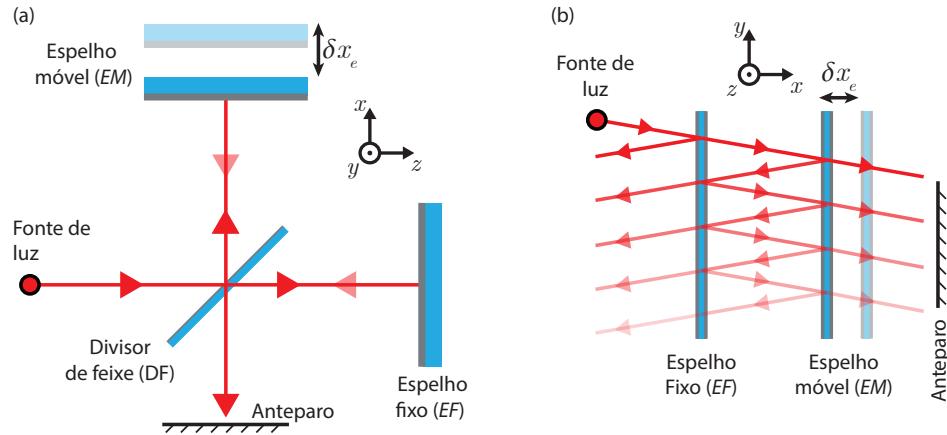


Fig. 11: **Diagrama e exemplos de duas importantes classes de interferômetros ópticos.** (a,d) Esquema de um interferômetro de Michelson (a) e de Fabry-Perot (d). O espelho EM está preso a um parafuso micrométrico e pode ter sua posição controlada com precisão submicrométrica. (b,e) Intensidade óptica observada em um ponto do anteparo quando varia-se a posição do espelho. Em (e), as diferentes curvas representam interferômetros Fabry-Perot montados com espelhos de diferentes refletividades R . (c,f,g) Distribuição transversal de intensidade observada no anteparo quando os interferômetros estão alinhados.

Objetivos

Entender os princípios e aplicações de interferômetros ópticos, utilizando-los para medir deslocamentos nanométricos e para desvendar o conteúdo espectral de fontes luminosas. Este roteiro explora os dois tipos de interferômetro mostrados na Fig. 11.

Introdução

A interferência é um fenômeno comumente observado quando trata-se de ondas, o caso eletromagnético (ou óptico) é apenas um exemplo. O fenômeno de interferência tem como base o princípio da superposição, segundo o qual o campo elétrico (ou magnético) resultante em um dado ponto do espaço é a soma linear entre o campo gerado por todas as fontes existentes no universo². Em favor da simplicidade, consideremos o campo total gerado por duas fontes em

²É bastante intrigante pensar nisto. Imagine a sua posição espacial neste momento, existem fontes de campos eletromagnéticos distribuídos por todo o universo, algumas a bilhões de anos luz de distância, outras tão próximas quanto seu telefone celular, todas contribuindo para o campo elétrico total na sua posição atual.

um ponto de observação do anteparo (\mathbf{r}),

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t) + \mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

Note que as duas fontes mencionadas acima podem ser, de fato, duas fontes independentes, como também o reflexo de espelho de uma mesma fonte; geralmente este é o caso nos interferômetros, veja o esquema ilustrado nas Fig. 11(a,d). As principais consequências da interferência são notadas quando detectamos o campo eletromagnético em um dado ponto de observação. A frequência óptica é tão alta, $\omega/2\pi \approx 300 \times 10^{12}$ Hz que não conseguimos detectar a variação do campo elétrico diretamente, como acontece em frequências baixas na qual pode-se usar um osciloscópio. Nestas frequências, entretanto, a energia dos fótons é tão grande (> 1 eV) que eles podem ser absorvidos pelas transições eletrônicas de um átomo, molécula ou material semicondutor. No olho humano os fótons são absorvidos por moléculas, já nos fotodetectores eles são absorvidos por materiais semicondutores (Si,Ge,GaAs, etc). Portanto o que observamos a olho nu é a média temporal da intensidade do campo eletromagnético³,

$$\langle I \rangle = \propto |\mathbf{E}|^2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* = |\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t)|^2 + |\mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t)|^2 + \underbrace{2\Re(\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{E}_2^*(\mathbf{r}, t))}_{\text{termo de interferência}}, \quad (2)$$

