

# ***LABORATORI D'ELECTRÒNICA I DE FÍSICA***

Primer curs del

Grau en Enginyeria de Sistemes Electrònics,  
Grau en Enginyeria de Sistemes Audiovisuals,  
Grau en Enginyeria de Sistemes de Comunicacions,  
Grau en Enginyeria Telemàtica,  
Grau en Ciència i Tecnologies de la Telecomunicació

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de  
Barcelona (ETSETB)

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

2009

L'equip de professors que ha elaborat aquest manual de Laboratori d'Electrònica i Física ha estat:

Lluís Prat Viñas, del Departament d'Enginyeria Electrònica (coordinador)  
Luis Benadero Garcia-Morato, del Departament de Física Aplicada  
Albert Orpella Garcia, del Departament d'Enginyeria Electrònica  
Antoni Turó Peroy, del Departament d'Enginyeria Electrònica  
Cristóbal Voz Sánchez, del Departament d'Enginyeria Electrònica

També han participat en l'elaboració aquest manual els professors:

Rafel Perez Perez, del Departament de Física Aplicada  
Ramon Bragós Bardia, del Departament d'Enginyeria Electrònica

El mestre de laboratori Josep Galman ha tingut una participació activa en el muntatge de la font d'alimentació de la part optativa de la pràctica 11

S'han utilitzat com documents de partida el llibre

“Laboratorio de Electrònica. Curso básico”, de Ll. Prat, J. Calderer, X. Rosell, X. Aragonés, O. Casas, F. Guinjoan, P. Molinàs, E. Navarro, A. Turó, de Edicions UPC, 1998

i el manual de laboratori

Pràctiques Física 1 (2008-2009), de A. Albareda, L. Benadero, J.E. Garcia, V. Gomis, J.A. Gorri, J.M. Juan, R. Perez, E. Toribio. CPET, 2008

que s'utilitzaven per realitzar les pràctiques de les assignatures Física 1 i Laboratori d'Electrònica 1 de primer curs dels estudis d'Enginyeria de Telecomunicació del pla d'estudis 1992.

## **PRÀCTICA 1. INTRODUCCIÓ AL CURS DE LABORATORI**

El curs està concebut de forma autònoma seguint un programa preestablert que serà desenvolupat en sessions de 2 hores per setmana durant 13 setmanes sota la direcció d'un professor que qualificarà el treball de cada estudiant. El curs està dissenyat per donar a l'estudiant les competències experimentals pròpies de les assignatures Fonaments d'Electrònica i Fonaments de Física.

Aquest curs de laboratori té per objectiu iniciar a l'estudiant que acaba de començar els seus estudis de grau a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona (ETSETB) en el treball experimental en un laboratori equipat amb instrumentació electrònica. Aquesta primera etapa formativa serà continuada en els següents semestres del grau amb l'objectiu final de donar a l'estudiant una sòlida formació experimental.

### **1.1.- Organització del curs de laboratori**

Les pràctiques de laboratori seran realitzades de forma conjunta per equips de dos estudiants. Cada equip ocuparà durant tot el curs el mateix lloc de treball al laboratori, realitzarà els estudis previs abans de la pràctica i els lliurarà al professor just al començar la sessió (pot ser una fotocòpia). Cal poder tenir disponible aquest estudi previ doncs moltes sessions de laboratori requereixen consultar resultats realitzats en ell.

Cada equip de treball haurà d'assistir al laboratori amb una caixa d'eines i components, i haurà de poder consultar la pràctica de la sessió corresponent i els manuals dels instruments electrònics.

L'assistència a les pràctiques és obligatòria i en cas d'una absència justificada l'estudiant haurà de recuperar la sessió pràctica pel seu compte. En finalitzar cada sessió de laboratori l'equip de treball lliurarà al professor el full de resultats que figura al final de cada pràctica. En el cas de que alguna pràctica no hagi pogut ser acabada en les dues hores previstes, els estudiants l'hauran d'acabar pel seu compte en hores que no hi hagin pràctiques en el laboratori i lliuraran al professor un full addicional de resultats completat al iniciar-se la següent sessió.

Es realitzaran tres controls durant el curs, un relatiu a les 4 primeres pràctiques, un altre corresponent a les pràctiques de la 5 a la 9, i un tercer de les 4 últimes pràctiques. Els controls seran individuals i es realitzaran durant uns 25 minuts en el mateix laboratori. La nota per aquest concepte serà la mitjana dels 3 controls.

La nota que obtindrà cada estudiant al final del curs de laboratori tindrà tres components:

- a.- Valoració dels estudis previs: 20%
- b.- Treball experimental en el laboratori: 40%
- c.- Nota dels controls: 40%

### **1.2. Contingut del curs**

Les sessions de laboratori que configuren aquest curs són:

- 1.- Introducció del curs de laboratori
- 2.- La font d'alimentació i el multímetre digital
- 3.- Mesures en contínua
- 4.- L'oscil·loscopi i el generador de funcions
- 5.- El díode: model de trams lineals.
- 6.- El díode: model exponencial
- 7.- Circuit RC
- 8.- El transformador, rectificador i filtre de condensador
- 9.- Oscil·lacions esmorteïdes i forçades
- 10.- Ones acústiques

- 11.- El transistor bipolar
- 12.- Realització d'una font d'alimentació
- 13.- Interferències d'ones

Com es pot observar algunes sessions es dediquen al coneixement dels instruments bàsics de laboratori i la seva utilització per fer mesures elèctriques. Altres sessions s'orienten al coneixement de dispositius electrònics bàsics i la seva utilització per realitzar una font d'alimentació regulada. I finalment un tercer conjunt de sessions tenen per objecte l'anàlisi de les oscil·lacions i ones.

### 1.3.- Descripció del lloc de treball

El lloc de treball per fer aquestes pràctiques requereix la instrumentació necessària per la realització i verificació de circuits electrònics de baixa freqüència (fins a 20 MHz) i està constituïda per:

*Font d'alimentació.* Subministra tensió continua ajustable per alimentar els circuits.

*Multímetre digital.* Permet mesurar resistències, tensions i corrents.

*Oscil·loscopi.* Permet visualitzar els senyals elèctrics i mesurar els seus paràmetres.

*Generador de funcions.* Produeix diferents tipus de senyals.

*Ordinador.* Mitjançant un full de càlcul realitzarem representacions gràfiques de les magnituds mesurades i trobarem línies de tendència.

Cada lloc de treball està connectat a la xarxa de subministrament elèctric de 220 Vef, i per motius de seguretat disposa d'un interruptor magnetotèrmic i un altre diferencial (vegeu apèndix).

### 1.4.- Eines i material

El material necessari que ha de dur cada equip per a la realització de les pràctiques és el següent:

- 6 cables unifilars de diversos colors amb connectors tipus banana en ambdós extrems.
- 4 cables coaxials de 50  $\Omega$  amb un connector BNC en un extrem i connectors banana a l'altre.
- 1 cable coaxial amb connectors BNC en ambdós extrems.
- Doble placa de connexions per inserció per al muntatge de circuits.
- 4 pinces tipus cocodril.
- Fil de connexió de 0,3 mm de diversos colors per a la placa de connexions.
- Tornavis petit per fer ajustaments.
- Alicates de punta.
- Pelacables.
- Un soldador de 30-40 W i un rodet d'estany de soldar.

A més a més, l'estudiant haurà d'adquirir els **components electrònics necessaris** per realitzar les pràctiques. Aquest components són els següents:

- Dues col·leccions completes de resistències de  $\frac{1}{4}$  W de potència i 5% de tolerància des de 10  $\Omega$  fins a 1 M  $\Omega$ .
- Resistències de  $\frac{1}{2}$  W de potència i 5% de tolerància: 2  $\Omega$  , 560  $\Omega$ .
- Resistències de 6W de potència: 56  $\Omega$  , 27  $\Omega$ .
- Resistències variables tipus PT15V: 470  $\Omega$  , 1 k  $\Omega$  , 1 M  $\Omega$ .
- Condensadors electrolítics tipus radial de 25V: 2200  $\mu$ F, 470  $\mu$ F, 10  $\mu$ F, 1  $\mu$ F.
- Condensadors ceràmics multicapa: 1  $\mu$ F, 10 nF, 3,3 nF.
- Bobina: 1 mH.
- Díodes: 5 de 1N4007, 1N4148.
- Zeners: 8,2V/400mW, BZX79.

- LEDs: de 3 mm de colors vermell, verd i groc.
- Transistors bipolars: 2 de BC547, BD139.
- Amplificador Operacional LM358.
- Micròfon CME-7.
- Portafusible + fusible de 500 mA .
- Dissipador de 10<sup>0</sup>/W+ cargol mètric 3 de 8 mm de longitud i la femella corresponent.
- 1 placa de 6,4cmx6,4cm de circuit imprès de "topos", de fibra de vidre, amb els "topos" units en pistes longitudinals .

Material per a la **part optativa** de la font d'alimentació (pràctica 12):

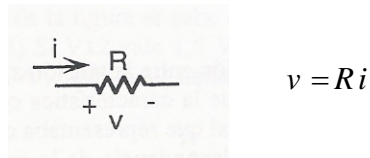
- Transformador 220Vef/12Vef, 500mA.
- Una capsa de 10cm x 8,3cm x 3cm.
- Terminal de connexió d'entrada per connectar el jack del transformador.
- Terminal de connexió de la sortida de 7,5 V: Jack mono de 3,5 mm i la base corresponent.
- Terminal de connexió de la sortida de 5 V: Jack mono de 2,5 mm i la base corresponent.
- Suport del LED: "mirilla" per LED de 3 mm.
- Circuit integrat LM7805.

### 1.5.- El circuit elèctric

Un circuit elèctric o electrònic és la interconnexió de dos o més components mitjançant conductors. Un component és un ens físic que presenta una determinada relació entre les tensions que s'apliquen als seus terminals i els corrents que circulen per ells; es modela matemàticament mitjançant un element circuital. Per analitzar un circuit cal conèixer les tensions que hi ha en cada un dels seus punts i els corrents que circulen pels conductors.

### 1.6.- Les resistències o resistors

La resistència ideal és un element circuital que té la propietat de presentar una relació constant entre el corrent que el travessa ( $i$ ) i la caiguda de tensió entre els seus terminals ( $v$ ). Aquesta relació ve donada per la llei d'Ohm:



$$v = R i$$

Figura 1.1. Resistència i llei d'Ohm.

Noteu que aquesta relació ens indica que en una resistència de valor zero la caiguda de tensió és nul·la per a qualsevol corrent que hi circuli. En aquest cas la resistència equival a un curtcircuit. A l'altre extrem, quan la resistència és molt gran, hi circula un corrent molt petit  $i$ , en el límit, si la resistència és infinita el corrent que hi circula és zero. Per això es diu que una resistència de valor infinit equival a un circuit obert.

La resistència real o resistor és un component electrònic que aproxima aquesta relació. Les característiques tècniques més importants són:

**Resistència nominal.** És el valor (en unitats d'Ohm) marcat sobre el cos del component.

**Tolerància.** El valor real del component discrepa del nominal. La tolerància és una mesura de la desviació màxima possible i s'expressa com a percentatge del valor nominal. Així, una resistència de valor nominal d'1 k $\Omega$  (es a dir, 1000  $\Omega$ ), i tolerància del 20% pot tenir un valor entre 800  $\Omega$  (1000 - 0,2·1000) i 1200  $\Omega$  (1000 + 0,2·1000). Valors típics de toleràncies en resistències comercials són 10%, 5% i 2%.

El valor nominal d'una resistència i la seva tolerància s'indiquen mitjançant un codi de quatre anells de colors pintats sobre el cos del component, tal com es pot veure a la figura 1.2. El valor

nominal de la resistència vé donat pels valors del tres primers anells, mentre que la tolerància la proporciona el quart anell.

$$R = AB \cdot 10^C$$

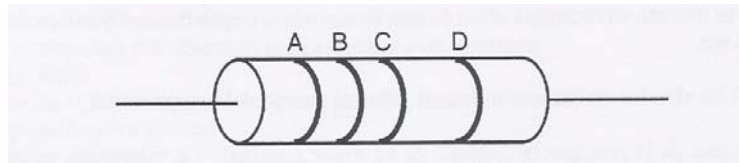


Figura 1.2. Anells de color marcats sobre la resistència per codificar el seu valor

El codi de colors per al valor nominal és:

Negre: 0	Marró: 1	Vermell: 2	Taronja: 3	Groc: 4	Verd: 5
Blau: 6	Violeta: 7	Gris: 8	Blanc: 9	Or: -1	Plata: -2

El codi de colors per a la tolerància és:

Sense color: 20%	Plata: 10%	Or: 5%	Vermell: 2%	Marró: 1%
------------------	------------	--------	-------------	-----------

Depenent de la tolerància es comercialitzen una sèrie de valors normalitzats de resistències:

Tolerància 10%: 10-12-15-18-22-27-33-39-47-56-68-82

Tolerància 5%: 10-11-12-13-15-16-18-20-22-24-27-30-33-36-39-43-47-51-56-62-68-75-82-91

Aquests valors es repeteixen cada dècada, des de 1  $\Omega$  fins a 1 M $\Omega$ . Els dissenys electrònics han de ser realitzats utilitzant valors normalitzats.

Una altra característica tècnica d'una resistència comercial és la seva *potència nominal*. És la potència màxima que pot dissipar a temperatura ambient. La llei de Joule estableix que una resistència per la que circula un corrent ( $i$ ) dissipa una potència en forma de calor:

$$P_D = Ri^2$$

Valors típics de potències nominals per a resistències de circuits de senyal són 1/8 W, 1/4 W i 1/2 W. La potència nominal d'una resistència vé donada per la seva mida, les de menor potencia són més petites, augmentant el seu tamany a mesura que augmenta la potència nominal.

### 1.7.- El full de càlcul

Un full de càlcul és un programa informàtic que permet manipular dades numèriques i alfanumèriques disposades en forma de taula, i fer càlculs complexes amb fórmules i funcions i dibuixar diversos tipus de gràfiques. Un exemple és el programa "Excel" de Microsoft i un altre és el "Calc" de OpenOffice.

En aquest curs de laboratori s'utilitzarà amb freqüència un full de càlcul mitjançant el programa "Excel" de Microsoft per tractar les dades obtingudes de les mesures experimentals, fer representacions gràfiques i fer-ne aproximacions amb diferents funcions. Per aquest motiu l'estudiant ha de tenir disponible en el seu ordinador personal un full de càlcul.

### 1.8.- Mesura de resistències

El multímetre és un instrument de laboratori que permet mesurar tensions, corrents i resistències. Quan seleccionem en el multímetre la funció per mesurar resistències es diu que actua com a òhmetre. A la figura 1.3 es presenta el panell frontal d'un multímetre genèric. Com es pot veure en aquesta figura, el resultat de la mesura es presenta en una pantalla en la que apareixen una sèrie de dígitos. Per això es diu que es tracta d'un multímetre *digital*. Les característiques específiques del multímetre del vostre lloc de treball les trobareu a ATENEA en

el fitxer "Manual d'instruments". Heu de buscar el corresponent a la marca del multímetre del vostre lloc de treball.

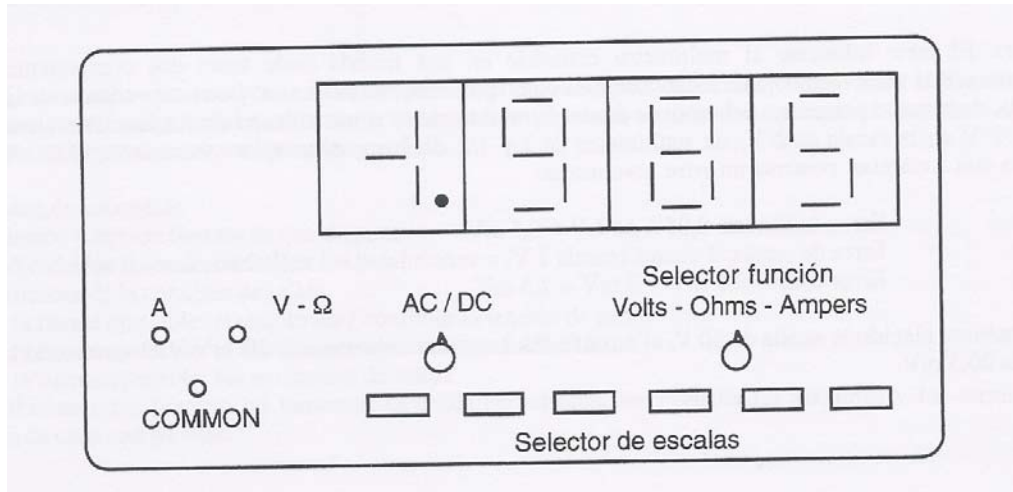


Figura 1.3.- Panell de control d'un multímetre digital.

Per mesurar resistències amb aquest instrument cal seleccionar en primer lloc la funció "òhmetre" amb el botó de control corresponent. També cal seleccionar una escala de mesura i connectar un cable en els endolls " $\Omega$ " (el terminal vermell) i "Common" (el terminal negre). Si toqueu a l'altre extrem del cable el terminal vermell i el negre es diu que fem un curtcircuit, la qual cosa equival a "connectar" entre aquests terminals una resistència de valor zero. A la pantalla hauríeu de llegir, al fer el curtcircuit, un valor de zero ohms.

Per mesurar una resistència només cal connectar-la entre el terminal vermell i el negre i llegir el seu valor a la pantalla. Per fer-ho correctament cal triar l'escala de l'òhmetre que doni més xifres decimals.

## **PART EXPERIMENTAL**

Per a la realització d'aquesta primera sessió, donat que encara no disposem del material per fer les pràctiques, el laboratori us deixarà un cable amb pinces en els seus terminals per connectar a l'òhmetre i poder mesurar resistències, i tres resistències: una de  $100 \Omega$ , una de  $5,1 \text{ k}\Omega$  i una de  $1 \text{ M}\Omega$ .

### 0.- CONSTITUCIÓ DELS EQUIPS DE TREBALL

Els estudiants s'agrupen en equips de dos per a realitzar les pràctiques d'aquest curs. Aquests equips seran els mateixos durant tot el curs. Cada equip haurà d'adquirir almenys una caixa d'eines i els components descrits a l'apartat 1.4, i l'haurà de portar al laboratori a partir de la pròxima sessió.

### 1.- REPRESENTACIÓ GRÀFICA AMB EL FULL DE CÀLCUL

Obriu el full de càlcul i feu una taula amb els següents valors. Cadascun dels següents punts és una fila. La columna A és el primer paràmetre de cada punt i la columna B el segon. Cal tenir en compte que en el full excel cal utilitzar "," pels decimals:  
(0; 1); (1; 2,72); (3; 20,1); (4; 54,6); (5; 148,4).

Seleccioneu les xifres numèriques de les columnes A i B i cliqueu en el menú superior la representació gràfica (un histograma amb columnes de colors). Apareixerà un menú en el que cal triar "XY (Dispersión)" amb només representació de punts. Al clicar a "següent" apareixerà una gràfica amb els punts de la taula. Al tornar a clicar en "següent" apareix un quadre de diàleg

que permet posar nom a la representació gràfica i als eixos. Poseu "Gràfica 1", "Volts" a l'eix X i "Miliampers" al eix Y. Al finalitzar aquest diàleg apareixen els punts de la taula en una gràfica.

Cal situar el cursor sobre un punt de la gràfica i clicar al botó de la dreta del ratolí. Trieu "Agregar línea de tendencia" i seleccioneu la línia "exponencial". Apareixeran els punts units amb una línia de tipus exponencial. Si poseu el cursor sobre la línia i cliqueu el botó dret del ratolí i seleccioneu "Opciones" podreu seleccionar que presenti l'equació de la línia de tendència en el gràfic. Feu-ho. Veureu que aproximadament els punts de la taula corresponen a la funció  $y = \exp(x)$ . Ho podeu comprovar amb una calculadora.

*Qüestió 1. Escriviu l'equació de la línia de tendència que us proporciona el full de càlcul*

Genereu una nova columna C a la taula, de forma que  $C = \log(B)$ . Per fer-ho, situeu-vos a la cel·la C2 (es a dir, columna C, fila 2). Escriviu: " $=\log(B2)$ " i polseu la tecla "intro". Us apareixerà a la taula el valor numèric "0" que correspon a  $\log(1)$ . A continuació torneu-vos a situar en la cel·la C2 i seleccioneu "copiar". Fet això, seleccioneu amb el ratolí les cel·les C2, C3, C4, C5 i C6, i una vegada seleccionades polseu "intro". Us apareixeran valors numèrics a les diferents cel·les, que corresponen als logaritmes de les xifres de la columna B.

Seleccioneu les xifres de les columnes A i C i representeu gràficament els valors, fent-ho com abans. Per seleccionar les xifres de les dues columnes, seleccioneu primer la columna A, i mantenint polsada la tecla "control", seleccioneu a continuació les xifres de la columna C. Seleccioneu després una línia de tendència tipus lineal i escriviu la seva equació.

*Qüestió 2. Escriviu l'equació de la recta obtinguda i relacioneu els seus paràmetres amb l'equació de la corba anterior.*

## 2.- MESURA DE RESISTÈNCIES AMB L'ÒHMETRE

Engegeu el multímetre. Seleccioneu la funció òhmetre i l'escala més petita. Endol·leu els cables per mesurar les resistències. Curtcircuitueu els terminals dels cables i verifiqueu que la resistència és zero en aquestes condicions.

Llegint el codi de colors de les resistències que us han proporcionat, trieu la de  $5,1 \text{ k}\Omega$ . Mesureu el seu valor amb l'òhmetre fent servir l'escala més adequada. Verifiqueu que el valor mesurat està dintre del marge de tolerància de la resistència.

Repetiu les mesures per les resistències de  $100 \Omega$  i de  $1 \text{ M}\Omega$ .

*Qüestió 3. Escriviu els valors nominals de les tres resistències, els valors mesurats amb l'òhmetre i la desviació percentual entre el valor mesurat i el teòric.*



## **FULL DE RESULTATS. Pràctica 1**

*Nom dels components de l'equip:*

*Lloc de treball:*

### **Representació gràfica amb el full de càlcul**

*Qüestió 1. Escriviu l'equació de la línia de tendència que us proporciona el full de càlcul.*

*Qüestió 2. Escriviu l'equació de la recta obtinguda i relacioneu els seus paràmetres amb l'equació de la corba anterior.*

### **Mesura de resistències**

*Qüestió 3. Escriviu els valors nominals de les tres resistències, els valors mesurats amb l'òhmetre i la desviació percentual entre el valor mesurat i el teòric.*

## Apèndix. El subministrament d'energia elèctrica

Cada lloc de treball està connectat a la xarxa de distribució d'energia elèctrica de 220 Vef per alimentar els equips electrònics. A la figura A.1 es representa l'esquema de distribució de l'energia elèctrica. L'energia elèctrica proporcionada pel generador (central hidroelèctrica, termoeelèctrica, nuclear, etc.) es transporta en forma trifàsica i en alta tensió (un valor habitual és de 220.000 Vef) per a que els corrents que circulin pels conductor siguin petits i evitar així les pèrdues per efecte Joule. En el sistema trifàsic, cada conductor (fase) transporta una tensió sinusoidal desfasada 120 graus respecte als altres conductors. Aquest sistema evita la necessitat de conductors de retorn del corrent que transporta cadascuna de les fases. En efecte, suposant que els corrents que circulen per cada conductor tinguin la mateixa amplitud i estiguin desfasades 120 graus entre sí, i que tots els corrents retornaran pel mateix conductor, el corrent resultant seria nul, ja que la suma de les tres sinusoides s'anul·laria en tot instant.

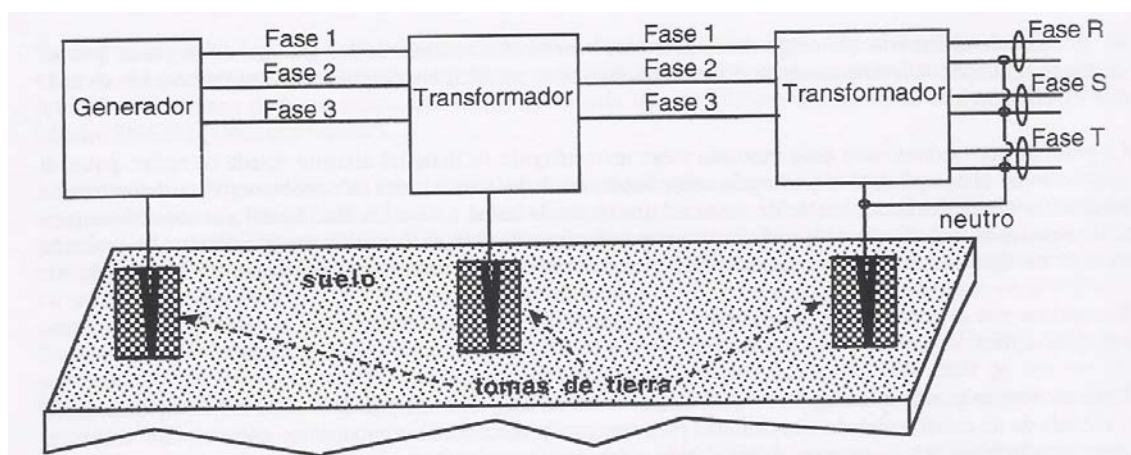


Figura A.1. Esquema de distribució de l'energia elèctrica.

El sistema de subministrament elèctric sol disposar de diverses estacions transformadores que transformen l'alta tensió inicial en amplituds menors (un valor intermedi típic és de 25.000 Vef). Finalment, un altre centre de transformació passa aquest valor entremig a una valor més baix, que per utilitzacions residencials sol ser 220 Vef. Aquestes estacions transformadores disposen d'un terminal "neutre" que està connectat físicament a terra a través d'una piqueta o d'un enreixat metàl·lic enterrat.

Els endolls de connexió a la xarxa elèctrica tenen tres contactes metàl·lics que corresponen al conductor de fase, al neutre i al terra (vegeu figura A.2). La fase i el neutre són els conductors necessaris per a l'alimentació del equip, mentre que el contacte de terra està constituït per dues llengüetes laterals de l'endoll. Al connectar les parts metàl·liques accessibles dels equips al conductor de terra de l'endoll es protegeix a l'usuari de possibles descàrregues elèctriques. Aquestes descàrregues podrien succeir si aquestes parts metàl·liques fessin contacte accidentalment amb els conductors de fase o neutre.

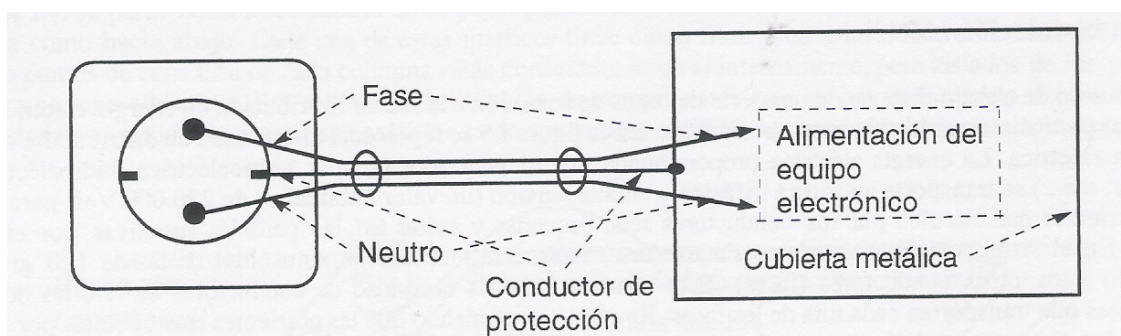


Figura A.2. Connexió d'un equip a la xarxa de distribució d'energia.

La normativa vigent estableix l'estructura i característiques de la instal·lació de posada a terra d'edificis. Com es pot observar a la figura A.3 hi ha una posada a terra a l'entrada de l'edifici, a la que es connecta la línia principal de terra. Les parts metàl·liques accessibles dels equips es connecten a aquesta línia a través de línies de derivació. En condicions normals de funcionament no circula corrent per aquestes línies de terra.

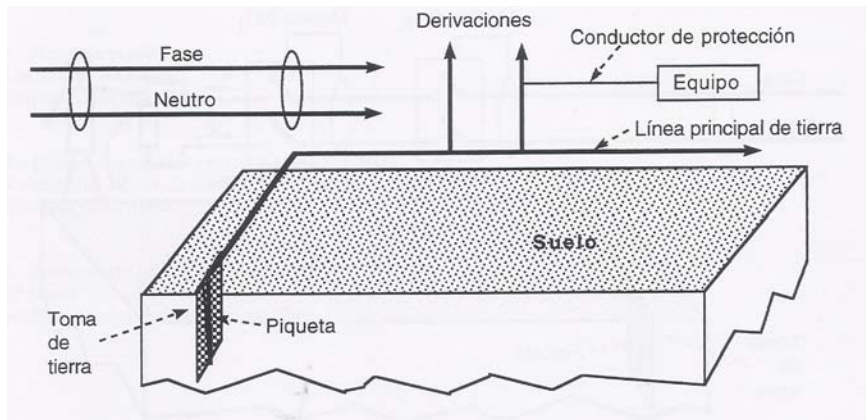


Figura A.3. Estructura de la instal·lació de la posada a terra d'un edifici.

Per altra banda, la normativa legal estableix l'obligació d'instal·lar dispositius de tall del corrent elèctric per evitar els danys que provocaria la connexió d'equips defectuosos que provoquin curtcircuits o fugues de corrent a terra. Hi ha dos tipus de dispositius per portar a terme aquesta desconexió: l'interruptor magnetotèrmic i l'interruptor diferencial. El primer és un dispositiu que disposa d'un interruptor per a la fase i d'un altre per al neutre, els quals s'obren quan el corrent que circula per ells supera un determinat valor (vegeu figura A.4,  $I_L = I_1 = I_2$ ). S'especifiquen pel seu corrent màxim (habitualment entre 1 i 100 A) i la seva velocitat de resposta.

L'interruptor diferencial mesura la diferència de corrent que circula pel conductor de fase i pel neutre ( $I_F = I_1 - I_2$ ). Quan aquesta diferència supera un determinat valor,  $I_{Fmax}$ , s'obre l'interruptor. La seva funció és protegir a les persones limitant el corrent  $I_F$  que circularia a través del seu cos cap a terra. L'especificació més important dels diferencials és el seu corrent de disparament, típicament de 30 mA.

Si per algun motiu desconegut s'apaguen els instruments del lloc de treball cal comprovar el magnetotèrmic i el diferencial. No s'han de tornar a connectar fins esbrinar la raó per la qual s'han activat, i una vegada arreglat el problema, tornar-los a connectar.

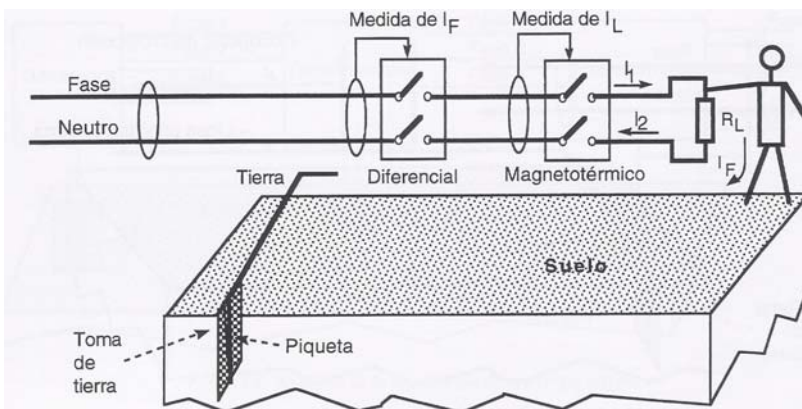


Figura A.4.- Interruptors de tall automàtic d'una instal·lació elèctrica: l'interruptor magnetotèrmic i l'interruptor diferencial.

## PRÀCTICA 2. LA FONT D'ALIMENTACIÓ I EL MULTÍMETRE DIGITAL

La font d'alimentació és un instrument electrònic que té com a principal funció proporcionar energia elèctrica en forma de corrent continu a diversos circuits electrònics tal com amplificadors, circuits lògics, sensors, etc. El multímetre digital serveix per mesurar resistències, tensions, corrents, tan continus com alterns, presentant el resultat de la mesura en forma numèrica.

### 2.1. La font d'alimentació

La font d'alimentació serveix per alimentar els circuits electrònics i, per tant, ha de subministrar la tensió i el corrent (o intensitat elèctric) adients per a que aquests circuits funcionin correctament. Com que la tensió d'alimentació dels circuits pot ser diferent, les fonts d'alimentació habitualment disposen de vàries sortides amb diferents tensions i corrents. Les sortides poden ser ajustables dins d'uns determinats marges, tant en la tensió elèctrica que subministren com en el corrent màxim que poden subministrar, o bé poden ser fixes, amb una tensió elèctrica fixa i un corrent màxim que no es pot variar. Les sortides fixes acostumen a ser amb els valors de les tensions d'alimentació més utilitzades en circuits electrònics (5 V i 15 V). A més, en alguns casos aquestes sortides inclouen un altre terminal amb la mateixa tensió amb polaritat negativa (sortides simètriques  $\pm 5$  V o  $\pm 15$  V).



Figura 2.1. Fonts d'alimentació de laboratori.

*Exercici 1.- Consultant el manual de la font d'alimentació del teu lloc de treball (model **PROMAX FA-363B** en el laboratori C4-S102B i model **BLAUSONIC EP-613A** en el laboratori A1-S101) identifica de quantes sortides ajustables i de quantes sortides fixes disposa la font.*

#### 2.1.1. Característica tensió-corrent I (V) de les sortides de la font d'alimentació

Les sortides d'una font d'alimentació poden aproximar-se en primera instància pel comportament d'una font de tensió contínua ideal. Una font de tensió contínua ideal proporciona una tensió constant en el temps, independent del circuit que se li connecti. La figura 2.2a representa la característica corrent-tensió d'una font de tensió contínua ideal. El seu circuit equivalent és una font de tensió contínua ideal.

Les fonts d'alimentació presenten una limitació de la intensitat màxima que poden proporcionar. Per tant, encara que el circuit que es connecti a la sortida de la font consumeixi més que aquesta intensitat màxima (és a dir, la resistència equivalent d'entrada del circuit o càrrega connectada és menor al quocient entre la tensió de sortida i el corrent màxim), la font només subministra aquesta quantitat. Aleshores el comportament de la font d'alimentació pot aproximar-se pel d'una font de corrent continu ideal. Una font de corrent continu ideal proporciona un corrent constant que no varia encara que ho faci la tensió entre els terminals de la font, tal com es representa en la figura 2.1b.

La figura 2.1c representa la característica I (V) d'una font d'alimentació amb limitació de corrent que inclou els dos comportaments anteriors. Observeu que quan el corrent és inferior al valor

límit  $I_{LIMIT}$  la font es comporta com una font de tensió  $V_o$ , mentre que quan el corrent que lliura la font arriba al valor  $I_{LIMIT}$  la font es comporta com una font de corrent.

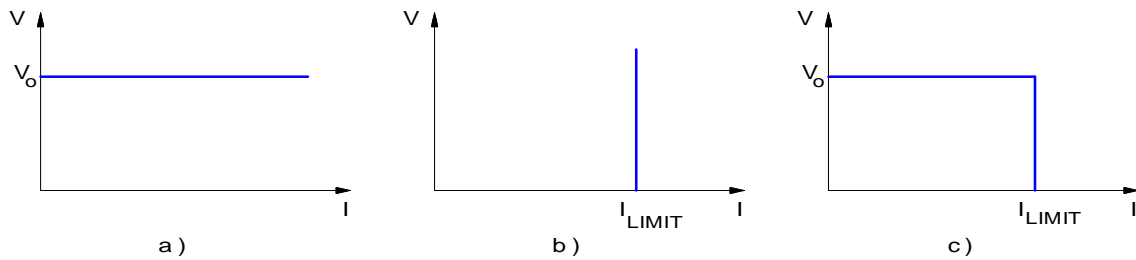


Figura 2.2. a) Font de tensió ideal. b) Font de corrent ideal. c) Font d'alimentació ideal amb limitació de corrent.

