

**Departamento de Eng. Electrónica e Informática**

**Análise de Circuitos  
Caderno de Engenheiro**

Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade do Algarve  
2007/2008

(<http://www.deei.fct.ualg.pt/AC/logbook.pdf>)

## A Folhas de Trabalhos Práticos

- 1 Instrumentos e técnicas de medida I
- 2 Instrumentos e técnicas de medida II
- 3 Instrumentos e técnicas de medida III
- 4 Teoremas gerais I
- 5 Teoremas gerais II
- 6 Filtros RC/CR - em regime sinusoidal
- 7 Quadripolos
- 8 Circuitos RC/CR - em regime transitório
- 9 Circuito RLC - em regime transitório

## A.1 Instrumentos e técnicas de medida I

### A.1.1 Preparação

As três quantidades básicas da electricidade - corrente, resistência e tensão - podem ser medidas através de três tipos de instrumentos: o amperímetro, o ohmímetro e o voltímetro respectivamente (figura A.1).



Figura A.1: símbolos do amperímetro, voltímetro e ohmímetro.

Em geral estes três tipos de medida podem ser efectuados usando um único aparelho que por isso se chama multímetro. Salvo no caso do ohmímetro, dever-se-á ter em atenção a polaridade do aparelho de medida em relação ao circuito a medir: os polos positivos deverão ser ligados entre si e os polos negativos também. Um engano na polaridade comportará, no caso dos aparelhos de agulha, um desvio no sentido negativo e nos aparelhos digitais um sinal de - antes do valor da corrente ou tensão medida.

#### Amperímetro

Um amperímetro coloca-se em série no circuito a medir (figura A.2) e por isso deverá apresentar, no caso ideal, uma resistência nula para não perturbar o circuito. A unidade de medida da corrente eléctrica é o Ampere (A).

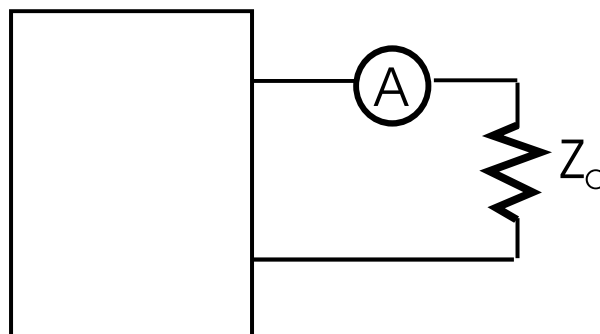


Figura A.2: montagem em série de um amperímetro.

#### Voltímetro

O voltímetro, ao contrário do amperímetro, deverá ser colocado em paralelo no circuito a medir (figura A.3). Assim, o voltímetro ideal deverá apresentar uma resistência infinita para não derivar nenhuma corrente do circuito em teste e não o perturbar. A unidade de medida da voltagem eléctrica é o Volt (V).

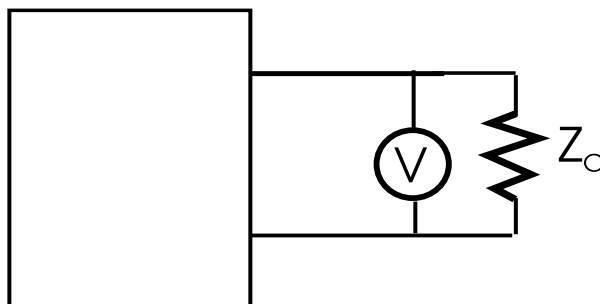


Figura A.3: montagem em paralelo de um voltímetro.

### Ohmímetro

A resistência é a oposição que um elemento oferece à passagem da corrente eléctrica. Em geral, torna-se necessário retirar o elemento a medir do circuito onde possa estar inserido e colocá-lo em paralelo aos terminais do ohmímetro. O ohmímetro gera uma diferença de potencial aos seus terminais fazendo passar uma certa corrente na resistência. Através da lei de Ohm, calcula a resistência, e mostra o seu valor no écran. A unidade de medida da resistência eléctrica é o Ohm ( $\Omega$ ).

### Fonte de alimentação contínua

Uma fonte de alimentação contínua de boa qualidade pode ser comutada como fonte de tensão ou fonte de corrente. No caso ideal, uma fonte de tensão deverá fornecer uma tensão constante qualquer que seja a corrente pedida. Isto implica que a sua resistência interna (em série) deverá ser nula. Contrariamente, uma fonte de corrente ideal deverá fornecer uma corrente constante qualquer que seja a diferença de potencial aos seus terminais e portanto deverá apresentar uma resistência interna (em paralelo) infinita. É claro que na prática a corrente e a tensão que podem ser fornecidos por uma fonte de alimentação encontram-se limitadas pelas características técnicas do aparelho em questão. Os circuitos equivalentes de uma fonte de alimentação de tensão e corrente encontram-se representados na figura A.4.

**Exercício 1:** considere a montagem da figura A.5 onde a fonte de tensão é considerada ideal.

- refaça um desenho do circuito com um amperímetro (ideal) para medir a corrente na resistência  $R$  e calcule o valor da corrente.

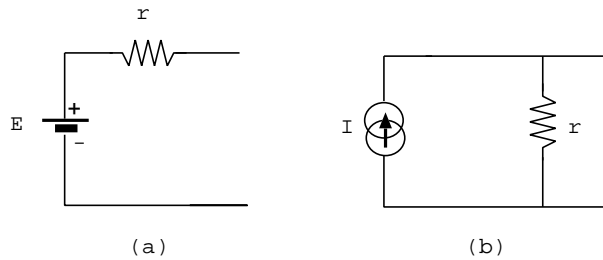


Figura A.4: fontes de alimentação equivalentes (a) de tensão e (b) de corrente.

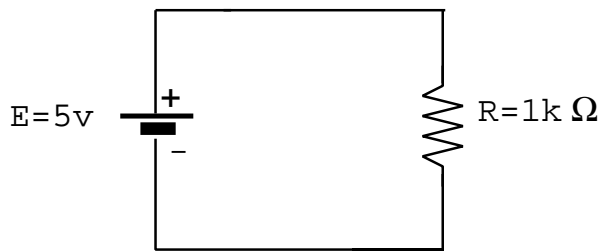


Figura A.5: medida de tensão e corrente

- b) no desenho de a) coloque também um voltímetro (ideal) para medir a diferença de potencial aos terminais de  $R$ . Qual o valor que se deve encontrar ?

**Exercício 2:** considere agora a montagem da figura A.6.

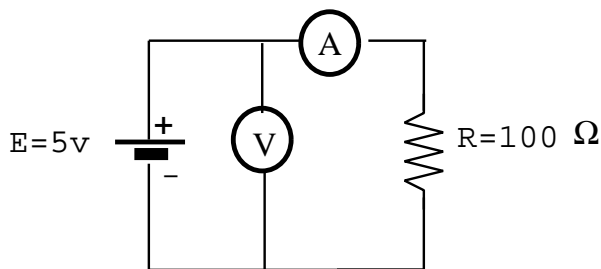


Figura A.6: medida de tensão e corrente.

- a) quais os valores medidos em V e A ?
- b) na figura A.6 (fonte de tensão ideal) considere que a fonte de tensão não é ideal mas sim formada por uma fonte ideal de 5 V em série com uma resistência interna de  $50 \Omega$ . Quais os novos valores medidos em V e A ?
- c) voltando à figura A.6 com a fonte de tensão ideal, considere que o amperímetro A não é ideal e tem uma resistência interna de  $5 \Omega$ . Quais os novos valores de tensão e corrente medidos em V e A ?

## A.1.2 Trabalho prático

### 1. Característica tensão-corrente numa resistência

- realize a montagem da figura A.5. Fazendo variar o valor da tensão nominal da fonte entre 0 e 10 V, de um em um volt; medir a corrente e a tensão para cada valor utilizando a montagem dos aparelhos de medida exemplificada na figura A.6<sup>1</sup>. Traçar a curva  $I = f(V)$ . A lei de Ohm é verificada? Porquê?
- deduzir experimentalmente o valor médio da resistência a partir da curva  $I = f(V)$  de a) através do ajuste linear nos pontos medidos. Comparar o valor obtido com o valor obtido num ponto, com o valor nominal e com o valor real (utilizando o ohmímetro). Qual o valor mais preciso? Conclusão.
- na mesma montagem de a), coloque agora os aparelhos de medida A e V de tal modo que o amperímetro fique em série antes do voltímetro. Refaça o traçado de  $I = f(V)$ . Deduza novamente o valor da resistência dos dados experimentais e faça a mesma comparação com os vários valores da resistência. Conclusão sobre a precisão de medida obtida pelas montagens: amperímetro antes e depois do voltímetro.