Interferômetros são instrumentos que exploram este fenômeno ondulatório para diversas aplicações, entre elas podemos destacar,

- Medidas de distância de alta precisão (até 10^{-21} m já foram demonstradas em detectores de ondas gravitacionais)
- Medidas de comprimento de onda de fontes de luz
- Medidas de planicidade de superfícies

Interferômetro de Michelson

No interferômetro de Michelson⁴, ilustrado na Fig. 11(a), o feixe de luz é dividido e recombinado utilizando um único divisor de feixes. Portanto as duas fontes de luz que causam a interferência são os reflexos da fonte de luz nos espelhos EM e EF . O campo elétrico no

³Nesta notação E_1 e E_2 representam a amplitude complexa dos campos eletromagnéticos, análoga à representação de fasores.

⁴Inventado por Albert Abraham Michelson e utilizado no famoso experimento de Michelson-Morley para testar a existência do Éter.

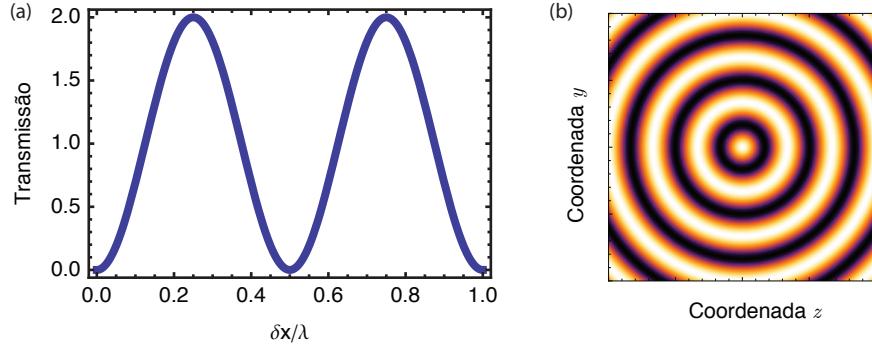


Fig. 12: **Esquema de reflexões e transmitância de um Fabry-Perot.** (a) Esquema de múltiplas reflexões em um Fabry-Perot. O deslocamento vertical dos feixes tem o intuito de simplificar os campos que contribuem para reflexão (E_r) dos campos que contribuem para a transmissão (E_t). (b) Intensidade óptica observada em um ponto do anteparo quando varia-se a posição do espelho. Em (e), as diferentes curvas representam interferômetros Fabry-Perot montados com espelhos de diferentes refletividades $R = (20, 40, 70)\%$.

ponto de observação terá duas contribuições,

$$\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t) = E_1 \exp[i(kx_1 - \omega t)] \mathbf{e}_1 \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t) = E_2 \exp[i(kx_2 - \omega t)] \mathbf{e}_2 \quad (4)$$

Os termos ao final das equações representam as amplitudes ($E_{1,2}$) e as polarizações dos campos ($\mathbf{e}_{1,2}$). No nosso experimento é uma excelente aproximação assumir que as polarizações são idênticas⁵, $\mathbf{e}_{1,2} = \mathbf{e}$. O divisor de feixe (DF) utilizado também é simétrico (50%) e portanto $E_{1,2} = E/\sqrt{2}$, sendo que E é a amplitude do campo eletromagnético da fonte. Os argumentos da exponencial complexa são os mais importantes no nosso estudo e representam a fase da onda eletromagnética; $\omega = 2\pi/T$ é a frequência temporal da onda, sendo T o período temporal da onda. Analogamente, $k = 2\pi/\lambda$ é denominado o número de onda e representa a frequência espacial da onda, sendo λ o período espacial da onda (ou comprimento de onda). Os termos x_1 e x_2 levam em consideração as diferentes distâncias percorridas pelo feixe de luz após incidir no divisor de feixe (DF), portanto, $x_1 = 2l_1$ e $x_2 = 2l_2$, conforme indica a figura Fig. 11(a). A intensidade no anteparo, analogamente à equação 2, será dada por

$$I(x) \propto \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* = |E|^2(1 + \Re(\exp(i2k\delta x))) = |E|^2(1 + \cos(2k\delta x)), \quad (5)$$

⁵Neste experimento não se utiliza nenhum componente capaz de "girar" a polarização dos campos. Como ambos feixes originam-se de uma única fonte é razoável assumir que possuem a mesma polarização.