El valor de la resistència connectada als terminals de sortida que estableix el límit entre els dos modes de funcionament s'anomena *resistència crítica*  $R_c$  i ve donada per:

$$R_c = \frac{V_o}{I_{LIMIT}}$$

La figura 2.3a representa el circuit equivalent d'una font d'alimentació real quan treballa com a font de tensió (resistència equivalent de la càrrega connectada superior a  $R_c$ ). Quan la font opera en mode de limitació de corrent (resistència equivalent de la càrrega connectada inferior a  $R_c$ ), el circuit equivalent és el de la figura 2.3b.



Figura 2.3. a) Circuit equivalent d'una font d'alimentació treballant en mode de font de tensió. b) Circuit equivalent quan treballa en mode de limitació de corrent.

En les sortides ajustables de les fonts d'alimentació, els valors de  $V_o$  i  $I_{LIMIT}$  poden modificar-se amb uns controls del panell frontal.

*Exercici 2.- Calculeu la resistència de càrrega crítica  $R_c$  de la sortida d'una font d'alimentació sabent que proporciona 12 V i que pot lliurar fins un corrent  $I_{LIMIT}$  de 1 A.*

### 2.1.2. Terminals i controls de les sortides

El panell de control d'una font d'alimentació típica amb una sortida ajustable es representa en la figura 2.4. Sol incloure un indicador de la tensió en els terminals de sortida de la font i un indicador del corrent que subministra la font. La tensió de sortida de la font és accessible entre els dos terminals indicats amb "+" i "-". Sol existir un tercer terminal indicat amb el signe de "terra" referit al terra de la xarxa de subministrament d'energia elèctrica. Aquesta darrer terminal només es fa servir en casos excepcionals que no es produiran en aquest curs. La tensió de sortida de la font es pot variar fent girar un comandament que normalment s'anomena "VOLTAGE". El corrent límit  $I_{LIMIT}$  es pot ajustar fent girar el comandament indicat amb "INT. LIMIT" o bé "CURRENT". Per fer-ho, cal fer un curtcircuit entre els terminals "+" i "-" de la font i en aquesta situació ajustar  $I_{LIMIT}$  fent girar el comandament.

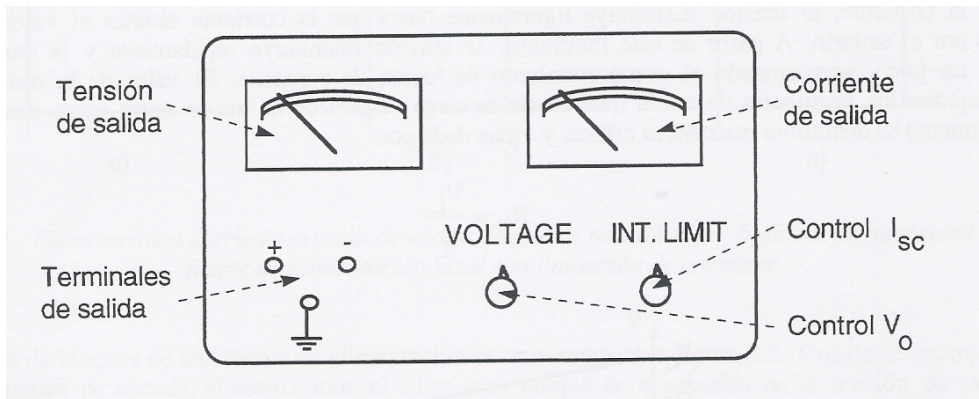


Figura 2.4. Panell de control d'una font d'alimentació típica amb una sortida ajustable.

Quan la sortida de la font és fixa, només s'inclouen els terminals de sortida sense cap indicador ni comandament d'ajust. I si la sortida és simètrica s'inclouen tres terminals : "0", "+" per a la tensió positiva respecte a "0" i "-" per a la sortida negativa respecte a "0".

### 2.1.3. Paràmetres més importants de la font d'alimentació

Per a cadascuna de les seves sortides, les especificacions d'una font d'alimentació solen ser:

- *Tensió o marge de la tensió de sortida*: Tensió que dona la font si la sortida és fixa, o bé, interval de valors de tensió si la sortida és ajustable.
- *Marge del corrent de sortida*: Interval de valors del corrent que pot proporcionar la font.
- *Factor d'arissat*: és una indicació de l'arissat (amplitud de la fluctuació de la tensió de sortida).
- *Factor de regulació de càrrega*: es una indicació de la capacitat de la font de mantenir constant la tensió de sortida encara que variï el corrent que lliura la font.

*Exercici 3.- Consultant el manual de la font d'alimentació del teu lloc de treball (model PROMAX FA-363B en el laboratori C4-S102B i model BLAUSONIC FA-325 en el laboratori A1-S101) especifica:*

- La tensió o marge de tensions de cadascuna de les sortides de la font.*
- Marge de corrent que pot lliurar cadascuna de les sortides de la font.*

## 2.2. El multímetre digital

El multímetre digital és un instrument utilitzat per mesurar tensions, corrents i resistències, amb una presentació numèrica dels valors mesurats en una pantalla. La presentació numèrica de la mesura exigeix un tractament digital de la informació, per la qual cosa s'anomenen digitals. Aquest tipus de presentació del resultat de la mesura disminueix els errors visuals que solen produir-se al llegir la posició d'una agulla en una escala graduada com passa en els equips analògics, si bé això no implica que els digitals siguin més exactes que els analògics.



Figura 2.5. Multímetres digitals.

### 2.2.1. Panell de control del multímetre digital

Els elements més importants del panell de control d'un multímetre digital es mostren en la figura 2.6. El panell habitualment inclou:

- La pantalla de presentació de la mesura.
- Els terminals d'entrada "A", "V- $\Omega$ " i "COM" (o "Common") que s'utilitzen segons la mesura que es desitja realitzar.
- Un selector d'escala o marge de mesura.
- Un selector de la funció de mesura "VOLTS", " $\Omega$ " i "A" per seleccionar la magnitud que es desitja mesurar, tensió, resistència o corrent, respectivament.
- El selector del mode d'acoblament "DC" o "AC" segons es vulgui fer una mesura de tensió o corrent continu, o bé, una tensió o un corrent altern.

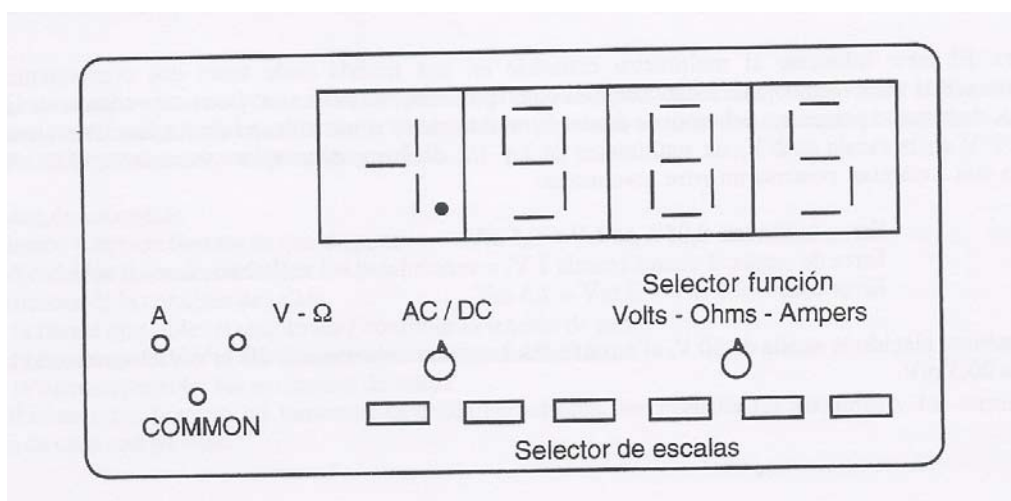


Figura 2.6. Exemple de panell de control d'un multímetre digital.

### 2.2.2. Pantalla de presentació i selector d'escala

La unitat de presentació és l'encarregada de mostrar el resultat de la mesura en forma numèrica. La presentació del valor numèric la realitza un conjunt d'elements anomenats dígit, cadascun dels quals pot presentar una xifra entre el 0 i el 9. A vegades, l'element de l'extrem esquerre pot representar solament un 0 o un 1. En aquest cas, aquest element rep el nom de mig dígit. La figura 2.7 mostra una pantalla numèrica de 3 i 1/2 dígit, que pot presentar una xifra decimal entre 0000 i 1999, tant en signe positiu com negatiu. Quan la mesura és de valor més gran del que es pot presentar en una escala determinada es produeix una sobrecàrrega que sol indicar-se bé sigui per un parpelleig dels dígit, o bé, per un 1 en el 1/2 dígit i la resta de dígit apagats.

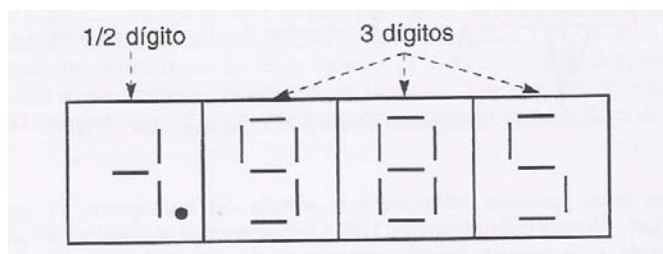


Figura 2.7. Visualitzador numèric d'un multímetre digital de 3 i 1/2 dígitos.

El selector d'escala permet ajustar el multímetre al valor de la magnitud que es vol mesurar per evitar la sobrecàrrega. L'escala seleccionada fixa la sensibilitat o resolució en la mesura, és a

dir, la mínima quantitat que es pot presentar en la pantalla. Cal notar que per aconseguir una millor mesura s'ha d'utilitzar l'escala més petita sense que es produeixi sobrecàrrega.

### 2.2.3. Utilització del multímetre digital com a voltímetre

Per mesurar la tensió entre dos nodes d'un circuit, el selector de la funció de mesura ha d'estar en la posició "VOLTS" i els dos nodes del circuit han d'estar connectats mitjançant un cable al terminal "V- $\Omega$ " i al terminal comú "COM".

La figura 2.8a mostra com es connecta el multímetre per mesurar la tensió entre els nodes A i C del circuit. Noteu que cal que el multímetre presenti una resistència d'entrada molt alta, idealment infinita, per evitar que absorbeixi corrent del circuit. Si la resistència d'entrada del multímetre no és molt alta es produeix un error d'intrusisme, que és l'error produït en la mesura degut a la modificació del circuit que es vol mesurar al connectar un instrument de mesura. En la pràctica, la resistència equivalent d'entrada del multímetre funcionant com a voltímetre no és infinita i està especificada pel fabricant de l'instrument.

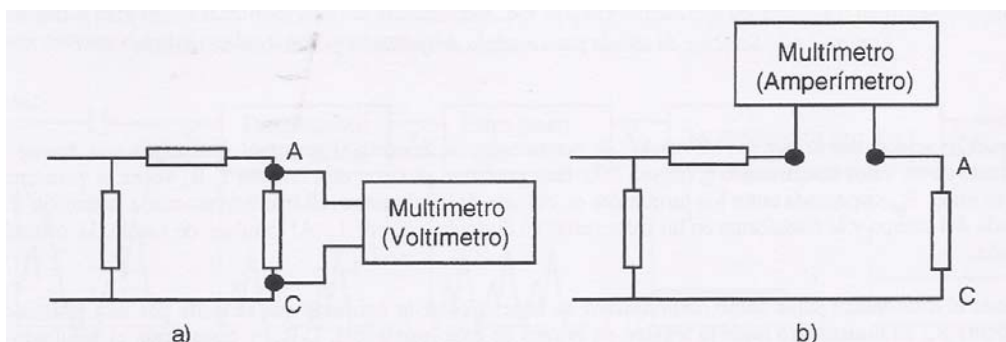


Figura 2.8. Connexió del multímetre al circuit per mesurar: a) la tensió entre A i C, i b) el corrent que circula entre A i C.

*Exercici 4.- Consultant el manual del multímetre digital del teu lloc de treball (model **TEKTRONIX CDM-250** en el laboratori C4-S102B i model **PROMAX MD-100C** en el laboratori A1-S101) especifica quines són les diferents escales de mesura de tensió i la resolució en cada escala.*

*Exercici 5.- Consultant el manual del multímetre digital del teu lloc de treball especifica quina és la resistència d'entrada del multímetre quan mesura tensió.*

### 2.2.4. Utilització del multímetre digital com a amperímetre

El corrent que circula per una malla es pot mesurar seleccionant la funció "A" en el selector de la funció de mesura i utilitzant el terminal "A" (alguns multímetres marquen aquest terminal amb "mA" o algun altre múltiple d'ampers) i el terminal comú "COM".

La figura 2.8b mostra la connexió del multímetre per mesurar el corrent que circula en la malla. Noteu que s'ha d'obrir la malla per fer circular el corrent que es vol mesurar per l'interior del multímetre. En aquest cas, el multímetre ha de presentar una resistència d'entrada molt baixa, idealment zero, per evitar que la seva connexió s'afegeixi com una nova resistència al circuit i generi un error d'intrusisme. En la pràctica, quan el multímetre funciona com a amperímetre, la seva resistència equivalent d'entrada no és nul·la, sinó que depèn de l'escala seleccionada i pot variar entre unes dècimes d'ohms i unes desenes d'ohms.

*Exercici 6.- Consultant el manual del multímetre digital del teu lloc de treball especifica quines són les diferents escales de mesura de corrent i la resolució en cada escala.*



## 2.2.5. Mesures en alterna amb el multímetre digital

El multímetre digital permet realitzar mesures de tensions i de corrents tant continus com alterns. Si els senyals a mesurar no varien en el temps (contínua) cal fer la mesura en mode "DC". Si el senyal és altern (per exemple, un senyal sinusoidal) cal seleccionar el mode "AC". En aquest darrer cas, la pantalla proporciona el valor eficaç del senyal sinusoidal mesurat. El valor eficaç d'una tensió arbitrària es defineix mitjançant la següent expressió:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) \cdot dt}$$

Quan una tensió  $v(t)$  és una sinusoide, el seu valor eficaç és:

$$v(t) = A \sin \omega t \quad \Rightarrow \quad V_{ef} = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

En canvi, si la forma d'ona no és una sinusoide (per exemple un senyal triangular o un senyal quadrat) la relació entre l'amplitud del senyal i el seu valor eficaç es diferent.

Els multímetres de gama alta mesuren directament el valor eficaç dels senyals (multímetres de valor eficaç real) però els multímetres més comuns basen la seva mesura en una sèrie de càlculs matemàtics pel cas d'un senyal sinusoidal. Per tant, la lectura és correcta només en el cas de que s'estigui mesurant una tensió o corrent sinusoidal. En canvi, si la forma d'ona del senyal no és sinusoidal, els valors de la mesura presentats a la pantalla són incorrectes. En aquest cas, per obtenir el valor eficaç correcte del senyal caldria aplicar un factor de correcció a la lectura de la pantalla.

*Exercici 7.- Quina és l'amplitud d'una tensió alterna sinusoidal amb un valor eficaç de 220 V<sub>ef</sub>?*

## 2.2.6. Utilització del multímetre digital com a òhmmetre

Per mesurar resistències amb el multímetre cal seleccionar en primer lloc la funció " $\Omega$ " amb el selector de la funció de mesura. La resistència que es vulgui mesurar s'ha de connectar, ja sigui directament o mitjançant algun cable, als terminals "V/ $\Omega$ " i "COM".

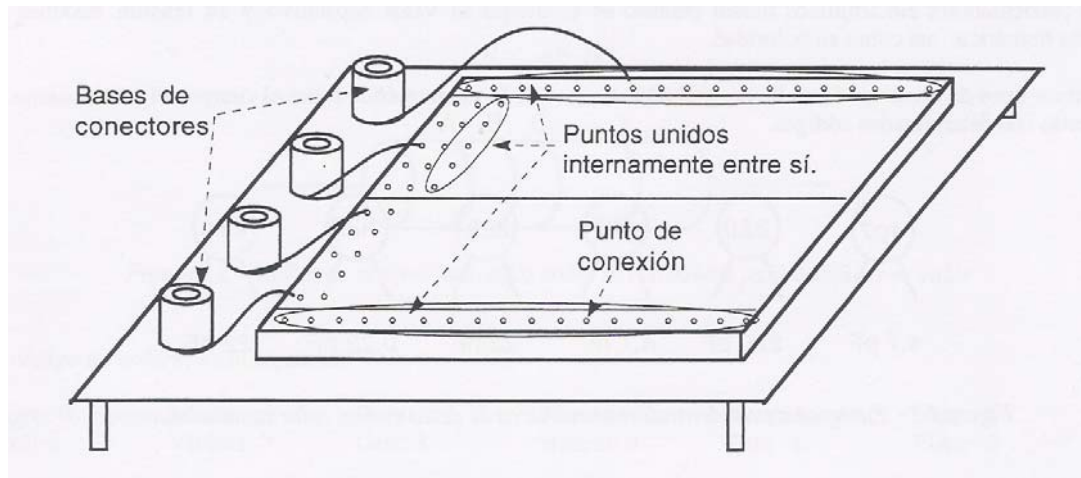
## 2.3.- La placa de connexions per inserció

Un exemple de placa de connexions per inserció sobre la que es realitzaran els muntatges de prova dels circuits d'aquest curs es representa a la figura 2.9. A partir de la línia central de la placa es pot observar una matriu de punts de connexió, tant cap amunt com cap avall. Cadascuna d'aquestes matrius té cinc files i un gran nombre de columnes. Els cinc punts de connexió de cada columna estan units internament entre sí, tal com s'indica a la figura, però aïllats dels punts de la columna adjacent. Per tant, dos components amb un dels seus terminals que s'hagi inserit dintre dels forats de connexió d'una mateixa columna estan connectats entre sí, com si estiguessin soldats.

A l'extrem superior de la placa, i també a l'extrem inferior, sol haver-hi una o dues files de punts de connexió (figura 2.9). Els punts d'una mateixa d'aquestes files estan connectats internament entre sí, encara que en algunes plaques la fila està dividida en dues meitats aïllades entre sí. Aquestes files solen utilitzar-se per connectar la tensió continua d'alimentació o el terminal de massa dels circuits que es volen muntar. Pot verificar-se la connexió interna entre dos punts introduint un fil de connexió en els forats corresponents, i assegurant amb el multímetre que la resistència entre ells és nul·la.

La placa de connexions sol estar muntada sobre un rectangle de material aïllant. Sobre el cos d'aquest rectangle hi sol haver uns quants terminals per connectar-hi els cables que porten el senyal o la tensió d'alimentació des dels instruments. L'usuari ha d'instal·lar un fil de connexió

suficientment llarg a cada terminal que permeti connectar-lo a qualsevol punt de connexió de la placa (vegeu figura 2.9). Habitualment s'utilitza un conveni de colors pels terminals i els cables d'alimentació: per a la massa s'utilitza el terminal i cable negre, i per al terminal i cable actiu s'usa el vermell.



*Figura 2.9. Placa de connexions per inserció.*

Cal tenir en compte que, si bé la placa de connexions és molt còmoda de fer servir a la fase de prova dels circuits, també té problemes. De tant en tant, els contactes fallen degut, tant a moviments involuntaris i inadvertits dels components, com a que els punts de connexió es malmeten per haver-hi introduït fils massa gruixuts. Per això, quan el circuit funciona correctament és aconsellable muntar-lo en una placa de circuit imprès soldant els components.

Nom:

Lloc de treball:

## PRÀCTICA 2. LA FONT D'ALIMENTACIÓ I EL MULTÍMETRE DIGITAL

### FULL DE RESPOSTES DE L'ESTUDI PREVI

**Exercici 1:**

*Número de sortides ajustables =  
Número de sortides sortides fixes =*

**Exercici 2:**

*Resistència crítica:  $R_C =$*

**Exercici 3:**

*Tensió o marge de tensions de les sortides:*

*Marge de corrent que pot lliurar cadascuna de les sortides:*

**Exercici 4:**

*Escales de mesura de tensió i resolució en cada escala:*

**Exercici 5:**

*Resistència d'entrada:  $R_{in} =$*

**Exercici 6:**

*Escales de mesura de corrent i resolució en cada escala:*

**Exercici 7:**

*Amplitud:  $A =$*

## PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI

### 1.- AJUSTAMENT DE LA SORTIDA DE LA FONT D'ALIMENTACIÓ A $V_o=10\text{ V}$ i $I_{\text{LIMIT}}=50\text{ mA}$

Engegueu la font d'alimentació. Per ajustar la tensió a  $10\text{ V}$  utilitzeu el comandament "VOLTAGE". Per ajustar la intensitat límit, primer poseu el botó de control de la intensitat molt a prop del mínim. Després heu de connectar un cable entre el terminal "+" i el "-" de la font, és a dir, heu de fer un curtcircuit entre els terminals de sortida. Finalment, utilitzant el botó del control de la intensitat límit, ajasteu el corrent a  $50\text{ mA}$ . Retireu el curtcircuit a continuació.

### 2.- MUNTATGE D'UN CIRCUIT A LA PLACA DE CONNEXIONS

Heu de muntar el circuit de la figura 2.10 a la placa de connexions. Agafeu una resistència de  $47\text{ k}\Omega$  i una altra de  $100\text{ k}\Omega$  de la bossa de components, ambdues de potència nominal de  $1/4\text{ W}$ . Dobleu els terminals metàl·lics de les resistències amb la finalitat d'inserir-les a la placa de connexions tal com s'indica en la figura 2.11. Connecteu els fils que surten dels endolls de connexió de l'esquerra de la placa en els punts indicats a la figura. Talleu un tros petit de fil per connectar el punt C amb la filera de punts inferior. Connecteu un cable vermell des de la sortida "+" de la font d'alimentació al terminal de connexions vermell que ha de fer contacte al punt A, i un cable negre des de la sortida "-" de la font al terminal negre de connexions que ha de fer contacte en el punt C. Noteu que els colors dels cables i terminals corresponen al conveni que habitualment es fa servir del color vermell per a tensions positives i el color negre per a la massa o referència.

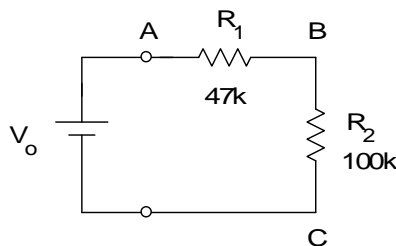


Figura 2.10.- Circuit que heu de muntar en la placa de connexions.

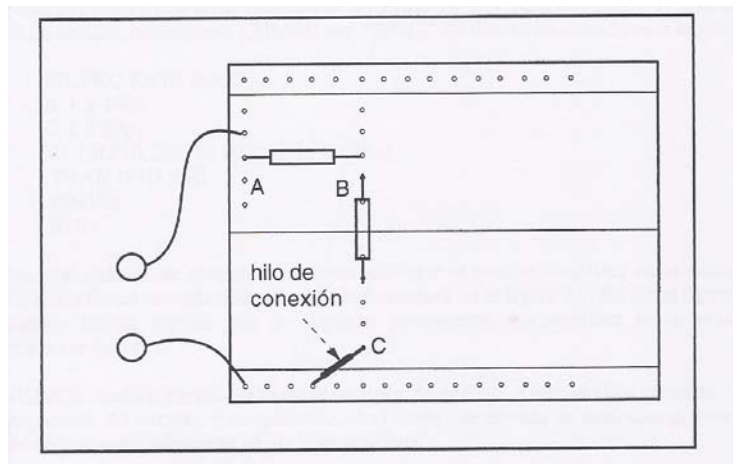


Figura 2.11.- Muntatge del circuit a la placa de connexions.

### 3.- MESURA DE TENSIONS CONTÍNUES AMB EL VOLTÍMETRE

Engegueu el multímetre. Seleccioneu la funció de voltímetre i el mode d'acoblament "DC". Seleccioneu l'escala de  $20\text{ V}$ . Connecteu un cable vermell en el terminal de sortida "V- $\Omega$ " i un cable negre en el comú "COM".

Endolleu el cable negre del comú del multímetre al node de referència C del circuit. Connecteu el cable vermell en el punt A i anoteu la lectura del voltímetre. Després connecteu el mateix cable vermell en el punt B (podeu fer servir un altre dels terminals de la placa de connexions amb un fil connectat al node B) i anoteu de nou la lectura.

*Qüestió 1. Justifiqueu els resultats de les dues mesures comparant-los amb els càlculs de les tensions que obtingueu de l'anàlisi del circuit de la figura 2.10.*

A continuació, intercanvieu la connexió dels cables a les entrades del multímetre, de forma que el cable vermell es connecti al comú "COM" i el cable negre es connecti al terminal "V-Ω".

*Qüestió 2. Anoteu i justifiqueu la lectura obtinguda.*

Tornant els cables a la situació original, augmenteu la tensió de la font fins superar els 20 V.

*Qüestió 3. Anoteu el que s'observa en la pantalla del voltímetre i indiqueu el seu significat.*

Reduïu la tensió de sortida de la font fins a 1 V i mesureu la tensió entre B i C. Proveu quin és el resultat obtingut en diferents escales. Trieu la que sigui millor.

*Qüestió 4. Justifiqueu quina escala és millor i anoteu la lectura obtinguda.*

#### **4.- MESURA DE CORRENTS CONTÍNUES AMB L'AMPERÍMETRE**

Torneu a ajustar la tensió de sortida de la font a 10 V. Heu de mesurar el corrent que circula per la malla del circuit de la figura 2.10. Desconnecteu els cables vermell i negre entre el multímetre i el circuit. Torneu a connectar el cable negre al terminal comú "COM" del multímetre i el cable vermell al terminal "A" (o "mA") del multímetre. Seleccioneu la funció amperímetre i el mode d'acoblament "DC". Seleccioneu l'escala de 200  $\mu$ A. Per obrir la malla i fer circular el corrent pel multímetre, podeu retirar el fil de connexió que va del punt C a la filera de punts inferior i en el seu lloc connecteu l'amperímetre en sèrie entre l'extrem de la resistència de 100 k $\Omega$  (cable vermell del multímetre) i el negatiu de la font d'alimentació (cable negre del multímetre).

*Qüestió 5. Anoteu i justifiqueu el resultat de la mesura comparant-lo amb l'anàlisi del circuit.*

Desconnecteu la font d'alimentació i el multímetre del circuit de la placa de connexions. Continueu amb el multímetre en funció amperímetre i mode "DC" però canvieu l'escala a 20 mA. Connecteu l'amperímetre directament en sèrie a la sortida de la font d'alimentació, connectant el terminal positiu de la font al terminal "A" i el negatiu al comú "COM". Ajusteu una intensitat límit a la font de forma que circulïn 15 mA per l'amperímetre.

*Qüestió 6. Anoteu la lectura del multímetre i la lectura dels dos displays de la font d'alimentació (tant de tensió com de corrent). Dibuixeu l'esquema elèctric d'aquest muntatge utilitzant els circuits equivalents de la font i de l'amperímetre. Expliqueu el valor de la tensió que es llegeix en la pantalla de la font d'alimentació.*

Repetiu aquesta mesura canviant l'escala de l'amperímetre a 200 mA.

*Qüestió 7. Justifiqueu les diferències respecte del cas anterior.*

#### **6.- MESURA DE LES CONNEXIONS INTERNES DE LA PLACA DE CONNEXIONS**

Es tracta de comprovar quins punts d'inserció de la vostra placa de connexions estan connectats internament entre sí. Per fer-ho, mesurem la resistència entre parells de punts. Si la resistència entre dos punts és zero vol dir que estan interconnectats internament. Si la resistència és molt gran (teòricament infinita) vol dir que estan aïllats entre sí. Connecteu dos fils suficientment llargs a dos dels terminals de la placa de connexió. Els altres extrems dels fils els heu d'inserir successivament en els dos punts que vulgueu comprovar. Measureu amb l'òhmmetre la resistència entre els terminals.

*Qüestió 8. Feu un esquema de les connexions internes entre els punts d'inserció de la vostra placa.*

Nom dels membres de l'equip:

Lloc de treball:

## PRÀCTICA 2. LA FONT D'ALIMENTACIÓ I EL MULTÍMETRE DIGITAL

### FULL DE RESULTATS

#### **Qüestió 1:**

*Lectura voltímetre entre A i C:*

*Lectura voltímetre entre B i C:*

*Tensió calculada entre B i C:  $V_{BC} =$*

*Justificació dels resultats:*

#### **Qüestió 2:**

*Lectura voltímetre:*

*Justificació de la lectura:*

#### **Qüestió 3:**

*Lectura voltímetre:*

*Significat de la lectura:*

#### **Qüestió 4:**

*Millor escala i justificació:*

*Lectura voltímetre:*

#### **Qüestió 5:**

*Lectura amperímetre:*

*Corrent calculat:*

*Justificació dels resultats:*

#### **Qüestió 6:**

*Lectura amperímetre:*

*Lectura display de tensió de la font:*

*Lectura display de corrent de la font:*

*Circuit elèctric equivalent:*

*Justificació de la tensió en el display de la font d'alimentació:*

#### **Qüestió 7:**

*Justificació de les diferències respecte del cas anterior:*

#### **Qüestió 8:**

*Esquema de les connexions internes de la vostra placa:*

## PRÀCTICA 3. MESURES EN CONTÍNUA

L'objectiu d'aquesta pràctica és realitzar mesures en contínua en circuits elèctrics senzills, tant per reforçar l'habilitat de muntar i mesurar circuits al laboratori com per desenvolupar noves tècniques de mesura per mètodes indirectes que evitin modificar el circuit. També es vol aprofundir en l'estudi dels errors d'intrusisme deguts a l'alteració del circuit al connectar-li els instruments de mesura. Es faran servir els dos instruments estudiats en la pràctica anterior, la font d'alimentació i el multímetre digital. S'utilitzaran resistències fixes i variables per muntar circuits resistius a la placa de connexions. També es farà servir el full de càlcul per al tractament gràfic de les dades mesurades.

### 3.1. El divisor de tensió

El divisor de tensió és un circuit molt simple que apareix amb molta freqüència en circuits més complexos, per això és útil tenir agilitat en el seu anàlisi. Consisteix en una malla formada per un generador de tensió i dues o més resistències en sèrie tal com s'indica a la figura 3.1. La "sortida" del circuit sol ser entre els punts A i B entre els quals no hi ha res més connectat que la resistència  $R_2$ . Per això s'indica que el corrent de sortida  $i_0$  és zero. La tensió de sortida  $v_0$  és simplement el producte de  $R_2$  pel corrent de la malla  $i$ . Aquest corrent és la tensió del generador dividit per la suma de resistències de la malla:

$$v_0 = R_2 \cdot i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_g = \frac{1}{R_1/R_2 + 1} \cdot v_g$$

Noteu a l'última fracció que el denominador és més gran que la unitat, per la qual cosa  $v_0$  és més petita que  $v_g$ . Per això s'anomena al circuit divisor de tensió.

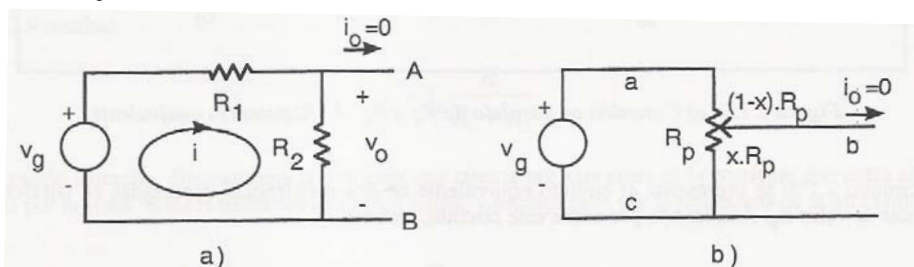


Figura 3.1. a) Circuit divisor de tensió. b) Divisor de tensió amb resistència variable

En els circuits electrònics una forma molt freqüent de fer un divisor de tensió és mitjançant una resistència variable o potenciòmetre. És un component de tres terminals que permet variar a voluntat el valor òhmic entre el terminal central (anomenat cursor) i un terminal extrem. Una forma típica d'aquestes resistències és circular, tal com s'indica a la figura 3.2, on es desplaça un contacte mòbil sobre el cos de la resistència.

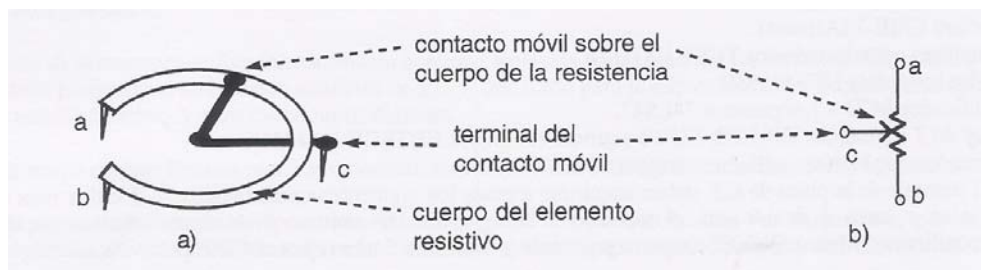


Figura 3.2. Resistència variable: a) estructura física, b) símbol

Tal com s'indica a la figura 3.1b, el generador de tensió es connecta als terminals fixes de la resistència variable, mentre que la sortida es pren del cursor. Si el valor de la resistència variable és  $R_p$  i a la sortida del divisor no hi ha res connectat, la tensió de sortida és:

$$v_0 = xR_p \cdot i = xR_p \cdot \frac{v_g}{R_p} = x \cdot v_g$$

amb :  $0 \leq x \leq 1$ , doncs la resistència entre el cursor i un de fix és una fracció de la resistència total  $R_p$ .

Sovint en el divisor de tensió hi ha una resistència  $R_3$  connectada a la sortida entre els punts A i B de la figura 3.1. En aquest cas es diu que les resistències  $R_2$  i  $R_3$  estan connectades en paral·lel, ja que tenen els seus respectius terminals connectats entre sí. A la teoria de circuits elèctrics es demostra que dues resistències connectades en paral·lel equivalen a una única resistència de valor:

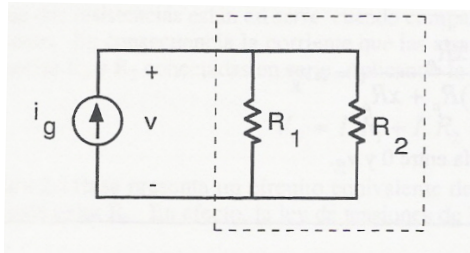
$$R_{eq} = R_2 // R_3 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

Noteu en aquesta expressió que  $R_{eq}$  és sempre menor que qualsevol de les dues resistències, i que si una d'elles és molt gran, per exemple si  $R_3 \gg R_2$ , la resistència equivalent s'acosta a la menor d'elles,  $R_2$  en aquest cas.

### 3.2. El divisor de corrent

El divisor de corrent és també un circuit habitual i convé tenir agilitat en el seu anàlisi. Consisteix en un node en el que es divideix el corrent entrant, tal com s'indica a la figura 3.3. El corrent que circula per la resistència  $R_2$  serà la tensió  $v$  aplicada a les dues resistències dividida per  $R_2$ :

$$i_{R_2} = \frac{v}{R_2} = \frac{i_g \cdot (R_1 // R_2)}{R_2} = i_g \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



En aquesta expressió,  $(R_1 // R_2)$  s'utilitza per indicar el valor de la resistència  $R_1$  en paral·lel amb la resistència  $R_2$ .

### 3.3. Error d'intrusisme del voltímetre i de l'amperímetre

S'anomena error d'intrusisme a l'error en la mesura provocat per la modificació del circuit que volem mesurar al connectar-li l'instrument de mesura. Considerem per exemple el divisor de tensió de la figura 3.1.a i que li connectem un voltímetre entre A i B per mesurar la tensió entre aquests punts. Com s'ha vist a la pràctica anterior, el voltímetre presenta una resistència d'entrada  $R_v$  que connectem de forma efectiva entre els punts A i B. Per tant  $R_v$  es connecta en paral·lel a  $R_2$ , la qual cosa modifica el circuit original. El nou circuit estarà constituït pel generador  $v_g$ , la resistència  $R_1$  i les resistències  $R_2$  i  $R_v$  connectades en paral·lel. Per tant, la tensió entre A i B en aquest circuit serà:

$$v_{AB} = (R_2 // R_v) \cdot i = (R_2 // R_v) \cdot \frac{v_g}{R_1 + (R_2 // R_v)} \neq R_2 \cdot \frac{v_g}{R_1 + R_2}$$

on  $(R_2 // R_v)$  indica la resistència equivalent de  $R_2$  en paral·lel amb  $R_v$ . El resultat, tal com s'indica, és diferent del circuit original. Només si  $R_v$  és molt més gran que  $R_2$  el resultat s'acostarà al que hauria de ser correcte i en aquest cas l'error d'intrusisme serà petit. Per això ens interessa que els voltímetres tinguin una resistència d'entrada tan gran com sigui possible.