### 2. Característica tensão-corrente num diodo

Realize a montagem da figura A.7 tomando em atenção a polaridade do diodo.

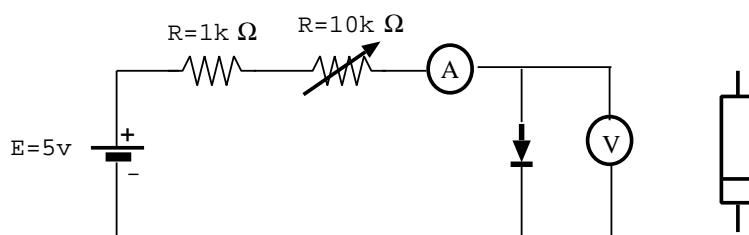


Figura A.7: característica tensão-corrente num diodo.

- fazendo variar o valor do potenciometro trace a característica  $I = f(V)$ . Compare com a curva obtida em A.1.2 1. a) e c). Conclusão.
- utilizando os valores medidos em a) trace a mesma curva mas em papel semi-logarítmico  $\log(I) = f(V)$ . Qual a forma da curva obtida? Conclusão.

<sup>1</sup>para medir corrente e tensão no mesmo ponto, utilizar o multímetro simultaneamente como voltímetro e amperímetro utilizando o ponto comum ligado à massa e as saídas V e I respectivamente em paralelo e em série, bastando seleccionar a função desejada com o respectivo botão para efectura a leitura seja da tensão seja da corrente.

Docente

Data

---

Docente

Data

---



## A.2 Instrumentos e técnicas de medida II

### A.2.1 Preparação

O osciloscópio é um elemento essencial na gama de instrumentos de medida utilizados em laboratórios de electrónica. A função essencial do osciloscópio é a de permitir visualizar a forma de onda ao longo do tempo. Quando essa visualização se efectua de forma calibrada, o osciloscópio é igualmente um importante aparelho de medida. Pode medir amplitudes, tempos, frequências, fases, etc... Uma das características importantes do osciloscópio é também a de permitir visualizar simultâneamente dois sinais, permitindo assim a sua comparação em termos de amplitude, atraso temporal, etc...

Durante muitos anos os osciloscópios eram completamente analógicos. Depois apareceram os osciloscópios com memória digital, que permitiam gravar uma parte do sinal em memória e depois visualizá-lo em detalhe. Esta função era particularmente útil para a análise de sinais transitórios. Hoje em dia existem já muitos osciloscópios completamente digitais. Qualquer um destes tipos de osciloscópios tem funcionalidades idênticas às do antigo osciloscópio analógico e por isso encontra-se em anexo uma descrição detalhada do princípio de funcionamento do osciloscópio catódico.

Neste trabalho prático vamos aprender a utilizar o osciloscópio para observar e medir formas de onda variadas.

#### Valores pico, eficazes, frequência e geradores ideais

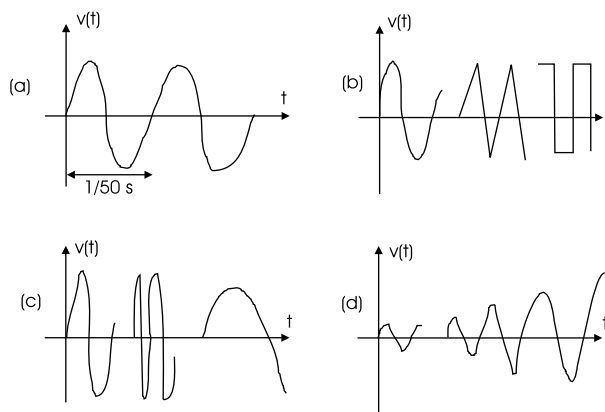


Figura A.8: (a) corrente doméstica, (b) formas de onda, (c) variação da frequência e (d) valor nominal.

A corrente contínua (DC) é produzida pela passagem de electrões do polo negativo para o polo positivo de uma fonte de alimentação ou pilha. A corrente tem, neste

caso, um só sentido. No caso da corrente alterna (AC), o sentido de passagem da corrente alterna do positivo para o negativo e depois do negativo para o positivo. A corrente alterna é em geral produzida por um gerador de frequência e o exemplo mais conhecido é a corrente de alimentação doméstica que em Portugal é à tensão nominal de 230 V e à frequência de 50 Hz de (figura A.8a). Na corrente alterna podemos fazer variar a forma de onda (figura A.8b), a frequência (figura A.8c) e o valor de pico (figura A.8d).

### Gerador de sinais

Um exemplo de fonte de tensão alterna é o gerador de sinais que possuímos em sala de Trabalhos Práticos. Em geral a corrente que estes geradores podem produzir é bastante limitada e por isso são chamados fontes de tensão pois encontram-se mais próximos de uma fonte de tensão ideal (resistência interna fraca) do que de uma fonte de corrente ideal (grande resistência interna). As características mais importantes num gerador de sinais são: as formas de onda que pode produzir, a gama de frequências que abrange e a tensão máxima que pode fornecer.

### Exercício 1: divisor de tensão

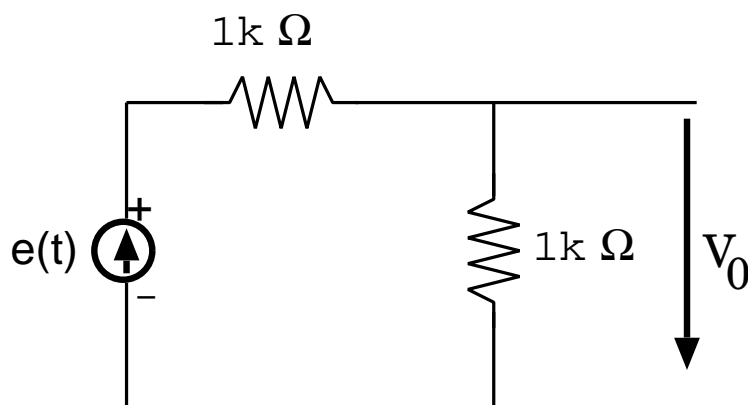


Figura A.9: divisor de tensão alterno.

Sabendo que o gerador de sinais debita uma tensão  $e(t) = 3 \sin(6280t)$ .

- calcule a tensão medida por um voltímetro colocado aos terminais do gerador.
- qual a amplitude pico medida por um osciloscópio colocado no mesmo ponto do voltímetro. Qual o rácio entre este valor e aquele observado em a) ?
- qual o valor do período da forma de onda observada no osciloscópio ?

- d) colocamos agora o multímetro de modo a medir a tensão  $V_0$ . Qual o valor medido ? E se colocarmos o osciloscópio no mesmo ponto, qual o valor pico a pico da forma da onda que podemos observar.

**Exercício 2:** sinal sinusoidal com um valor de offset

Considere uma tensão sinusoidal  $v(t)$

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \phi) + V_0$$

- a) calcule o seu valor médio  $\bar{v}$
- b) calcule o seu valor eficaz  $v_{eff}$

**Uso racional de um osciloscópio**

Depois de ter observado todos os botões de comando assim como todos os terminais de ligação do osciloscópio, assegurar-se de que:

1. a massa está ligada à terra
2. os botões de desvio vertical e horizontal estão a meio
3. os botões de luminosidade e concentração encontram-se no ponto médio.
4. os amplificadores estão desligados
5. o comutador da base de tempo encontra-se regulado no período do sinal a observar.
6. o botão de variação contínua da base de tempo encontra-se completamente à esquerda.
7. o comutador de seleção do varrimento encontra-se na posição de varrimento interior.

Ligar o aparelho e esperar que ele aqueça. Ajustar os potenciômetros de luminosidade e concentração para o aparecimento de um traço fino no ecrã. ATENÇÃO: nunca aumentar muito a luminosidade do traço e sobretudo nunca deixar um ponto luminoso imóvel no ecrã.

## A.2.2 Trabalho Prático

### 1. Funcionamento do osciloscópio

Ligar o osciloscópio seguindo os passos descritos no parágrafo “Uso racional do osciloscópio” da preparação. Identificar os diferentes botões e o seu efeito. Obter um traço contínuo no ecrã.

### 2. Medida de amplitudes

Aplicar num dos canais do osciloscópio uma tensão sinusoidal. Regular a amplitude do sinal de modo a obter uma tensão de 1 volt eficaz. Qual o valor pico a pico nesse caso ? Verificar o valor da tensão usando o voltímetro. Verificar a utilização do botão de calibração dos canais verticais.

### 3. Medida de frequências

A medida de frequências pode ser feita de forma directa introduzindo um sinal sinusoidal no canal A do osciloscópio e medindo o período do sinal, calcular a frequência. Comparar com o valor marcado no gerador de sinais. Trata-se de uma medida precisa ? Quais são os erros de medida mais importantes neste tipo de medida ? Como podem ser minimizados ? Veremos no próximo trabalho prático uma forma diferente de efectuar a medida de frequências que reduz os erros de experimentais.