sendo que $\delta x = (l_1 - l_2)$ é a diferença de distância entre os dois caminhos ortogonais do interferômetro. O comportamento da função $1 + \cos(2k\delta x)$ é mostrado na Fig. 11. Note que o período desta função será $\Lambda = 2\pi/(2k) = \lambda/2$, conforme indicado na figura, isto significa que ao deslocar o espelho móvel por uma distância de $\lambda/2$, o padrão de interferência se deslocará por uma franja completa. Se utilizarmos um laser vermelho ($\lambda \approx 630$ nm), seremos capazes de identificar com precisão deslocamentos da ordem de 300 nm!. Outro aspecto importante é que esta variação espacial da intensidade será observada para qualquer ponto transversal do anteparo (veja Fig. 11(b)), quando variarmos a posição do espelho móvel (EM). Note que a variação δx não tem relação com a distribuição transversal do padrão de interferência, mostrado na figura 11(c), este perfil anular está relacionado à simetria cilíndrica das lentes utilizadas neste experimento.

Interferômetro de Fabry-Perot

No interferômetro de Fabry-Perot, dois espelhos parcialmente refletores são dispostos paralelamente, conforme indica a Fig. 11(d). A luz proveniente da fonte, ao incidir sobre o primeiro espelho (espelho fixo) é parcialmente transmitida e parcialmente refletida. A fração transmitida propaga-se até o segundo espelho e também sofre reflexão e transmissão parcial. Devido ao paralelismo entre os espelhos, o feixe refletido pelo segundo espelho sofre múltiplas reflexões entre os dois espelhos, originando diversos feixes que irão se sobrepor no anteparo⁶. A refletividade dos espelhos é um fator fundamental para o Fabry-Perot, ela determina efetivamente quantas vezes o feixe percorrerá a distância entre os espelhos. Em contraste com o interferômetro de Michelson, no qual se sobrepõe a luz percorrida por dois caminhos ópticos, no caso do Fabry-Perot, observa-se a sobreposição de múltiplos caminhos.

É fácil deduzir qual será o padrão de interferência no FP, basta calcularmos os múltiplos campos que serão refletidos entre os espelhos e contribuirão para o campo total transmitido. Para simplificar consideremos o caso de incidência normal e espelhos idênticos, conforme ilustrado na Fig. 13(a). Denominamos o coeficiente de transmissão dos campos por t e o de reflexão por r . A energia transmitida é dada por $T = |t|^2$ e a refletida por $R = |r|^2$, assumimos que não existem perdas entre os espelhos ou entre eles, de forma que a energia total é conservada, i.e., $T^2 + R^2 = 1$. A ausência de perdas entre os espelhos implica que o efeito da propagação entre os espelhos é simplesmente introduzir uma fase adicional ao campo ($e^{i\phi}$) sendo que $\phi = kl$ com $k = 2\pi/\lambda$ e l representando a distância entre os espelhos. Portanto os sucessivos campos

⁶Um exemplo infantil do Fabry-Perot pode ser encontrada em salas de espelhos típicas de parques de diversão, nestas observamos várias cópias da nossa própria imagem.