Quan volem mesurar un corrent amb l'amperímetre hem d'obrir el circuit original entre dos punts per connectar-li en sèrie l'amperímetre (vegeu la figura 2.8b de la pràctica anterior). Al fer aquesta mesura introduïm una nova resistència en sèrie en el circuit, la pròpia del amperímetre  $R_a$ . En un circuit simple com el de la figura 3.4, el valor del corrent de la malla sense l'amperímetre és:

$$i = \frac{v_g}{R_1 + R_2}$$

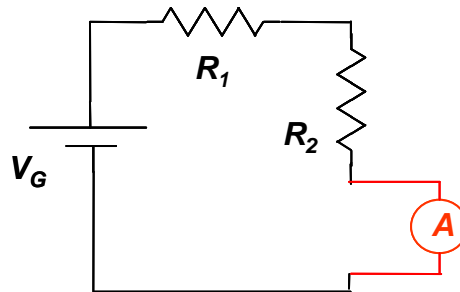


Figura 3.4. Exemple de circuit per mesurar el corrent amb l'amperímetre

Mentre que a l'obrir el circuit i inserir-li l'amperímetre, el nou corrent serà:  $i^* = \frac{v_g}{R_1 + R_2 + R_a}$

on  $R_a$  és la resistència que presenta l'amperímetre. Noteu que és diferent del valor anterior. L'error d'intrusisme per la inserció de l'amperímetre serà petit si  $R_a$  és molt inferior a les altres dues resistències. Per aquest motiu ens interessa que l'amperímetre tingui una resistència d'entrada tan petita com sigui possible.

### 3.4. Mesura indirecta del corrent amb el voltímetre

Sovint s'intenta evitar mesurar corrents amb l'amperímetre per no haver d'obrir el circuit, ja que normalment els components van soldats en una placa de circuit imprès i és complicat dessoldar-los per poder inserir en sèrie l'amperímetre.

Per mesurar el corrent de forma indirecta es fa ús de la llei d'Ohm. Si es mesura la caiguda de tensió en els terminals d'una resistència i es coneix el seu valor, el corrent es calcula dividint la tensió per la resistència. Com que el valor nominal de la resistència sol anar codificat amb els anells de color, només cal llegir-los per conèixer aquest valor. En conseqüència només cal mesurar la caiguda de tensió entre els terminals de la resistència per poder calcular el corrent que circula per ella.

### ESTUDI PREVI

1. Considera el circuit de la figura 3.6 sense el voltímetre, on escollim un potenciòmetre o resistència variable  $R_1 = 500 \Omega$  i  $V_G = 10V$ . Suposa que el contacte mòbil està just a la meitat de la resistència variable, de forma que entre el contacte mòbil i l'extrem fix superior hi ha  $250 \Omega$ , i entre el contacte mòbil i l'extrem fix interior hi ha també  $250 \Omega$ . a) Calcula la tensió  $V$  que mesurarà el voltímetre si  $R_2 = 47 k\Omega$ . b) Calcula-ho un altre cop si  $R_2 = 220 \Omega$ .

2. Considera el circuit de la figura 3.7 sense el voltímetre, amb la font ajustada a  $10 V$  i amb les següents resistències:  $R_1 = 560 k\Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 1 M\Omega$ . Calcula la tensió que hi hauria entre els punts on després es connectarà el voltímetre.

3. Considera el circuit de la figura 3.8 sense l'amperímetre, i amb  $V_G = 10 V$ ,  $R_1 = 220 \Omega$  i  $R_2 = 100 \Omega$ . a) Calcula el corrent que circularà per la malla. b) Calcula la caiguda de tensió que hi hauria en la resistència  $R_2$ .

4. Considera el circuit de la figura 3.10 amb  $R_1 = 220 \Omega$ ,  $R_2 = 100 \Omega$  i on  $I_{lim} = 50 mA$ . Treu el voltímetre i l'amperímetre i calcula el corrent que circularia per la resistència  $R_2$ .

## PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI

### MESURA DE LA CARACTERÍSTICA $I(V)$ D'UNA RESISTÈNCIA

Munteu el circuit de la figura 3.5 amb una resistència  $R = 470 \Omega$ . Ajusteu la intensitat límit de la font a 50 mA. Ajusteu la tensió de la font  $V_G$  a 8 V i anoteu el corrent que indica l'amperímetre. Repetiu la mesura per 6 V, 4 V, 2 V i 0 V. Obriu un full excel, escriviu els valors anotats de tensió i corrent, representeu-los gràficament, introduïu una corba de tendència lineal, feu que es presenti la seva equació i determineu l'invers del pendent. Amb l'òhmmetre mesureu el valor exacte de la resistència.

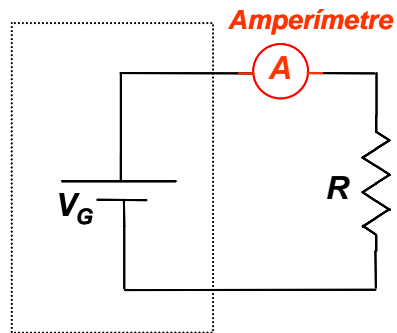


Figura 3.5. Circuit per mesurar la característica  $I(V)$  de la resistència

Qüestió 1. Coincideix el valor mesurat de la resistència amb l'invers del pendent de la recta? Si hi ha discrepància raoneu la possible causa.

### DIVISOR DE TENSÍO

Munteu el circuit de la figura 3.6 amb una resistència variable (potenciòmetre)  $R_1 = 500 \Omega$ , una resistència fixa  $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$  i la font ajustada a 10 V i 50 mA de corrent límit. Comproveu amb l'òhmmetre que entre els terminals fixes de la resistència variable hi ha aproximadament 500  $\Omega$ . Verifiqueu que al moure el cursor, la tensió mesurada amb el voltímetre varia entre 10 V i 0 V. Ajusteu el cursor fins que la tensió sigui 5 V. Apagueu la font i canvieu la resistència  $R_2$  per una de 220  $\Omega$ . Engageu la font i mesureu la tensió.

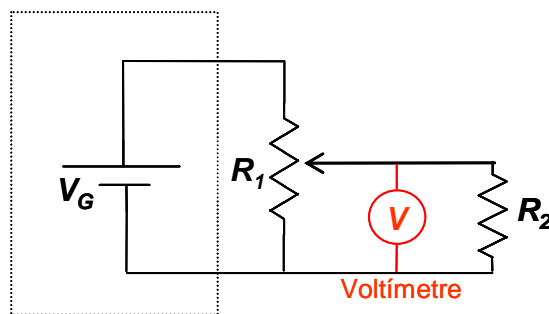


Figura 3.6. Circuit divisor de tensió.

Qüestió 2. Anoteu el resultat de la mesura. Justifiqueu-lo.

### ERROR D'INTRUSISME DEL VOLTÍMETRE

Munteu el circuit de la figura 3.7 amb la font ajustada a 10 V i 50 mA de corrent límit, i amb les següents resistències:  $R_1 = 560 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 1 \text{ M}\Omega$ . Mesureu la tensió entre els punts indicats.

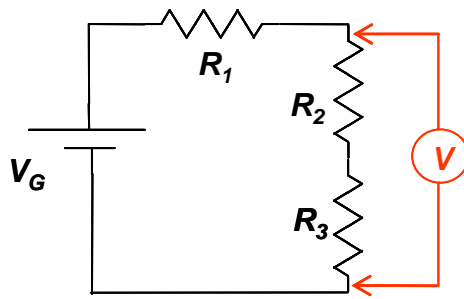


Figura 3.7. Circuit per mesurar l'error d'intrusisme del voltímetre

Qüestió 3. Anoteu el resultat de la mesura i justifiqueu-lo, comparant-ho amb el resultat obtingut a l'estudi previ.

#### MESURA DE CORRENTS AMB L'AMPERÍMETRE

Munteu el circuit de la figura 3.8 amb  $V_G = 10 \text{ V}$ ,  $R_1 = 220 \ \Omega$  i  $R_2 = 100 \ \Omega$ . Mesureu el corrent amb l'amperímetre.

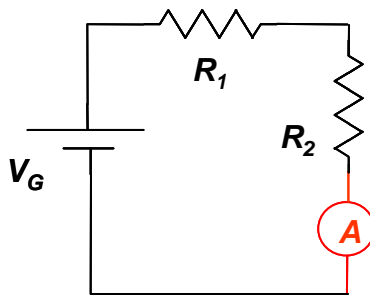


Figura 3.8. Circuit per mesurar un corrent amb l'amperímetre.

Qüestió 4. Anoteu el resultat de la mesura i justifiqueu el resultat.

#### MESURA INDIRECTA DEL CORRENT AMB EL VOLTÍMETRE

Desconnecteu l'amperímetre del muntatge anterior i realitzeu el circuit de la figura 3.9. Mesureu amb el voltímetre la tensió en els terminals de  $R_2$ . Calculeu el valor del corrent per  $R_2$ .

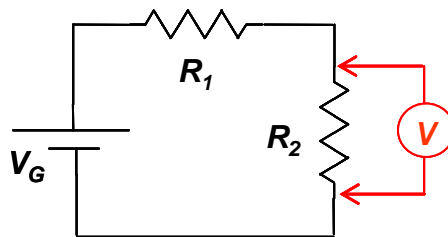


Figura 3.9. Mesura indirecta del corrent que circula per  $R_2$ .

Qüestió 5. Anoteu el resultat de la mesura i compareu-lo amb l'obtingut en el circuit anterior.

#### DIVISOR DE CORRENT

En aquest apartat farem treballar la font d'alimentació com a font de corrent. Ajusteu primer la font a  $10 \text{ V}$  i la intensitat límit a  $50 \text{ mA}$  com s'ha fet prèviament. Resulta obvi que la precisió dels  $50 \text{ mA}$  com intensitat límit és molt dolenta. Per això ara tornarem a ajustar aquesta intensitat amb l'ajut del amperímetre.

Connecteu el multímetre a la sortida de la font i seleccioneu la funció amperímetre en l'escala immediatament superior a 50 mA. La resistència interna de l'amperímetre en aquesta escala és molt petita i el podem aproximar per un curtcircuit. Per tant, connectant l'amperímetre a la sortida de 10 V de la font, podrem mesurar el corrent límit. Ajusteu el control d'intensitat límit de la font fins aconseguir 50 mA en la lectura.

Munteu el circuit de la figura 3.10 amb  $R_1 = 220 \Omega$  i  $R_2 = 100 \Omega$ . Com que la resistència connectada a la font ( $220\Omega // 100\Omega$ ) és inferior a la resistència crítica, la font actuarà com a generador de corrent de 50 mA.

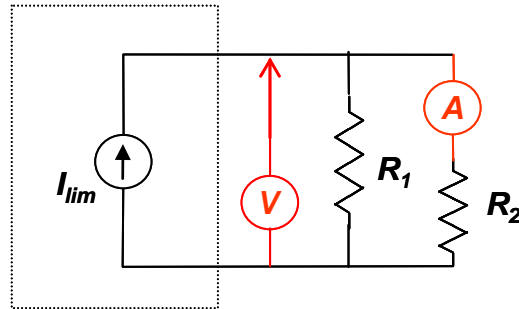


Figura 3.10. Circuit divisor de corrent utilitzant la font d'alimentació com a generador de corrent

Qüestió 6. Anoteu la tensió que dóna la font en aquesta situació, i el valor del corrent a través de  $R_2$  mesurat amb l'amperímetre. Coincideix amb el valor calculat a l'estudi previ a través de la fórmula del divisor de corrent? Si hi ha discrepància comenteu la possible causa.

## **FULL DE RESULTATS. Pràctica 3**

Nom dels components de l'equip:

Lloc de treball:

### **Mesura de la característica I(V) d'una resistència**

Qüestió 1. Coincideix el valor mesurat de la resistència amb l'invers del pendent de la recta? Si hi ha discrepància raoneu la possible causa.

### **Divisor de tensió**

Qüestió 2. Anoteu el resultat de la mesura. Justifiqueu-lo

### **Error d'intrusisme del voltímetre**

Qüestió 3. Anoteu el resultat de la mesura i justifiqueu-lo.

### **Mesura de corrents amb l'amperímetre**

Qüestió 4. Anoteu el resultat de la mesura i justifiqueu el resultat

### **Mesura indirecta del corrent amb el voltímetre**

Qüestió 5. Anoteu el resultat de la mesura i compareu-lo amb el realitzat en el circuit anterior.

### **Divisor de corrent**

Qüestió 6. Anoteu el resultat de la mesura. Coincideix amb el valor calculat a l'estudi previ a través de la fórmula del divisor de corrent? Si hi ha discrepància comenteu la possible causa.

## PRÀCTICA 4. L'OSCIL·LOSCOPÍ I EL GENERADOR DE FUNCIONS

Aquesta pràctica té per objectiu introduir l'estudiant en la utilització de dos instruments bàsics d'un laboratori d'electrònica: l'oscil·loscopi i el generador de funcions. L'oscil·loscopi permet visualitzar i mesurar tensions elèctriques que varien en el temps, que també podem anomenar senyals elèctrics. El generador de funcions permet generar senyals elèctrics periòdics amb diferents formes d'ona, amplituds i freqüències.

### 4.1. L'oscil·loscopi

L'oscil·loscopi fou inventat l'any 1897 pel científic alemany Karl Ferdinand Braun sobre la base de la tecnologia del tub de raigs catòdics. És l'instrument electrònic més antic i amb ell va néixer l'electrònica. Aquests primers oscil·loscopis s'anomenen analògics, s'han utilitzat durant més d'un segle, i se segueixen utilitzant encara. Treballen directament amb el senyal continu en el temps (senyal analògic) que és aplicat a la seva entrada. Aquest senyal degudament condicionat desvia un feix d'electrons (raigs catòdics) que a l'incidir en una pantalla genera un punt lluminós. El moviment d'aquest punt a la pantalla genera la representació de l'amplitud del senyal en funció del temps.

Durant les últimes dècades s'ha desenvolupat un altre tipus d'oscil·loscopi anomenat digital. Aquest oscil·loscopi treballa amb senyals discretitzats i codificats amb "1" i "0", i d'aquí el seu nom de digitals. El senyal digital es grava a la memòria de l'oscil·loscopi i després de ser processat adequadament es representa en una pantalla, que molt sovint és de cristall líquid, d'una tecnologia semblant a la que s'utilitza actualment als televisors (pantalles planes).

Actualment coexisteixen els dos tipus d'oscil·loscopi i molt probablement l'estudiant es trobarà amb tots dos a mesura que vagi passant pels diversos laboratoris de l'ETSETB. Per això en aquesta pràctica presentarem el funcionament més bàsic d'un oscil·loscopi que és comú tant a l'oscil·loscopi analògic com al digital.

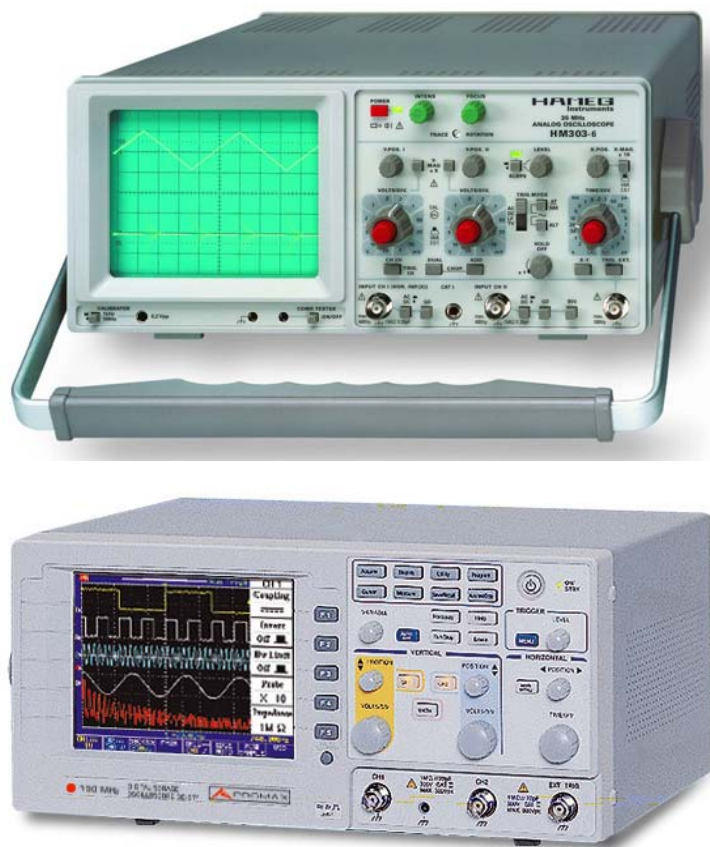


Figura 4.1. Fotografies de dos oscil·loscopis.

#### 4.1.1. La pantalla de l'oscil·loscopi

La finalitat de l'oscil·loscopi és representar en la seva pantalla l'evolució en el temps del senyal que es connecta a la seva entrada o canal. A partir d'aquesta representació es poden mesurar diferents paràmetres d'aquest senyal. Habitualment un oscil·loscopi disposa de més d'un canal d'entrada, com és el cas dels models que utilitzarem en aquest curs que en tenen dos. Això vol dir que en la pantalla poden representar-se al mateix temps els senyals d'entrada dels canals desitjats. Cadascun dels canals d'entrada disposa del seu connector del tipus BNC on es connecten els cables coaxials amb els senyals que es volen mesurar.

En la figura 4.2 es presenta la pantalla típica d'un oscil·loscopi. En aquesta pantalla es pot apreciar que hi apareixen unes línies tant verticals com horitzontals que divideixen la pantalla en parts més petites en forma de reixeta. La separació entre dues línies consecutives s'anomena divisió. Alhora, en les línies centrals tant en sentit vertical com horitzontal s'aprecien unes marques delimitant unes subdivisions que són útils per afinar les mesures.

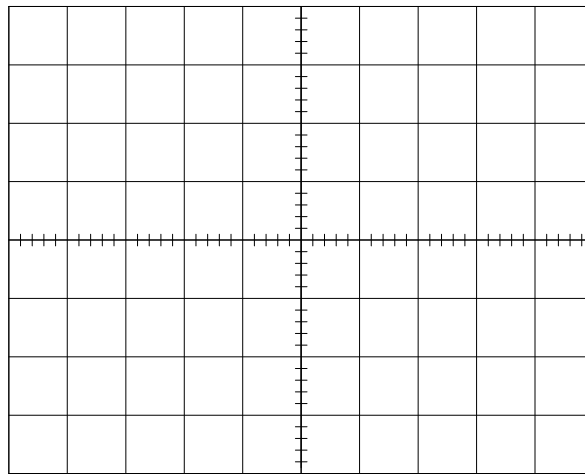


Figura 4.2. Pantalla típica d'un oscil·loscopi.

*Exercici 1: Quantes divisions té la pantalla en el sentit horitzontal? I quantes en té en el sentit vertical? Quantes subdivisions té cada divisió?*

Com s'ha dit, en la pantalla de l'oscil·loscopi es visualitza com varia el senyal elèctric en el temps i, per tant, les divisions verticals corresponen a amplituds o tensions (és a dir les unitats són volts) i les divisions horitzontals corresponen a temps (les unitats són segons).

#### 4.1.2. Controls de l'eix vertical

Cada canal d'entrada de l'oscil·loscopi disposa dels controls d'ajustament de la representació en la pantalla en el sentit vertical. Els tres ajustaments bàsics del canal vertical són: sensibilitat o VOLTS/DIV, posició vertical i mode d'acoblament.

La sensibilitat determina quina amplitud o tensió correspon a cada divisió de la pantalla en el sentit vertical. L'ajustament de la sensibilitat es fa amb un comandament que està calibrat en passos discrets indicats en VOLTS/DIV. Així per exemple, si el senyal ocupa en el sentit vertical de la pantalla un total de quatre divisions, i el comandament de sensibilitat està en la posició de 0,5 V/div el senyal connectat a l'entrada tindrà una amplitud de 2 V (4 divisions multiplicat per 0,5 V/div).

*Exercici 2: Quina sensibilitat del canal vertical s'ha de seleccionar per a que un senyal de 16 V de pic a pic ocupi 8 divisions de la pantalla en sentit vertical?*

El comandament d'ajustament de la posició vertical permet a l'usuari triar en quin punt de la pantalla en el sentit vertical es representa una amplitud de 0 volts. El més habitual es fixar

aquest nivell 0 de referència en la línia central de la pantalla, però pot ajustar-se en qualsevol punt de la pantalla.

El selector d'acoblament del canal vertical permet triar entre tres modes: AC, DC i GD. Amb l'acoblament DC, en la pantalla de l'oscil·loscopi es representa directament el senyal connectat a l'entrada. Si es tria el mode GD, el que es fa és connectar internament l'entrada a massa i per tant en la pantalla és representa 0 V i no el senyal que hi ha connectat a l'entrada. La utilitat d'aquest mode és fixar mitjançant el comandament de la posició vertical el punt de la pantalla on es vol la referència del 0 V. En el cas de triar l'acoblament AC, en la pantalla només es visualitza la component alterna del senyal connectat a l'entrada, és a dir, s'elimina la component de tensió contínua del senyal d'entrada. Aquest acoblament es útil quan es vol mesurar un senyal altern d'amplitud petita superposat a un nivell de continua elevat.

La figura 4.3 mostra un exemple del que es veu a la pantalla de l'oscil·loscopi, amb un mateix senyal connectat a l'entrada, per a cadascun dels tres modes d'acoblament. El senyal d'entrada és  $V(t) = 2 + \sin \omega t$  i els comandaments de sensibilitat està en la posició de 1 V/div i el de posició vertical fixa la referència de 0 V en la línia central en el sentit vertical de la pantalla. Cal notar que el senyal d'entrada està compost d'una component contínua de 2 V i d'una component alterna sinusoidal d'amplitud 1 V i freqüència  $f = \omega/2\pi$ .

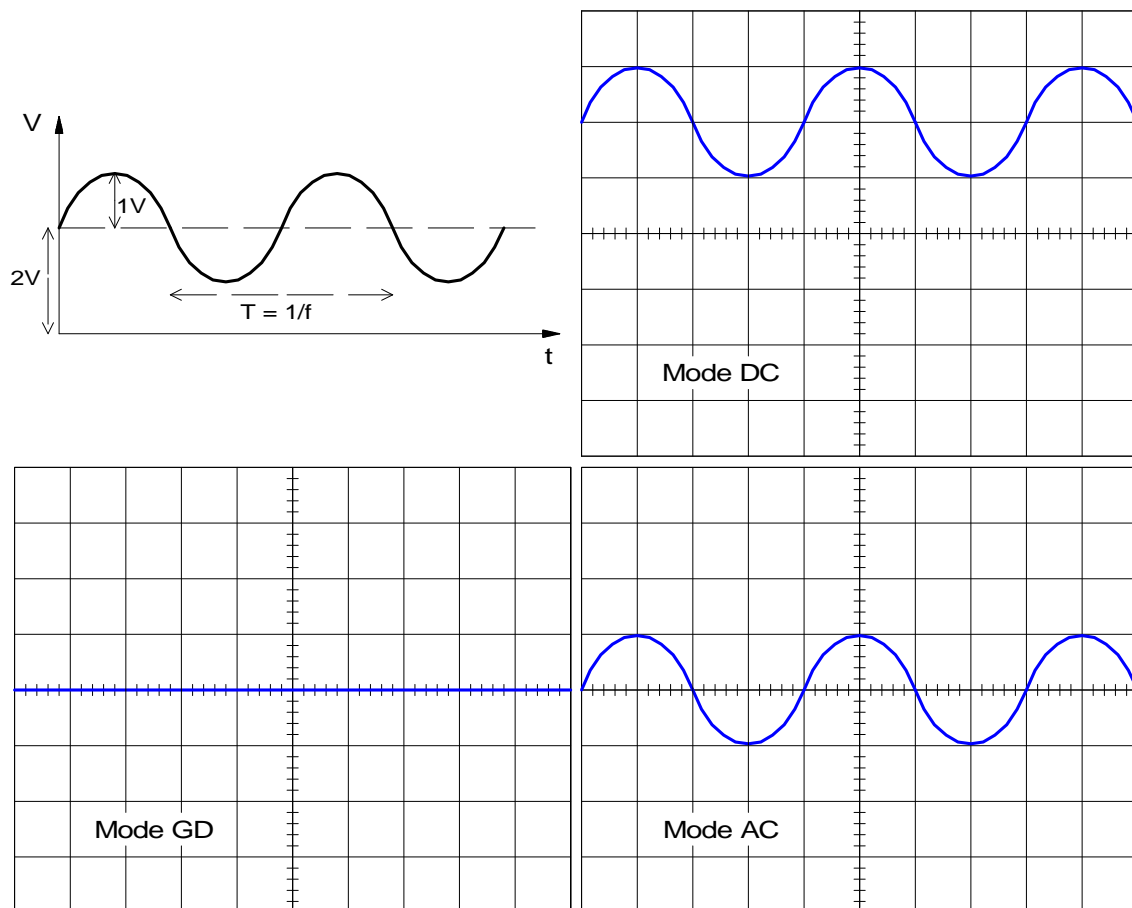


Figura 4.3. Visualització en la pantalla del mateix senyal per cadascun dels tres modes d'acoblament del canal vertical.

*Exercici 3: La figura 4.4 mostra la pantalla de l'oscil·loscopi per un senyal quadrat d'entrada quan s'acobla el canal vertical en mode DC. Dibuixa com es veuria en la pantalla aquest mateix senyal en cadascun dels altres dos modes d'acoblament AC i GD.*



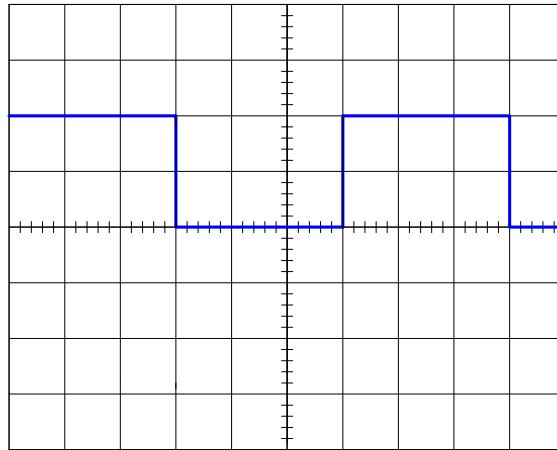


Figura 4.4. Visualització en la pantalla del senyal de l'exercici 3.

#### 4.1.3. Controls de l'eix horitzontal

El sentit horitzontal de la pantalla representa els temps i, per tant, les unitats de les divisions horitzontals són segons o fraccions de segons.

L'oscil·loscopi disposa d'un comandament que determina la sensibilitat horitzontal, també anomenat base de temps i indicat normalment per TIME/DIV. Aquest comandament permet ajustar en salts discrets el temps que correspon a una divisió horitzontal. Així per exemple, si la base de temps està a la posició "2  $\mu$ s/div" i el període del senyal ocupa 5 divisions horitzontals, vol dir que el període és de 5 divisions multiplicades per 2  $\mu$ s/div igual a 10  $\mu$ s, i que, per tant, la seva freqüència serà de  $1/10 \mu\text{s} = 100 \text{ kHz}$ .

*Exercici 4: Quina és la freqüència d'un senyal si un dels seus cicles ocupa 4 divisions horitzontals de la pantalla i la base de temps està en 5 ms/div?*

Igual que en el sentit vertical, l'oscil·loscopi disposa d'un comandament d'ajustament de la posició horitzontal que permet a l'usuari desplaçar horitzontalment la representació del senyal en la pantalla.

#### 4.1.4. Controls de sincronisme i disparament

La forma més habitual de treball de l'oscil·loscopi és presentant contínuament el senyal d'entrada que va variant amb el temps. Això vol dir que en la pantalla es visualitzen finestres de temps successives com es mostra a la figura 4.5. La durada d'aquestes finestres es calcula multiplicant les 10 divisions horitzontals de la pantalla pel valor de la posició on està ajustada la base de temps i s'anomena temps d'escombrat. Quan acaba una finestra o escombrat es presenta el següent i així successivament.

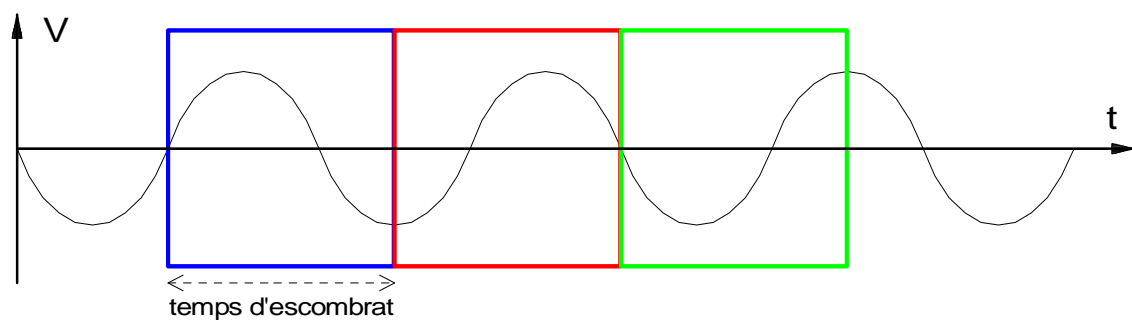


Figura 4.5. Escombrats successius del senyal d'entrada no sincronitzats.

Per tant, la presentació en la pantalla correspon a la superposició del senyal en els successius escombrats com mostra la figura 4.6. En la figura s'aprecia que la presentació en la pantalla no és fixa i canvia contínuament ja que l'evolució del senyal no coincideix en els successius escombrats. En aquest cas es diu que els escombrats no estan sincronitzats o bé que hi ha manca de sincronisme.

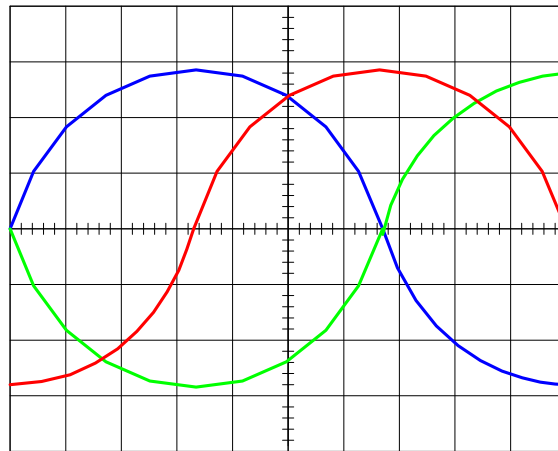


Figura 4.6. Visualització del senyal amb manca de sincronisme.

L'oscil·loscopi disposa dels circuits interns, anomenats de sincronisme i disparament, per evitar aquest problema. La solució consisteix en sincronitzar els successius escombrats, això és, aconseguir que l'inici o disparament (en anglès, trigger) de cada escombrat o finestra coincideixi en instants amb el mateix nivell i pendent del senyal d'entrada. En la figura 4.7 es mostra com els disparaments dels escombrats s'esperen fins que el senyal té el mateix nivell (en anglès, level) de 0 V i el mateix pendent (en anglès, slope) creixent o positiu fent que la presentació en la pantalla sigui fixa com es veu en la figura 4.8.

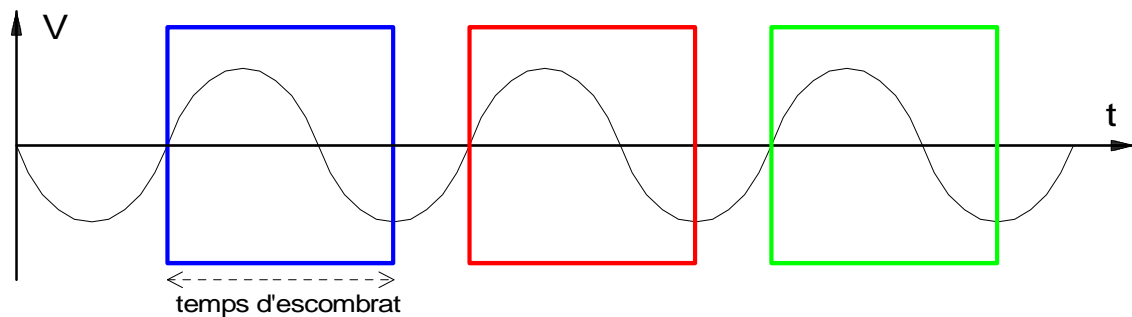


Figura 4.7. Escombrats sincronitzats.

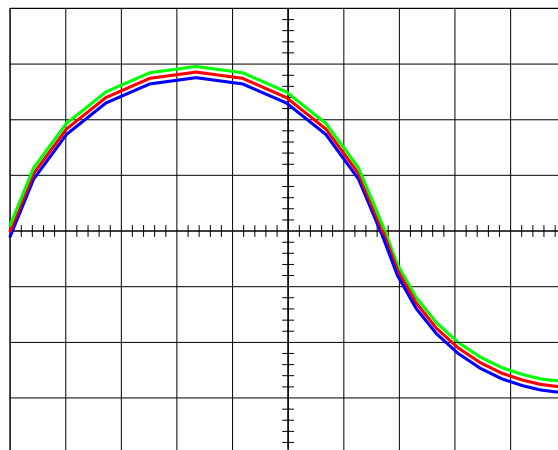


Figura 4.8. Visualització del senyal sincronitzat correctament.

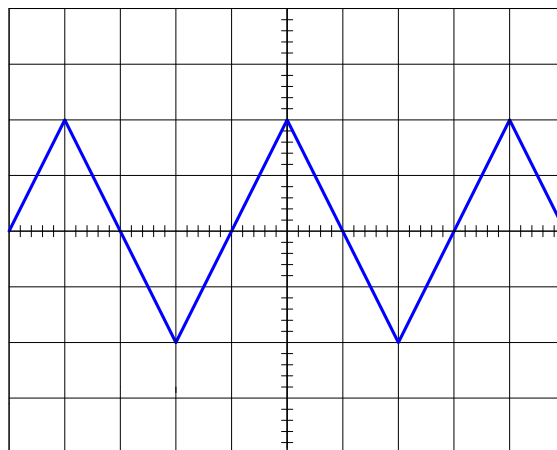
Cal notar que el senyal que es vol visualitzar a la pantalla ha de ser periòdic, és a dir, s'ha de repetir en el temps, per aconseguir una imatge fixa.

El funcionament dels circuits de sincronisme i disparament de l'oscil·loscopi poden controlar-se mitjançant quatre comandaments bàsics: selector de font o senyal de disparament, selector de mode de disparament, ajustament de nivell de disparament i selector de pendent de disparament.

Amb el selector de la font de disparament, l'usuari tria el senyal a partir del qual es decideixen els instants d'inici de cada escombrat. La forma més habitual de sincronitzar els escombrats és mitjançant el mateix senyal que es vol mesurar tal com s'ha explicat en el paràgraf anterior. Per tant, cal triar amb aquest selector el canal d'entrada on hi ha el senyal que vol visualitzar-se.

El selector de mode disparament permet seleccionar la forma com es fa l'ajustament de l'instant de disparament, tant en nivell com en pendent, del senyal triat amb el selector de font. Per defecte es pot deixar que el propi oscil·loscopi faci automàticament aquest ajustament amb el mode automàtic AUTO o AT. L'alternativa és que l'usuari faci aquesta tria de forma manual amb el mode NORMAL, triant el nivell amb el comandament LEVEL i el pendent mitjançant el selector SLOPE.