### 4. Divisor de tensão alterno

Realize a montagem da figura A.9.

- regule o gerador de sinais de forma a gerar a onda  $e(t) = 3 \sin(6280t)$ . Para tal utilize o multímetro e o osciloscópio. Explique o procedimento.
- meça a tensão aos terminais do gerador de sinais e aos terminais da resistência,  $V_o$  utilizando o multímetro. Calcule os valores de pico correspondentes. Verifique os resultados com o osciloscópio. Qual dos dois aparelhos tem maior precisão ? Conclusão.
- utilizando o botão de *offset* do gerador adicione ao sinal  $e(t)$  uma tensão contínua de 2 V. Verifique utilizando o osciloscópio em posição DC. Qual é o novo valor eficaz de  $e(t)$  ? Calcule e verifique experimentalmente utilizando o multímetro. Quais os valores eficazes, pico e pico-pico medidos em  $V_o$  ?
- sempre com a tensão  $e(t) = 3 \sin(6280t)$  mude para onda quadrada. Meça de novo  $V_o$  com o multímetro e com o osciloscópio. Conclusão.

## Anexo

### Princípio de funcionamento do osciloscópio catódico

#### O tubo catódico (figura A.10)

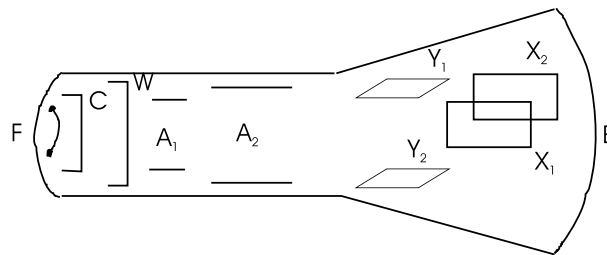


Figura A.10: esquema interno do tubo catódico.

#### O canhão de electrões

Chama-se canhão de electrões ao conjunto de elementos que permite obter um feixe de electrões a grande velocidade. Este comporta:

- um filamento F aquecido por uma tensão alterna ou contínua geralmente de 2.5 ou 6.3 volts.
- um cátodo C, de forma cilíndrica, colocado em torno do filamento e emitindo electrões por efeito termo iónico.
- o cilindro de Wehnelt W, chamado correntemente Wehnelt, que é a grelha de comando do tubo e que regula a intensidade do feixe de electrões. A sua tensão em relação ao cátodo é de cerca de -50 a -120 volts.
- um eléctrodo de concentração  $A_1$ . Este tem o papel de uma lente electrostática e produz a focalização do feixe de electrões no ecrã fluorescente E. A sua tensão em relação ao cátodo é de cerca de +30 a +1000 volts.
- um eléctrodo de aceleração  $A_2$  que dá aos electrões uma grande velocidade. A sua tensão em relação ao cátodo é de +600 a +3000 volts.

#### As placas de desvio

- um par de placas horizontais  $Y_1$  e  $Y_2$  produzindo o desvio vertical do spot luminoso quando é estabelecido um campo eléctrico entre elas.

- b) um par de placas verticais  $X_1$  e  $X_2$ , produzindo o desvio horizontal do spot luminoso quando um campo eléctrico existe entre elas.

### Um eléctrodo de pós-aceleração $A_3$

A presença deste eléctrodo é dispensável. Tem a forma de um anel mais ou menos largo constituído geralmente por uma camada condutora na face interna do tubo catódico. Aplicada uma diferença de potencial de alguns milhares de volts (5000 a 30000) ele aumenta o brilho do spot através do aumento da energia cinética dos electrões.

### O ecrã de observação

A face anterior do tubo de vidro está coberta de uma matéria que se torna luminosa quando recebe o choque de electrões a alta velocidade. O impacto no ecrã do feixe de electrões traduz-se assim por um ponto luminoso (spot).

### Montagem prática. Protecção

O tubo catódico é revestido de uma camisa de protecção magnética em  $\mu$  metal destinada a reduzir ao máximo a influência dos campos magnéticos exteriores e inclusive do campo terrestre. Em aparelhos antigos o tubo catódico encontra-se protegido por uma camada de vidro espesso e transparente de modo a proteger o utilizador dos riscos de implosão do tubo.

### O circuito de varrimento

#### O varrimento normal

O varrimento normal destina-se a produzir uma tensão que aplicada entre as placas  $X_1$  e  $X_2$  provoca o desvio horizontal do spot luminoso proporcional ao tempo sob todo o ecrã E. Esta tensão deverá portanto variar linearmente em função do tempo e cair a zero num tempo muito curto: é o que se chama uma tensão em “dentes de serra”. O circuito que produz esta tensão chama-se **base de tempo**.

#### O varrimento desencadeado

Em muitas aplicações, e em especial no estudo dos fenómenos transitórios não periódicos, é necessário dispôr de um dispositivo tal que o varrimento seja desencadeado pelo fenómeno a observar. Em geral o sinal a observar é injectado no circuito de base de tempo de modo a desencadear o varrimento do ecrã. O tempo entre a chegada do impulso e o varrimento pode ser regulável assim como o nível de sensibilidade a partir do qual o varrimento será efectuado.

### Varrimento 50 Hz

A maioria dos osciloscópios possui um dispositivo de varrimento sinusoidal com a

frequência da tensão de alimentação 50 Hz que é uma frequência de referência que serve para observar figuras de Lissajoux.

### **Varrimento exterior**

Neste caso pode-se eliminar todo e qualquer circuito de varrimento interno e controlar o varrimento através de uma tensão externa.

### **Os amplificadores**

A presença de amplificadores nos circuitos de varrimento horizontal e vertical é indispensável na maior parte dos casos de modo a tornar a tensão de controle do tubo o mais independente possível do circuito a observar. As características em frequência destes amplificadores dão ao osciloscópio a sua banda passante que pode ir entre 20 MHz e o GHz. As diferenças de fase introduzidas por estes amplificadores devem ser muito pequenas de modo a que as medidas sejam o mais fiéis possíveis.

### **Os circuitos de sincronização**

#### **Sincronização interna**

A sincronização interna permite obter uma “relação temporal constante” entre o sinal a observar e o circuito de varrimento de modo a poder obter uma figura estável no ecrã e permitir a observação e medida de amplitudes, tempos, diferenças de fase, etc...

#### **Sincronização 50 Hz**

Este dispositivo permite controlar o varrimento independentemente da tensão a observar, a partir da frequência do sector de alimentação 220V.

#### **Sincronização externa**

A frequência de um sinal exterior pode ser também usada para sincronizar o sinal a observar.

### **Circuito de alimentação**

O circuito de alimentação do osciloscópio permite obter um número de tensões variadas, entre alguns volts para os circuitos electrónicos de base de tempo e sincronização, e até alguns milhares de volt para a alimentação do tubo catódico e das placas de aceleração.

### **Os comandos dum osciloscópio**

#### **Interruptor ON/OFF**

Permite ligar o aparelho que demorará alguns segundos a aquecer o filamento do

tubo catódico.

### **Potênciometro de luminosidade**

Este potênciometro permite controlar a intensidade luminosa do spot.

### **Potênciometro X**

Permite agir sobre as placas “X” e regular o spot no sentido horizontal.

### **Potênciometro Y**

Permite agir sobre as placas “Y” e regular o spot no sentido vertical.

### **Potênciometro “Focus”**

Este potênciometro permite realizar a focalização do feixe de electrões no ecrã de observação.

### **Varrimento e sincronização**

Esta parte do osciloscópio comporta em geral:

- a) um comutador que permite escolher o modo de varrimento: interno, desencadeado, 50 Hz, externo e o modo de sincronização: interno, 50 Hz, externo
- b) para a base de tempo interna um comutador de gama de frequências, um potênciometro permitindo uma variação contínua da frequência no interior de cada gama e um potênciometro para o controle da amplitude horizontal do varrimento.
- c) para o varrimento externo: um potênciometro de comando do ganho do amplificador horizontal (se ele existe).
- d) para a sincronização (interna ou externa): um potênciometro de controle da taxa de sincronização.

### **Amplificador vertical**

- a) um comutador de modificação do ganho
- b) um potênciometro de variação precisa do ganho no interior de uma gama de ganho.
- c) um comutador AC/DC/GROUND permitindo calibrar o amplificador em posição GROUND, visualizar todo o sinal em posição DC e sómente a sua componente alterna em posição AC.