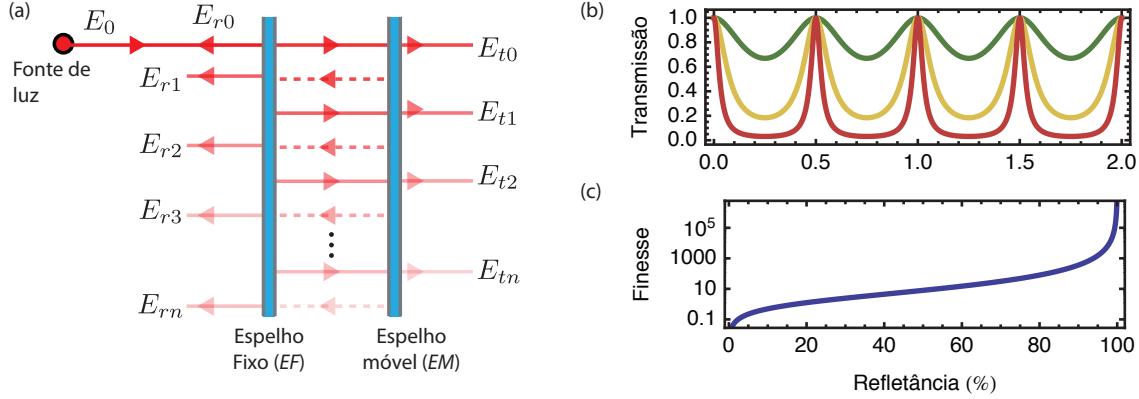


Fig. 13: **Esquema de reflexões e transmitância de um Fabry-Perot.** (a) Esquema de múltiplas reflexões em um Fabry-Perot. O deslocamento vertical dos feixes tem o intuito de simplificar os campos que contribuem para reflexão (E_r) dos campos que contribuem para a transmissão (E_t). (b) Intensidade óptica observada em um ponto do anteparo quando varia-se a posição do espelho. Em (e), as diferentes curvas representam interferômetros Fabry-Perot montados com espelhos de diferentes refletividades $R = (20, 40, 70)\%$.

transmitidos, indicados na Fig. 13 são dados por,

$$\begin{aligned}
 m & \quad E_{t_m} \\
 0 & \quad t^2 r^0 \exp i\phi \\
 1 & \quad t^2 r^2 \exp i3\phi \\
 2 & \quad t^2 r^4 \exp i5\phi \\
 & \quad \vdots \\
 & \quad \vdots \\
 n & \quad t^2 r^{2n} \exp i(2n+1)\phi
 \end{aligned}$$

O campo eletromagnético total será dado pela soma,

$$E_t = \sum_{m=0}^{\infty} E_{t_m} = t^2 \exp i\phi \sum_{m=0}^{\infty} (r^2 e^{i2\phi})^m = \frac{t^2}{r^2 e^{i2\phi} - 1}. \quad (6)$$

Na última igualdade usamos que $r < 1$ e portanto a soma é uma série geométrica convergente de razão ($r^2 e^{i2\phi} < 1$). A intensidade da luz transmitida pelo par de espelhos é simplesmente

$$\langle I \rangle \propto |E_t|^2 = \frac{T^2}{1 + R^2 - 2R \cos(2\phi)} = \frac{(1-R)^2}{1 + R^2 - 2R \cos(2\phi)} = \frac{1}{1 + F \sin^2(\phi)} \quad (7)$$

na qual definimos a importante quantidade denominada *finesse*, $F \equiv 4R/(1-R)^2$. A razão F/π

quantifica, aproximadamente, quantas vezes o campo percorreu a distância entre os espelhos. Na figura 13(b) mostramos o comportamento da transmitância do FP para diferentes valores da refletância dos espelhos. Na figura 13(c) mostramos como a *finesse* aumenta quando varia-se a refletividade dos espelhos.

Preparação

1. Calcule a função de transferência $H(\omega)$ do filtro LC mostrado na figura 3. Mostre que a transmitância ($|H|^2$) é dada por $T(\omega) = \frac{L^2\omega^4C_{in}^2}{(L\omega^2(C_{in}+C_v)-1)^2}$.
2. Qual é a frequência de ressonância deste filtro?
3. Assumindo que o indutor possui $L = 62\mu\text{H}$ e o capacitor variável pode variar entre $30\text{ pf} < C_v < 350\text{ pf}$, calcule a faixa de frequências que este filtro poderá sintonizar. Descubra na internet quais rádios de Campinas estão nesta faixa.
4. Assuma que a curva IV de um diodo pode ser aproximada pela expressão $i(t) = a_1v(t) + a_2v^2(t)$, onde a_1 e a_2 são constantes. Calcule a corrente quando a tensão for na forma $v(t) = v_0(1 + m(t)) \cos[\omega_ct]$. Mostre que existe um termo proporcional à $m(t)$. Pense no que acontece com os demais termos ao passar pelo capacitor do alto-falante?

Material

- Diodo de silício.
- Diodo de germânio tipo Schotky (Nunca aplicar um sinal do gerador neste diodo, ele é sensível e pode queimar!).
- Indutor e capacitor sintonizável ($30\text{ pf} < C_v < 350\text{ pf}$) (Estes componentes já estão montados!).
- Resistores: $1\text{k }\Omega$.