*Exercici 5: El senyal triangular de la figura 4.9 correspon al disparament en el mode AUTO. Dibuixa com es veuria la pantalla si el disparament fos en el mode NORMAL amb l'ajustament de nivell en -1 V i amb un pendent negatiu. La sensibilitat vertical està ajustada a 1 V/div.*



*Figura 4.9. Visualització en la pantalla del senyal de l'exercici 5.*

Cal notar que el mode AUTO ajusta automàticament el nivell de disparament al voltant dels 0 V i que encara que no detecti cap senyal d'entrada després d'un temps d'espera dispara l'escombrat. Això vol dir que sempre hi ha un traç a la pantalla encara que no hi hagi cap senyal a l'entrada. En canvi, en el mode NORMAL és indispensable que el senyal assoleixi el nivell al qual s'ajusta el disparament per a que aquest es produeixi. En cas contrari, no apareix cap traç en la pantalla, com per exemple quan no hi ha senyal d'entrada.

#### **4.1.5. Altres comandaments d'un oscil·loscopi**

Els comandaments i controls explicats en els apartats anteriors són els principals i bàsics en el funcionament d'un oscil·loscopi. No obstant, atenent el model d'oscil·loscopi concret de que es tracti, aquests comandaments es completen amb d'altres més avançats per ampliar les capacitats de mesura de l'instrument. Alguns dels més habituals es detallen en aquest apartat.

El mode XY, que només és possible en oscil·loscopis amb dos canals d'entrada, permet visualitzar a la pantalla la composició ortogonal de dos senyals: un senyal X (canal 1 que correspon a l'eix horitzontal) i un senyal Y (canal 2 que correspon a l'eix vertical). Els comandaments de sensibilitat i posició del canal 1 controlen l'eix horitzontal mentre que els del

canal 2 controlen l'eix vertical. El mode XY es pot fer servir per visualitzar característiques corrent – tensió d'un dispositiu electrònic o quan es vol mesurar el desfasament entre dos senyals.

L'oscil·loscopi disposa habitualment de més opcions de sincronisme i disparament de les explicades en l'apartat anterior. A més de poder sincronitzar els escombrats amb el propi senyal que es vol visualitzar també es pot disparar amb un senyal extern, opció EXT del selector de la font de disparament, que es connecta al connector BNC d'entrada EXT o EXT TRIG, o bé, amb la tensió de la xarxa de subministrament elèctric amb l'opció LINE.

Així mateix molts oscil·loscopis disposen d'una altra opció en el mode de disparament habitualment anomenada SINGLE. En aquest mode, l'oscil·loscopi fa un sol disparament i escombrat i, per tant, la presentació en pantalla correspon només a l'interval de temps entre el disparament i l'instant final d'aquell escombrat. No és una presentació contínua del senyal d'entrada amb successius escombrats com és el cas amb els modes AUTO i NORMAL.

#### 4.1.6. Ample de banda i impedància d'entrada d'un oscil·loscopi

L'ample de banda d'un oscil·loscopi es l'interval de freqüències dels senyals que pot mesurar. Com que poden mesurar senyals contínues, de freqüència zero, l'ample de banda indica la major freqüència del senyal d'entrada que es pot presentar i mesurar correctament.

La impedància d'entrada d'un oscil·loscopi és la impedància equivalent de l'instrument vista des dels terminals als quals es connecta el senyal que es vol mesurar. Normalment és una resistència i una capacitat connectades en paral·lel. Valors típics de la resistència solen ser de l'ordre del  $M\Omega$ , mentre que els valors típics de la capacitat són de l'ordre de desenes de pF.

*Exercici 6: Consultant el manual de l'oscil·loscopi del teu lloc de treball (model **PROMAX OD-571** en el laboratori C4-S102B i model **HAMEG 303-6** en el laboratori A1-S101) cerca la següent informació:*

- *Número de canals:*
- *Impedància d'entrada:*
- *Ample de banda:*

#### 4.2. El generador de funcions

El generador de funcions és un instrument electrònic que proporciona senyals elèctrics periòdics de diferents formes d'ona. Aquests senyals són útils per provar i mesurar els circuits electrònics. La freqüència i l'amplitud d'aquests senyals es pot variar dins d'un determinat marge de valors.



Figura 4.10. Fotografia d'un generador de funcions.

#### 4.2.1. Sortida principal

En el panell frontal del generador de funcions pot trobar-se el connector BNC de sortida principal. Els paràmetres de la tensió elèctrica que proporciona aquest connector poden ajustar-se mitjançant els comandaments principals. El botó selector de funció FUNCTION permet triar la forma d'ona del senyal de sortida que pot ser sinusoidal, triangular o quadrada. L'amplitud d'aquest senyal pot ajustar-se de forma contínua des del comandament AMPLITUDE del panell frontal. La freqüència del senyal, que pot mostrar-se en un display, s'ajusta mitjançant un botó de selecció de marge de freqüències i un comandament rotatori. A més, és possible afegir un valor de tensió contínua al senyal altern seleccionat, de polaritat positiva o negativa, i de valor ajustable. Aquesta acció pot fer-se amb el comandament DC OFFSET.

El circuit equivalent de la sortida del generador de funcions es representa a la figura 4.11, consistent en un generador ideal de tensió en sèrie amb una resistència de sortida  $R_0$ .

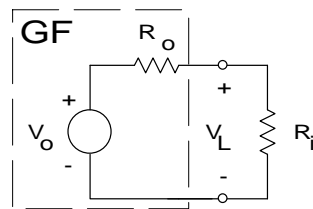


Figura 4.11. Circuit equivalent del generador de funcions.

Noteu que si el circuit que es connecta al generador de funcions té una resistència d'entrada  $R_i$ , aleshores la tensió que proporciona el generador serà:

$$v_L = v_0 \frac{R_i}{R_i + R_0}$$

*Exercici 7: Troba el valor de la resistència equivalent de sortida d'un generador de funcions que en circuit obert proporciona una tensió de 10 V d'amplitud i en curtcircuit proporciona un corrent de 100 mA d'amplitud. Quina tensió s'obtindria a la seva sortida si s'hi connectés una resistència de 50  $\Omega$ ?*

#### 4.2.2. Sortida TTL

Els generadors de funcions també solen oferir una sortida TTL que pot ser útil per fer mesures en circuits lògics, de la freqüència seleccionada i amb la possibilitat d'ajustar el seu cicle de treball (en anglès "duty cycle"). El cicle de treball es defineix com la relació  $\tau/T$  segons mostra la figura 4.12.

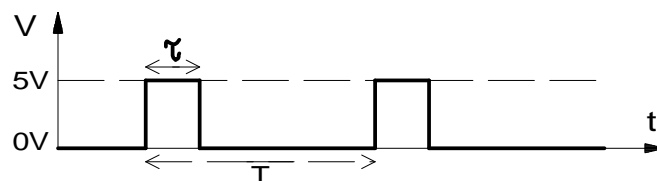


Figura 4.12.- Senyal TTL.

*Exercici 8: Consultant el manual del generador de funcions del teu lloc de treball (model PROMAX GF-232) identifica:*

- Freqüència mínima i màxima del senyal de sortida:
- Màxima amplitud del senyal de sortida principal (circuit obert):
- Valor màxim i polaritat del nivell de contínua (circuit obert):
- Resistència de sortida del generador en la sortida principal:

Nom :

Lloc de treball:

## PRÀCTICA 4. L'OSCIL·LOSCOPI I EL GENERADOR DE FUNCIONS

### FULL DE RESPOSTES DE L'ESTUDI PREVI

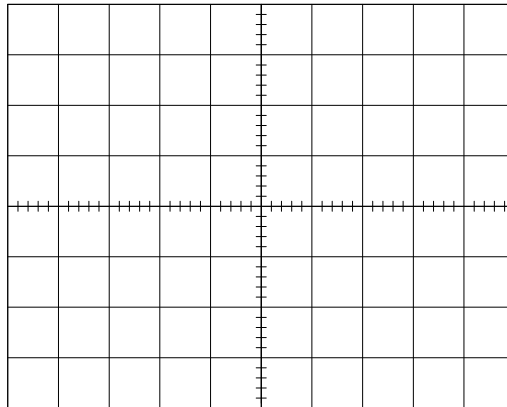
**Exercici 1:**

*Divisions horitzontals =*  
*Divisions verticals =*  
*Subdivisions per cada divisió =*

**Exercici 2:**

*Sensibilitat del canal vertical =*

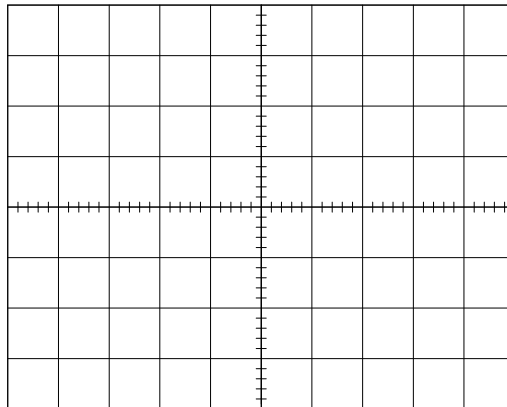
**Exercici 3:**



**Exercici 4:**

*Freqüència =*

**Exercici 5:**



**Exercici 6:**

- *Número de canals:*
- *Impedància d'entrada:*
- *Ample de banda:*

**Exercici 7:**

*Resistència equivalent de sortida =*  
*Tensió de sortida =*

**Exercici 8:**

- *Freqüència mínima i màxima del senyal de sortida:*
- *Màxima amplitud del senyal de sortida principal (circuit obert):*
- *Valor màxim i polaritat del nivell de contínua(circuit obert):*
- *Resistència de sortida del generador en la sortida principal:*

## **PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI C4-S102B**


### **1.- VERIFICACIÓ DEL SENYAL DE CALIBRAT DE L'OSCIL-LOSCOPÍ**

El primer senyal que visualitzareu i mesurareu amb el **canal 1** de l'oscil·loscopi és el senyal de calibrat que disposa el propi instrument. Aquest senyal és accessible en un petit terminal en forma de pestanya metàl·lica que es troba a l'esquerra del connector BNC del canal 1.

Engegueu l'oscil·loscopi polsant en botó **ON**.

Com que es vol que la línia central en sentit vertical correspongui a 0 V , ajusteu la traça de l'oscil·loscopi al centre de la pantalla de la següent manera:

- 1) Seleccioneu el mode GD d'acoblament del canal vertical d'entrada. Heu de polsar un cop la tecla **CH1** dels ajustaments del canal **VERTICAL**, després en el menú de la pantalla heu de triar l'opció **Acoplo** amb la tecla **F1** i, finalment, polsant successivament la mateixa tecla **F1** podreu seleccionar l'acoblament en mode **GD** amb el símbol de terra.
- 2) Poseu el disparament en mode automàtic. Heu d'anar a la part de disparament **TRIGGER** i polsar la tecla **MENU**. En el menú de la pantalla, la tecla **F1** ha d'estar en l'opció **Flanco**, la tecla **F2** correspon al selector de la font de disparament que ha d'estar en **CH1**, i la tecla **F3** permet triar el mode de disparament i ha de triar-se **AUTO**.
- 3) Amb el botó **POSITION** de la part **VERTICAL**, ajusteu la línia al centre de la pantalla.

Un cop centrada la traça, passeu l'acoblament d'entrada a la posició DC. Seguiu el mateix procediment que en **1)** seleccionant el mode DC que es representa amb el símbol de contínua  .


Connecteu el senyal de calibrat que proporciona l'oscil·loscopi al canal 1 utilitzant un cable coaxial amb un connector BNC en un extrem i dos terminals banana en l'altre. Podeu fer servir en el connector banana vermell una pinça cocodrill o bé un petit fil de connexió amb la punta pelada per fer contacte elèctric amb la pestanya metàl·lica de la sortida del senyal de calibrat. El connector banana negre no cal connectar-lo ja que la massa de la sortida del senyal de calibrat està unida internament amb la massa del connector BNC del canal d'entrada.

Verifiqueu que només es visualitza en la pantalla el canal 1. Per activar o apagar el canal 1 cal polsar successius cops la tecla **CH1** (la tecla **CH2** fa el mateix amb el canal 2).

Ajusteu el control de sensibilitat vertical **VOLTS/DIV** de forma que el senyal ocupi el màxim nombre de divisions verticals, i la base de temps **TIME/DIV** de forma que es vegin en la pantalla més de dos cicles del senyal.

Mesureu l'amplitud i freqüència del senyal de calibrat. Comproveu que compleix les especificacions que apareixen en el manual de l'instrument.

*Qüestió 1: Quina és la forma, amplitud i freqüència del senyal de calibrat mesurat amb l'oscil·loscopi?*

Col·loqueu el selector d'acoblament d'entrada a la posició AC. Seguiu el mateix procediment que en **1)** i seleccioneu el mode AC que es representa amb el símbol d'alterna .

*Qüestió 2. Dibuixeu el senyal que apareix en la pantalla amb els dos modes d'acoblament DC i AC i justifiqueu l'efecte que produeix l'acoblament AC en la visualització el senyal de calibrat*

Els oscil·loscopis digitals habitualment disposen de la tecla **AUTOSET** que ajusta internament els controls de forma automàtica. Aquesta tecla és molt útil per fer una primera visualització quan volem mesurar un senyal desconegut. Comproveu que aquesta tecla permet una correcta visualització del senyal de calibrat.

## 2.- VERIFICACIÓ DEL GENERADOR DE FUNCIONS (GF)

Engegueu el GF polsant el comandament **LINE**.



Connecteu la sortida principal del GF al canal 1 de l'oscil·loscopi mitjançant un cable coaxial amb connectors BNC als dos extrems. Ajusteu l'oscil·loscopi al mode d'acoblament **DC** i el disparament automàtic **AUTO** seguint el mateix procediment de l'apartat anterior. Poseu la sensibilitat vertical en 0,5 V/div i la base de temps en 250  $\mu$ s/div. Ajusteu l'amplitud i la freqüència del GF per obtenir exactament 2 V de pic a pic i 1 kHz de freqüència.

Seleccioneu una forma d'ona sinusoidal amb el selector de forma d'ona **FUNCTION**. Ajusteu la freqüència del senyal de sortida 1 kHz amb el selector de rang i el comandament rotatori. Ajusteu l'amplitud del senyal a 2 V de pic a pic mitjançant el comandament **AMPLITUDE**. Comproveu que el botó de nivell de contínua **DC OFFSET** no està activat (ha d'estar en la posició OFF).

Comproveu com varia el senyal amb els controls del GF relatius a la forma d'ona, amplitud, freqüència, nivell de contínua, sortida TTL i cicle de treball. Mesureu la màxima freqüència que proporciona el GF del vostre lloc de treball.

*Qüestió 3. Valor màxim de la freqüència mesurat a l'oscil·loscopi. El GF compleix les especificacions donades pel fabricant?*

## 3.- CONTROL DEL DISPARAMENT DE L'OSCIL·LOSCOPI

Ajusteu la sortida del GF a un senyal triangular de 4 V de pic a pic i 1 kHz. Poseu la sensibilitat vertical de l'oscil·loscopi en la posició de 0,5 V/div. Seleccioneu el mode de disparament de l'oscil·loscopi seguint el procediment del punt 2) del primer apartat. Primer visualitzeu el senyal en el mode **AUTO** i després en el mode **NORMAL**. Verifiqueu el funcionament dels controls del disparament: del nivell (comandament **LEVEL** de la part de **TRIGGER**) i del pendent (cal polsar la tecla **MENU** de **TRIGGER**, polsar la tecla **F5** de **Flanco/Acoplo**, polsar la tecla **F1** de **Flanco** i finalment polsar un altre cop **F1** per seleccionar el pendent positiu  o negatiu ).

*Qüestió 4. Dibuixeu la visualització en la pantalla quan es dispara amb el mode AUTO i quan es dispara amb el mode NORMAL amb pendent negativa i un nivell de disparament al voltant de -1 V.*

Feu disminuir l'amplitud del senyal de sortida del GF fins que ocupi molt menys d'una divisió vertical. Compareu el funcionament dels modes de disparament normal i automàtic en aquestes condicions.

*Qüestió 5. Que succeeix amb les visualitzacions en la pantalla? Justifiqueu els resultats.*

## 4.- MESURA DE LA RESISTÈNCIA INTERNA DEL GENERADOR DE FUNCIONS

Per mesurar la resistència de sortida del GF, seleccioneu un senyal sinusoidal de 1 kHz i d'una amplitud d'uns pocs volts. Mesureu amb l'oscil·loscopi la tensió de sortida en circuit obert, és a dir, quan la sortida es connecta directament a l'oscil·loscopi. Connecteu després a la sortida del GF una resistència de 47  $\Omega$  i mesureu la nova amplitud. A partir d'aquesta mesura, i fent servir el circuit equivalent de la figura 4.11, calculeu la resistència de sortida  $R_o$  del generador de funcions.

*Qüestió 6. Indiqueu el valor calculat de la resistència de sortida del GF. Compleix les especificacions del fabricant?*



## **PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI A1-S101**

### **1.- VERIFICACIÓ DEL SENYAL DE CALIBRAT DE L'OSCIL-LOSCOPÍ**

El primer senyal que visualitzareu i mesurareu amb el **canal I** de l'oscil·loscopi és el senyal de calibrat que disposa el propi instrument. Aquest senyal és accessible en un petit terminal en forma de pestanya metàl·lica que es troba a l'esquerra sota la pantalla.

Engegueu l'oscil·loscopi polsant en botó **POWER**.

Feu que la línia lluminosa de la pantalla sigui ben visible i fina ajustant els botons de intensitat **INTENS** i d'enfocament **FOCUS**.

Com que es vol que la línia central en sentit vertical correspongui a 0 V , ajusteu la traça de l'oscil·loscopi al centre de la pantalla de la següent manera:

- 1) Seleccioneu el mode **GD** d'acoblament del canal vertical d'entrada. Heu de polsar la tecla **GD** que es troba a la dreta del connector BNC d'entrada.
- 2) Poseu el disparament en mode automàtic. Heu d'anar a la part de disparament **TRIG. MODE** i deixar la tecla **AT/NM** sense polsar.
- 3) Amb el botó **Y-POS**, ajusteu la línia al centre de la pantalla, i amb el **X-POS**, feu que comenci a l'extrem esquerra de la retícula.

Un cop centrada la traça, passeu l'acoblament d'entrada a la posició DC. Heu de desactivar la tecla **GD** i polsar la tecla contigua **AC-DC**.

Connecteu el senyal de calibrat que proporciona l'oscil·loscopi al canal I utilitzant un cable coaxial amb un connector BNC en un extrem i dos terminals banana en l'altre. Podeu fer servir en el connector banana vermell una pinça cocodrill o bé un petit fil de connexió amb la punta pelada per fer contacte elèctric amb la pestanya metàl·lica de la sortida del senyal de calibrat. El connector banana negre no cal connectar-lo ja que la massa de la sortida del senyal de calibrat està unida internament amb la massa del connector BNC del canal d'entrada.

Verifiqueu que només es visualitza en la pantalla el canal I. Per seleccionar el canal I cal que la tecla **CHI/II** no estigui polsada. Quan la tecla **CHI/II** està polsada es visualitza en pantalla el canal II i si, a més, la tecla **DUAL** està també polsada es visualitzen tots dos canals.

Ajusteu el control de sensibilitat vertical **VOLTS/DIV** de forma que el senyal ocupi el màxim nombre de divisions verticals, i la base de temps **TIME/DIV** de forma que es vegin en la pantalla més de dos cicles del senyal.

Mesureu l'amplitud i freqüència del senyal de calibrat. Comproveu que compleix les especificacions que apareixen en el manual de l'instrument.

*Qüestió 1: Quina és la forma, amplitud i freqüència del senyal de calibrat mesurat amb l'oscil·loscopi?*

Col·loqueu el selector d'acoblament d'entrada a la posició AC polsant la tecla **AC-DC**.

*Qüestió 2. Dibuixeu el senyal que apareix en la pantalla amb els dos modes d'acoblament DC i AC i justifiqueu l'efecte que produeix l'acoblament AC en la visualització el senyal de calibrat*

### **2.- VERIFICACIÓ DEL GENERADOR DE FUNCIONS (GF)**

Engegueu el GF polsant el comandament **LINE**.

Connecteu la sortida principal del GF al canal I de l'oscil·loscopi mitjançant un cable coaxial amb connectors BNC als dos extrems. Ajusteu l'oscil·loscopi al mode d'acoblament **DC** i el

disparament automàtic **AT** seguint el mateix procediment de l'apartat anterior. Poseu la sensibilitat vertical en 0,5 V/div i la base de temps en 0,2 ms/div. Ajusteu l'amplitud i la freqüència del GF per obtenir exactament 2 V de pic a pic i 1 kHz de freqüència.

Seleccioneu una forma d'ona sinusoidal amb el selector de forma d'ona **FUNCTION**. Ajusteu la freqüència del senyal de sortida 1 kHz amb el selector de rang i el comandament rotatori. Ajusteu l'amplitud del senyal a 2 V de pic a pic mitjançant el comandament **AMPLITUDE**. Comproveu que el botó de nivell de contínua **DC OFFSET** no està activat (ha d'estar en la posició OFF).

Comproveu com varia el senyal amb els controls del GF relatius a la forma d'ona, amplitud, freqüència, nivell de contínua, sortida TTL i cicle de treball. Mesureu la màxima freqüència que proporciona el GF del vostre lloc de treball.

*Qüestió 3. Valor màxim de la freqüència mesurat a l'oscil·loscopi. El GF compleix les especificacions donades pel fabricant?*

### 3.- CONTROL DEL DISPARAMENT DE L'OSCIL-LOSCOPÍ

Ajusteu la sortida del GF a un senyal triangular de 2 V de pic a pic i 1 kHz. Poseu la sensibilitat vertical de l'oscil·loscopi en la posició de 0,5 V/div. Seleccioneu el mode de disparament de l'oscil·loscopi seguint el procediment del punt **2)** del primer apartat. Primer visualitzeu el senyal en el mode automàtic (tecla **AT/NM** sense polsar) i després en el mode normal (tecla **AT/NM** polsada). Verifiqueu el funcionament dels controls del disparament: del nivell de disparament (comandament **LEVEL**) i del pendent (tecla **SLOPE**).

*Qüestió 4. Dibuixeu la visualització en la pantalla quan es dispara amb el mode AUTO i quan es dispara amb el mode NORMAL amb pendent negativa i un nivell de disparament al voltant de -1 V.*

Feu disminuir l'amplitud del senyal de sortida del GF fins que ocupi molt menys d'una divisió vertical. Compareu el funcionament dels modes de disparament normal i automàtic en aquestes condicions.

*Qüestió 5. Que succeeix amb les visualitzacions en la pantalla? Justifiqueu els resultats.*

### 4.- MESURA DE LA RESISTÈNCIA INTERNA DEL GENERADOR DE FUNCIONS

Per mesurar la resistència de sortida del GF, seleccioneu un senyal sinusoidal de 1 kHz i d'una amplitud d'uns pocs volts. Mesureu amb l'oscil·loscopi la tensió de sortida en circuit obert, és a dir, quan la sortida es connecta directament a l'oscil·loscopi. Connecteu després a la sortida del GF una resistència de 47  $\Omega$  i mesureu la nova amplitud. A partir d'aquesta mesura, i fent servir el circuit equivalent de la figura 4.11, calculeu la resistència de sortida  $R_o$  del generador de funcions.

*Qüestió 6. Indiqueu el valor calculat de la resistència de sortida del GF. Compleix les especificacions del fabricant?*

Nom dels membres de l'equip:

Lloc de treball:

## PRÀCTICA 4. L'OSCIL·LOSCOPI I EL GENERADOR DE FUNCIONS

### FULL DE RESULTATS

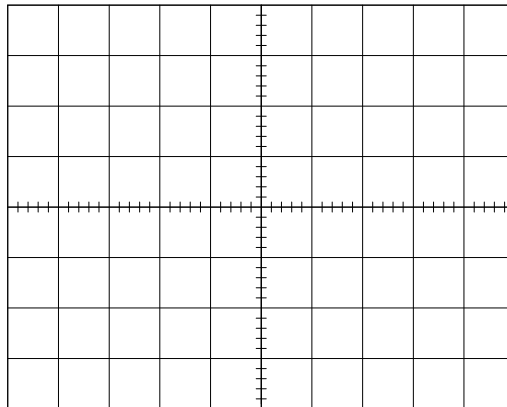
#### Qüestió 1:

*Forma d'ona:*

*Amplitud:*

*Freqüència:*

#### Qüestió 2:



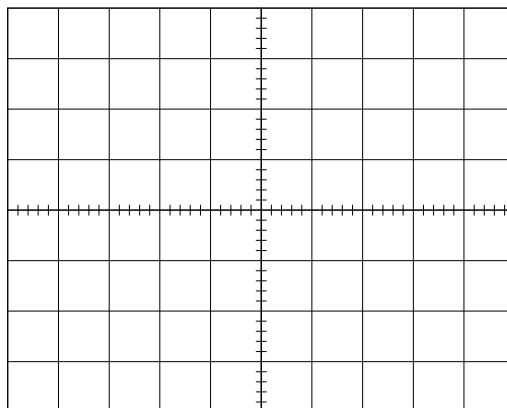
*Justificació dels resultats:*

#### Qüestió 3:

*Freqüència màxima:*

*Compleix les especificacions del fabricant?*

#### Qüestió 4:



#### Qüestió 5:

*Efecte en la pantalla:*

*Justificació:*

#### Qüestió 6:

*Resistència de sortida:  $R_o$*

*Compleix les especificacions del fabricant?*

## PRÀCTICA 5. EL DÍODE (1): MODEL DE TRAMS LINEALS

L'objectiu d'aquesta pràctica és presentar a l'estudiant un dispositiu electrònic bàsic, el díode. Es tractaran tant els díodes que s'utilitzen per convertir un senyal de corrent altern en corrent continu, els anomenats rectificadors, com els que s'utilitzen per generar senyals lluminoses, els LED's. També s'estudiaran els díodes que s'utilitzen per establir un nivell de tensió continu en els circuits electrònics, els díodes zener. Per modelar aquests dispositius es farà servir en aquesta pràctica un model denominat de trams lineals. A la part experimental es mesurarà la tensió de colze i la tensió zener de diversos díodes, que són els paràmetres més significatius d'aquest model.

### 5.1. El díode

El díode és un dispositiu electrònic de dos terminals, anomenats ànode i càtode, que té la propietat fonamental de deixar passar el corrent en el sentit ànode a càtode i de bloquejar el seu pas en sentit contrari. Degut aquest comportament es diu que és un dispositiu no lineal. A la figura 5.1 es representa el símbol d'aquest dispositiu.

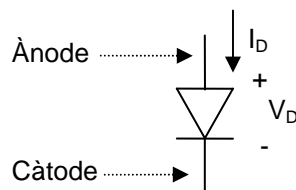


Figura 5.1.- Símbol del díode

El díode fou el primer dispositiu electrònic que es va inventar i es considera que amb ell va néixer l'electrònica. Fou creat al 1904 pel científic americà J.A. Fleming i va ser utilitzat per detectar ones de radio. Era un tub de vidre amb varis elèctrodes metàl·lics en el seu interior i dins del qual es feia el buit. Aquesta tecnologia, anomenada de tubs de buit va durar més de cinquanta anys i fou substituïda per la tecnologia moderna basada en semiconductors. Els díodes de semiconductor també s'anomenen díodes de unió PN, ja que s'utilitza la unió entre un semiconductor P i un N. Un semiconductor s'anomena de tipus P quan dominen les càrregues positives generades per la presència de determinats àtoms diferents del semiconductor, mentre que es denomina de tipus N si dominen les càrregues negatives generades per un altre tipus d'àtoms. La part P constitueix l'ànode, mentre que la part N és el càtode.

El símil d'una vàlvula hidràulica sol ajudar a donar una idea intuïtiva d'aquest comportament. Considereu la figura 5.2 que mostra un tros de tub pel que circula aigua i que conté una vàlvula en el seu interior. Aquesta vàlvula no és més que una peça circular mòbil i subjecta al tub per la seva part inferior. Quan l'aigua circula en el sentit de esquerra a dreta, l'aigua empeny la vàlvula, que cedeix sense presentar cap resistència. Per el contrari, quan l'aigua vol circular en sentit contrari, l'empeny contra l'anella interior que redueix el diàmetre del tub, tapa el pas, i no deixa circular aigua.

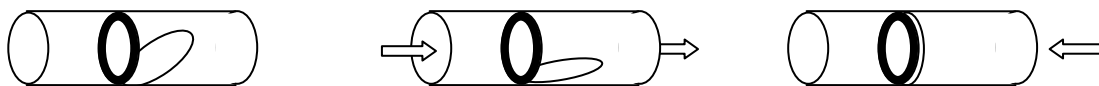


Figura 5.2.- Símil hidràulic d'un díode. La peça circular de l'interior del tub deixa passar l'aigua quan circula d'esquerra a dreta, però tapa el tub quan pretén circular al revés

El model més simple d'aquest dispositiu i que il·lustra més clarament el seu comportament és el del "díode ideal", representat a la figura 5.3. Per identificar el "díode ideal" hem enquadrat el símbol del díode en un rectangle. Quan el corrent travessa el dispositiu en el sentit directe, és a dir, d'ànode a càtode, el díode equival a un curtcircuit: deixa passar el corrent com si fós un conductor. Pel contrari, quan el corrent vol circular en sentit invers, de càtode a ànode, el díode equival a un circuit obert. Aquest comportament es representa en el pla  $I_D(V_D)$  per dos trams rectes: quan  $I_D$  és positiu el comportament del díode ve representat pel semieix d'ordenades positiu, mentre que quan  $I_D$  vol ser negatiu el díode ve representat pel semieix d'abscisses negatiu. En el primer cas, circula corrent sense haver-hi caiguda de tensió entre els terminals del díode, mentre que en el segon cas, la tensió negativa aplicada al díode no és capaç de fer circular corrent en sentit invers.

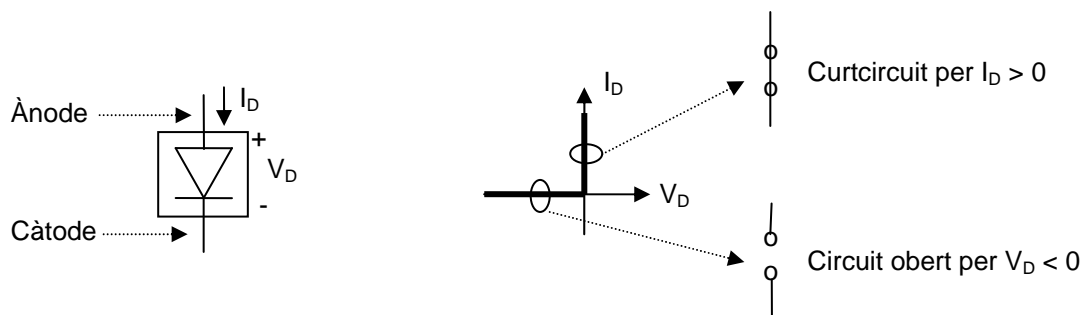


Figura 5.3.- Díode ideal, símbol i característica corrent tensió.

Els díodes reals aproximen aquest comportament, però presenten una petita caiguda de tensió entre els terminals quan el díode condueix (en el díodes fabricats amb silici, els més habituals, aquesta tensió és d'uns 0,7 V). En alguns casos, quan es treballa amb tensions elevades, aquesta caiguda es pot ignorar i el model ideal es pot considerar vàlid. Però en altres casos, quan es treballa amb senyals de petita amplitud, la caiguda en directa pot ser significativa i, aleshores, el model ideal és poc exacte i s'han de fer servir models més elaborats.

## 5.2.- Model de trams lineals del díode

Els díodes reals solen presentar una característica corrent tensió com la representada en la figura 5.4. Es permet el pas de corrents positives amb una petita caiguda de tensió i es bloqueja el pas de corrents negatives. Una forma d'aproximar aquest comportament és aproximar la corba real per dos trams lineals com els mostrats a la figura: un segment de recta pel tram de corrents positives, de pendent  $m$ , i un altre segment, un tros de l'eix d'abscisses, pel tram de bloqueig del corrent. Els dos segments es creuen a la tensió  $V_\gamma$ , que s'anomena tensió de colze o tensió llindar. Aquesta forma d'aproximar la corba es denomina model de trams lineals.

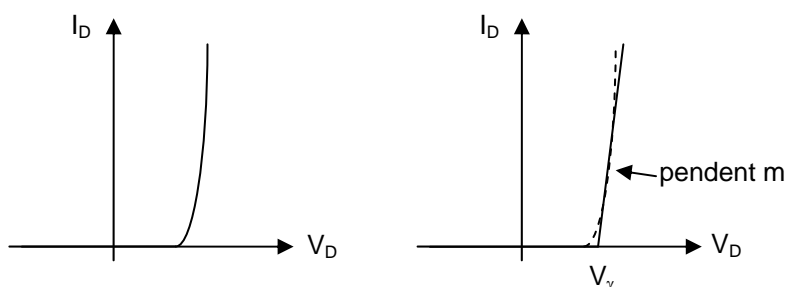


Figura 5.4.- Característica corrent tensió d'un díode real, i aproximació per trams lineals

El model de trams lineals es pot implementar amb un circuit senzill que conté un díode ideal, en sèrie amb una resistència  $R_s$  de valor  $1/m$ , i en sèrie amb una pila de valor  $V_\gamma$ , tal com mostra la figura 5.5. Quan el díode ideal condueixi serà un curtcircuit, i el corrent que circularà serà:

$$I_D = \frac{V_D - V_\gamma}{R_s} \quad (1)$$

Aquesta expressió només serà vàlida quan  $V_D$  sigui superior a  $V_\gamma$ , ja que en cas contrari  $I_D$  seria negatiu i en aquesta situació el díode ideal seria un circuit obert. Per tant, quan  $V_D$  sigui inferior a  $V_\gamma$  el corrent serà zero. D'aquesta forma, la característica  $I_D(V_D)$  del circuit és la dels dos trams lineals de la figura 5.4.

En la gran majoria d'aplicacions es pot negligir la resistència  $R_s$  d'aquest model, de forma que el model es simplifica a un díode ideal en sèrie amb la pila  $V_\gamma$ . Això és així perquè el pendent de la característica del díode és tan elevat que el seu invers és una resistència d'uns pocs ohms. Com les resistències típiques dels circuits electrònics són de l'ordre dels KOhm, es pot ignorar el petit valor de la resistència del díode. Si no es diu res, prendrem per defecte el valor d'aquesta resistència com a zero. En definitiva, quan el díode condueixi hi haurà una caiguda de tensió de valor  $V_\gamma$  entre els seus terminals.

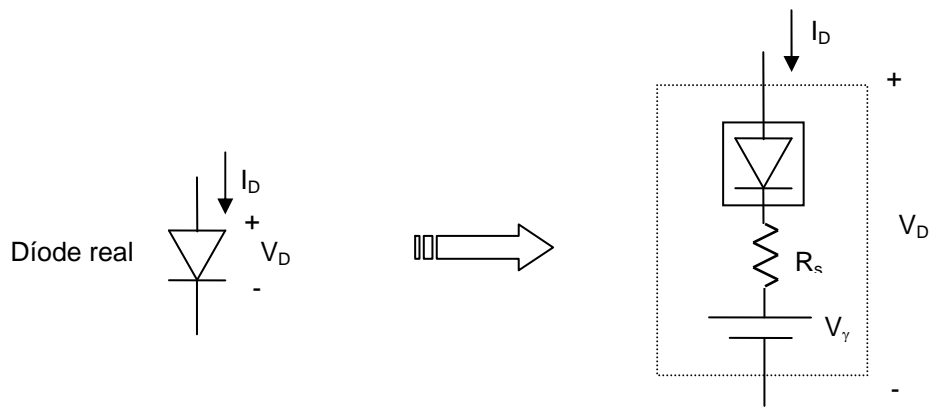


Figura 5.5.- Circuit del model per trams lineals

### 5.3.- Díodes rectificadors i díodes emissors de llum (LED's)

Hi ha molts tipus de díodes i es fan servir per molt diverses aplicacions. Una utilització molt freqüent és en circuits rectificadors, que converteixen un corrent altern en un corrent continu. Els díodes rectificadors formen part d'un circuit que converteix l'energia elèctrica subministrada en forma de corrent altern per la xarxa d'energia elèctrica a energia elèctrica en forma de corrent continu que és necessària per alimentar la majoria d'equips electrònics. Els díodes que s'utilitzen per fer aquesta aplicació solen ser fabricats amb silici, el semiconductor més emprat en l'electrònica moderna.