## Dispositivos complementares

Outros osciloscópios mais sofisticados poderão comportar dispositivos mais específicos segundo a função a que se destinam. Entre outros podemos ter:

1. calibração em tensão possível através de uma fonte de tensão interna muito estável.
2. varrimento monotraço que permite desencadear um varrimento à escolha do utilizador cada vez que este carrega num botão.
3. dois canais de visualização simultânea. Hoje em dia quase todos os osciloscópios são bicanal nos quais é usado um comutador electrónico que permite aplicar ao amplificador vertical uma ou outra das tensões a visualizar. A comutação faz-se a alta velocidade de forma que o utilizador não se aperceba. Os osciloscópios com dois canhões de electrões no mesmo tubo catódico são muito raros hoje em dia devido ao seu custo elevado.
4. hoje em dia existem osciloscópios completamente digitais que permitem uma manipulação do sinal observado seja na memória para obter zooms, sobreposições, impressões em papel, espectros, etc...
5. é também possível em alguns osciloscópios modular a intensidade do spot aplicando no Wehnelt uma tensão entre 10 e 50 volts.

Docente

Data

---

Docente

Data

---

## A.3 Instrumentos e técnicas de medida III

### A.3.1 Preparação

#### 1. Medida de diferenças de fase com o método directo

Para medir a diferença de fase entre dois sinais podemos utilizar o método de medida directa aplicando cada um dos sinais aos canais X e Y do osciloscópio. Ajusta-se a base de tempo de forma a que o meio período de um dos sinais preencha completamente o ecrã na horizontal. De forma a obter uma maior precisão na medida amplificam-se verticalmente os sinais de modo a obter uma interseção franca quase a 90 graus do traço luminoso com o eixo horizontal do tempo. Conta-se o número de quadriculas horizontais que separam os traços dos dois sinais. A diferença de fase obtem-se sabendo que o ecrã completo, i.e., dez quadriculas, corresponde a  $\pi$  e fazendo a proporção. O resultado é directamente obtido em radianos. Este método também pode ser utilizado para medir o atraso temporal entre os dois sinais. Em todas as medidas com o osciloscópio deveremos colocar-nos de modo a obter uma visão frontal do ecrã e nunca de lado, de forma a evitar erros de paralaxe nas medidas.

#### 2. Medida de diferenças de fase com o método da elipse

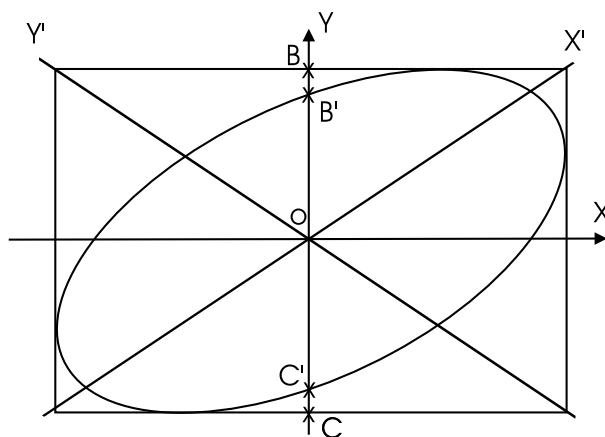


Figura A.11: método da elipse.

Consideremos dois sinais sinusoidais aplicados nos canais X e Y de um osciloscópio (eixos ortogonais OX e OY da figura A.11),

$$\begin{cases} x(t) = A \cos \omega t \\ y(t) = B \cos(\omega t - \phi) \end{cases}$$

A composição destas duas equações obtem-se eliminando o tempo  $t$  entre elas, i.e., o ponto luminoso no ecrã vai ser desviado horizontal e verticalmente em simultâneo, formando assim uma figura parameterizada pela variável tempo.

a) comece por definir

$$x' = \frac{x}{A} = \cos \omega t$$

$$y' = \frac{y}{B} = \cos(\omega t - \phi) = x' \cos \phi + \sin \omega t \sin \phi,$$

e demonstre que

$$x'^2 + y'^2 - 2x'y' \cos \phi - \sin^2 \phi = 0.$$

b) sabendo que a equação anterior é a equação de uma elipse rodada de  $\pi/4$ , faça uma mudança de variável

$$x' = x'' \cos \frac{\pi}{4} - y'' \sin \frac{\pi}{4} = \frac{x'' - y''}{\sqrt{2}}$$

$$y' = x'' \sin \frac{\pi}{4} + y'' \cos \frac{\pi}{4} = \frac{x'' + y''}{\sqrt{2}},$$

demonstre que

$$\frac{x''^2}{2 \cos^2 \frac{\phi}{2}} + \frac{y''^2}{2 \sin^2 \frac{\phi}{2}} = 1.$$

c) que é agora uma elipse segundo os eixos  $OX''/OY''$ . Calcule os meios eixos segundo  $OX''$  e  $OY''$ , respectivamente  $a$  e  $b$ . Demonstre que o valor do atraso  $\phi$  entre as duas formas de onda se calcula como sendo

$$\tan \frac{\phi}{2} = \frac{b}{a}$$

### A.3.2 Trabalho prático

#### 1. Medida de frequência comparada: figuras de Lissajoux

Pretende-se determinar a frequência de um sinal de uma forma precisa e assim aplica-se o método dito de Lissajoux, que não é mais do que uma extensão do método da elipse a sinais de frequência diferente. Para efectuar esta medida é necessário possuir uma frequência de referência em relação à qual se efectua a medida. Para efectuar este trabalho será necessário o uso de dois geradores. Demonstra-se que a composição de duas vibrações sinusoidais de frequências  $F_x$  e  $F_y$  segundo dois eixos ortogonais resulta numa curva inscrita num rectângulo cujos lados são iguais às amplitudes das vibrações. Se a relação  $F_x/F_y$  for igual à relação entre dois números inteiros  $m/n$  (supostos primos), a curva de Lissajoux será fechada e terá exactamente  $m$  pontos de contacto com os lados verticais do rectângulo e  $n$  pontos de contacto com os lados horizontais. Se uma das frequências for conhecida com precisão, podemos determinar a outra também com grande precisão.

$$F_x = F_y \times \frac{\text{numero de pontos de contacto com os lados verticais}}{\text{numero de pontos de contacto com os lados horizontais}} \quad (4)$$

Se  $F_x = F_y$  a curva é em geral uma elipse salvo no caso em que a diferença de fase entre os dois sinais é 0 ou  $\pi$  onde se obterá um recta na diagonal do rectângulo.

NOTA: a figura de Lissajoux será rigorosamente estável se os geradores estudados não tiverem nenhuma deriva em frequência.

Realize três figuras distintas e estáveis no ecrã. Desenhe e explique.

## 2. Medida de diferenças de fase

Realizar a montagem da figura A.12. Introduzir à entrada um sinal  $V_e = 2.5 \sin(12566t)$ .

a) determinar o valor da diferença de fase utilizando o método de medida directa.

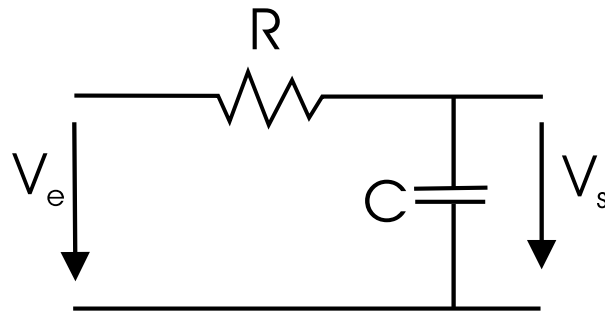


Figura A.12:  $R = 1k\Omega$  e  $C = 220nF$

b) empregar agora o método estudado na preparação fazendo uma elipse de Lissajoux. Calcular de novo  $\phi$ .

c) medir a amplitude dos sinais de entrada e de saída. Fazer variar a frequência e observar a variação do sinal de saída em relação ao sinal de entrada tanto em amplitude como em diferença de fase. Colocar os valores de amplitude e fase numa tabela para vários valores da frequência. Conclusão.

NOTAS:

i) um método alternativo ao da preparação consiste em verificar nas equações que quando  $x = 0$  temos  $A \sin \omega t = 0$  o que implica que o segmento  $OB'$  na figura A.11 é  $B \sin \omega t$  e como  $B=OB$  então

$$\sin \phi = \frac{OB'}{OB} = \frac{B'C'}{BC} \quad (5)$$

ii) se a elipse tem o seu eixo principal no segundo quadrante então

$$\phi \text{ (real)} = \pi - \phi \text{ (medido)} \quad (6)$$

- iii) no método da elipse, a medida é facilitada se os dois sinais aplicados tiverem a mesma amplitude.