Roteiro

Caracterização do circuito LC

Para caracterizar o filtro iremos utilizar a montagem da Fig. 14. Acople o sinal do gerador no terminal **verde** do filtro, meça o sinal de saída no terminal **vermelho**. Estime a frequência de ressonância esperada e depois encontre-a experimentalmente para 4 diferentes posições das placas do capacitor sintonizável. Com a maior capacidade possível, meça 10 pontos das amplitudes V_{pp1}/V_{pp2} na faixa de 50 KHz em torno da ressonância. No relatório estime a largura de banda do filtro.

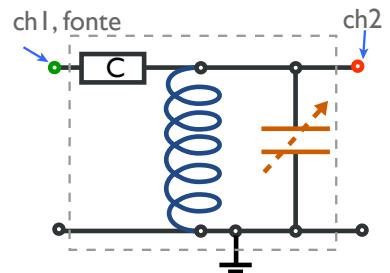


Fig. 14: Esquema do circuito para caracterizar o filtro LC. Utilize o gerador de funções no canal 1.

Caracterização da curva IV do diodo

Em teoria poderíamos medir a curva IV de um diodo simplesmente introduzindo um resistor R em série com o diodo. A queda de tensão no resistor seria proporcional à corrente, portanto $I = V_R/R$. Para obter V_D basta medirmos a queda de tensão no diodo. Contudo, no laboratório precisamos conectar o canal 1 do osciloscópio entre os terminais do diodo e o canal 2 entre os terminais de resistor. Como o terra de ambos canais é o mesmo, tal conexão implicaria no resistor (ou o diodo) em curto-circuito, portanto a queda de tensão medida seria nula. Para resolver este problema de aterrramento iremos explorar o transformador de tensão pois neste o enrolamento primário (conectado à rede elétrica) está isolado do secundário (conectado ao circuito), consequentemente podemos impor um ponto de terra entre o resistor e o diodo, como ilustra a Fig. 15⁷. Como invertemos o sentido que estamos medindo a tensão no resistor, é também necessário **inverter** o sinal do canal 2 do osciloscópio.

1. Monte o circuito da Fig. 15.
2. No modo YT do osciloscópio centralize ambas (canais 1 e 2) ondas em $Y = 0$ e grava no seu cartão de memória.
3. No modo XY salve 2 versões da curva IV, uma em que a curva toda possa ser visualizada (ajuste as escalas horizontais e verticais) e outra em que a origem ($V_R = 0, V_D = 0$) esteja ampliada.

No seu relatório inclua as três curvas. Para as curvas IV indique a escala vertical como corrente em mA e o eixo horizontal em V. Extraia destas curvas a corrente de saturação e também a inclinação da curva dI/dV , para polarização reversa ($V < 0$) e três pontos distintos para polarização direta ($V > 0$). Calcule a resistência diferencial nestes pontos $R = (dI/dV)^{-1}$

⁷Note que se fizéssemos esta conexão utilizando o gerador sem o transformador, o resistor conectado ao terminal central do indutor estaria em curto-circuito.

Ouvindo o rádio

Chegou finalmente o momento de ouvirmos alguma música (ou notícias). Monte o circuito da Fig. 3 utilizando como detetor o diodo schotky. A motivo de usarmos este diodo, ao invés do diodo de silício, é que a tensão crítica na qual este diodo deixa passar corrente ($V_0 \approx 30$ mV) é muito menor que o diodo de silício ($V_0 \approx 700$ mV). Isto o torna ideal para demodular sinais de pequena amplitude, como o que recebemos da antena. Muito cuidado com este diodo pois ele é sensível e não temos muitos sobrando. Descreva no relatório quais rádios você consegui sintonizar. Em Campinas existem duas rádios nesta faixa de frequências, a rádio Central e a rádio Bandeirantes

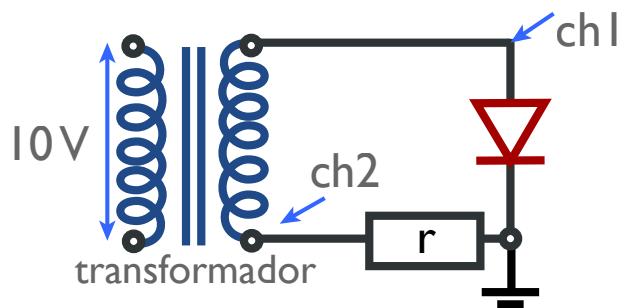


Fig. 15: Esquema do circuito para caracterizar a curva IV. Utilize o transformador de 9 V de saída e $R = 1K\Omega$ e um diodo de silício (encapsulamento preto!).