Una altra aplicació dels díodes és la de generar un senyal lluminós quan condueixen. Els díodes que realitzen aquesta funció es denominen LED (Light-Emitting Diode). Són fabricats amb semiconductors diferents del silici, com són l'arseniur de gal-li o el fosfur de gal-li. Aquests materials generen llum quan condueixen, cosa que no fa el silici, que genera calor, i no fan llum en polarització inversa. La tensió de colze sol estar entre 1 i 2 V. El seu símbol és el del díode però s'hi afegeix una fletxa perpendicular al símbol per indicar que "surten" llum. Un cas especial és el díode làser, que genera llum com el LED, però la llum generada té unes característiques especials (coherència) que no té la llum del LED.

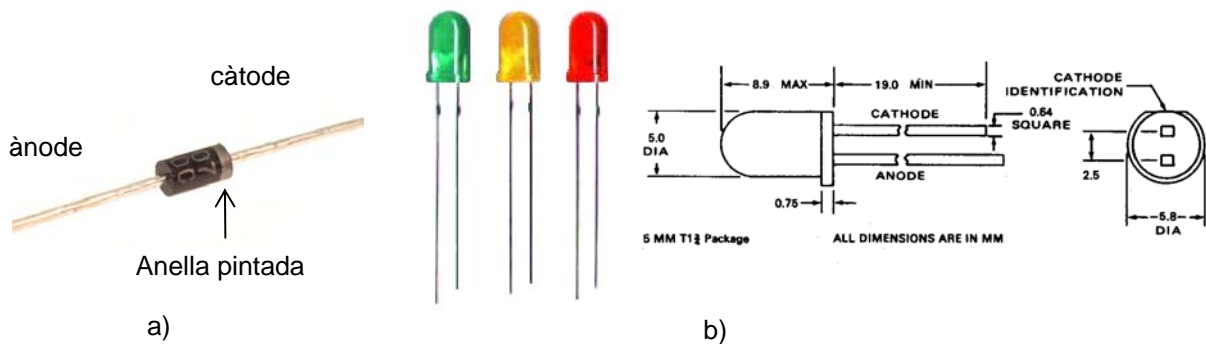


Figura 5.6.- a) Exemple de díode rectificador (1N4007) amb l'anella pintada sobre el cos per identificar el càtode. b) exemples de LED's de diversos colors, amb l'esquema per identificar el càtode, que és el terminal més curt i al costat de la part plana.

### 5.4.- Ruptura dels díodes en polarització inversa

El comportament del díode descrit fins aquest moment només representa una part del seu funcionament. Tots els díodes acaben deixant circular un corrent invers, és a dir negatiu, si s'augmenta suficientment la tensió inversa que se'ls hi aplica. Quan circula pel díode aquest corrent negatiu es diu que el díode entra en ruptura. I si no hi ha algun mecanisme que limiti el corrent invers el díode, aquest es destruirà degut a la dissipació d'una potència excessiva. La tensió a la qual el díode comença a entrar en ruptura és  $-|V_z|$  denominada tensió de ruptura o tensió Zener, on el subíndex "z" prové de la paraula Zener, que és l'efecte que sol explicar el mecanisme físic que provoca la ruptura. La figura 5.7 il·lustra aquest funcionament.

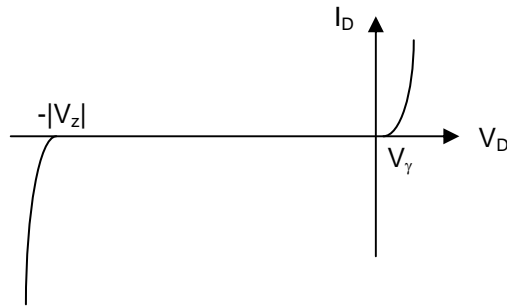


Figura 5.7.- Característica corrent tensió d'un díode mostrant la regió de ruptura

Si la tensió  $|V_z|$  és molt més gran que les tensions presents en el circuit que conté el díode, aquest mai arribarà a la ruptura i aleshores el seu comportament serà el descrit en els apartats anteriors: condueix en directa i bloqueja el corrent en inversa. Però si la tensió inversa aplicada al díode és més negativa que  $-|V_z|$ , el díode deixarà passar corrent negatiu i s'haurà d'analitzar el comportament del circuit en aquesta situació.

### 5.5.- El díode zener

El díodes zener són un tipus de díodes especialment dissenyats per treballar a la regió de ruptura. El seu símbol és mostrat a la figura 5.8. El comportament d'aquests díodes s'aproxima per un model amb tres trams lineals: el tram de conducció directa, el tram de bloqueig de corrent (com en els díodes rectificadors) i un tercer tram per la regió de ruptura. Aquest tram és similar al tram de directa, però capgirat per deixar passar un corrent negatiu. La figura 5.8 també inclou aquest model. Noteu que si el díode només treballa amb tensions inverses es pot eliminar el tram directa format per  $R_s$  i  $V_\gamma$ , i considerar només el tram de bloqueig i el tram de ruptura format per  $|V_z|$  i  $R_z$ .

Com que el tram de ruptura és també molt vertical, el valor de  $R_z$  és petit, i sovint és pot negligir aquesta resistència al comparar-la amb les altres resistències del circuit. Si aquest fos el cas, aleshores, al circular corrent invers el díode presentaria entre els seus terminals una tensió constant de  $-|V_z|$ . Els circuits electrònics solen utilitzar aquesta propietat per establir un nivell de continua dins del circuit. Es comercialitzen díodes amb molts valors de  $V_z$ .

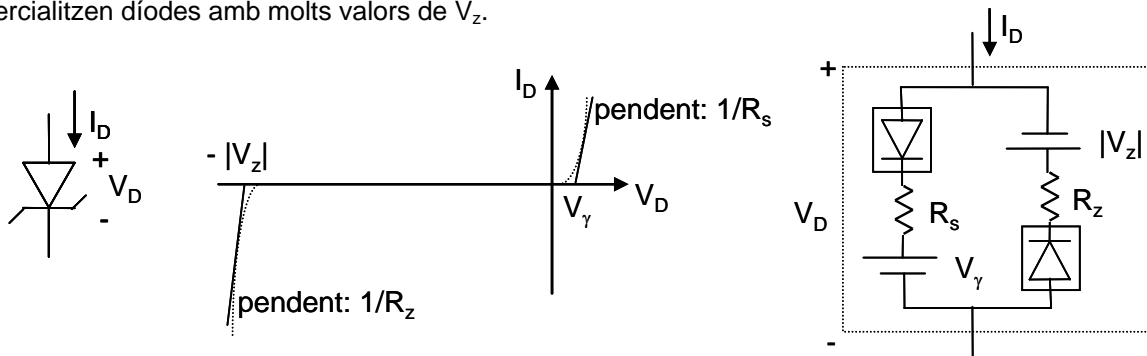


Figura 5.8.- Símbol i model de trams lineals del díode zener.

### ESTUDI PREVI

- 1.- Considera el circuit de la figura 5.9. Calcula  $I_D$  en funció de  $V_i$  suposant que el díode és ideal i que  $V_i$  és una tensió constant i positiva. Després calcula  $V_o$  en funció del valor trobat de  $I_D$ , i finalment troba  $V_D$  restant  $V_i$  i  $V_o$ . Repeteix els càlculs per valors de  $V_i$  negatius.
- 2.- Repeteix l'exercici anterior suposant el model de trams lineals del díode amb  $V_\gamma = 0,7$  V i  $R_s = 10$  Ohms.
- 3.- Fes una taula en el full de càlcul amb les columnes  $V_i$ ,  $I_D$ ,  $V_o$  i  $V_D$  i considera inicialment un valor  $V_i = 5$  V. Repeteix els càlculs per valors de  $V_i$  de 4 V, 3 V,... fins arribar a -5V en salts de 1 V. Representa gràficament  $I_D$  en funció de  $V_D$  i  $V_o$  en funció de  $V_D$  fent servir el model de l'exercici 2.
- 4.- Si el generador  $V_i$  suministra una tensió en forma de senyal triangular de 10 V de pic, sense offset, i de 1 kHz de freqüència. Suposant el díode ideal, dibuixa les tensions  $V_i$  i  $V_o$  en funció del temps en dos cicles d'aquests senyals.

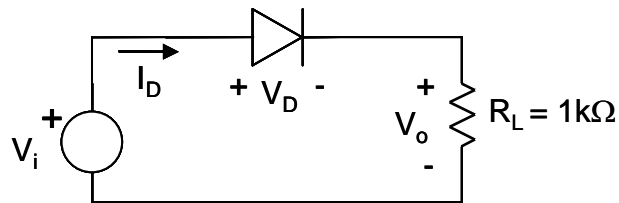


Figura 5.9.- Circuit per obtenir la característica corrent tensió

## PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI

### MESURA DE LA CARACTERÍSTICA $I(V)$ D'UN DIODE RECTIFICADOR

Munteu a la placa de connexions el circuit de la figura 5.9 amb la font d'alimentació com a generador  $V_i$  limitant el corrent a 50 mA, el díode rectificador 1N4007 i una resistència de  $R_L$  de 1 kΩ. Ajusteu la font d'alimentació a 5 V. Mesureu amb el multímetre en mode DC la tensió  $V_i$  i la tensió  $V_o$ . Anoteu aquests valors en un full de càlcul, afegint-hi una tercera columna amb el valor de  $V_D$  (que serà  $V_i - V_o$ ) i una quarta columna per  $I_D$  (que serà  $V_o/1k\Omega$ ). Repetiu les mesures per tensions  $V_i$  entre 5 v i -5 V amb passos de 1 V, invertint els terminals de la font pel valors negatius de la tensió.

*Qüestió 1.- Representeu la gràfica  $I_D(V_D)$ . Quin és aproximadament el valor de  $V_f$ ?*

*Qüestió 2.- Representeu la característica de transferència  $V_o(V_i)$ . Justifiqueu la gràfica.*

### MESURA DE LA CARACTERÍSTICA $I(V)$ DE LED's

Munteu el circuit 5.9 substituint el díode rectificador pel LED vermell. Ajusteu  $V_i$  fins que circulin pel LED 10 mA (es a dir, que hi hagi una caiguda de 10 V en  $R_L$ ). Després invertiu la polaritat de la font d'alimentació.

*Qüestió 3.- Justifiqueu els resultats d'emissió de llum del LED*

Mesureu la tensió de colze del LED vermell fent que circuli per ell 10 mA. Repetiu la mesura pel LED verd i pel LED groc.

*Qüestió 4.- Indiqueu les tensions de colze dels LED's vermell, verd i groc*

### RECTIFICACIÓ D'UN SENYAL ALTERN

Munteu el circuit de la figura 5.9 (amb el díode rectificador 1N4007) substituint la font d'alimentació pel generador de funcions seleccionant un senyal triangular de 10 V de pic, sense offset i 1 kHz de freqüència. Connecteu  $V_i$  al canal 1 de l'oscil·loscopi i  $V_o$  al canal 2.

*Qüestió 5.- Dibuixeu els senyals que es veuen a la pantalla, i justifiqueu la seva forma*

### MESURA DE LA CARACTERÍSTICA $I(V)$ D'UN DIODE ZENER

Repetiu el primer apartat de la part experimental d'aquesta pràctica substituint el díode 1N4007 pel díode zener BZX79 de 5,1 V, fent variar la tensió  $V_i$  entre -10 V i 5 V en passos de 1V.

*Qüestió 6.- Representeu la gràfica  $I_D(V_D)$ . Quins són els valors de  $V_f$  i de  $V_z$ ?*

*Qüestió 7.- Representeu la funció de transferència  $V_o(V_i)$ . Justifiqueu la seva forma.*



## **FULL DE RESULTATS. Pràctica 5**

Nom dels components de l'equip:

Lloc de treball:

### **Mesura de la característica I(V) d'un díode rectificador**

Qüestió 1:  $V_\gamma =$

*Representeu la característica I(V) del díode*

Qüestió 2: *Representeu la característica de transferència  $V_o(V_i)$*

### **Mesura de la característica I(V) d'un LED**

Qüestió 3.- *Justifiqueu els resultats d'emissió de llum del LED*

Qüestió 4.- *Indiqueu les tensions de colze dels LED's vermell: , verd: i groc:*

### **Rectificació d'un senyal altern**

Qüestió 5.- *Dibuixeu els senyals que es veuen a la pantalla, i justifiqueu la seva forma*

### **Mesura de la característica I(V) d'un díode zener**

Qüestió 6.- *Quins són els valors de  $V_\gamma$  i de  $V_z$ ?*

*Representeu la gràfica  $I_D(V_D)$ .*

Qüestió 7.- *Representeu la funció de transferència  $V_o(V_i)$ . Justifiqueu la seva forma.*

## PRÀCTICA 6. EL DÍODE (2): MODEL EXPONENCIAL

L'objectiu d'aquesta pràctica és presentar i mesurar el model exponencial del díode. Aquest model es basa en la denominada equació del díode en la que els seus paràmetres tenen una relació directa amb les característiques del material amb el que s'ha fabricat i amb la temperatura de funcionament del dispositiu. Es treballarà especialment la representació de la característica corrent tensió en l'escala lineal i en l'escala semilogarítmica, i s'utilitzarà el full de càlcul per ajustar els punts mesurats a una recta que representi aquests punts amb un error quadràtic mínim.

### 6.1. Model exponencial del díode

El díode fabricat amb semiconductors també se sol modelitzar mitjançant una expressió anomenada "equació del díode":

$$I_D = I_s \left[ \exp\left(\frac{V_D}{\eta V_t}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

on  $I_D$  és el corrent que travessa el díode,  $V_D$  la tensió aplicada entre els seus terminals,  $V_t$  un paràmetre anomenat tensió tèrmica que depèn de la temperatura del díode, i  $\eta$  i  $I_s$  són dos paràmetres específics per cada díode denominats factor de idealitat i corrent invers de saturació respectivament. Degut a la presència de l'exponencial a l'equació, aquesta expressió també es denomina model exponencial del díode.

Observeu en l'expressió (1) que si  $V_D$  és positiva i molt més gran que  $\eta V_t$  el valor de l'exponencial és molt superior a la unitat i, per tant la unitat es pot negligir, i el corrent del díode varia exponencialment amb la tensió. Pel contrari, si  $V_D$  és negatiu i de valor absolut molt més gran que  $\eta V_t$ , (unes dècimes de volt) el valor de l'exponencial és molt inferior a la unitat i aleshores el corrent del díode es pot aproximar per  $-I_s$ . Quan  $V_D$  és negatiu es diu que el díode està polaritzat en inversa. Per això el paràmetre  $I_s$  s'anomena corrent invers de saturació, ja que  $-I_s$  és l'asíptota a la que tendeix  $I_D$  en polarització inversa. La figura 6.1 representa l'equació del díode en inversa per una  $I_s$  de  $10^{-15}$  A, i uns valors de  $\eta$  i de  $V_t$  de 1 i de 0,025 V respectivament. Noteu, però, que un valor de  $10^{-15}$  A és indistingible de zero quan es treballa amb corrents de l'ordre dels miliampers, típics dels circuits electrònics de senyal.

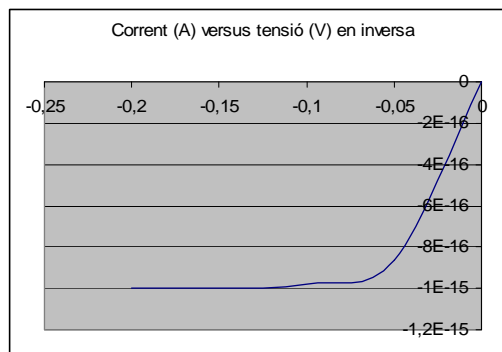


Figura 6.1.- Representació en inversa de  $I_D = 10^{-15} \cdot [\exp(V_D/0.025) - 1]$

### 6.2. Model exponencial i model de trams lineals

Un valor típic de  $I_s$  en díodes de silici és  $10^{-15}$  A, i els corrents habituals en molts circuits electrònics de senyal són de l'ordre dels miliampère. Per tant, l'expressió (1) indica que  $\exp(V_D/\eta V_t)$  ha de ser de l'ordre de  $10^{12}$  per aconseguir que  $I_D$  sigui de l'ordre de  $10^{-3}$ . Si el factor de idealitat fos la unitat, això implicaria un valor de  $V_D$  igual a 0,7 V.

És immediat comprovar que per valors de  $V_D$  una mica inferiors a 0,7 el corrent és molt inferior a 1 mA, que en moltes aplicacions es podria aproximar per zero, mentre que per valors lleugerament superiors a 0,7 és molt superior a 1 mA. La figura 6.2 és una representació realitzada a través del full de càlcul de l'equació del díode per aquests valors.

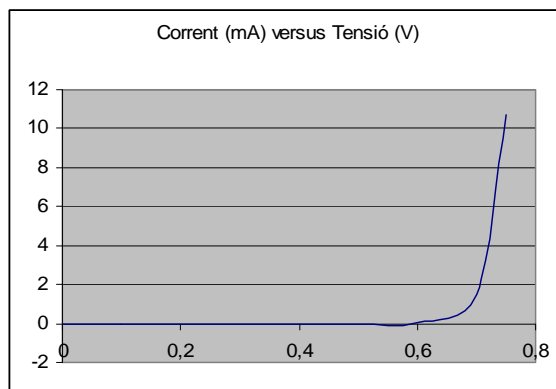


Figura 6.2.- Representació lineal de  $I_D = 10^{-15} \cdot [\exp(V_D/0.025) - 1]$

Aquesta representació posa de manifest que l'aproximació del model exponencial és molt similar a la del model per trams lineals presentada en la pràctica anterior. En aquest exemple, la tensió llindar o de colze seria 0,7 V i el tram de conducció es podria aproximar per una recta gairebé vertical, mentre que el tram de tall seria l'eix d'abscisses per tensions inferiors a 0,7 V. Observeu que el principal paràmetre del model per trams lineals, la tensió de colze  $V_\gamma$ , la podríem obtenir del model exponencial calculant la tensió necessària per obtenir un determinat corrent de referència,  $I_{Dref}$ , que en aquest exemple hem triat com 1 mA:

$$I_{Dref} = I_s \left[ \exp\left(\frac{V_\gamma}{\eta V_t}\right) - 1 \right] \Rightarrow V_\gamma \cong \eta V_t \cdot \ln\left(\frac{I_{Dref}}{I_s}\right) \quad (2)$$

L'expressió (2) ens permet saber com variarà  $V_\gamma$  segons sigui el corrent de referència i segons siguin  $I_s$  i la temperatura, cosa que el model de trams lineals no permetia estimar.

### 6.3. Paràmetres del model exponencial

El paràmetre principal del model exponencial del díode és  $I_s$ . El factor d'idealitat  $\eta$  és un paràmetre secundari que ens permet ajustar les corbes dels díodes reals amb l'equació (1), les quals estan afectades per efectes secundaris que desvien el díode del comportament ideal. La tensió tèrmica  $V_t$  no és més que:

$$V_t = \frac{k_B T}{q} \quad (3)$$

on  $k_B$  és la constant de Boltzmann,  $T$  la temperatura del díode en graus Kelvin, i  $q$  la càrrega de l'electró en Coulomb. Com que resulta que les unitats d'aquesta expressió són Volt, s'anomena tensió tèrmica, i es pot comprovar que si  $T$  és 300 graus Kelvin (27 ° centígrads),  $V_t$  val aproximadament 0,025 V.

El corrent invers de saturació  $I_s$  depèn de les característiques específiques de fabricació del díode. Dins d'aquestes característiques la més important és un dels paràmetres del semiconductor utilitzat: el valor de l'energia de la seva banda prohibida  $E_g$ :

$$I_s = \alpha \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{k_B T}\right) \quad (4)$$

El silici, que és el semiconductor més utilitzat en la fabricació dels dispositius electrònics, té una  $E_g$  de 1,1 eV, i això sol conduir a una  $I_s$  de l'ordre de  $10^{-15}$  A i a una  $V_\gamma$  de 0,7 V. Però altres semiconductors, com els utilitzats per fabricar díodes electroluminiscents (LED), solen tenir una  $E_g$  del ordre de 1,5 eV, la qual cosa condueix a  $I_s$  del ordre de  $10^{-25}$  A i a  $V_\gamma$  del ordre de 1,5 V.

El corrent  $I_s$  depèn de la temperatura a través de la  $T$  de l'expressió (4). Quan  $T$  augmenta  $I_s$  augmenta amb caràcter exponencial. L'expressió (2) mostra que l'increment de  $I_s$  provoca la disminució de  $V_\gamma$ , malgrat

l'augment de  $V_f$  que és lineal. En molts díodes la variació de la tensió de colze ve donada aproximadament per:

$$\frac{dV_f}{dT} = -2 \text{ mV / } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

es a dir, disminueix 2 mV per cada increment d'un grau centígrad de la temperatura del díode.

#### 6.4. Representació lineal i semilogarítmica

La figura 6.2 mostra la representació de l'equació del díode en una escala lineal, és a dir, tant en l'eix abscisses com en el d'ordenades la distància d'un valor a l'origen és proporcional al seu valor absolut. Aquest tipus de representacions en escala lineal són les que s'utilitzen gairebé sempre en les representacions gràfiques de funcions o resultats.

La representació lineal, malgrat que és molt útil, té però alguns inconvenients. Un d'ells és que ens permet visualitzar un marge molt petit de valors del corrent (en la figura 6.2, per exemple, podem veure amb cert detall un interval d'uns 10 mA). Una alternativa que permet visualitzar un marge de valors molt més gran és la representació semilogarítmica, que consisteix en representar el  $\log(I_D)$  en funció de  $V_D$ .

En polarització directa, si  $V_D$  és superior a 0,1 V, es pot negligir el "-1" de l'equació del díode. Fent aquesta aproximació, i prenent logaritmes a l'equació (1), resulta:

$$\log(I_D) = \log(I_s) + \frac{\log(e)}{\eta V_t} \cdot V_D \quad (6)$$

La funció  $\log(I_D)$  es, per tant, una recta de pendent  $[\log(e)/\eta V_t]$  i que intersecta l'eix d'ordenades en  $\log(I_s)$ . A la figura 6.3 es representa en escala semilogarítmica la mateixa equació que la representada en escala lineal a la figura 6.2. En aquesta gràfica cal observar que a l'eix d'ordenades hi figura  $\log(I_D)$ . Si  $I_D$  val 1 A el seu logaritme és zero, i si val 1 mA el seu logaritme és -3. Per tant, la gràfica ens mostra valors de  $10^{-15}$  A fins a valors de  $10^2$  A: 17 ordres de magnitud! Observeu que en aquesta gràfica l'interval de 1 mA a 10 mA és una part molt petita de la gràfica. Una segona observació; la gràfica no és vàlida per valors de  $V_D$  inferiors a 0,1 V, ja que s'ha negligit el "-1" de l'equació del díode. En realitat, per  $V_D$  igual a zero, el corrent és zero, i el seu logaritme tendria a menys infinit. L'extrapolació de la recta per valors inferiors a 0,1 V ens permet determinar el valor de  $I_s$ , que en aquest exemple és  $10^{-15}$ .

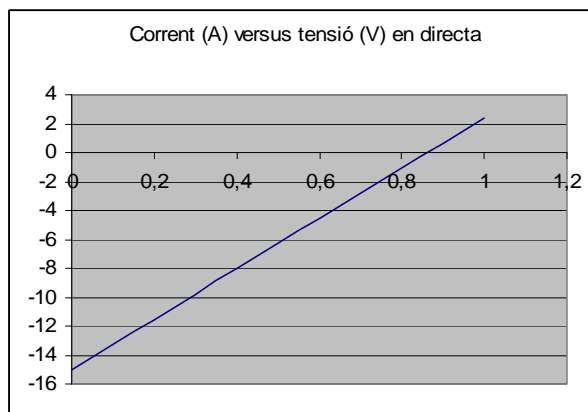


Figura 6.3.- Representació semilogarítmica de  $I_D = 10^{-15} \cdot [\exp(V_D/0.025) - 1]$

L'equació del díode que s'acaba de representar a la figura 6.3 correspon a la d'un díode amb factor d'idealitat  $\eta$  igual a la unitat. Els díodes reals presenten trams en els que  $\eta$  és la unitat i altres en els que val 2. També sol haver-hi altres trams, normalment en valors elevats del corrent, en els que la característica s'aparta d'aquestes rectes. Aquestes desviacions respecte del model ideal són degudes a fenòmens secundaris, a efectes de "segon ordre". La figura 6.4 representa un exemple de característica d'un díode real. Noteu que els canvis en  $\eta$  només afecten al pendent dels segments representats (equació (6)). En

alguns casos els trams de pendent amb  $\eta$  igual a la unitat desapareix "engolida" pels trams de  $\eta$  igual a 2. Per això sol ser útil utilitzar un únic valor de  $\eta$  per tota la corba que l'aproximi en l'interval de corrents considerats.

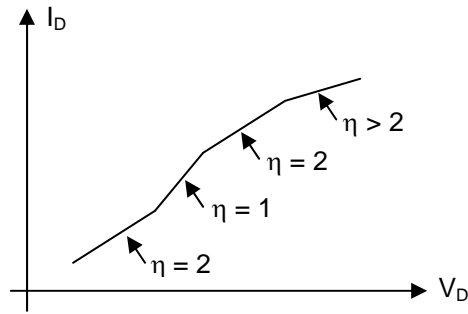


Figura 6.4.- Característica semilogarítmica d'un díode real

## ESTUDI PREVI

- 1.- Considereu un díode amb tensió de colze de 0,7 V per a corrents de l'ordre de 1 mA. Quin serà el valor del paràmetre  $I_s$ , suposant  $\eta$  igual a 1?
- 2.- Considereu el circuit de la figura 6.5. Suposeu una resistència R de 10 k $\Omega$ . Quin valor hauríem de posar en  $V_G$  perquè circulés un corrent de 1 mA?

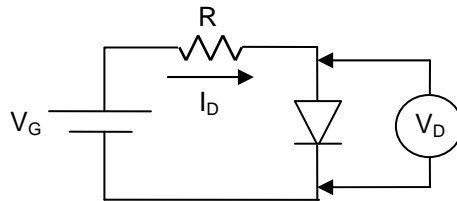


Figura 6.5.- Circuit per mesurar la característica corrent tensió del díode

- 3.- Considereu un valor de  $V_D = 0,6$  V. Trobeu el corrent  $I_D$  aplicant l'equació (1) amb el valor de  $I_s$  trobat a l'exercici 1 i suposant  $\eta = 1$ . Calculeu amb aquests valors de  $V_D$  i  $I_D$  el valor de  $V_G$ . Feu una taula en el full de càlcul amb una columna  $V_G$ , una columna  $V_D$  i una columna  $I_D$ . Anoteu els valors acabats de calcular. Repetiu aquest procediment incrementant cada vegada  $V_D$  en 10 mV fins arribar a 0,75 V. Quin serà aproximadament el valor de  $I_D$  quan  $V_G$  valgui 30 V?
- 4.- Representeu amb el full de càlcul la gràfica lineal  $I_D$  en funció de  $V_D$ . Ajusteu la corba exponencial de tendència. Quins són els paràmetres d'aquesta corba?
- 5.- Genereu a la taula una nova columna amb el valor de  $\log(I_D)$ , calculat automàticament pel full de càlcul. Representeu  $\log(I_D)$  en funció de  $V_D$ . Ajusteu la corba obtinguda amb una recta de tendència. Quins són els paràmetres d'aquesta recta? són coherents amb l'equació del díode que hem utilitzat?

## **PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI**

### MESURA DE LA CARACTERÍSTICA I(V) D'UN DIODE

Munteu el circuit de la figura 6.5 utilitzant el díode de silici 1N4148 i, en primer lloc, una resistència  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ . Mesureu amb el multímetre el valor real d'aquesta resistència i anoteu el resultat en una casella del full de càlcul. Fixeu un valor de  $V_G$  de 3 V en la font d'alimentació. La tensió en el díode  $V_D$  la mesurarem amb el multímetre i la tensió  $V_G$  la llegirem directament a la pantalla de la font. Amb les dades  $V_G$  i  $V_D$  farem una taula en el full de càlcul i a partir d'elles i del valor de  $R_1$  calcularem  $I_D$  de forma automàtica.

*Qüestió 1.- Quin són els valors de  $V_D$  i de  $I_D$  per a  $V_G$  igual a 3 V?*

Incrementeu el valor de  $V_G$  fins que el valor de  $V_D$  s'hagi incrementat aproximadament en uns 10 mV. Aneu incrementant progressivament el valor de  $V_G$  tal que es produeixin increments d'uns 10 mV en  $V_D$  fins arribar al màxim de la font (uns 30 V). Anoteu els valors mesurats a la taula del full de càlcul.

*Qüestió 2.- Quin són els valors de  $V_D$  i de  $I_D$  pel valor màxim de  $V_G$ ?*

Amb la finalitat d'incrementar el rang de mesura, reduïrem el valor de  $V_G$  i canviarem la resistència per un nou valor  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ . De nou incrementem  $V_G$ , a partir del valor que ens doni un resultat per a  $V_D$  lleugerament superior al que tenien amb  $R_1$  i el valor més alt de  $V_G$ . Noteu, però, que no és convenient augmentar excessivament el valor del corrent  $I_D$ , ja que aleshores el díode s'escalfarà i l'augment de temperatura canviarà la gràfica, ja que  $I_s$  i  $V_t$  seran majors. A efectes pràctics no farem servir corrents superiors a 3 mA.

*Qüestió 3.- Quins són els valors de  $V_D$  i de  $I_D$  pel valor màxim de  $V_G$  i la nova resistència?*

*Qüestió 4.- Indiqueu l'interval de corrents mesurats. Que passaria en les condicions de mesura si augmentem molt el corrent? Quins efectes tindria un augment de la temperatura del díode sobre el corrent mesurat?*

### TRACTAMENT DE LES DADES EXPERIMENTALS

Amb la taula de dades de  $V_D$  i  $I_D$  confeccionarem la gràfica lineal corresponent ( $V_D$  en abscisses i  $I_D$  en ordenades). Afegiu en aquest gràfica la línia de tendència exponencial i obtingueu els seus paràmetres.

*Qüestió 5.- Quins són els paràmetres de la línia exponencial d'ajust proporcionats pel full de càlcul?*

Afegiu a la taula del full de càlcul una nova columna en la que es calcularà, també de manera automàtica, el logaritme decimal de  $I_D$ . Confeccionem ara una nova gràfica amb  $V_D$  en abscisses i  $\log(I_D)$  en ordenades. Afegiu la recta de tendència i obtingueu els seus paràmetres.

*Qüestió 6.- Quins són els paràmetres de la recta d'ajust dels punts experimentals?*

Compareu els paràmetres de la recta de tendència acabada de calcular i els de l'exponencial ajustada a l'apartat anterior.

*Qüestió 7.- Són coherents entre sí els dos resultats?*

A partir de la recta de la gràfica semilogarítmica estimeu el valor de  $\eta$ , tenint en compte la temperatura del díode (heu de fer la lectura en graus centígrades del termòmetre que hi ha en el laboratori i afegir 273 per passar a Kelvin).

*Qüestió 8.- Quin és el valor de  $\eta$  que heu trobat. Si hi ha discrepàncies respecte de la teoria presentada intenteu esbrinar les possibles causes.*

## **FULL DE RESULTATS. Pràctica 6**

Nom dels components de l'equip:

Lloc de treball:

### **Mesura de la característica $i(v)$ d'un díode**

*Qüestió 1.- Quin són els valors de  $V_D$  i de  $I_D$  per a  $V_G$  igual a 3 V?*

*Qüestió 2.- Quin són els valors de  $V_D$  i de  $I_D$  pel valor màxim de  $V_G$ ?*

*Qüestió 3.- Quins són els valors de  $V_D$  i de  $I_D$  pel valor màxim de  $V_G$  i la nova resistència?*

*Qüestió 4.- Indiqueu l'interval de corrents mesurades. Que passaria en les condicions de mesura si augmentem molt el corrent? Quins efectes tindria un augment de la temperatura del díode sobre el corrent mesurat?*

### **Tractament de les dades experimentals**

*Qüestió 5.- Quins són els paràmetres de la línia exponencial d'ajust proporcionats pel full de càlcul?*

*Qüestió 6.- Quins són els paràmetres de la recta d'ajust dels punts experimentals?*

*Qüestió 7.- Són coherents entre sí els dos resultats?*

*Qüestió 8.- Quin és el valor de  $\eta$  que heu trobat. Si hi ha discrepàncies respecte de la teoria presentada intenteu esbrinar les possibles causes.*

## PRÀCTICA 7. CIRCUITS RC. TEMPORITZADOR AMB CONDENSADOR

Aquesta pràctica té per objectiu introduir a l'estudiant en el coneixement d'un component nou, el condensador, i en l'estudi dels circuits RC. L'estudiant aprendrà a mesurar les constants de temps d'aquests circuits elementals. Per altra banda s'utilitzarà la càrrega d'un condensador per fer un temporitzador, fent servir en aquest circuit un amplificador operacional com a comparador.

### 7.1. Circuits RC

Els circuits RC que considerarem en aquesta pràctica són circuits formats per generadors de tensió i/o corrent, resistències i un sol condensador. L'anàlisi d'aquests circuits es realitza aplicant les lleis de Kirchoff a l'igual que es fa en els circuits resistius, i tenint en compte que el comportament del condensador ve establert per la següent expressió:

$$V_c = \frac{q}{C} \quad (1)$$

on  $V_c$  és la tensió entre els seus terminals i  $q$  és la càrrega emmagatzemada internament pel condensador. Si es té en compte que el corrent  $I_c$  que entra al condensador no és més que  $dq/dt$ , aleshores, si es deriva l'equació (1), resulta la següent equació alternativa

$$I_c = C \cdot \frac{dV_c}{dt} \quad (2)$$

Aquesta segona equació posa de manifest dues propietats molt importants del condensador. Primera, la tensió  $V_c$  ha de ser una funció contínua en el temps, ja que si no fós així la seva derivada seria infinita la qual cosa implicaria un corrent  $I_c$  infinit que no té sentit físic. Segona, si  $V_c$  és constant la seva derivada és zero, i per tant, el corrent que entra en el condensador és nul. El significat físic d'això és que en règim permanent, quan les tensions i corrents del circuit es fan constants, el condensador equival a un circuit obert, ja que d'aquesta manera el dispositiu pot presentar diferència de tensió entre els seus terminals sense que hi circuli corrent.

Considerem el circuit de la figura 7.1 amb l'interruptor tancat. Si el circuit es manté en aquestes condicions un temps suficient el condensador es descarregarà totalment a través de  $R_4$ . Per tant, podem suposar que la càrrega inicial (per un temps donat)  $q_0$  és zero.

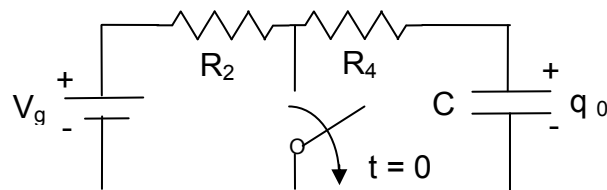


Figura 7.1.- Circuit RC bàsic.

Suposem que en aquestes condicions l'interruptor s'obre en l'instant  $t = 0$ . El generador  $V_g$  impulsa corrent cap al condensador, de forma que s'anirà carregant fins que la tensió en els seus terminals sigui  $V_c = V_g$ . En aquest moment no hi haurà diferència de tensió a les resistències i deixarà de passar corrent. Al ser  $I_c = 0$ , la càrrega emmagatzemada internament pel condensador no variarà, ja que no entrarà nova càrrega, i  $V_c$  serà constant. La càrrega interna final del condensador serà, per tant,  $C \cdot V_g$ . Direm que el condensador s'ha carregat a la tensió  $V_g$ .