### **3. Medidas de sinais transitórios**

Utilizar a mesma montagem da figura A.12 com  $C = 22 \text{ nF}$ . Aplicar em  $V_e$  uma onda quadrada de frequência 500 Hz. Observar e desenhar o sinal  $V_s$ . Aumentar progressivamente a frequência até 50 kHz. Desenhar o sinal de saída para  $f=2, 5, 10, 20$  e 50 kHz observado as amplitudes e formas relativas da entrada e saída. Conclusão.

Docente

Data

---



Docente

Data

---

## A.4 Teoremas Gerais I

### A.4.1 Preparação

#### 1. Teorema de sobreposição

Considerando um circuito linear com vários geradores de tensão e/ou corrente independentes, o teorema de sobreposição diz que a corrente eléctrica num ramo do circuito é igual à soma da corrente produzida nesse ramo por cada um dos geradores agindo isoladamente.

#### 2. Teorema de Thevenin

Seja um circuito linear com vários geradores de tensão e/ou corrente independentes. Para um dado ramo do circuito, de impedância  $Z_c$ , o resto do circuito comporta-se como um gerador de força electromotriz  $V_{TH}$  e de impedância interna  $Z_{TH}$ , chamado gerador de Thevenin (figura A.13).

- cálculo de  $V_{TH}$ : retira-se  $Z_c$  e calcula-se a tensão entre AB à qual se chama  $V_{TH}$ .
- cálculo de  $Z_{TH}$ : mantendo sempre o circuito em aberto entre AB, anulando todas as fontes de tensão e de corrente independentes do circuito calcula-se a impedância entre AB à qual se chama  $Z_{TH}$ .

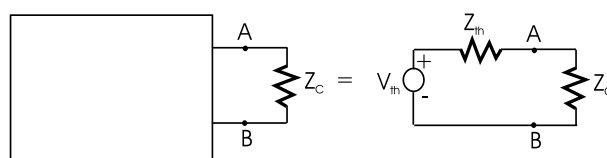


Figura A.13: teorema de Thevenin

#### 3. Teorema de Norton

Considerando o circuito precedente pode-se substituir o gerador de Thevenin por um gerador de corrente equivalente de valor  $I_N = V_{TH}/Z_{TH}$  e colocá-lo em paralelo com a impedância  $Z_{TH}$ .

#### 4. Aplicação

Considere o circuito da figura A.14.

- calcular a corrente  $I$  na resistência  $R_4$  utilizando o teorema de sobreposição.
- verificar o resultado usando o teorema de Thevenin.

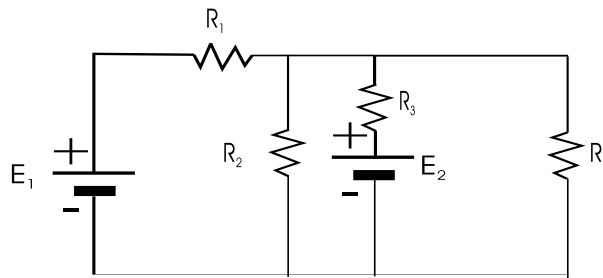


Figura A.14: montagem de aplicação

c) aplicação numérica:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 120\Omega & E_1 &= 9 \text{ v} \\
 R_2 &= 180\Omega & E_2 &= 4.5 \text{ v} \\
 R_3 &= 220\Omega \\
 R_4 &= 120\Omega
 \end{aligned}$$

Anotar os valores das correntes e tensões nos diferentes casos para verificação durante o trabalho prático.

#### A.4.2 Trabalho Prático

Trata-se da verificação prática dos resultados teóricos calculados com os valores numéricos da preparação.

NOTAS:

- i) para efectuar a medida de uma corrente  $I$  numa resistência não usar um amperímetro em série com a resistência mas sim um voltímetro colocado aos terminais da resistência e utilizar a lei de Ohm. Isto de modo que a resistência interna do amperímetro não introduza um erro suplementar na medida da corrente.
- ii) antes de colocar uma resistência ou potenciômetro num circuito fazer o cálculo da potência dissipada para escolher o valor de potência da resistência.
- iii) os vários resultados (teóricos e experimentais) devem ser apresentados sob forma de tabela.

Realizar a montagem da figura A.14 com os valores de 4.c) da preparação.

### 1. Teorema de sobreposição

- a) medir os valores das correntes na resistência  $R_4$ , devidas alternativamente a uma e a outra fonte de tensão. Explicar os métodos de medida e estimar os erros da medida efectuados.
- b) medir agora a corrente em  $R_4$  com as duas fontes ligadas de acordo com o circuito da figura A.14 e verificar os resultados experimentais obtidos nesta e na alínea a), por comparação com os os resultados teóricos obtidos na preparação.

## 2. Teorema de Thevenin e Norton

Sempre na montagem da figura A.14:

- a) medir a tensão de Thevenin  $V_{TH}$  e a resistência de Thevenin  $R_{TH}$  visto de  $R_4$ . Explicar os métodos de medida e os possíveis erros cometidos.
- b) medir a corrente de Norton. Comparar com o valor deduzido de a).
- c) comparar os resultados obtidos com os valores teóricos da preparação. Conclusão.
- d) utilizando os equivalentes de Thevenin e Norton, determine a corrente em  $R_4$ . Compare com o valor obtido com aquele medido para essa corrente, na prova do teorema de sobreposição.

Docente

Data

---

Docente

Data

---

## A.5 Teoremas Gerais II

### A.5.1 Preparação

Considere os circuitos da figura A.15.

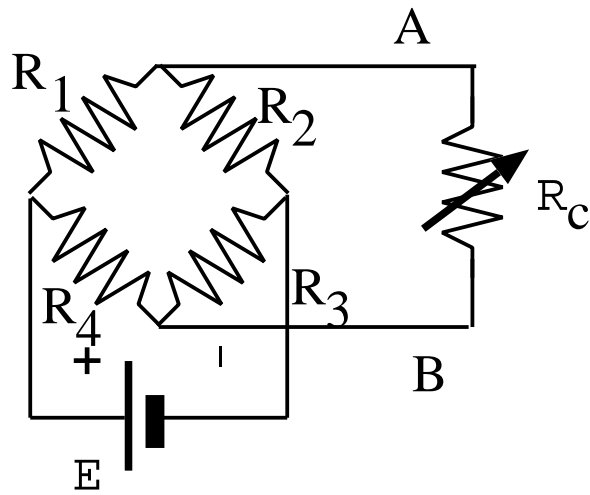


Figura A.15: ponte de Wheatstone

- calcular o gerador de Thevenin e Norton equivalentes ao dipólos da figura A.15.
- a partir do resultado obtido em i) calcular a potência  $P=VI$  dissipada na carga  $R_c$ .
- para que valor da carga se obtem a condição de adaptação ?
- qual é o valor máximo dissipado na carga ?
- aplicação numérica: para os casos de i) a iv) utilizar os valores:

$$\begin{aligned}R_1 &= 120\Omega & E &= 10 \text{ v} \\R_2 &= 180\Omega \\R_3 &= 120\Omega \\R_4 &= 220\Omega\end{aligned}$$

Anotar os valores obtidos de  $V_{th}$ ,  $I_N$ ,  $R_{th}$  e  $P_{max}$ , para posterior verificação experimental durante o trabalho prático.

### A.5.2 Trabalho Prático

Trata-se da verificação experimental dos resultados teóricos calculados na preparação. Realizar a montagem da figura A.15.

- a) traçar a curva  $V=f(I)$  aos bornos da carga, fazendo variar  $R_c$  de 0 a  $\infty$ , notando os valores de  $V, I, R_c$  numa tabela. Deduzir da curvas os elementos de Thevenin e Norton. Comparar com os valores teóricos utilizando os resultados da preparação.
- b) realizar os geradores de Thevenin e de Norton com os valores determinados em a) e traçar de novo  $V = f(I)$  no mesmo gráfico da alínea a) <sup>2</sup>. Conclusão.
- c) traçar a curva  $P = f(R_c)$  utilizando os resultados medidos em a). A partir da curva determinar o valor de  $R_c$  que dá a adaptação máxima e comparar com o valor teórico. Conclusão.

---

<sup>2</sup>as fontes de alimentação da sala de TP podem ser utilizadas como fontes de corrente estabilizadas fazendo um curto circuito aos bornos e ajustando a corrente ao valor pretendido. Não se deve tocar mais no botão da corrente estando o botão de tensão colocado num valor elevado.



Docente

Data

---

Docente

Data

---

## A.6 Filtros RC/CR em regime sinusoidal

### A.6.1 Preparação

#### 1. Revisões: notação complexa

Em regime permanente sinusoidal uma tensão em qualquer ponto de um circuito pode ser representada por

$$v(t) = V_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (\text{A-6.1})$$

e caracterizada completamente através da sua amplitude  $V_0$  e fase  $\phi$ . Para efeitos de cálculo, podemos representar o sinal  $v(t)$  pelo valor complexo

$$\bar{V} = V_0 e^{j\phi} \quad (\text{A-6.2})$$

que é um número que pode ser representado no plano complexo como indicado na figura A.16.

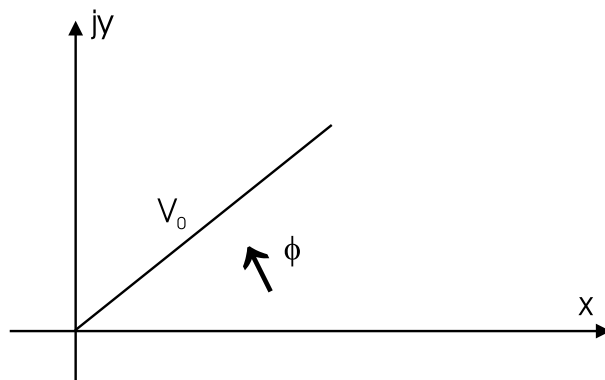


Figura A.16: representação de fasor.

A passagem da notação complexa  $\bar{V}$  à notação trigonométrica  $v(t)$  faz-se multiplicando  $\bar{V}$  por  $e^{j\omega t}$  e tomando a parte real do resultado obtido. O valor  $\bar{V}$  obedece a todas as regras de cálculo dos números complexos e representa um potente utensílio na análise de circuitos em regime permanente sinusoidal (e só nesse caso!).

Se aplicarmos uma tensão sinusoidal  $v(t) = V_0 \cos(\omega t)$  aos terminais de uma resistência  $R$  obtemos uma corrente  $i(t)$  também sinusoidal de amplitude  $V_0/R$  e em fase com  $v(t)$ . Em notação complexa podemos dizer que

$$\bar{V} = R\bar{I} \quad (\text{A-6.3})$$

Se em vez da resistência tivermos um condensador  $C$ , podemos escrever que

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} = -C\omega V_0 \sin(\omega t) \quad (\text{A-6.4})$$

Utilizando a relação  $\sin(\omega t) = -\cos(\omega t + \pi/2)$ , podemos escrever em notação complexa que o fasor associado com a tensão sinusoidal  $\sin(\omega t)$  se escreve  $-\bar{V} \exp j\pi/2$ . Substituindo em (A-6.4) temos que

$$\bar{I} = -C\omega(-\bar{V}e^{j\frac{\pi}{2}}) \quad (\text{A-6.5})$$

$$= jC\omega\bar{V} \quad (\text{A-6.6})$$

de onde

$$\bar{V} = \frac{1}{jC\omega}\bar{I} \quad (\text{A-6.7})$$

Diz-se que um condensador tem uma impedância equivalente em sinusoidal igual a  $Z_C = 1/jC\omega$  e que a tensão tem um atraso de fase de  $\pi/2$  em relação à corrente. No caso da bobine de valor  $L$  temos que

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \rightarrow i(t) = \frac{1}{L} \int v(t) dt \quad (\text{A-6.8})$$

substituindo  $v(t)$

$$i(t) = \frac{V_0}{\omega L} \sin(\omega t) = \frac{V_0}{\omega L} \cos(\omega t) e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (\text{A-6.9})$$

e finalmente

$$\bar{V} = j\omega L \bar{I} \quad (\text{A-6.10})$$

e diz-se neste caso que a impedância equivalente a uma bobine em regime sinusoidal permanente é  $Z_L = j\omega L$  e que a tensão tem um avanço de fase de  $\pi/2$  em relação à corrente. Destas duas expressões  $Z_C$  e  $Z_L$  pode ver-se que a impedância da bobine aumenta com a frequência e a do condensador diminui com a frequência.

## 2. Revisões: representação de Bode

Um sistema, dito de primeira ordem, tem uma representação do tipo

$$A = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 + j\tau\omega},$$

onde  $\tau = RC$  é a constante de tempo do sistema. O estudo em regime permanente sinusoidal deste sistema faz-se normalmente através da representação de  $A$  num diagrama da Bode, *i.e.*, representando separadamente a amplitude (em dB) e a fase de  $A$ .

O ganho em décibéis (dB) obtém-se a partir do módulo  $|A|$  como  $G_{\text{dB}} = 20 \log |A|$  e assim,

$$G_{\text{dB}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + R^2 C^2 \omega^2}},$$

ou seja

$$G_{\text{dB}} = -10 \log(1 + \tau^2 \omega^2).$$

Quando  $\omega \rightarrow 0$  temos que  $G_{dB} \rightarrow 0$  dB e quando  $\omega \rightarrow \infty$  temos que  $G_{dB} \rightarrow -\infty$  dB.

A inclinação das assíntotas é de 0 dB quando  $\omega \rightarrow 0$  e de -20 dB por década (passagem de uma frequência  $f$  a uma frequência  $10f$ ) quando  $\omega \rightarrow \infty$ . Isto pode-se determinar observando que quando  $\omega \rightarrow \infty$

$$G_{dB} \rightarrow -10 \log \omega^2 + 10 \log \omega_0^2$$

onde  $\omega_0 = 1/\tau$ . Num gráfico semi-logarítmico podemos escrever  $X = \log \omega$  e  $X_0 = \log \omega_0$  portanto

$$G_{dB} \approx -20X + 20X_0$$

o que não é mais do que a equação de uma recta de inclinação -20 dB e de ordenada na origem igual a  $20X_0$ . A função  $G_{dB}$  e as respectivas assíntotas estão representadas na figura A.17.

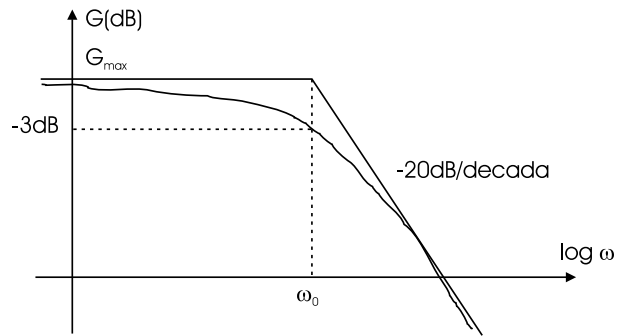


Figura A.17: diagrama de amplitude.

Define-se a banda passante  $B$  como sendo a gama de frequências para as quais o ganho  $G$  está compreendido entre o seu valor máximo  $G_{max}$  e  $G_{max} - 3$  dB. No caso do filtro RC representado acima, o valor  $G_{max}$  é igual a 0 dB que é atingido para  $\omega = 0$ . Por outro lado como  $-3$  dB =  $-20 \log X$  implica  $X = 1/\sqrt{2}$ , podemos calcular o valor de  $\omega$  para o qual

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}}$$

que tem como solução  $\omega = \omega_0$ . O resultado final é que a banda passante  $B = \omega_0$ .

A diferença de fase entre  $V_e$  e  $V_s$  é o argumento do número complexo  $A$  em função da frequência. O argumento de  $A$  pode-se obter calculando o argumento do numerador e do denominador ( $\angle x$  significa “argumento de  $x$ ”)

$$\Phi(\omega) = \angle A = \angle(1) - \angle(1 + RC\omega)$$

sabendo que o argumento dum número real é zero podemos escrever

$$\Phi(\omega) = -\arctan RC\omega$$

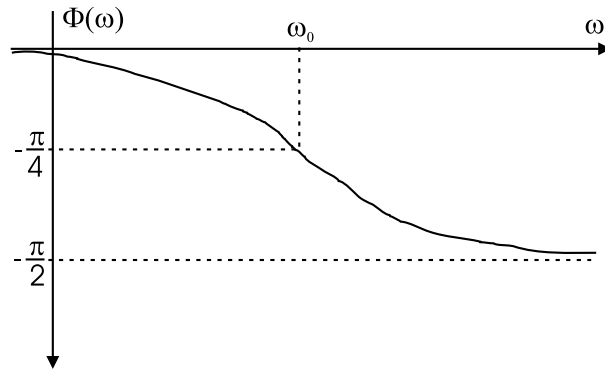


Figura A.18: diagrama de fase.

pondo  $\tau = RC = 1/\omega_0$  que é a constante de tempo do circuito.

Obtemos

$$\Phi(\omega) = -\arctan \frac{\omega}{\omega_0}$$

A variação de  $\Phi(\omega)$  pode-se calcular de forma aproximada observando que quando  $\omega \rightarrow 0$   $\Phi \rightarrow 0$ , e que quando  $\omega \rightarrow \infty$  então  $\Phi \rightarrow -\pi/2$ . Obtem-se um valor particular para  $\omega = \omega_0$  para o qual  $\Phi(\omega_0) = -\pi/4$ . Podemos fazer um traçado aproximado que terá uma forma semelhante ao da figura A.18. Alguns autores admitem um traçado de fase assíntotico através de segmentos de recta, no qual a fase é considerada nula para  $\omega < \omega_0/10$  e igual a  $-\pi/2$  para  $\omega > 10\omega_0$ . Para  $\omega_0/10 < \omega < 10\omega_0$  a curva de fase é aproximada por um segmento de recta com uma inclinação de  $-\pi/4$  por década.