Aquest comportament es pot quantificar resolent l'equació del circuit. Aplicant la llei de Kirchhoff de tensions a la malla quan  $t \geq 0$ , resulta:

$$V_g = I_c \cdot R_2 + I_c \cdot R_4 + V_c \quad (3)$$

I com que  $I_c = C \cdot dV_c/dt$ , resulta:

$$V_g = I_c \cdot (R_2 + R_4) + V_c = C \cdot (R_2 + R_4) \cdot \frac{dV_c}{dt} + V_c \quad (4)$$

Que és una equació diferencial en  $V_c$  (ja que conté la variable  $V_c$  i la seva derivada) que modela el comportament del circuit. Cal notar que tots els circuits RC amb un sol condensador tindran una equació diferencial similar ja que el circuit que "veu" el condensador sempre es podrà substituir per un equivalent de Thévenin amb un generador  $V_{th}$  en sèrie amb una resistència  $R_{th}$ . Per això, els circuits RC amb un sol condensador estan caracteritzats per una equació diferencial del tipus:

$$CR_{th} \frac{dV_c}{dt} + V_c = V_{th} \quad (5)$$

En el circuit 7.1  $V_{th}$  seria  $V_g$  i  $R_{th}$  valdria  $(R_2 + R_4)$ . La solució d'aquesta equació diferencial es pot obtenir per integració directa. Reordenant els termes:

$$CR_{th} \frac{dV_c}{dt} + V_c = V_{th} \Rightarrow \frac{dV_c}{dt} = \frac{V_{th} - V_c}{CR_{th}} \Rightarrow \frac{dV_c}{V_c - V_{th}} = - \frac{dt}{CR_{th}} \quad (6)$$

Integrant els dos membres de l'última igualtat resulta:

$$\ln(V_c - V_{th}) = - \frac{t}{CR_{th}} + A \quad (7)$$

essent A la constant d'integració. Per tant, aquesta solució es pot expressar com:

$$V_c - V_{th} = B \cdot \exp\left(-\frac{t}{CR_{th}}\right) \Rightarrow V_c = V_{th} + B \cdot \exp\left(-\frac{t}{CR_{th}}\right) \quad (8)$$

on  $B = \exp(A)$  és una constant arbitrària. Amb certa freqüència aquesta expressió es formula d'una forma lleugerament diferent, ja que quan  $t$  tendeix a infinit  $V_c$  tendeix a  $V_{th}$ , i per tant,  $V_{th} = V_c(\infty)$ . Per altra banda, quan  $t = 0$ ,  $V_c(0) = V_{th} + B$ , i per tant,  $B = V_c(0) - V_{th} = V_c(0) - V_c(\infty)$ .

$$V_c(t) = V_c(\infty) + [V_c(0) - V_c(\infty)] \cdot \exp\left(\frac{-t}{CR_{th}}\right) = V_{cf} + [V_{ci} - V_{cf}] \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (9)$$

que es coneix amb el nom de *fórmula del valor inicial i del valor final*, ja que  $V_{cf}$  és el valor final de  $V_c$ ,  $V_c(\infty)$ , i  $V_{ci}$  és el valor inicial de  $V_c$ ,  $V_c(0)$ . La constant que divideix al temps en l'exponencial,  $\tau$ , s'anomena constant de temps del circuit, i el seu valor en un circuit RC és el producte de C per la resistència que "veu" el condensador, és a dir,  $R_{th}$ .

La figura 7.2 mostra els valors que pren la funció exponencial segons el valor del seu argument i els representa gràficament. També proporciona i representa els valors de la funció  $(1 - \exp(-t/\tau))$ . Quan  $t = 0$ , l'exponencial val 1, i per tant,  $V_c(0) = V_{ci}$ . Quan  $t$  és molt més gran que  $\tau$ , l'exponencial tendeix a zero i, en conseqüència, l'equació (9) mostra que  $V_c$  tendeix a  $V_{cf}$ . A nivell pràctic i en el context d'aquest curs, suposarem que  $V_c(t)$  arriba al valor final quan  $t = 3 \cdot \tau$ , ja que  $\exp(-3) = 0,05$ . De vegades, en altres aplicacions, es considera que s'arriba al valor final quan  $t = 5 \cdot \tau$ , ja que amb aquest valor  $\exp(-5) = 0,007$ , que és un valor molt més proper a zero

que l'anterior. Una vegada determinada la tensió  $V_c(t)$  es pot trobar molt fàcilment el corrent, derivant  $V_c$  tal com indica l'equació (2).

$t/\tau$	0,000	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000
$\exp(-t/\tau)$	1,000	0,368	0,135	0,050	0,018	0,007	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000
$(1-\exp(-t/\tau))$	0,000	0,632	0,865	0,950	0,982	0,993	0,998	0,999	1,000	1,000	1,000

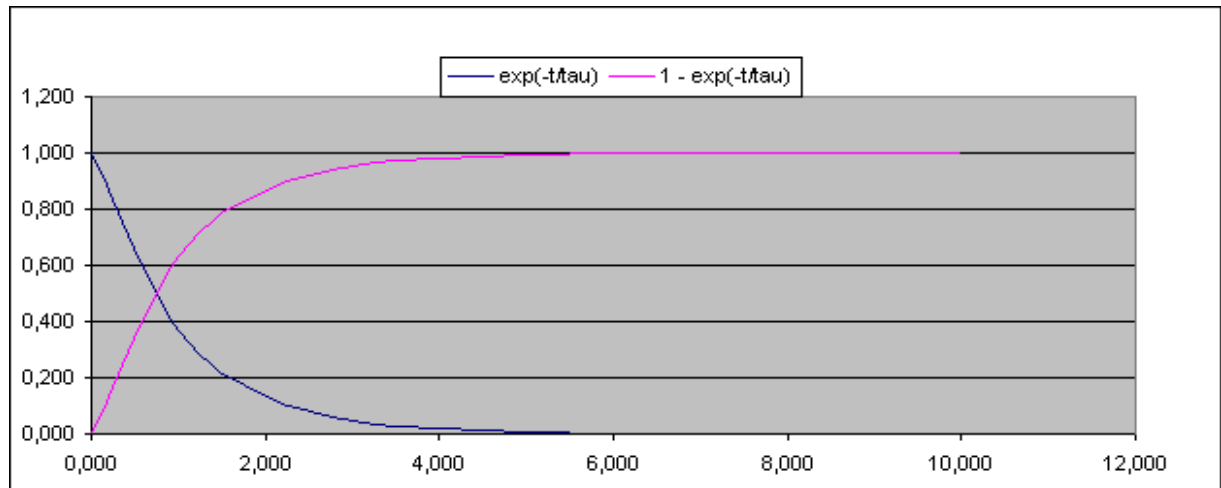


Figura 7.2.- Representació gràfica de  $\exp(-t/\tau)$ , corba amb pendent negatiu, i de  $(1-\exp(-t/\tau))$ , corba amb pendent positiu. Segons (9), si  $V_{ci} = 0$  i  $V_{cf} = 1$ ,  $V_c(t)$  seguiria la corba amb pendent positiu, i  $I_c(t)$  la corba amb pendent negatiu.

Noteu que si  $V_{ci}$  és zero, aleshores l'equació (9) mostra que  $V_c(t) = V_{cf}(1-\exp(-t/\tau))$ , i per tant tindrà una evolució com la representada amb la línia de pendent positiu, partint de zero i tendint cap a  $V_{cf}$ . El corrent l'obtindríem derivant aquesta expressió que donaria proporcional a la funció exponencial, representada amb la línia de pendent negatiu. Observeu que mentre que  $V_c(t)$  és una funció contínua en el temps,  $I_c$  és discontinua.

## 7.2. L'amplificador operacional com a comparador

L'amplificador operacional (AO) és un circuit integrat que amplifica la diferència de tensions aplicades a les seves dues entrades, la no inversora,  $V^+$ , i la inversora,  $V^-$ . L'AO es representa pel símbol de la figura 7.3, que mostra les entrades  $V^+$  i  $V^-$ , la sortida  $V_0$ , i en la que també es representa la característica sortida/entrada. Els AO també tenen dues entrades per aplicar la tensió d'alimentació contínua,  $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ . L'amplificador que utilitzarem en aquesta pràctica s'alimenta amb una única tensió contínua ( $V_{EE}$  es connecta a terra). Altres AO s'alimenten de forma "simètrica", aplicant a  $V_{EE}$  una tensió igual i de signe contrari que la aplicada a  $V_{CC}$ . Els corrents que entren al OA pels terminals  $V^+$  i  $V^-$  són molt petits i els aproximarem per zero.

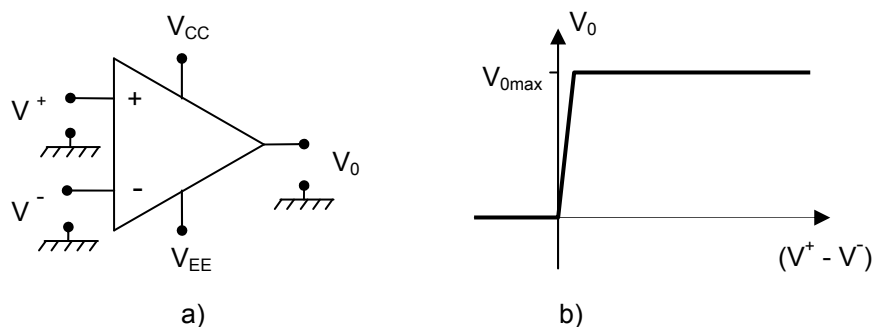


Figura 7.3.- a) Símbol de l'amplificador operacional. b) característica sortida/entrada.

La característica de transferència d'aquest AO (amb  $V_{EE} = 0$ ) és la representada en la figura 7.3b. La tensió de sortida  $V_0$  es representa en l'eix d'ordenades, mentre que l'eix d'abscisses és la diferència de tensions d'entrada,  $V^+ - V^-$ . En aquesta característica tenim tres trams ben diferenciats. En el primer, on l'entrada  $V^+ - V^-$  és negativa, la sortida val zero. En el segon, que s'anomena lineal, la sortida és proporcional a  $V^+ - V^-$ . Aquest és el tram en el que l'AO amplifica, essent els valors típics del guany de tensió, definit per  $\Delta V_0 / \Delta (V^+ - V^-)$ , des de 100.000 cap amunt. Finalment, quan  $V^+ - V^-$  assoleix un determinat valor la sortida tendeix cap a  $V_{0max}$ . Noteu que si utilitzem l'AO de la forma que mostra la figura 7.4, com que  $V_{0max}$  és de l'ordre de la tensió d'alimentació  $V_{CC}$  i el guany de tensió és d'un valor molt elevat, resulta que el tram lineal només es donarà per un marge de la tensió d'entrada ( $V^+ - V^-$ ) molt petit. Per exemple, si  $V_{0max}$  és de 10 V i el guany de tensió és 100.000 el marge de tensió d'entrada del tram lineal va des de zero fins a 0,1 mV (10/100.000). Per tant, si  $V^+$  supera a  $V^-$  en més de 0,1 mV (en la pràctica podem dir que si  $V^+ > V^-$ ) la sortida és  $V_{0max}$ , mentre que si  $V^+$  és inferior en més de 0,1 mV a  $V^-$  (en la pràctica podem dir que si  $V^+ < V^-$ ) la sortida és zero.

L'AO en la figura 7.4 funciona com a comparador de tensions. Aquest AO està alimentat per  $V_{CC} = 15$  V i per  $V_{EE} = 0$  V. L'entrada inversora té aplicada una tensió fixa de 5 V, mentre que l'entrada no inversora està connectada al condensador  $C_1$ . Mentre  $V^+$  sigui inferior a  $V^-$  la sortida serà zero, però quan  $V^+$  superi els 5 V aplicats a  $V^-$ , la sortida commutarà a  $V_{0max}$ . En aquesta situació circularà corrent pel LED la qual cosa ens avisa de que la tensió en el condensador ha arribat a 5 V.

### 7.3. Circuit temporitzador amb un condensador

El circuit de la figura 7.4 és el circuit de temporització que es realitzarà en aquesta pràctica. Es pretén que s'encengui el LED de la dreta quan una porta ha estat oberta més de 20 segons. La situació de la porta es simula amb l'interruptor de l'esquerra. Quan la porta està tancada, l'interruptor està a la posició 2 (0 V) i, quan la porta està oberta, l'interruptor està en la posició 1 (circuit obert). A més d'aquest interruptor i d'aquest LED, el circuit està format per un condensador que es va carregant a través de  $R_2$  i  $R_4$ , i l'AO que actua com a comparador entre la tensió del condensador  $C_1$  i la tensió aplicada al seu terminal "-".

El funcionament del circuit és el següent. Quan la porta està tancada, l'interruptor de l'esquerra fa contacte en el punt 2, és a dir, a massa (0 V). En aquesta situació el condensador es descarregarà a través de  $R_4$  i, si està descarregat, la tensió entre els seus terminals serà nul·la. Quan la porta s'obre, l'interruptor passa a la posició 1 de circuit obert. En aquesta situació el condensador es carregarà a través de la font de 15 V, i les resistències  $R_2$  i  $R_4$ . Per tant, la tensió en el condensador anirà pujant des del valor inicial de 0 V tendint cap un valor final de 15V. Ara bé, quan aquesta tensió arribi a 5 V, l'amplificador operacional canviarà la seva sortida des de 0 a un valor proper a 15 V i el LED conduirà fent llum.

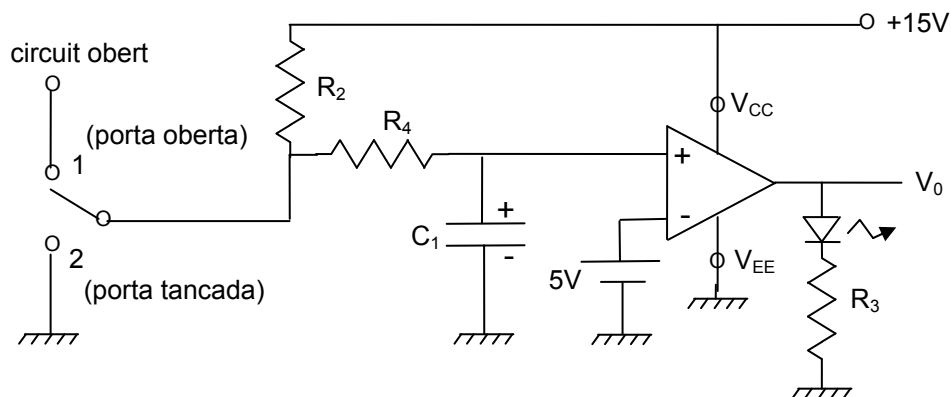


Figura 7.4.- Circuit de temporització amb condensador.

Per tant, s'ha d'aconseguir que el temps que tarda el condensador en carregar-se des de 0 V fins a 5V sigui del valor que es vulgui dissenyar, per exemple 20s. I que quan la porta es tanqui

el condensador es descarregui ràpidament per poder repetir el procediment si la porta es torna a obrir.

#### 7.4. Càrrega i descàrrega del condensador $C_1$

Suposem que l'interruptor acaba de commutar a la posició 1 i que el condensador ja estava descarregat. En aquestes circumstàncies comença a circular un corrent des del generador de 15 V cap al condensador a través de les resistències  $R_2$  i  $R_4$ . Aplicant l'equació (9) l'evolució de la tensió en el condensador seria:

$$V_c(t) = V_{cf} + [V_{ci} - V_{cf}] \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) = V_{cf} \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)\right] = 15 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)\right] \quad (10)$$

Es a dir,  $V_c$  parteix de zero ( $V_{ci} = 0$ ) i va augmentant cap a un valor final de 15 V. La constant de temps d'aquest circuit és  $\tau = C_1 \cdot (R_2 + R_4)$ , i s'arribarà aproximadament al valor final una vegada hagi transcorregut un temps  $t = 3\tau$ .

En el nostre circuit volem que el temps que es tarda en passar de zero a 5 V sigui de 20 s. Per tant, s'ha de complir que:

$$V_c(20s) = 5 = 15 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-20}{\tau}\right)\right] \quad (11)$$

relació que ens permet trobar la constant de temps  $\tau$  necessària per aquesta aplicació.

Suposem ara que l'interruptor passa a la posició 2 quan  $V_c$  està carregat a 15 V. En aquestes condicions  $V_{ci}$  serà 15 V,  $V_{cf}$  serà 0 V, i la constant de temps  $\tau^* = C_1 \cdot R_4$ . L'evolució de  $V_c$  aplicant l'equació (9) serà:

$$V_c(t) = 15 \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau^*}\right) \quad (12)$$

expressió que ens permet trobar el temps que tarda el condensador  $C_1$  en descarregar-se:  $3\tau^*$

### ESTUDI PREVI

1.- Considereu el circuit de la figura 7.5 constituït per un generador de senyal quadrat entre 0 V i 1 V de freqüència igual a 5 kHz, una resistència de valor 1 k $\Omega$  i un condensador de 10 nF en sèrie. Supposeu que a l'instant  $t = 0$  es connecta el generador, la sortida del qual suposarem que en aquest instant canvia des de 0 V fins a 1 V, i que el condensador està descarregat. a) Escriviu i representeu gràficament l'equació de  $V_c(t)$  durant el primer semiperíode, indicant el instant en el que aproximadament  $V_c(t)$  arriba al seu valor final. b) Calculeu l'expressió de  $I_c(t)$  i representeu-la gràficament.

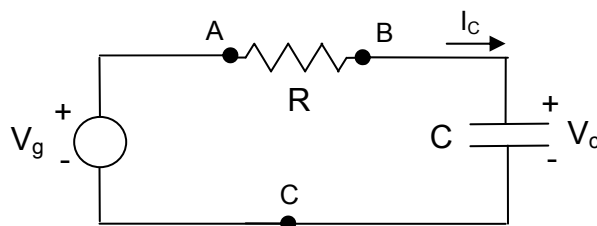


Figura 7.5.-Circuit RC per mesurar la constant de temps.

2.- Considereu ara el comportament del circuit en el segon semiperíode del senyal quadrat (a partir del canvi de 1 V a 0 V). a) Quins seran els valors de  $V_c$  i de  $I_c$  just abans de que la sortida del generador commuti a 0 V? b) Escriviu l'equació de  $V_c(t)$  i representeu-la gràficament durant el nou semiperíode del senyal quadrat. c) Idem per  $I_c(t)$  en aquest interval de temps

3.- Considereu el circuit temporitzador de la figura 7.4. Calculeu la constant de temps requerida per a que el condensador es carregui des de 0 V fins a 5 V en 20 segons.

4.- Suposant que el condensador  $C_1$  que utilitzarem és de 470  $\mu\text{F}$ , calculeu el valor de  $R_2$  per aconseguir la constant de temps de la qüestió 4, suposant que  $R_2 \gg R_4$ .

5.- Calculeu  $R_4$  si es vol que el condensador es descarregui en menys d'1 segon quan tanqui la porta.

## PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI

### 1.- MESURA DE LA CONSTANT DE TEMPS EN CIRCUITS RC

Munteu el circuit RC de la figura 7.5 constituït pel generador de funcions donant un senyal quadrat de 5 kHz, seguit d'una resistència en sèrie d'1 k $\Omega$  i d'un condensador de 10 nF. Visualitzeu en el canal 1 de l'oscil·loscopi, en mode DC, un període del senyal en els terminals del condensador (entre els punts B i C) i ajusteu l'amplitud del senyal fins que ocupi 8 divisions, fixant l'eix d'abscisses en la línia inferior de la pantalla. Tal com s'indica a la figura 7.6, la constant de temps és el temps transcorregut des de l'inici de l'exponencial fins el temps en el que el seu valor és de 5 divisions (en rigor, 5,06 divisions), ja que  $V_c(\tau) = 8 \cdot (1 - \exp(-1)) = 5,06 \cong 5$  V.

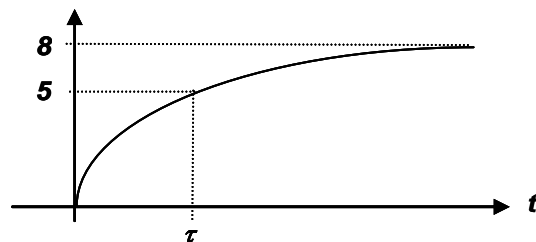


Figura 7.6. Mesura de la constant de temps.

*Qüestió 1.- Indiqueu el valor mesurat de la constant de temps i compareu-lo amb el valor teòric de l'estudi previ. Justifiqueu les diferències si n'hi han.*

Dibuixeu aproximadament la forma d'ona que veieu a la pantalla. Canvieu la connexió del punt B al punt A (figura 7.5) i dibuixeu aproximadament la forma d'ona que apareix.

*Qüestió 2.- Dibuixeu aproximadament els dos senyals visualitzats i justifiqueu la seves formes.*

### 2.- TEMPORITZADOR: CIRCUIT RC

Realitzeu el muntatge del circuit de la figura 7.4 (de moment sense l'AO, ni el LED ni  $R_3$ ) en la placa de connexions per inserció amb els següents valors:  $R_2 = 100$  k $\Omega$ ,  $R_4 = 330$   $\Omega$ ,  $C_1 = 470$   $\mu\text{F}$ . Reserveu la línia horitzontal superior de la placa per a la tensió d'alimentació de 15 V i la línia horitzontal inferior per a massa. Per simular l'interruptor de porta es connectarà un fil conductor des del nus d'interconnexió de  $R_2$  i  $R_4$  fins a massa, quan la porta està tancada i el deixareu desconnectat quan la porta està oberta.

Visualitzeu la tensió en el condensador  $C_1$  fent servir el multímetre digital en mode DC. Verifiqueu que quan la porta està tancada la tensió en  $C_1$  és zero, i que quan s'obre la tensió comença a pujar.

Qüestió 3.- Mesureu amb un cronòmetre el temps que tarda la tensió del condensador en arribar a 5 V des de que s'obre la porta.

Qüestió 4.- A partir del resultat de la qüestió anterior calculeu la constant de temps de càrrega del condensador

Qüestió 5.- A partir d'una mesura aproximada amb el cronòmetre, estimeu la constant de temps de descàrrega del condensador al tancar-se la porta.

### 3.- TEMPORITZADOR: CIRCUIT COMPARADOR

Apagueu la font d'alimentació i completeu el muntatge del circuit de la figura 7.4 fent servir l'AO LM358, una resistència  $R_3 = 1k\Omega$  i un LED qualsevol.

El circuit integrat LM358 conté dos amplificadors operacionals tal com es mostra a la figura 7.7. Podeu fer servir qualsevol d'ells. Per exemple, si feu servir el numerat amb "1", les seves entrades són les  $V1^-$  i  $V1^+$ , la seva sortida la "out 1" i la seva alimentació s'ha aplicar entre  $V_{CC}$  el 15 V i GND la massa (0 V).

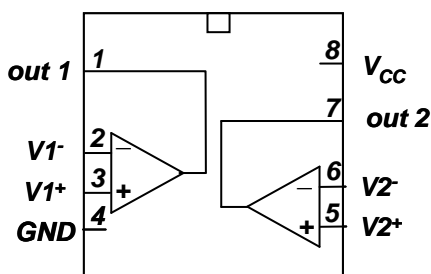


Figura 7.7.- Terminals del circuit integrat LM358.

Connecteu el fil que simula l'interruptor a massa corresponent a porta tancada. Verifiqueu que la tensió en el condensador és zero.

Qüestió 6.- Quina tensió hi ha a la sortida de l'AO?

Qüestió 7.- Quin corrent circula per  $R_3$  i pel LED?

Canvieu la connexió del fil que simula l'interruptor d'entrada a la posició de porta oberta.

Qüestió 8.- Quan tarda en encendre's el LED?

Qüestió 9.- Quin corrent circula ara per  $R_3$  i pel LED?

## **FULL DE RESULTATS. Pràctica 7**

Nom dels components de l'equip:

Lloc de treball:

### **Mesura de la constant de temps en circuits RC**

*Qüestió 1.- Indiqueu el valor mesurat de la constant de temps i compareu-lo amb el valor teòric de l'estudi previ. Justifiqueu les diferències si n'hi han.*

*Qüestió 2.- Dibuixeu aproximadament els dos senyals visualitzats i justifiqueu la seves formes.*

### **Temporitzador: circuits RC**

*Qüestió 3.- Mesureu amb un cronòmetre el temps que tarda la tensió del condensador en arribar a 5 V des de que s'obre la porta.*

*Qüestió 4.- A partir del resultat de la qüestió anterior torneu a calcular la constant de temps de càrrega del condensador*

*Qüestió 5.- A partir d'una mesura aproximada amb el cronòmetre, estimeu la constant de temps de descàrrega del condensador al tancar-se la porta.*

### **Temporitzador: circuit comparador**

*Qüestió 6.- Quina tensió hi ha a la sortida del AO?*

*Qüestió 7.- Quin corrent circula per  $R_3$  i pel LED?*

*Qüestió 8.- Quan tarda en encendre's el LED?*

*Qüestió 9.- Quin corrent circula ara per  $R_3$  i pel LED?*

## PRÀCTICA 8. TRANSFORMADOR, RECTIFICADOR I FILTRE.

Aquesta pràctica té per objectiu estudiar el transformador, els circuits rectificadors i el filtre de condensador. L'estudiant farà un disseny d'una font sense estabilitzar, la qual serà completada en una propera pràctica amb un regulador basat en un díode zener i transistor bipolar. En primer lloc es muntaran els circuits en la placa de connexió per inserció, i una vegada funcionin correctament es soldaran els components en un circuit imprès.

### 8.1. El transformador

El transformador és un component electrònic constituït per dues bobines acoblades magnèticament. Una d'aquestes bobines s'anomena primari i se sol considerar com l'entrada del transformador, mentre que l'altra bobina es denomina secundari i sol ser la sortida del transformador. A la figura 8.1a es representa l'estructura física dels transformador, i a la 8.1b el símbol del transformador ideal.

Com es pot veure en la figura, s'enrotlla un fil conductor sobre un nucli de material magnètic fent  $N_1$  voltes o espiras en el primari. Així mateix es bobina una altre fil al voltant del mateix nucli fent  $N_2$  espiras. Els corrents que circulen pels enrotllaments o debanats creen un camp magnètic que és confinat (atrapat) pel nucli. Aquest nucli, que en la figura s'ha representat en forma toroïdal, sol tenir més habitualment una forma rectangular per fer-lo més compacte. La llei de Faraday estableix que si varia el flux del camp magnètic que travessa una espira es genera una diferència de tensió entre els extrems d'aquesta espira. Per això, la tensió que es genera en un debanat quan varia el flux magnètic que el travessa és proporcional al seu nombre d'espiras, ja que aquestes estan en sèrie. Noteu però, que ha de variar el flux magnètic, la qual cosa exigeix que els corrents que circulen pels debanats i que generen el camp magnètic, siguin variables amb el temps.

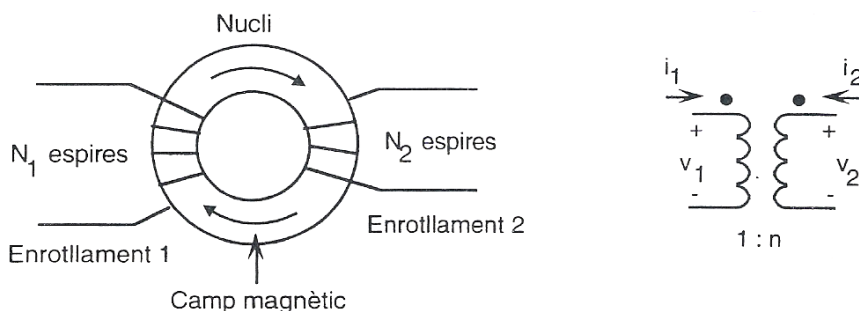


Figura 8.1. a) Estructura física del transformador. b) Símbol del transformador ideal.

El transformador ideal està caracteritzat per les següents lleis de comportament:

$$\frac{v_2(t)}{v_1(t)} = \frac{N_2}{N_1} \equiv n \quad \frac{i_2(t)}{i_1(t)} = \frac{-1}{N_2 / N_1} = \frac{-1}{n} \quad (1)$$

on  $v_1$  i  $i_1$  són la tensió i el corrent en el debanat 1 del transformador, i  $v_2$  i  $i_2$  la tensió i el corrent en el 2. Noteu que en (1) s'indica tant per les tensions com pels corrents que són funcions del temps, ja que aquestes expressions només valen si els corrents i tensions varien en el temps.  $N_2$  i  $N_1$  són el nombre de voltes del debanat 2 i 1 respectivament, i  $n$  s'anomena relació de transformació del transformador. Els punts en la figura 8.1b indiquen els terminals del transformador que tenen la mateixa polaritat: si en el debanat 1 el terminal marcat amb un punt és positiu respecte de l'altre, en el debanat 2 el terminal marcat amb un punt també serà positiu respecte l'altre. Els punts també es prenen com a referència pels corrents, tal com s'indica a la figura.

En aquesta pràctica utilitzarem el transformador com a reductor de tensió, per passar dels 220 volts eficaços que proporciona la xarxa (una sinusoide de 310 volts d'amplitud i 50 Hz de



frequència) a una tensió propera a 12 volts eficaços (una sinusoide d'uns 17 V d'amplitud). Per fer-ho necessitem la següent relació de transformació:

$$n = \frac{v_2(t)}{v_1(t)} = \frac{12}{220} = \frac{1}{18,33} = 0,0545 \quad (2)$$

és a dir, una espira en el secundari per cada 18,33 espiras en el primari. En altres aplicacions els transformadors es fan servir per augmentar la tensió. Aquest és el cas, per exemple, de quan es disposa d'una distribució d'energia elèctrica de 110 volts eficaços i es requereixen 220 volts eficaços per poder utilitzar electrodomèstics que només accepten aquesta tensió d'entrada.

El transformador real no segueix exactament el comportament del seu model ideal. Per una banda s'escalfa, la qual cosa indica que consumeix energia, i per altra els seus enrotllaments presenten una resistència paràsita bastant significativa, ja que a l'augmentar el corrent que proporciona el transformador disminueix l'amplitud de la sinusoide de sortida.

## 8.2. Circuits rectificadors

Quan s'aplica una tensió alterna a un circuit rectificador, aquest només deixa passar corrent d'una polaritat, és a dir, en un sol sentit. El circuit rectificador més simple és l'estudiat a la pràctica 5 (figura 8.2) on  $V_i$  representa un generador de tensió alterna, i  $R_L$  és la resistència de càrrega a la que es lliura la tensió de sortida.

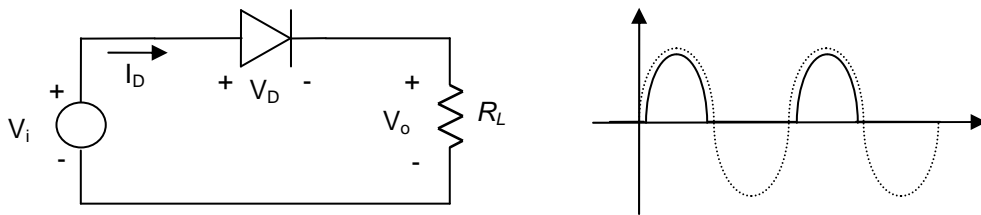


Figura 8.2.- Rectificador de mitja ona. a) Circuit. b) Tensió de sortida.

En aquest circuit el díode només deixa passar corrent positiu, que succeeix quan  $V_i$  és superior a la tensió llindar de conducció  $V_\gamma$  del díode. Per tant, quan el díode condueix,  $V_o$  serà  $V_i - V_\gamma$ . Per altra banda, quan  $V_i$  és negatiu el díode equival a un circuit obert i en conseqüència  $I_D$  i  $V_o$  són nuls. Per això es diu que només deixa passar els semicicles positius, és a dir, mitja ona. Aquest tipus de rectificador és poc eficient ja que només permet utilitzar l'energia dels semicicles positius.

El circuit que permet utilitzar els dos semicicles s'anomena rectificador d'ona completa i es pot implementar mitjançant el circuit representat en la figura 8.3. Quan  $V_i$  és positiva el corrent circula pel terminal positiu de  $V_i$  - D1 -  $R_L$  - D2 - terminal negatiu de  $V_i$ , mentre que quan  $V_i$  és negativa el corrent circula pel terminal negatiu de  $V_i$  - D3 -  $R_L$  - D4 - terminal positiu de  $V_i$ . Noteu que el corrent sempre circula en el mateix sentit per la resistència  $R_L$ . Per aquest motiu, la tensió en  $R_L$  sempre és positiva o nul·la, mai negativa. Noteu també que quan circula corrent per  $R_L$  sempre ho fa travessant dos díodes, per la qual cosa la tensió de sortida és  $V_i - 2V_\gamma$ .

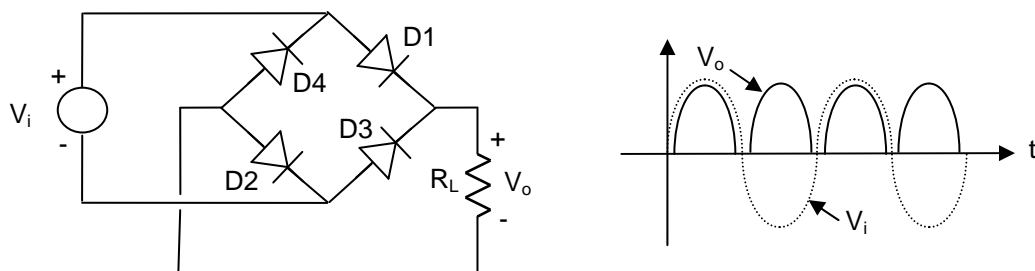


Figura 8.3.- Rectificador d'ona completa. a) Circuit. b) Tensió de sortida.

### 8.3. El filtre de condensador

La tensió de sortida del rectificador és una tensió unipolar, és a dir, d'una sola polaritat, però no és constant. La primera acció per transformar-la en constant és mitjançant un condensador connectat en paral·lel amb  $R_L$ , que s'anomena filtre de condensador. En la figura 8.4 es mostra aquest condensador i la seva acció sobre el senyal de sortida. El resultat final és que la tensió de sortida és aproximadament constant, però presenta una certa fluctuació que s'anomena "arriusat" del senyal de sortida.

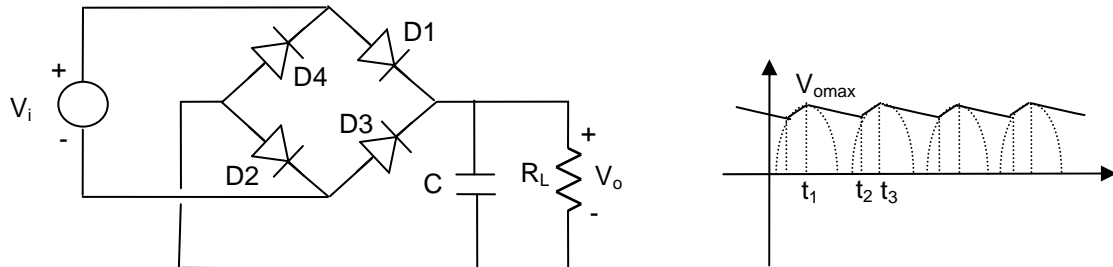


Figura 8.4.- Filtre de condensador. a) Circuit. b) Acció sobre la tensió de sortida.

Suposem que estem a l'instant  $t_1$  (figura 8.4b) que correspon a un màxim de  $V_o$  que val  $V_{o\max}$ , el qual és aproximadament  $V_{i\max} - 2V_\gamma$ . Obeint al caràcter sinusoidal del senyal, la tensió  $V_i$  comença a disminuir a partir de  $t_1$ . Suposem que la descàrrega del condensador a través de  $R_L$  sigui lenta, i per tant, la tensió  $V_o$  disminuirà poc a poc, per la qual cosa  $V_o$  serà més gran que  $V_i$ . En aquesta situació els díodes estaran polaritzats en inversa i es transformaran en circuits oberts. Per tant, el condensador només quedarà connectat a  $R_L$  i començarà a descarregar-se seguint la llei de descàrrega:

$$V_o(t) = V_{o\max} \exp\left(-\frac{t-t_1}{CR_L}\right) \quad (3)$$

Però mentrestant,  $V_i$  va evolucionant seguint la funció sinusoidal. A l'instant  $t_2$ ,  $V_i$  torna a superar a  $V_o$  i en conseqüència els díodes condueixen i  $V_o$  torna a ser  $V_i - 2V_\gamma$ . Aquest seguiment de  $V_o$ , i per tant de  $V_o$ , respecte de  $V_i$  dura fins que s'arriba a un nou màxim en l'instant  $t_3$ . A partir d'aquest instant es repeteix el comportament anterior: els díodes es tallen i  $C$  es descarrega a través de  $R_L$ .