### 3. Estudo de uma célula RC

Considere a montagem da figura A.19 com  $v_e(t) = 3 \cos(6283t)$

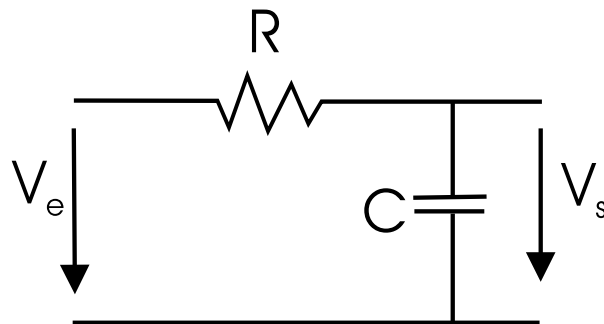


Figura A.19: célula RC.

a) desenhar a tensão de saída  $v_s(t)$  com  $R = 1k\Omega$  e  $C = 160 \text{ nF}$ .

- b) desenhar a corrente  $i(t)$  no circuito para a mesma tensão de entrada  $v_e(t)$  e nas mesmas condições que em a)
- c) calcule e represente a curva de Bode (amplitude e fase) do ganho em tensão  $A = V_s/V_e$ .

#### 4. Estudo de uma célula CR

Considere a montagem da figura A.20.

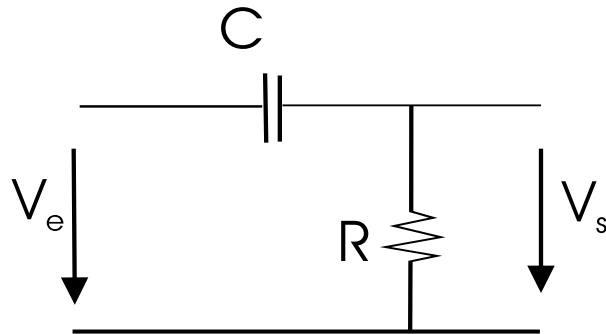


Figura A.20: circuito CR:  $R = 1\text{ k}\Omega$  e  $C = 160\text{ nF}$ .

- a) desenhar a tensão de saída  $v_s(t)$ .
- b) desenhar a corrente  $i(t)$  no circuito para a mesma tensão de entrada  $v_e(t)$  e nas mesmas condições que em a).
- c) calcule e represente a curva de Bode (amplitude e fase) do ganho em tensão  $A = V_s/V_e$ .

#### A.6.2 Trabalho prático

##### 1. Filtro RC ou passa baixo

Realizar a montagem da figura A.19 com  $R=1\text{ k}\Omega$  e  $C=22\text{ nF}$ .

- a) aplicar sucessivamente em  $v_e(t)$  um sinal sinusoidal de frequência  $f = 100\text{ Hz}$ ,  $1000\text{ Hz}$  e  $10\text{ kHz}$ . Para estes três valores da frequência desenhar no mesmo gráfico, sinal de entrada e de saída. Comentar as amplitudes e diferenças de fase relativas entrada-saída.

- b) medir os valores do ganho em tensão  $G = V_s/V_e$  amplitude e fase, em função da frequência para uma variação compreendida entre 100 Hz e 1 MHz (utilizando o método de medida de diferença de fase entre dois sinais mais apropriado, ver trabalho no. 2). Em simultâneo traçar o diagrama de Bode em papel semi-logarítmico, amplitude e fase.
- c) no gráfico de ganho traçado em b) determinar e assinalar a frequência de corte e as assíntotas quando  $f \rightarrow 0$  e  $f \rightarrow \infty$ . Comparar o valor da frequência de corte experimental com o valor teórico calculado a partir dos elementos do circuito. Porque é que este filtro se chama passa baixo ? O que é que caracteriza um filtro de 1ª ordem ?
- d) no gráfico de fase traçado em b) determinar e assinalar a frequência de corte e as assíntotas quando  $f \rightarrow 0$  e  $f \rightarrow \infty$ . Comparar o valor da frequência de corte experimental com o valor teórico calculado a partir dos elementos do circuito. Quais as características de fase de um filtro de 1ª ordem ? Conclusão.

## 1. Filtro CR ou passa alto

Realizar a montagem da figura A.20 com  $R=1\text{ k}\Omega$  e  $C=22\text{ nF}$ . A tensão de saída  $v_s(t)$  é medida aos terminais da resistência.

- a) aplicar sucessivamente em  $v_e(t)$  um sinal sinusoidal de frequência  $f = 100\text{ Hz}$ ,  $1000\text{ Hz}$  e  $10\text{ kHz}$ . Para estes três valores da frequência desenhar no mesmo gráfico, sinal de entrada e de saída. Comentar as amplitudes e diferenças de fase relativas entrada-saída.
- b) medir os valores do ganho em tensão  $G = V_s/V_e$  amplitude e fase, em função da frequência para uma variação compreendida entre 100 Hz e 1 MHz (utilizando o método de medida de diferença de fase entre dois sinais mais apropriado, ver trabalho no. 2). Em simultâneo traçar o diagrama de Bode em papel semi-logarítmico, amplitude e fase.
- c) no gráfico de ganho traçado em b) determinar e assinalar a frequência de corte e as assíntotas quando  $f \rightarrow 0$  e  $f \rightarrow \infty$ . Comparar o valor da frequência de corte experimental com o valor teórico calculado a partir dos elementos do circuito. Porque é que este filtro se chama passa alto ? Trata-se de um filtro de 1ª ordem ? Porquê ?
- d) no gráfico de fase traçado em b) determinar e assinalar a frequência de corte e as assíntotas quando  $f \rightarrow 0$  e  $f \rightarrow \infty$ . Comparar o valor da frequência de corte experimental com o valor teórico calculado a partir dos elementos do circuito. Conclusão.



Docente

Data

---

Docente

Data

---

## A.7 Quadripolos

### A.7.1 Preparação

#### Quadripolo em T

Considere a montagem da figura A.21. Calcular:

- os parâmetros impedância  $\{Z_{ij}\}$
- o conjunto de parâmetros híbridos  $\{h_{ij}\}$
- o ganho em tensão  $A_v$  sem carga.
- colocando uma resistência de carga  $R_L$  à saída deduza o ganho em corrente  $A_i = i_2/i_1$ .

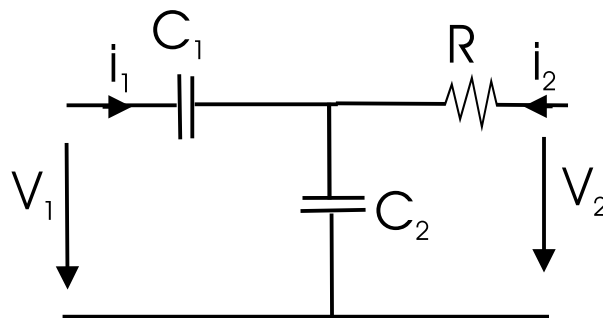


Figura A.21: quadripolo passivo simétrico.

### A.7.2 Trabalho prático

#### 1. Parâmetros impedância

Realizar a montagem da figura A.21 com  $C_1 = C_2 = 220 \text{ nF}$  e  $R = 1 \text{ k}\Omega$ .

- efectuar a medida do conjunto de parâmetros impedância a uma frequência de 1 kHz. Fazer o desenho da montagem de medida para cada caso e explicar o método empregue. Detalhar as dificuldades encontradas. Precisão das medidas. Comparar com os valores teóricos calculados na preparação.
- propôr um método de medida para a curva de fase da impedância de entrada  $Z_e = v_1/i_1$  com  $R_L = 100\Omega$ . Explicar como executar esse método e medir  $Z_e$  para o circuito da figura A.21.

## 2. Parâmetros característicos

- a) medir o ganho em tensão  $A_v = \frac{v_2}{v_1}$  a  $f = 1$  kHz.
- b) com uma resistência de carga de  $100 \Omega$ , medir o módulo do ganho em corrente  $A_i = \frac{i_2}{i_1}$ . Qual deveria ser a evolução da fase de  $A_i$  em função da frequência ? Confirmar medindo um ou dois pontos particulares.

Docente

Data

---

Docente

Data

---

## A.8 Circuitos RC/CR em regime transitório

### A.8.1 Preparação

#### 1. Circuito integrador passivo RC

Considere a montagem da figura A.22.