Observeu, per tant, que entre  $t_1$  i  $t_2$  al estar tallats els díodes, el corrent de sortida el proporciona el condensador, per la qual cosa perd càrrega i tensió. Entre  $t_2$  i  $t_3$  els díodes tornen a conduir i lliuren al condensador la càrrega que ha perdut en l'interval de  $t_1$  a  $t_2$ . Aquests cicles de càrrega i descàrrega del condensador es van repetint en cada semicicle de  $V_i$ . L'amplitud de l'arriusat serà la pèrdua de tensió del condensador:

$$\Delta V_o = V_{o\max} - V_{o\max} \exp\left(-\frac{t_2-t_1}{CR_L}\right) \quad (4)$$

Si l'amplitud de l'arriusat és petita es pot aproximar  $(t_2-t_1)$  per  $T/2$ , el temps entre dos pics consecutius. Fent aquesta aproximació a (4) resulta:

$$\Delta V_o = V_{o\max} \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{2fCR_L}\right)\right) \quad (5)$$

Aquesta expressió ens proporciona la relació entre l'amplitud relativa de l'arriusat,  $\Delta V_o/V_{o\max}$ , el condensador  $C$ , i la càrrega  $R_L$ , ja que  $f$  és la freqüència de la tensió alterna que val 50 Hz. Observeu que a mesura que  $C$  creix, l'amplitud de l'arriusat disminueix, i en el límit quan  $C$  tendís a infinit, l'arriusat seria zero.

Per tant, a primera vista, semblaria que convindria triar un condensador quan més gran millor. Però això no és així, ja que cal tenir en compte un altre aspecte del circuit: el corrent que han de conduir els díodes.

Observeu que a mesura que l'amplitud de l'arribat disminueix, el temps de recàrrega del condensador,  $(t_3-t_2)$ , també disminueix, la qual cosa indica que el circuit ha de proporcionar una determinada càrrega al condensador en un temps menor. I com que càrrega per unitat de temps és intensitat del corrent, el corrent pels díodes augmentarà a mesura que l'amplitud de l'arribat disminueixi. Una expressió que aproxima el corrent màxim pel díode i l'amplitud de l'arribat (que es pot deduir suposant que prop del màxim  $V_o$  es pot aproximar per una funció cosinus) ve donada per:

$$I_{D_{\max}} = \pi \frac{V_{dc}}{R_L} \sqrt{\frac{2}{r}} \quad r = \frac{T/2}{CR_L} \quad V_{dc} = V_{o_{\max}} \left(1 - \frac{r}{2}\right) \quad (6)$$

Per tant, si tenim en compte que els díodes es poden destruir si per ells circula un corrent excessiu, caldrà trobar una solució de compromís pel valor del condensador, de forma que l'amplitud de l'arribat sigui acceptable i també ho sigui el corrent pels díodes.

#### 8.4. Muntatge del circuit en una placa de circuit imprès

L'última part de la pràctica consisteix en muntar el circuit en una placa de circuit imprès, soldant en els llocs adequats els components electrònics. Per aquest motiu dedicarem aquest apartat a comentar algunes característiques de com s'han de realitzar aquestes soldadures.

La soldadura de circuits electrònics es realitza amb estany. El soldador fon l'estany, el qual s'adhereix tant al terminal del component com a la pista conductora del circuit imprès, garantint d'aquesta forma, la unió física i elèctrica del component amb les pistes impreses de la placa.

El soldador consta d'un metall (normalment coure) acabat en punta, que s'escalfa per acció d'una resistència elèctrica. Els soldadors més adequats pels circuits electrònics típics tenen una potència de 30-40 W. La punta del soldador ha d'escalfar els materials a soldar durant 2 o 3 segons. El fil d'estany no s'ha d'aplicar a la punta del soldador sinó sobre les peces a soldar una vegada hagin estat escalfades. Un cop fos l'estany, cal mantenir el soldador durant uns 3 segons addicionals per a que l'estany es reparteixi uniformement. Després es retira el soldador, es deixa refredar la soldadura, i finalment es talla el tros sobrant del terminal del component soldat.

Quan el soldador és nou s'ha d'estanyar la punta abans de la primera soldadura. Per fer-ho, cal escalfar el soldador i s'ha d'aplicar el fil d'estany en la punta fins que es fongui. Després s'ha de fer rodar la gota d'estany fos per tota la punta movent el soldador. Al cap d'un minut es retira la gota fent un moviment bruscat del soldador. Per soldar correctament convé tenir la punta llisa i neta, cosa que es pot aconseguir fent servir una esponja de cel·lulosa humida o un drap net. La punta no s'ha de llimar mai. A la figura 8.5 s'il·lustra aquestes recomanacions per fer una soldadura correcta.

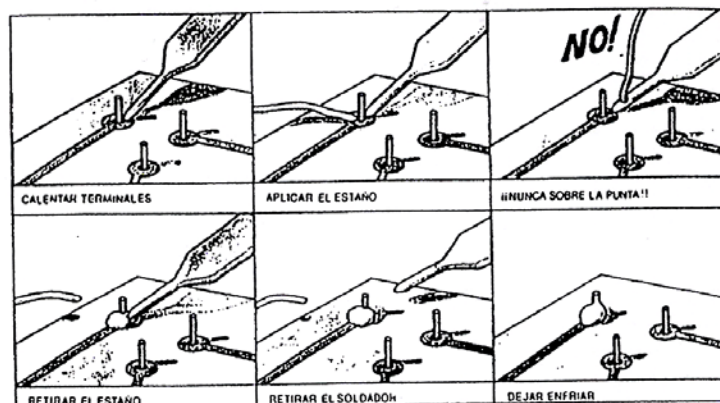


Figura 8.5.- Algunes indicacions per aconseguir una soldadura correcta.

## **ESTUDI PREVI**

1. Els transformador que utilitzareu en aquesta pràctica transforma una sinusoide de 220 V<sub>ef</sub> en una altra de 12 V<sub>ef</sub>. Recordant que el valor eficaç d'una sinusoide és el valor de pic dividit per la arrel quadrada de 2, trobeu les amplituds de les sinusoides d'entrada i de sortida.
2. Trobeu quantes espiras hi hauran en el secundari per cada espira del primari.
3. Suposant que el transformador real es pogués modelar amb un transformador ideal seguit d'una resistència en sèrie de 5  $\Omega$  en el secundari, digueu quina seria la l'amplitud de la tensió de sortida en el secundari en circuit obert, i quina seria quan hi circula un corrent de 500 mA.
4. Dibuixeu la tensió de sortida en el rectificador de mitja ona de la figura 8.2 si  $V_i$  fos un senyal quadrat de 6 V pic a pic amb valor mig igual a zero, el díode fos de silici amb una tensió de colze de 0,7 V i la resistència fos de 1 k $\Omega$ .
5. Repetiu l'exercici anterior però fent servir un rectificador en pont com el de la figura 8.3.
6. Calculeu l'amplitud de l'arriestat si poseu com a filtre un condensador de 1  $\mu$ F, fent servir l'expressió (5), amb una  $R_L$  de 1 k $\Omega$  i una  $V_{omax}$  de 20V.
7. Repetiu l'exercici anterior substituint el condensador per un de 1000  $\mu$ F.
8. Calculeu el corrent de pic que circularà pels díodes durant la recàrrega del condensador utilitzant l'expressió (6).

## **PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI**

### **1.- MESURES SOBRE EL TRANSFORMADOR**

Munteu el transformador que us deixarà el mestre de laboratori per fer aquesta pràctica, connectant primer els terminals de sortida dels transformador a la placa de connexions per inserció i després el transformador a l'endoll de 220 V<sub>ef</sub> del lloc de treball. Tingueu molta cura de que els terminals del secundari del transformador no es toquin entre sí, ja que aleshores circularia un corrent molt intens que faria malbé el transformador.

Engegueu l'oscil·loscopi i connecteu el canal 1 a la sortida del transformador, en la placa de connexions. Visualitzeu el senyal i mesureu la freqüència i l'amplitud de tensió (de pic) d'aquest senyal.

*Qüestió 1. Indiqueu el valor de la freqüència i el de l'amplitud de tensió a la sortida del transformador*

Connecteu a la sortida del transformador una resistència de 10 k $\Omega$ , mesureu l'amplitud de tensió del senyal altern i anoteu-la

Canvieu la resistència de 10 k $\Omega$  per una altra de 56  $\Omega$  i 3 W, i repetiu la mesura. Anoteu l'amplitud i el valor de la resistència. Torneu a canviar la resistència per una altra de 27  $\Omega$  i 6W. Repetiu les anotacions. A partir de l'amplitud i el valor de la resistència utilitzada calculeu el corrent de sortida del transformador.

*Qüestió 2. Escriviu una taula amb tres columnes corresponents al valor de la resistència, l'amplitud de tensió i el corrent. Interpreteu els resultats.*

## 2.- RECTIFICADOR DE MITJA ONA

Munteu a la placa de connexions el circuit de la figura 8.2, on  $V_i$  és la sortida del transformador, el díode és el 1N4007, i R és la resistència de 10 k $\Omega$ . Visualitzeu en el canal 1 de l'oscil·loscopi primer el senyal  $V_i$ , i després la forma d'ona a la resistència ( $V_o$ ).

*Qüestió 3. Quina forma d'ona té la tensió de sortida?*

*Qüestió 4. Quina caiguda de tensió presenta el díode quan condueix?. Quina tensió màxima ha de suportar el díode quan no condueix?*

## 3.- RECTIFICADOR EN PONT

Munteu a la placa de connexions el circuit rectificador en pont de la figura 8.3, on  $V_i$  és la sortida del transformador, els díodes són tots de la sèrie 1N4007, i R és la resistència de 10 k $\Omega$ . Visualitzeu primer en el canal 1 el senyal d'entrada  $V_i$ , i després, en el mateix canal la tensió a la resistència de sortida ( $V_o$ ).

*Qüestió 5. Quina forma d'ona té la tensió de sortida?*

*Qüestió 6. Quina caiguda de tensió presenta cada díode quan condueix? Quina tensió màxima ha de suportar cada díode quan no condueix?*

## 4.- EL FILTRE DE CONDENSADOR

Munteu un condensador electrolític de 1  $\mu$ F a la sortida, en paral·lel a  $R_L$ , tal com s'indica a la figura 8.4, fent servir com  $R_L$  la resistència de 10 k $\Omega$ . Heu de tenir en compte que els condensadors electrolítics tenen polaritat, i que si no es respecte aquesta polaritat poden explotar. Fixeu-vos que en el cos del condensador hi figura una tira on s'indica un signe negatiu, "-". Un dels dos terminals del condensador està al costat d'aquesta tira. És el terminal més curt. Aquest terminal s'ha de connectar a un punt del circuit que tingui una tensió contínua inferior al punt on es connecta l'altre terminal. En aquest cas, el terminal més llarg (el positiu) s'ha de connectar on hi han els terminals dels díodes D1 i D3, i que correspon al punt on hi ha el terminal "+" de la tensió de sortida  $V_o$ .

Visualitzeu primer en el canal 1 de l'oscil·loscopi el senyal  $V_i$ , i després en el mateix canal la forma d'ona a la resistència. Mesureu el valor mig del senyal de sortida i l'amplitud pic a pic de l'arrissat. La mesura del valor mig l'heu de fer en mode DC. Per mesurar l'amplitud de l'arrissat heu de commutar a mode AC, ja que d'aquesta forma elimineu el valor de contínua i podeu augmentar la sensibilitat del canal vertical per poder mesurar més fàcilment l'arrissat.

*Qüestió 7. Quin és el valor mig de la tensió de sortida? Quina és l'amplitud de l'arrissat?*

Canvieu el condensador per un de 2200  $\mu$ F/25V. Repetiu la mesura del valor mig i de l'arrissat.

*Qüestió 8. Quins són els nous valors de contínua i de l'arrissat? Compareu els resultats amb el que s'obté de l'anàlisi teòric explicat a l'estudi previ.*

Canvieu la resistència de 10 k $\Omega$ , per una de 27  $\Omega$ /6W, mantenint el condensador de 2200  $\mu$ F. Repetiu les mesures del valor de contínua i de l'arrissat.

*Qüestió 9. Quins són els nous valors de contínua i de l'arrissat? Compareu els resultats amb el que s'obté de l'anàlisi teòric explicat a l'estudi previ.*

## 5.- MUNTATGE DEL CIRCUIT EN LA PLACA DE CIRCUIT IMPRÈS

El circuit que heu realitzat i mesurat en la placa de connexions el muntareu ara a una placa de circuit imprès, soldant els diversos components. La placa mesura 6,5 cm de llarg per 6,6 cm d'ample. Realitzareu el muntatge fent que les pistes metal·litzades de la part posterior siguin horitzontals. Per això s'aconsella fer un senyal a la cara de la placa que no té pistes (per exemple, dibuixant un tros de ratlla que segueixi una pista) per estar segurs de que les pistes van d'esquerra a dreta i no pas en sentit vertical.

Els components s'introdueixen des de la part superior (la que no té les pistes) pels forats realitzats en la placa. Una vegada introduïts els terminals del component pels forats adequats, cal capgirar la placa de forma que quedin les pistes a la vista, mantenint el component al seu lloc sense que caigui. A continuació es solda el component tal com s'ha indicat a l'apartat 8.4. Noteu que els components que es soldin sobre la mateixa pista estaran connectats entre sí. En aquest sentit, els forats d'una mateixa pista (que serà un fil en el circuit imprès) juguen un paper similar als forats d'una mateixa columna d'una placa de connexió per inserció, que estan units internament entre sí.

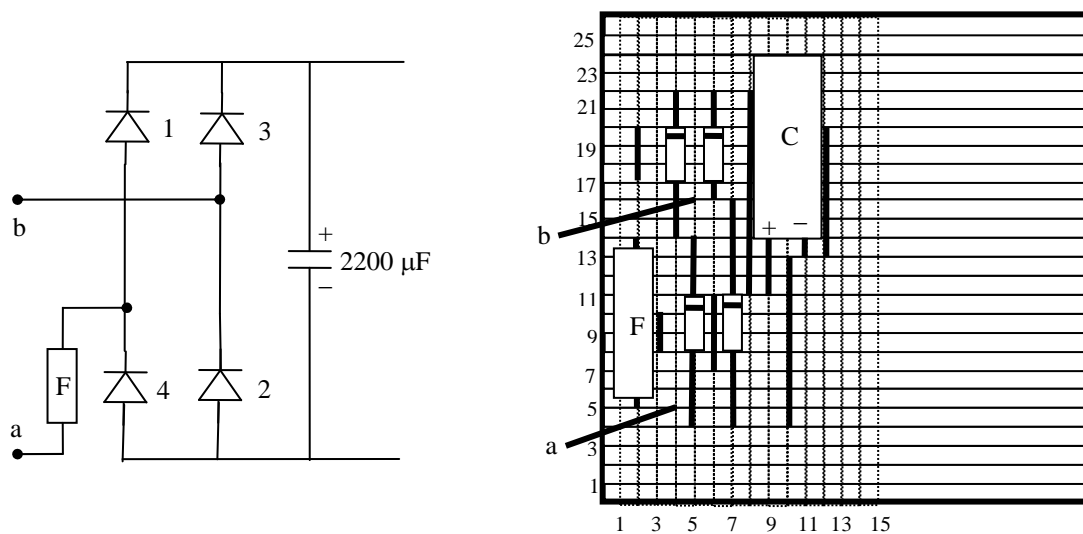


Figura 8.6.- Esquema elèctric del circuit i el seu muntatge a la placa de circuit imprès

A la figura 8.6a es representa l'esquema elèctric del circuit que s'ha de muntar a la placa de circuit imprès, i a la 8.6b la disposició dels components sobre la placa. Noteu que s'han de soldar els 4 díodes, el portafusible F i el condensador de 2200 µF. També s'han de "muntar" uns fils d'interconnexió de pistes del circuit imprès, que s'han indicat com segments de traç gruixut. Els números del costat esquerra indiquen les pistes del circuit imprès, un total de 25 pistes. Els números de baix indiquen les columnes de forats de la placa vistes des de la part que no té les pistes. Això ens permet identificar els punts on s'han de soldar els diversos components. Així, el portafusibles va des del punt (2,5) al punt (2,14), i el condensador des del punt (9,11) fins el punt (11,13). Els terminals a i b són uns fils que permeten connectar la tensió alterna d'entrada. Els fils d'interconnexió han de ser conductors unifilars coberts amb el plàstic aïllant, és a dir, iguals que els que es fan servir a la placa de connexions per inserció

## **FULL DE RESULTATS. Pràctica 8**

Nom dels components de l'equip:

Lloc de treball:

### **Mesures sobre els transformador**

*Qüestió 1. Indiqueu el valor de la freqüència i el de l'amplitud de tensió a la sortida del transformador.*

*Qüestió 2. Escriviu una taula amb tres columnes corresponents al valor de la resistència, l'amplitud de tensió i el corrent. Interpreteu els resultats.*

### **Rectificador de mitja ona**

*Qüestió 3. Forma d'ona de la tensió de sortida.*

*Qüestió 4. Quina caiguda de tensió presenta el díode quan condueix? Quina tensió màxima ha de suportar el díode quan no condueix?*

### **Rectificador en pont**

*Qüestió 5. Forma d'ona de la tensió de sortida.*

*Qüestió 6. Quina caiguda de tensió presenta cada díode quan condueix? Quina tensió màxima ha de suportar cada díode quan no condueix?*

### **Filtre de condensador**

*Qüestió 7.  $C = 1 \mu F$ . Quin són els valors de continua i de l'arissat de la tensió de sortida?*

*Qüestió 8.  $C = 2200 \mu F$ . Quin són els valors de continua i de l'arissat de la tensió de sortida?*

*Qüestió 9.  $R_L = 27 \Omega$ ,  $C = 2200 \mu F$ . Quin són els valors de continua i de l'arissat de la tensió de sortida?*

## PRÀCTICA 9. OSCIL·LACIONS ESMORTEÏDES I FORÇADES. RESSONÀNCIA

Aquesta pràctica té per objectiu introduir a l'estudiant en l'estudi de les oscil·lacions lliures i forçades que presenten diversos sistemes físics. Veurem que el comportament d'un sistema està governat per una equació diferencial i unes condicions inicials. Aquesta propietat permet establir el principi d'analogia entre sistemes: si dos sistemes presenten la mateixa equació diferencial i les mateixes condicions inicials es diu que són anàlegs i els resultats d'un d'ells permet analitzar el comportament de l'altre sense fer més canvis que els de les variables implicades. D'aquesta forma podem estudiar per exemple les oscil·lacions lliures i forçades d'un sistema mecànic analitzant el seu anàleg elèctric, molt fàcil d'implementar en un laboratori amb instrumental electrònic.

### 9.1. Oscil·lacions elèctriques en un circuit RLC

Un component que forma part d'un circuit elèctric absorbeix energia del circuit a un ritme de  $P_{ab} = I \cdot V$  joules per segon. En aquesta expressió el corrent  $I$  que travessa el component va en el sentit de "+" a "-" de la tensió  $V$  aplicada entre els seus terminals.

Quan el component és una resistència l'energia absorbida es converteix en calor i s'evacua a l'ambient en un procés irreversible. En el cas d'un condensador "ideal" l'energia absorbida s'emmagatzema internament en forma de camp elèctric entre les dues plaques i pot ser retornada al circuit més endavant. Si un condensador de capacitat  $C$  té entre els seus terminals una tensió  $V_c$  l'energia emmagatzemada que té en el seu interior és  $(1/2) \cdot C \cdot V_c^2$ . De forma similar, una bobina o inductor "ideal" emmagatzema energia en el seu interior en forma de camp magnètic entre les seves espiras, que també pot ser retornada al circuit més endavant. Si un corrent  $I_L$  circula per un inductor de coeficient d'autoinducció  $L$ , l'energia que té en el seu interior és  $(1/2) \cdot L \cdot I_L^2$ .

En alguns circuits es pot produir un acoblament entre un condensador i una bobina de forma que en un determinat instant l'energia està emmagatzemada en el condensador, però aquest la transfereix en forma de corrent elèctric a la bobina fins que la traspasa del tot. Tot seguit, el procediment es torna a repetir a l'inrevés, de la bobina al condensador. Si no hi hagués cap resistència en el circuit no es perdria energia i aquest transvasament d'energia entre el condensador i la bobina podria durar de forma indefinida. Es diu, aleshores, que el circuit oscil·la. Aquesta oscil·lació indefinida requereix que no hi hagi cap resistència en el circuit, cosa que no succeeix en els circuits reals doncs sempre hi han resistències paràsites que evacuaran energia a l'ambient en forma de calor, de forma que l'energia del circuit anirà disminuint fins a zero, desapareixent finalment l'oscil·lació.

El comportament del circuit ve determinat per la seva equació diferencial i les seves condicions inicials. Considerem el circuit de la figura 9.1 constituït per un generador de tensió, una resistència, un condensador i una bobina en sèrie. La llei de tensions de Kirchhoff d'aquesta malla serà:

$$V_g = R \cdot I + \frac{q}{C} + L \cdot \frac{dI}{dt} = R \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} + L \cdot \frac{d^2q}{dt^2} \quad (1)$$

on  $q$  és la càrrega emmagatzemada a l'interior del condensador i s'ha tingut en compte que  $I = dq/dt$ . Resulta una equació diferencial de segon ordre en  $q$ . Noteu que la tensió en el condensador és  $q/C$ , per la qual cosa  $V_c$  és proporcional a  $q$ . L'equació també es pot expressar en funció d'una variable molt habitual a l'analitzar els circuits elèctrics com és la intensitat del corrent. Només cal derivar l'equació anterior:

$$\frac{dV_g}{dt} = R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} + L \cdot \frac{d^2I}{dt^2} \quad (2)$$



que és una equació diferencial de segon ordre en el corrent  $I$ . Les solucions d'aquestes equacions es poden obtenir aplicant els procediments matemàtics pertinents i tenint en compte les condicions inicials del circuit.

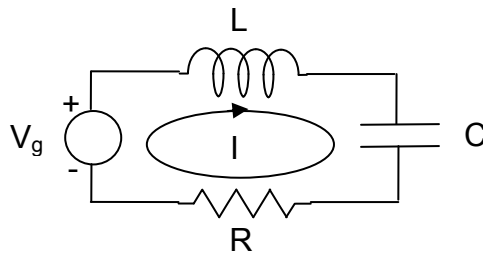


Figura 9.1. Circuit RLC.

Noteu que en les pràctiques anteriors només varem considerar circuits RC sense bobines. En aquells casos l'equació diferencial es reduïa a una equació de primer ordre, la solució de la qual era una exponencial i no presentava oscil·lacions.

## 9.2. L'analogia electro-mecànica

Considerem el circuit mecànic de la figura 9.2 consistent en una massa  $m$  subjectada verticalment a una molla de constant de força  $k$ , i subjectada aquesta última a un suport que és mogut verticalment per una força externa (en aquesta representació gràfica, la mà) de valor  $F_0 \cdot \cos(\omega t)$ . Si el desplaçament vertical respecte de la posició d'equilibri l'anomenem  $x$  resulta que, aplicant la segona llei de Newton, podem escriure:

$$\Sigma F = m \cdot a$$

$$F_0 \cdot \cos(\omega t) - k \cdot x - b \cdot v = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (3)$$

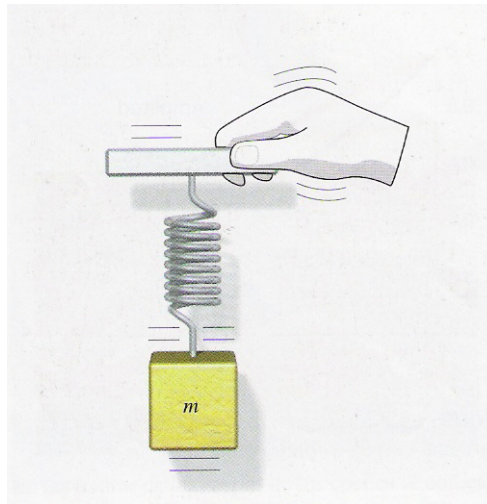


Figura 9.2. Sistema mecànic oscil·lant.

on s'ha considerat que el sistema està sotmès a una força esmorteïdora proporcional a la velocitat  $F_a = -b \cdot v$ . Reordenant els termes d'aquesta última equació:

$$F_0 \cdot \cos(\omega t) = k \cdot x + b \frac{dx}{dt} + m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (4)$$

que resulta igual que la primera de les equacions de l'apartat anterior si substituïm  $x$  per  $q$ ,  $m$  per  $L$ ,  $b$  per  $R$ ,  $k$  per  $1/C$ , i la força externa per  $V_g$ . La taula 9.1 resumeix aquestes analogies.

Oscil·lador elèctric	$q$	$L$	$R$	$C$	$V_g$	$I = dq/dt$
Oscil·lador mecànic	$x$	$m$	$b$	$1/k$	$F$	$v = dx/dt$

Taula 9.1. Analogia electro-mecànica.

Aquesta analogia permet analitzar sistemes mecànics a través dels seus anàlegs elèctrics i posteriorment traduir els resultats elèctrics en mecànics.

En els següents apartats analitzarem les oscil·lacions produïdes tant pel circuit mecànic com pel seu anàleg elèctric anant del cas més senzill al més complicat.

### 9.3. Oscil·lacions lliures

Considerem el circuit LC de la figura 9.3, amb l'interruptor que es tanca a l'instant  $t = 0$  i el condensador amb una càrrega inicial  $q_0$  (que produeix una tensió entre terminals del condensador de valor  $V_c(0) = q_0/C$ ). Per saber el comportament d'aquest circuit cal resoldre la seva equació diferencial:

$$0 = \frac{I}{C} + L \frac{d^2 I}{dt^2} \quad (5)$$

amb les condicions inicials  $I(0) = 0$  i  $q(0) = q_0$ .

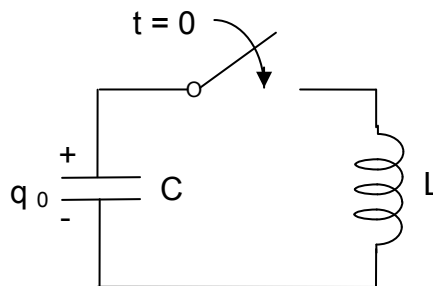


Figura 9.3.- Circuit oscil·lant LC.

La solució d'aquesta equació diferencial es:

$$q = A \cdot \cos(\omega_0 t); \quad I = -A \omega \sin(\omega_0 t); \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad (6)$$

ja que substituint el corrent  $I$  a l'equació diferencial es comprova que la compleix, i també compleix la condició inicial nul·la del corrent i la de la càrrega inicial (noteu que en aquest circuit el corrent surt del condensador per la qual cosa  $I = -dq/dt$ ). Per tant, la solució indica que el corrent del circuit oscil·la segons una sinusoide de freqüència  $\omega_0 = (LC)^{-1/2}$  i amplitud  $q_0 \cdot \omega_0$ .

Aquest resultat té un clar sentit físic, doncs al tancar l'interruptor el corrent ha de ser inicialment nul, ja que així ho imposa la continuïtat del corrent per la bobina. Però al mateix temps, la tensió inicial del condensador provoca un augment del corrent a la bobina ( $dI_L/dt = V_c/L$ ). I a mesura que va circulant corrent el condensador es va descarregant la qual cosa fa disminuir el valor de  $V_c$  i aquest decrement comporta la disminució del ritme de creixement del corrent.

Considerem ara l'oscil·lador mecànic de la figura 9.2 però amb el suport superior quiet (es a dir,  $F_0 = 0$ ) i sense esmorteïment ( $b = 0$ ). L'equació diferencial del sistema en aquestes condicions seria:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + k \cdot x = 0 \quad (7)$$

Les condicions inicials del circuit mecànic són un desplaçament  $x_0$  i una velocitat nul·la de la massa (simplement, estirem la massa  $m$  un tros  $x_0$  i a l'instant zero deixem de subjectar-la i la molla la propulsa cap amunt). Aquesta equació diferencial és anàloga a la del circuit LC que acabem d'estudiar. Noteu també que les condicions inicials són anàlogues a les del circuit elèctric (velocitat zero de la massa és equivalent a intensitat elèctrica zero, i el desplaçament inicial  $x_0$  és equivalent a la càrrega inicial  $q_0$ ).

La solució d'aquest sistema mecànic serà per tant:

$$x = A \cdot \cos(\omega_0 t); \quad v = \frac{dx}{dt} = -A \omega \cdot \sin(\omega_0 t); \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad (8)$$

que mostra que la massa oscil·la al voltant del seu punt d'equilibri amb una freqüència  $(k/m)^{1/2}$  i amb una amplitud  $x_0$ .

#### 9.4. Oscil·lacions esmorteïdes

Suposem ara que introduïm una resistència petita en sèrie amb la bobina en el circuit de la figura 9.3, deixant la resta igual. En aquest cas l'equació diferencial del circuit serà:

$$0 = R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} + L \frac{d^2 q}{dt^2} \quad (9)$$

la solució de la qual, amb les mateixes condicions inicials que en el cas anterior, és:

$$q = A e^{-\frac{t}{2\tau}} \cos(\omega_1 t); \quad I = -I_m \cdot e^{-\frac{t}{2\tau}} \sin(\omega_1 t + \varphi_I); \quad (10)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{1}{(2\tau)^2}}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad \tau = \frac{L}{R}; \quad I_m \cong A \omega_1; \quad \varphi_I \cong \frac{1}{2\tau \omega_1} \cong \frac{1}{2Q}$$

Observem per tant que el corrent és oscil·lant (sempre que  $R < 2 \cdot (L/C)^{1/2}$ ) però a una freqüència  $\omega_1$  menor que la d'abans, i que l'amplitud es va esmorteïnt degut a la presència de l'exponencial  $\exp(-t/2\tau)$ . La figura 9.4 mostra aquest resultat. Un oscil·lador esmorteït ve caracteritzat per seu factor de qualitat  $Q$ :

$$Q = \omega_0 \cdot \tau \quad (11)$$

que es pot demostrar que és una mesura de la pèrdua d'energia de l'oscil·lació a cada cicle.

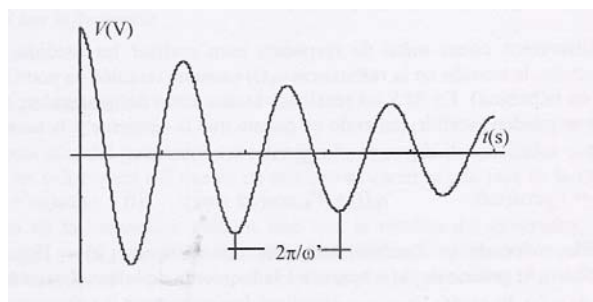


Figura 9.4. Resposta esmorteïda.

A l'igual que en el cas anterior, la taula de l'analogia electro-mecànica ens permetria escriure la solució del sistema mecànic esmorteït. En aquest cas podríem imaginar la força d'esmorteïment mitjançant l'oscil·lació de la massa  $m$  dins d'un líquid viscos que produeix una força de frenada proporcional a la seva velocitat ( $F_a = -b \cdot v$ ).

Un circuit molt similar a l'acabat d'estudiar és el de la figura 9.5. Al tancar l'interruptor a l'instant zero la bobina impedeix que circuli corrent, per la condició de continuïtat del corrent que imposa la bobina. Per tant, la caiguda de tensió en  $R$  és nul·la, i la tensió  $V_L$  que s'aplica entre els terminals de la bobina serà  $[V_g - V_c(0)]$ , essent aquesta última tensió la inicial del condensador. Aquesta tensió provocarà un increment del corrent per la bobina i s'iniciarà una oscil·lació similar a la descrita en els paràgrafs anteriors. Però, com que el circuit té una resistència l'oscil·lació s'anirà esmorteïnt fins que al cap de cert temps desapareixerà. En aquesta situació final el corrent serà zero, el condensador es comportarà com un circuit obert i la bobina com un curtcircuit. La tensió final en el condensador serà per tant  $V_g$ .

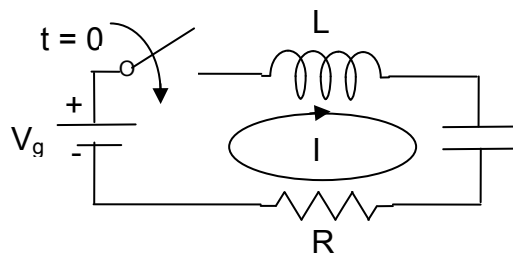


Figura 9.5.- Circuit oscil·lant RLC.

Per poder quantificar aquest comportament hem de resoldre l'equació del circuit, que serà precisament la (1), i si la derivem obtindrem la (2), que coincideix amb la (9), ja que  $V_g$  la suposem en aquest cas constant. La condició inicial del corrent també serà zero, i el condensador tindrà una certa càrrega inicial  $q(0)$ . Per tant, l'oscil·lació serà la mateixa que la expressada per (10) i representada en la figura 9.4. Hi haurà una oscil·lació a partir de  $t = 0$  que s'anirà esmorteïnt fins a desaparèixer. Al final el corrent pel circuit serà nul·la i el condensador estarà carregat a la tensió  $V_g$ .

Una forma d'implementar un circuit que presenti aquest comportament és muntar el circuit 9.1 utilitzant com a generador de tensió  $V_g$  una ona quadrada. Si el període d'aquesta ona és suficientment llarg, l'oscil·lació produïda en una commutació de l'ona quadrada ja s'haurà esmorteït al cap de mig període, quan es produeix una nova commutació de  $V_g$ . En aquesta situació, cada commutació de l'ona quadrada equival al accionament d'un interruptor com el de la figura 9.5. El corrent resultant serà una successió d'oscil·lacions esmorteïdes que s'inicien en cada flanc de l'ona quadrada i que s'esmorteïxen abans d'arribar al nou flanc. D'aquesta manera podem visualitzar a l'oscil·loscopi les oscil·lacions lliures i esmorteïdes del circuit.

### 9.5. Oscil·lacions forçades

Finalment considerarem el circuit de la figura inicial 9.1 en la que suposarem que el generador de tensió  $V_g$  és de valor  $V_0 \cdot \cos(\omega t)$ . Com veurem, aquest generador forçarà oscil·lacions en el circuit.

La solució de l'equació diferencial general (1) consta de dues parts, la solució transitòria i la solució permanent. La solució transitòria és idèntica a la descrita a l'apartat anterior (eq. (10)) i s'extingeix al transcórrer un cert temps, quedant finalment només la solució permanent. La solució permanent és:

$$q = A \cdot \cos(\omega t - \delta); \quad I = -A \cdot \omega \cdot \sin(\omega t - \delta);$$

$$A = \frac{V_0}{\sqrt{L^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + R^2\omega^2}}; \quad \text{tg}(\delta) = \frac{R\omega}{L(\omega_0^2 - \omega^2)}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad (12)$$

El corrent que circula pel circuit oscil·la a la freqüència  $\omega$  que és la del generador extern. Es tracta, per tant, d'una oscil·lació forçada.

Podem observar de (12) que l'amplitud  $A$  presenta un màxim quan la freqüència del generador extern  $\omega$  coincideix amb la freqüència lliure o "natural"  $\omega_0$ , d'oscil·lació del circuit quan no hi ha esmoreïment ni generador extern. Es diu que el circuit entra en ressonància i l'amplitud de l'oscil·lació es fa màxima. El desfasament  $\delta$  també varia al fer-ho la freqüència del generador. Si  $\omega \ll \omega_0$ ,  $\delta$  és molt petit. Quan  $\omega = \omega_0$ ,  $\delta = \pi/2$ . I quan  $\omega \gg \omega_0$ ,  $\delta = \pi$ . L'amplitud de l'oscil·lació i el desfasament es representen a la figura 9.6.