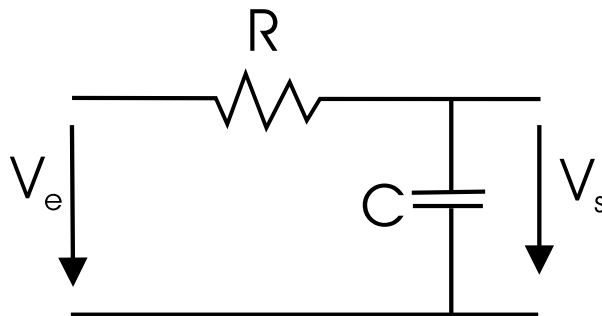


Figura A.22: circuito RC:  $R = 1\text{ k}\Omega$  e  $C = 100\text{ nF}$ .

Aplicamos uma tensão  $V_e$  à entrada do circuito e observa-se uma tensão  $V_s$  à saída.

- calcular a resposta  $V_s$  quando  $V_e$  muda bruscamente de 0 para uma tensão constante  $V_0$ , sabendo que o condensador  $C$  se encontra inicialmente descarregado.
- calcular a equação da recta tangente na origem e determinar a sua intersecção com a recta  $V_s = V_0$ . Desenhar o gráfico da tensão de saída para  $V_0 = 5$  volts.
- a partir de b) determinar para que valores do tempo  $t$  (em relação à constante de tempo  $\tau = RC$ ) o sinal de saída se comporta como o integral do sinal de entrada.

#### 2. Circuito derivador passivo CR

Considere a montagem da figura A.23. Aplicamos uma tensão  $V_e$  à entrada do circuito e observa-se uma tensão  $V_s$  de saída.

- calcular a resposta  $V_s$  quando  $V_e$  muda bruscamente de 0 para uma tensão constante  $V_0$ .
- calcular a equação da tangente na origem e determinar a sua intersecção com a recta  $V_s = 0$ . Desenhar o gráfico da tensão de saída para  $V_0 = 5$  volts.

- c) a partir de b) determinar para que valores do tempo  $t$  (em relação à constante de tempo  $\tau = RC$ ) o sinal de saída se comporta como a derivada do sinal de entrada.

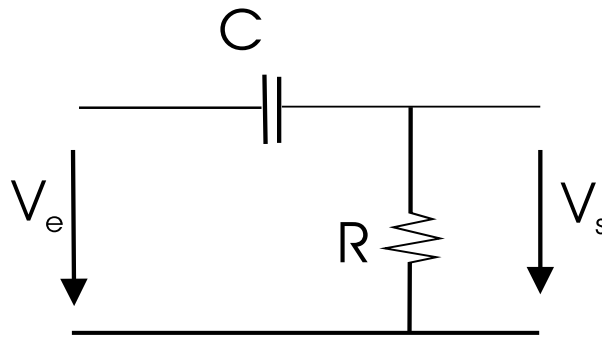


Figura A.23: circuito CR:  $R = 1\text{ k}\Omega$  e  $C = 100\text{ nF}$ .

## A.8.2 Trabalho prático

### NOTAS:

1. define-se o tempo de subida como o tempo que o sinal demora a passar de 10 a 90% do seu valor final. Para realizar a medida de forma precisa no osciloscópio dever-se-á aumentar o sinal de modo a ocupar o ecrã entre os tracejados na parte inferior e superior. O tempo de subida encontra-se medindo o intervalo de tempo entre as intersecções da curva com as linhas contínuas logo acima e logo abaixo das linhas tracejadas no ecrã.
2. o símbolo  $\ll$  em electrónica pode ser interpretado como 10 vezes inferior.

### 1. Circuito RC

Realizar a montagem da figura A.22.

- a) aplicar à entrada uma tensão  $V_e$  quadrada de período 0.4 ms. Desenhar os sinais de saída observados. Medir com o osciloscópio os tempos de subida para valores de  $C = 22, 100$  e  $220\text{ nF}$ .
- b) para  $C = 100\text{ nF}$ , comparar o valor da constante de tempo com o período do sinal e em seguida fazer variar este período. Desenhar e explicar os casos  $RC \ll T/2$ ,  $RC = T/2$  e  $RC \gg T/2$  onde  $RC$  é a constante de tempo dada na preparação. Em que caso o sinal de saída se comporta como o integral do sinal de entrada.



- c) aplicar à entrada uma onda triangular. Observar o sinal de saída no caso em que este se comporta como o integral do sinal de entrada. Explicar.

## 2. Circuito CR

Realizar a montagem da figura A.23.

- a) aplicar à entrada uma tensão  $V_e$  quadrada de período 0.4 ms. Medir com o osciloscópio os tempos de descida do sinal de saída para valores de  $C = 22, 100$  e  $220$  nF.
- b) para  $C = 100$  nF, comparar o valor da constante de tempo com o período do sinal e em seguida fazer variar este período. Desenhar e explicar os casos  $RC \ll T/2$ ,  $RC = T/2$  e  $RC \gg T/2$ . Em que caso o sinal de saída se comporta como a derivada do sinal de entrada.
- c) aplicar à entrada uma onda triangular. Observar o sinal de saída no caso em que este se comporta como a derivada do sinal de entrada. Explicar.

Docente

Data

---

Docente

Data

---

## A.9 Circuito RLC em regime transitório

### A.9.1 Preparação

Considere a montagem da figura A.24. Sabendo que o sinal aplicado em  $v_e(t)$  muda bruscamente de 0 para 5 V e designando por  $R_0$  o valor de  $P + R$  em série, calcule:

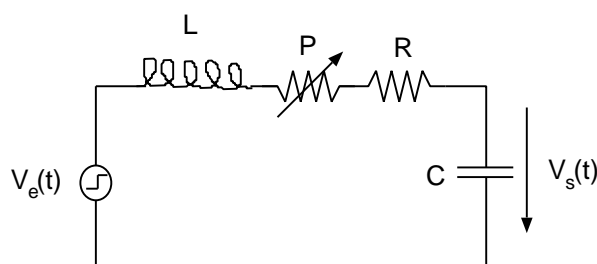


Figura A.24: Circuito RLC série:  $R=1\text{ k}\Omega$ ,  $P$  potenciômetro linear de  $2.2\text{ k}\Omega$ ,  $L=0.1\text{ H}$ ,  $C = 220\text{ nF}$ .

- a) a forma literal da tensão  $v_s(t)$  considerando que o circuito se encontra em repouso no instante inicial.
- b) a forma literal e o valor numérico da resistência crítica  $R_c$  para a qual o regime de funcionamento é exponencial limite antes de se tornar oscilatório.
- c) uma tabela com os quatro regimes de funcionamento possíveis e os valores de amplitudes, durações e pulsações (caso existam) do sinal de saída, tendo em conta os valores numéricos dos elementos da montagem e do sinal  $v_e(t)$ .

### A.9.2 Trabalho Prático

Realize a montagem da figura A.24.

#### 1. Regime sobre amortecido

Neste caso o potenciômetro  $P$  deverá ser colocado no seu valor máximo aumentando assim a resistência no circuito para um valor bem superior à resistência crítica  $R_c$ .

- a) observar e desenhar o sinal de saída  $v_s(t)$ . Medir o tempo de subida.
- b) verificar e comentar o efeito de uma variação da resistência  $R + P$  no tempo de subida. Desenhar e medir o tempo de subida para um caso extremo relativamente à alínea anterior.

## 2. Regime crítico

- a) coloque o potenciômetro  $P$  no valor máximo e retire a resistência  $R$  do circuito. Faça variar a resistência do circuito através do potenciômetro  $P$ , até obter uma resposta  $v_s(t)$  imediatamente antes de se verificar oscilação. Medir o valor de  $P$  e deduzir o valor da resistência crítica. Comparar com o valor encontrado na preparação.
- b) medir o tempo de subida para  $R = R_c$ .

## 3. Regime sub amortecido

Considere para  $R_c$  o valor calculado na preparação

- a) para  $R < R_c/2$ , desenhar o sinal de saída obtido. Medir o tempo de subida, o valor máximo atingido e a pulsação do sinal de saída. Comparar com os valores teóricos calculados na preparação.
- b) fazer variar  $R$  para valores  $R_c/5$  e  $R_c/10$ . Observar e desenhar o sinal de saída. Apresente numa tabela os valores do tempo de subida, valores máximos e pulsações para os valores de resistência considerados.

## 4. Regime não amortecido

Curto-circuitar a resistência  $R$  e diminuir progressivamente o valor do potenciômetro  $P$  até zero. Observar o sinal de saída. Que sinal se deveria obter ? O que é que se obtém e porquê ?

Docente

Data

---

Docente

Data

---