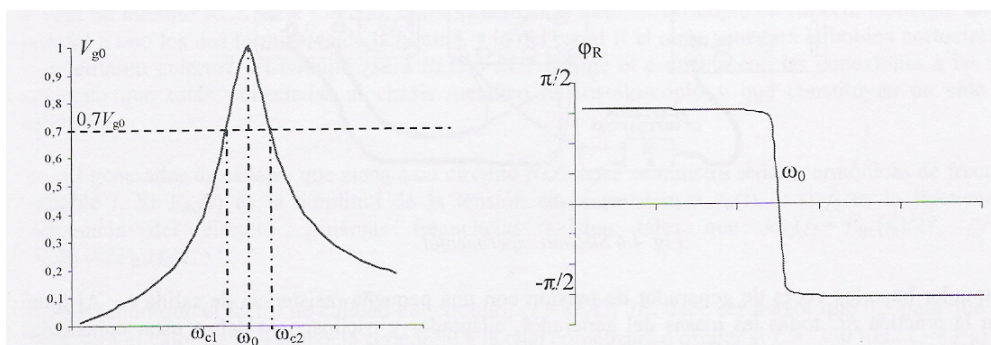


Figura 9.6. Amplitud i desfasament del circuit RLC en funció de la freqüència del generador

Un paràmetre important d'aquest tipus de circuit és el factor de qualitat  $Q$ . Aquest factor es defineix com:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \quad (13)$$

on  $\Delta\omega$  és l'amplada de la corba de ressonància i ve donada per l'interval de freqüències en les que l'amplitud és major o igual que el valor màxim (el valor de pic) dividit per  $\sqrt{2}$  (noteu que  $1/\sqrt{2} = 0,7$ ). És una mesura de l'agudesesa de la corba de ressonància, ja que si  $\Delta\omega$  és molt petita  $Q$  serà molt gran, i viceversa. Es demostra que aquest factor  $Q$  és el mateix que caracteritza les oscil·lacions esmoreïdes, definit en les expressions (11) i (10).

## ESTUDI PREVI

1. Considereu el circuit 9.1 amb els següents valors:  $L = 1000 \mu\text{H}$ ,  $C = 3,3 \text{ nF}$ ,  $R = 100 \Omega + R_i$ , essent  $R_i = 50 \Omega$  la resistència interna del generador de funcions del seu lloc de treball. Aplicant les expressions (10) i (11) obtingueu els valors de  $\omega_0$ ,  $\tau$  i  $Q$  del circuit en règim d'oscil·lació lliure esmoreïda.
2. Per poder observar bé el pic de ressonància del corrent en funció de la freqüència, la representarem en un interval de freqüències limitat per  $f_{\text{inicial}} = f_0 \cdot (1 - 1/Q) = f_0 - \Delta f$  i per  $f_{\text{final}} = f_0 \cdot (1 + 1/Q) = f_0 + \Delta f$ , essent  $\Delta f$  l'interval indicat a la figura 9.6. Calculeu aquestes dues freqüències.
3. Utilitzant el full de càlcul i aplicant les expressions (12) calculeu  $\delta$  i  $A\omega$  en funció de la freqüència  $\omega$  i de l'amplitud  $V_0$  del generador de senyal (preneu  $V_0 = 1,0 \text{ Volt}$ ). Feu una taula de

l'amplitud del corrent  $A_\omega$  en funció de la freqüència  $f$  del generador des de  $f_{inicial}$  fins a  $f_{final}$  amb intervals de 1 kHz i representeu-la gràficament. Hauria de ser semblant a la representada a la figura 9.6. Calculeu l'amplitud corresponent a la freqüència  $f_0$ , que denominarem  $V_R^{max}$ . Marqueu en la gràfica la posició de  $f_0$  i la amplitud corresponent a aquesta freqüència i estimeu l'interval en el que l'amplitud de l'oscil·lació és igual o superior a  $V_R^{max}/\sqrt{2}$ . Determineu les freqüències  $f_1$  i  $f_2$  que delimiten aquest interval.

4. Com que  $\Delta f = f_2 - f_1$ , a partir d'aquí podem trobar el factor de qualitat  $Q = f_0/\Delta f$  i la constant de temps:  $\tau = Q/2\pi \cdot f_0 = 1/2\pi \Delta f$ . Verifiqueu que aquest paràmetres coincideixen amb els trobats a l'apartat 1 de l'estudi previ.

5. Repetiu els apartats anteriors canviant els valors dels paràmetres del circuit. Cas a) canviarem la R per 330  $\Omega$ . Cas b) tornarem a posar R = 100  $\Omega$  i canviarem C per 10 nF. Justifiqueu els canvis observats en les corbes de ressonància.

## **PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI**

### 1.- MUNTATGE DE L'OSCIL·LADOR RLC

Munteu a la placa de connexions un circuit sèrie format per una bobina, un condensador i una resistència (1000  $\mu$ H, 3,3 nF, 100  $\Omega$ ), connectats a un generador de senyal de impedància de sortida 50  $\Omega$ . Cal connectar la resistència a la massa del generador (terminal negre), a fi de poder mesurar la tensió alterna que hi cau. S'aplicarà una tensió sinusoïdal d'amplitud qualsevol (però sempre la mateixa) i freqüència variable. Cal observar que el valor efectiu de la resistència serà la suma de la que inserim a la placa de connexions més la resistència interna del generador de senyal

La tensió a la resistència  $V_R$  (proporcional al corrent) es connectarà al canal I de l'oscil·loscopi, mentre que la tensió de sortida del generador  $V_G$  es connectarà al canal II, i l'usarem per sincronitzar-lo.

### 2.- OBTENCIÓ DE LA GRÀFICA DE RESSONÀNCIA $V_R(f)$

Volem fer mesures de  $V_R(f)$  entre els terminals de la resistència per a un conjunt de freqüències degudament espaiades que cobreixi l'interval  $[f_{final}, f_{inicial}]$  obtingut a l'exercici previ. Programarem un total de 10 o 12 freqüències.

Seleccionarem la primera d'aquestes freqüències en el generador de funcions, mantenint sempre la mateixa amplitud de la tensió del generador de senyal. Mesurarem el valor pic a pic de  $V_R$ .

*Qüestió 1. Indiqueu el valor de la primera freqüència i el de  $V_R$  mesurat.*

Repetirem la mesura per a cada una de les freqüències  $f$  programades. Farem una taula que relacioni  $V_R$  amb  $f$ , i ho representarem gràficament amb el full de càlcul. S'espera obtenir una funció suau amb un màxim al seu centre.

*Qüestió 2:- Escriviu la taula de valors mesurats i la seva representació gràfica.*

Cal imprimir aquesta gràfica. Sobre el paper podem identificar la freqüència en la que es produeix el màxim (freqüència de ressonància  $f_0$ ) i el valor que pren  $V_R$  en aquest punt  $V_R^{max}$ . Per determinar l'amplada del pic, calcularem  $V_R^{max}/\sqrt{2}$  i buscarem sobre el paper les freqüències  $f_1$  i  $f_2$  a les quals  $V_R$  té aquest valor.

Aleshores  $\Delta f = f_2 - f_1$ . A partir d'aquí podem trobar el factor de qualitat  $Q = f_0/\Delta f$  i la constant de temps:  $\tau = Q/2\pi f_0 = 1/2\pi \Delta f$

*Qüestió 3.- Quins són els valors obtinguts de  $f_0$ ,  $\Delta f$ ,  $Q$  i  $\tau$  obtinguts per aquest procediment?*

### 3.- OBTENCIÓ MÉS PRECISA DE $f_0$ , $\tau$ i $Q$

Repetirem les mesures de  $f_0$ ,  $\tau$  i  $Q$  per un procediment més directe i precís. En comptes de fer la mesura punt a punt, buscarem directament la freqüència  $f_0$  a la que l'amplitud de  $V_R$  és màxima i la seva fase coincideix amb la de  $V_g$  (observeu que això permet una determinació molt més precisa). Manipulant la sensibilitat del oscil·loscopi farem que el valor pic a pic tingui 7 divisions. A les freqüències  $f_1$  i  $f_2$  l'amplitud ha de ser aproximadament 5 divisions ( $\sqrt{2}$  vegades més petita), i buscarem les freqüències a les que això passa, sense tocar l'amplitud ni la sensibilitat.

Amb els valors de  $f_1$ ,  $f_2$  i  $f_0$  tornarem a calcular  $\tau$  i  $Q$ .

*Qüestió 4. Quins són els nous valors de  $f_0$ ,  $\tau$  i  $Q$*

*Qüestió 5.- Compareu aquests valors amb els trobats al primer apartat del estudi previ i si hi ha discrepància discutiu les possibles causes.*

### 4.- INFLUÈNCIA DELS VALORS DELS COMPONENTS EN LA CORBA DE RESSONÀNCIA

Analitzarem com canvia el comportament de l'oscil·lador quan canvien els valors dels components del circuit. En tots els casos mesurarem  $f_0$  i  $\Delta f$  seguint el procediment directe, i analitzarem com s'han alterat respecte al cas anterior i ho interpretarem en funció de les expressions teòriques.

Cas a) Canviarem la  $R$  per  $330 \Omega$ .

Cas b) Tornarem a posar  $R = 100 \Omega$  i canviarem  $C$  per  $10 \text{ nF}$

*Qüestió 6.- Escriviu els valors de  $f_0$ ,  $\tau$  i  $Q$  per el cas a) i el cas b). Compareu-los amb els valors trobats a l'estudi previ i si hi ha discrepàncies discutiu-ne les possibles causes.*

### 5.- OSCIL·LACIONS LLIURES DEL CIRCUIT RLC

Amb la configuració inicial, i excitant l'oscil·lador amb una ona quadrada de baixa freqüència (de l'ordre de  $1 \text{ kHz}$ ), obtindrem la oscil·lació lliure ( esmorteïda ), de la que en mesurarem el període  $T$ .

Per mesurar-ne la constant de temps  $\tau$ , mesurarem l'amplitud  $A_0$  i  $A_1$  de dues oscil·lacions consecutives, i farem ús del fet que  $T/2\tau = \ln(A_0/A_1) = \delta$  ( decrement logarítmic).

A partir de  $T$  i  $\tau$  calcularem  $f = 1/T$ ,  $\Delta f = 1/2\pi\tau$  i el factor de qualitat  $Q$ .

Calcularem el valor de  $f_0$ , comprovant que per aquest factor de qualitat, la diferència entre  $f$  i  $f_0$  és gairebé irrellevant. Compararem els valors de  $f_0$  i  $\Delta f$  obtinguts per aquest procediment amb els obtinguts a partir del pic de ressonància.

*Qüestió 7.- Escriviu els valors mesurats en aquest apartat de  $f$ ,  $f_0$ ,  $\tau$  i  $Q$ , i compareu-los amb els trobats en l'experiment anterior.*

## FULL DE RESULTATS. Pràctica 9

Nom dels components de l'equip:

Lloc de treball:

### Obtenció de la gràfica de ressonància

Qüestió 1:  $f_1 =$

$V_R =$

Qüestió 2:- *Escriviu la taula de valors mesurats i la seva representació gràfica.*

Qüestió 3.-  $f_0 =$

$\Delta f =$

$Q =$

$\tau =$

### Obtenció més precisa de $f_0$ , $\tau$ i $q$

Qüestió 4.-  $f_0 =$

$\Delta f =$

$Q =$

$\tau =$

Qüestió 5.- *Compareu aquests valors amb els trobats al primer apartat del estudi previ i si hi ha discrepància discutiu les possibles causes.*

### Influència dels valors dels components en la corba de ressonància

Qüestió 6.- Cas a):  $f_0 =$

$Q =$

$\tau =$

Cas b):  $f_0 =$

$Q =$

$\tau =$

*Compareu-los amb els valors trobats a l'estudi previ i si hi ha discrepàncies discutiu les possibles causes.*

### Oscil·lacions lliures del circuit RLC

Qüestió 7.- *Escriviu els valors mesurats en aquest apartat:  $f =$   $f_0 =$   $\tau =$   $Q =$*

*Compareu-los amb els trobats en l'experiment anterior.*



## PRÀCTICA 10. ONES ACÚSTIQUES

Aquesta pràctica té per objectiu estudiar les ones acústiques i mesurar les seves principals característiques. En particular s'obtidran ones acústiques audibles i es veurà la dependència del seu  $\tau_0$  amb la freqüència. També es mesuraran els principals paràmetres d'una ona acústica inaudible: la longitud d'ona, la freqüència i la velocitat de propagació.

### 10.1. Ones acústiques

Les ones acústiques són ones longitudinals de pressió que es propaguen per un medi material. Imaginem una filera unidimensional de molècules en equilibri, uniformement separades, com mostra la figura 10.1. Suposem que a través d'algun procediment empenyem la primera molècula de l'esquerra cap a la dreta, de forma que xoqui amb la segona. A conseqüència del xoc, aquesta segona també es mourà cap a la dreta i xocarà amb la tercera. Per tant, la pertorbació inicial es va propagant longitudinalment a una certa velocitat.

Si la font que comunica el moviment a les molècules vibra, provocarà que aquestes oscil·lin al voltant de les seves posicions d'equilibri amb una certa amplitud. Una ona sonora elemental, en una dimensió, es pot expressar per una funció  $s(x,t)$  que descriu el desplaçament de cada molècula respecte de la seva posició d'equilibri:

$$s(x,t) = s_0 \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

Aquests desplaçaments es realitzen en la direcció del moviment de propagació de l'ona i donen lloc a variacions de la densitat i pressió del medi de propagació.

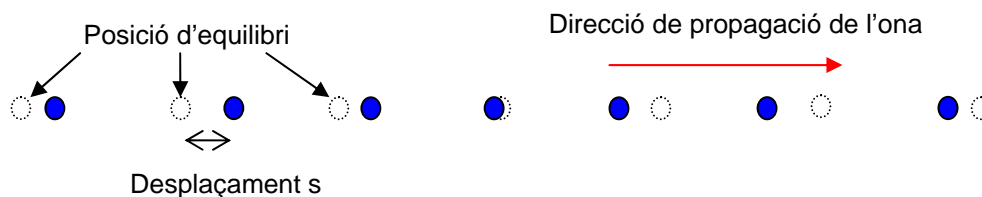


Figura 10.1.- Filera unidimensional de molècules que es desplacen "longitudinalment" respecte de la seva posició d'equilibri. L'ona es propaga en la mateixa direcció que el desplaçament.

Una propietat general de les ones és que la seva velocitat de propagació depèn de les propietats del medi i és independent de la font que genera l'ona. Es demostra que la velocitat de propagació d'una ona acústica en un gas, com és l'aire, és:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (2)$$

on  $T$  és la temperatura absoluta en graus Kelvin,  $R$  és la constant universal dels gasos que val  $8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ,  $M$  la massa molar del gas que per l'aire val  $29\cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$ , i  $\gamma$  és una constant que depèn del tipus de gas. Per a l'aire, dominat per les molècules diatòmiques de oxigen i nitrogen, es pren per  $\gamma$  el valor de 1,4. Noteu que la velocitat de propagació de l'ona acústica augmenta amb la temperatura. A  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  la velocitat és de  $331 \text{ m/s}$ , mentre que a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  és de  $343 \text{ m/s}$ .

L'energia transportada per les ones longitudinals és proporcional al quadrat de la seva amplitud. La intensitat d'una ona acústica és la quantitat d'energia que travessa la unitat de superfície perpendicular a la direcció de propagació per segon. Es mesura en watts per metre quadrat, i ve donada per la següent expressió:

$$I = \frac{1}{2} \omega^2 s_0^2 \rho v \quad (3)$$

on  $s_0$  és l'amplitud del desplaçament donat per l'equació (1),  $\omega$  la pulsació,  $\rho$  la densitat de l'aire i  $v$  la velocitat de propagació de l'ona.

El marge d'intensitats de l'ona acústica que l'oïda és capaç de detectar és enorme. La màxima intensitat que és percep sense perjudici per a l'oïda és aproximadament de  $1 \text{ W/m}^2$ , i es poden arribar a escoltar intensitats de l'ordre de  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Aquest gran marge, juntament amb el fet que les sensacions auditives augmenten en escala aritmètica quan les intensitats ho fan en escala geomètrica fa convenient utilitzar un tractament logarítmic per les intensitats. Per això s'utilitza com intensitat sonora el decibel, definit de la següent forma:

$$I_{\text{decibel}} = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad (4)$$

on  $I_0$  correspon al só audible més feble,  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ , i  $I$  és la intensitat en  $\text{W/m}^2$ . Per tant, el llindar del só serà de 0 db, mentre que el llindar de sensació desagradable serà de 120 db. La intensitat de dolor correspon a 140 db, i la perforació dels timpans a 160 db.

La figura 10.2 mostra la dependència de la sensació sonora amb la freqüència del senyal acústic. L'espectre de freqüències acústiques audibles va des de 20 Hz fins a 20 kHz, si bé un percentatge elevat de persones no sent més enllà de l'interval entre 50 Hz i 15 kHz. El màxim de sensibilitat es troba al voltant dels 3 kHz. Les ones acústiques de freqüència superior a les audibles, és a dir, superiors a 20 kHz, s'anomenen ultrasons.

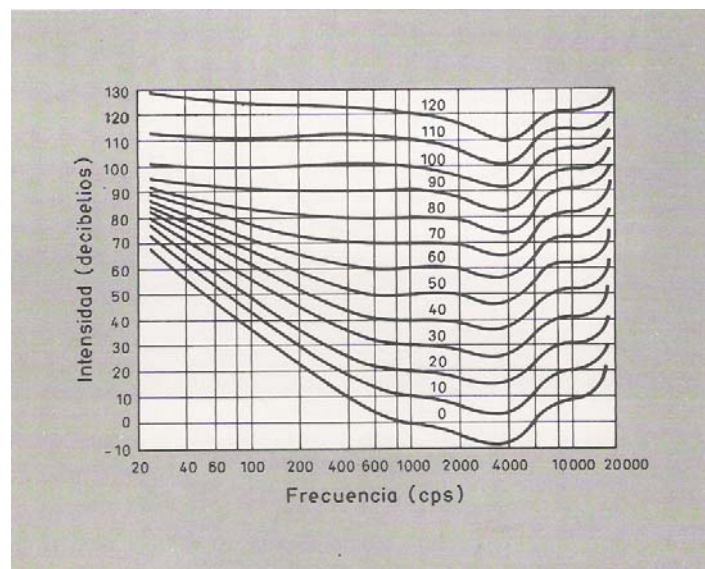


Figura 10.2.- Línies de sensació sonora constant.

## 10.2. L'equació d'ona

S'anomena equació d'ona a la següent equació diferencial:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (5)$$

i es denomina funció d'ona a tota funció  $y(x,t)$  que compleixi l'equació d'ona. Una funció d'ona és del tipus  $y = f(x-vt)$ , ja que és fàcil demostrar, derivant la funció, que es compleix (5). En aquestes funcions  $v$  és la velocitat de propagació de l'ona.

Un cas particular de funció d'ona, que s'anomena ona harmònica, és el donat per:

$$y = A \sin(kx - \omega t) \quad (6)$$

en aquesta expressió  $A$  és l'amplitud de l'ona,  $k$  el *nombre d'ona* i  $\omega$  la pulsació o *freqüència angular*. Noteu que l'equació (1) és una funció d'ona harmònica. L'argument de la funció sinus,  $(kx - \omega t)$ , també es denomina fase.

El nombre d'ona  $k$  està relacionat amb un paràmetre anomenat *longitud d'ona*  $\lambda$ . Imaginem que fem una "fotografia" a l'ona en un instant determinat  $t_0$ . El que obtindríem seria una funció sinusoidal que varia amb  $x$ :

$$y = A \cdot \sin(kx - \phi_0) \quad (7)$$

on el desfasament  $\phi_0$  és  $\omega t_0$ . Aquesta funció sinusoidal tindria una representació gràfica com la de la figura 10.3 que mostra un període  $\lambda$  segons la variable  $x$ . És a dir, el valor de la funció, per exemple un pic, es torna a repetir després de recórrer un espai  $\lambda$ . Per tant:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8)$$

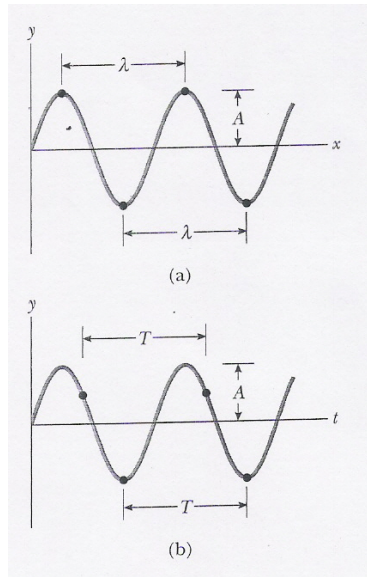


Figura 10.3.- Ona harmònica. a) Variació de l'amplitud en funció de  $x$  en un determinat instant. b) Variació de l'amplitud en funció del temps en un punt determinat.

La freqüència angular està relacionada amb la freqüència  $f$  i el període  $T$  segons:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (9)$$

La longitud d'ona  $\lambda$  i la freqüència  $f$  estan lligades per la velocitat de propagació. En efecte, si volem conservar un determinat valor constant de la fase s'haurà de complir que:

$$k\Delta x = \omega\Delta t \quad \Rightarrow \quad v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = f\lambda \quad (10)$$

Ja que  $\Delta x/\Delta t$  és la velocitat a la que ens hem de moure per mantenir el mateix valor de la fase. Per tant, la velocitat de propagació ve donada pel producte de la freqüència per la longitud d'ona.

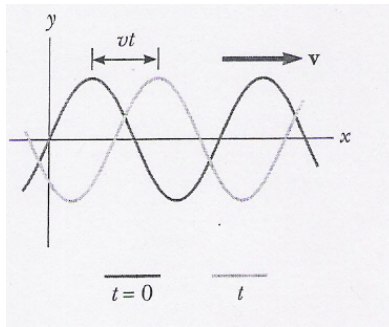


Figura 10.4.- Representació gràfica de la propagació d'una ona.

L'equació d'ona té un àmbit d'aplicació molt més ampli que el de l'acústica, amb aplicacions en els camps de la mecànica i en el de l'electromagnetisme entre d'altres. En tots aquests camps s'utilitzen les relacions presentades en aquest apartat si bé amb magnituds i valors de naturalesa diferent.

### 10.3. Transducció de senyals acústics

La transducció és la transformació d'un tipus de senyal en un altre de naturalesa diferent. Els micròfons són transductors que converteixen un senyal acústic en un senyal elèctric, mentre que els altaveus són transductors que fan la conversió contrària, d'elèctrica a acústica.

La figura 10.5 mostra el circuit de polarització d'un micròfon (del tipus electret) que es farà servir en aquesta pràctica per convertir senyals sonors en elèctrics. Per obtenir una tensió proporcional al senyal acústic s'ha de polaritzar el micròfon amb la resistència  $R_M$  i la font  $V_{CC}$ . L'encapsulatge metàl·lic ha d'anar connectat a massa.

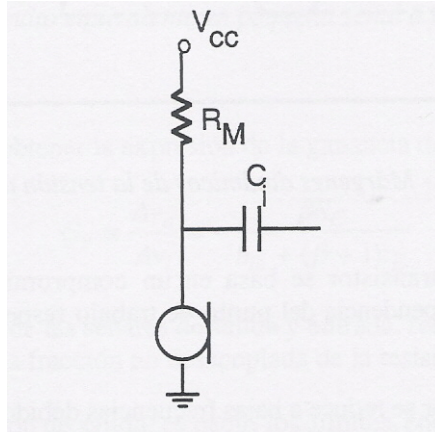


Figura 10.5.- Circuit de polarització del micròfon.

En aquesta pràctica també farem servir emissors i receptors d'ultrasons. Aquests dispositius estan formats per un disc ceràmic piezoelèctric metal·litzat per les seves dues cares. Es basen en un sistema que ressona a uns 40 kHz. L'emissor vibra quan se l'excita amb una tensió elèctrica i emet un feix d'ultrasons en la direcció del seu eix. El receptor genera una tensió elèctrica proporcional a la pressió que exerceix l'ona acústica que incideix sobre ella.

### 10.4. Errors en les mesures

Quan es realitzen mesures de magnituds físiques sempre es fan errors. Aquests errors són deguts a la limitada precisió dels instruments de mesura, als sentits de l'observador, a les fluctuacions de les variables i a d'altres causes. Aquests errors es solen classificar com sistemàtics o aleatoris. Els sistemàtics són deguts als instruments mal calibrats i estan presents

en totes les mesures. Una vegada coneguts es poden corregir. Els aleatoris, pel contrari, són deguts a l'observador i no es poden evitar.

El tractament dels errors en les mesures és una tècnica que va més enllà dels objectius d'aquest curs, i es fonamenta en l'estadística, ja que no es coneix a priori el valor exacte de la magnitud que es mesura. Aquí només s'introduiran dos conceptes elementals: l'error absolut i el relatiu, i la propagació dels errors en mesures indirectes.

L'error absolut és el valor mesurat menys el valor exacte:  $\Delta x = x - x_0$ . L'error relatiu és l'error absolut dividit pel valor exacte:  $\Delta x_r = \Delta x/x_0$ . Noteu que al no ser conegut el valor exacte, només podrem fer estimacions dels errors. Una mesura serà més precisa si l'error relatiu és menor. En aquesta pràctica es mesurarà una longitud amb ajut d'un regle calibrat en mil·límetres. Es pot estimar que l'error absolut en la mesura serà al voltant de 1 mm. Si la longitud que mesurem és de 1 cm, l'error que farem serà del 10% ( $1/10 = 0,1$ ), mentre que si mesurem una longitud de 10 cm, l'error relatiu serà del 1% ( $1/100 = 0,01$ ). Per tant, la segona mesura serà molt més precisa que la primera.

Quan el resultat que es vol obtenir s'obté de forma indirecta, a través d'una fórmula en la que es mesuren les variables independents que intervenen, es diu que hi ha una propagació de l'error. Per exemple, el període d'oscil·lació d'un pèndul segueix la llei  $T = 2\pi(L/g)^{1/2}$ , essent L la longitud del pèndul. Aquesta expressió permet obtenir g de forma indirecta mesurant L i T. Però els errors comesos en la mesura de L i T es "propaguen" en el càlcul de g. Per calcular l'error en la mesura indirecta de g es fa servir el càlcul diferencial.

## **ESTUDI PREVI**

- 1.- Calcula la intensitat en  $W/m^2$  d'una ona sonora de 60 db.
- 2.- Quina intensitat hauria de tenir una ona sonora de 100 Hz per a tingués la mateixa sensació sonora que una de 1 kHz i 60 dB d'intensitat. Utilitza la gràfica 10.2
- 3.- Calcula la velocitat del só a  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  i a  $40\text{ }^\circ\text{C}$ . Quina serà la longitud d'ona en les dues temperatures si la freqüència és de 4 kHz.?
- 4.- Calcula el període i la longitud d'ona d'una ona acústica de 40 kHz suposant una velocitat de propagació de 340 m/s.
- 5.- Les ones electromagnètiques també poden ser descrites per funcions d'ona com les acústiques, però la seva velocitat de propagació és la de la llum, aproximadament 300.000 km/s. Calcula la freqüència d'una ona electromagnètica de  $0,6\text{ }\mu\text{m}$  de longitud d'ona.
- 6.- Fes una taula amb el full de càlcul de la funció  $y = 5 \cdot x^{-2}$  entre  $x = 1$  i  $x = 10$  amb passos de 1. Representa la funció  $y(x)$  en escala lineal i en escala logarítmica (es a dir,  $\log(y)$  en funció de  $\log(x)$ ). Quin és el pendent de la recta que aproxima aquesta última corba?

## **PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI**

### **1.- VISUALITAZIÓ DE SENYALS ACÚSTICS**

Connecteu l'altaveu al generador de funcions, seleccionant prèviament un senyal sinusoidal de 400 Hz. Verifiqueu que la intensitat del só depèn de l'amplitud del senyal elèctric. Seleccioneu una intensitat que no molesti als veïns. Varieu la freqüència del senyal elèctric. Noteu com canvia el to del senyal acústic.

*Qüestió 1: Quin és l'interval de freqüències que podeu apreciar amb aquest altaveu?*

Munteu el transductor de sò utilitzant el micròfon CME-7 tal com s'indica en la figura 10.5. Per usar aquest micròfon cal soldar dos fils metàl·lics, similars als terminals de les resistències, en els punts de soldadura de la seva cara posterior. Observeu que el micròfon té la càpsula metàl·lica connectada en un dels seus punts terminals, que és el que s'ha de connectar a massa. Utilitzeu per  $R_M$  el valor de 22 k $\Omega$  i una  $V_{cc} = 15V$ . No cal connectar el condensador  $C_i$ .

Seleccioneu en el generador de funcions un senyal sinusoidal de 1 kHz. Col·loqueu el micròfon molt a prop de l'altaveu i visualitzeu en l'oscil·loscopi el senyal de sortida. Mesureu la freqüència d'aquest senyal i verifiqueu que coincideix amb la del que proporciona el generador de funcions.

*Qüestió 2: Coincideix la freqüència dels dos senyals. Si hi ha discrepàncies expliqueu les possibles causes.*

*Qüestió 3.- Comenteu el que succeiria si el senyal seleccionat fos de 25 kHz.*

## 2.- MESURA DE LA LONGITUD D'ONA

A partir d'aquest apartat treballarem amb l'emissor i receptor d'ultrasons. Com que són sistemes ressonants, només funcionen a l'entorn d'una determinada freqüència, d'uns 40 kHz, per la qual cosa cal ajustar prèviament el sistema. Connecteu l'emissor a la sortida del generador de funcions, a la màxima amplitud, i el receptor al canal II de l'oscil·loscopi. El senyal de sortida del generador es connecta al canal I de l'oscil·loscopi per mitjà d'una T i d'un cable BNC-BNC. L'oscil·loscopi es sincronitza amb aquest últim senyal.

Situeu l'emissor i el receptor l'un davant de l'altre a una distància d'uns 10 cm i busqueu la freqüència per la qual el senyal del receptor és màxim. Quan s'ha trobat, convé no tocar més la freqüència del generador. Amb l'oscil·loscopi es mesura el període T del senyal.

*Qüestió 4.- Quin és el valor del període?*

Sense modificar la connexió elèctrica, es col·loquen l'emissor i el receptor un davant de l'altre, amb els laterals de les bases tocant el regle metàl·lic, de manera que puguin lliscar al llarg d'ell, alterant la distància que els separa (figura 10.6). Es comprova que qualsevol moviment que allunyi o apropi els dos elements té com a conseqüència un desfasament d'un senyal respecte l'altre. El desplaçament que cal fer perquè el desfasament sigui de  $2\pi$  (un cicle sencer) és la longitud d'ona. Aquesta mesura, però, tindrà un error relatiu gran, ja que  $\lambda$  és de l'ordre de 1 cm.

La longitud d'ona la mesurarem amb més precisió de la següent forma. Es col·loca el receptor sobre el regle en un lloc tal que sigui possible desplaçar-lo cap enrera uns 20 cm. Al seu davant, a una distància d'uns 10 cm hi posem el emissor, i ajustem la seva posició perquè els dos senyals estiguin en fase. A partir d'aquí no hem de tocar l'emissor. Mesurem la posició del receptor i, desplaçant-lo cap enrera, aconseguirem que estigui novament en fase. Repetim el procés n vegades i mesurem la posició final del receptor. Aleshores, la distància recorreguda és igual a n vegades la longitud d'ona (podeu prendre  $n = 20$ ). Estimeu l'error relatiu en la mesura de  $\lambda$ ,  $\Delta\lambda_r$

*Qüestió 5.- Quins és el valor mesurat de  $\lambda$ ?*

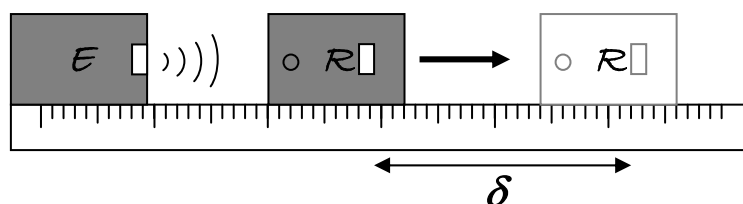


Figura 10.6.- Muntatge experimental per mesurar la longitud d'ona.

### 3.- MESURA DE LA VELOCITAT DE PROPAGACIÓ DEL SÒ

A partir dels valors del període  $T$  i de la longitud d'ona  $\lambda$  calculeu el valor de la velocitat de propagació  $v = \lambda/T$ .

A partir de la temperatura del laboratori, calculeu el valor teòric de  $v$  utilitzant l'expressió (2). Compareu aquest valor amb el valor obtingut experimentalment al laboratori.

Qüestió 6.- Valor experimental  $v =$  . Valor teòric  $v =$

### 4.- DEPENDÈNCIA DE L'AMPLITUD AMB LA DISTÀNCIA A L'EMISSOR

Sense canviar el muntatge, col·loqueu l'emissor en l'extrem del regle i el receptor a davant seu, tant a prop com sigui possible. Mesureu la posició efectiva de l'emissor, així com la del receptor, la qual cosa ens permetrà calcular la distància  $d$  que hi ha entre ells (figura 10.7). Mesureu a l'oscil·loscopi l'amplitud pic a pic  $A$  del senyal del receptor.

Allunyeu uns centímetres el receptor i torneu a fer les mesures, tant de la seva posició com de l'amplitud del senyal. Repetiu el procés per a diferents distàncies fins aconseguir uns 50 cm de separació. Anoteu els resultats en una taula en el full de càlcul.

Representeu  $A$  en funció de la distància  $d$ . Constateu que és una funció monòtona decreixent. En cas contrari intenteu esbrinar-ne les causes.

Per tal de veure quin tipus de funció és  $A(d)$ , i davant la hipòtesi raonable que sigui una funció potencial, representeu el  $\log(A)$  en funció de  $\log(d)$ . Comproveu que és una recta i determineu-ne el pendent. Expliqueu el significat d'aquest pendent. ¿Es pot justificar de forma teòrica?

Qüestió 7.- *Escriviu una expressió que correspongui a la recta mesurada. Justifiqueu aquest resultat teòricament.*

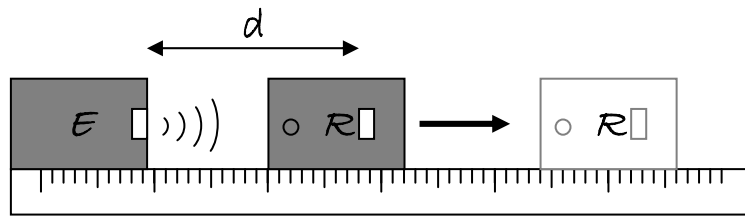


Figura 10.7.- Muntatge per mesurar la funció  $A(d)$ .

## **FULL DE RESULTATS. Pràctica 10**

Nom dels components de l'equip:

Lloc de treball:

### **Visualització dels senyals acústics**

Qüestió 1: Interval de freqüències audibles en el vostre sistema:  $f_{min} =$   $f_{max} =$

Qüestió 2: Hi ha discrepància entre la freqüència dels dos senyals?:  
En cas afirmatiu expliqueu-ne les possibles causes:

Qüestió 3.- Comenteu les diferències entre un senyal de 1 kHz i un senyal de 25 kHz

### **Mesura de la longitud d'ona**

Qüestió 4.- Quin són els valors del període i la seva incertesa?  $T =$

Qüestió 5.- Quins són els valors mesurats de  $\lambda$  i de  $\Delta\lambda$ ?  $\lambda =$   $\Delta\lambda_r =$

### **Mesura de la velocitat de propagació del só**

Qüestió 6.- Valor experimental  $v =$  Valor teòric  $v =$   
En cas de discrepància expliqueu els motius

### **Dependència de l'amplitud amb la distància al emissor**

Qüestió 7.- Escriviu una expressió que correspongui a la recta mesurada.  
Justifiqueu aquest resultat teòricament.



## PRÀCTICA 11. EL TRANSISTOR BIPOLAR

Aquesta pràctica té per objectiu introduir a l'estudiant en el coneixement del transistor bipolar analitzant les seves corbes característiques i els seus modes de funcionament. També s'introduirà la seva utilització com a interruptor.

### 11.1. El transistor bipolar NPN

El transistor bipolar és un dispositiu de tres terminals anomenats emissor (E), base (B) i col·lector (C) que es fabrica utilitzant semiconductors. Aquests tipus de materials permeten variar la seva conductivitat mitjançant la introducció d'àtoms d'altres materials. Quan els àtoms són capaços de donar electrons el semiconductor queda carregat negativament i s'anomena tipus N, en canvi quan els àtoms capten electrons del semiconductor aquest queda carregat positivament i s'anomena tipus P.

Segons l'estructura de fabricació, els transistors bipolars es divideixen en dos tipus: el transistor bipolar NPN fabricat amb un semiconductor tipus N a l'emissor, P a la base i N al col·lector, i el transistor PNP amb P a l'emissor, N a la base i P al col·lector. Aquestes estructures bàsiques i els símbols corresponents es representen a la figura 11.1.

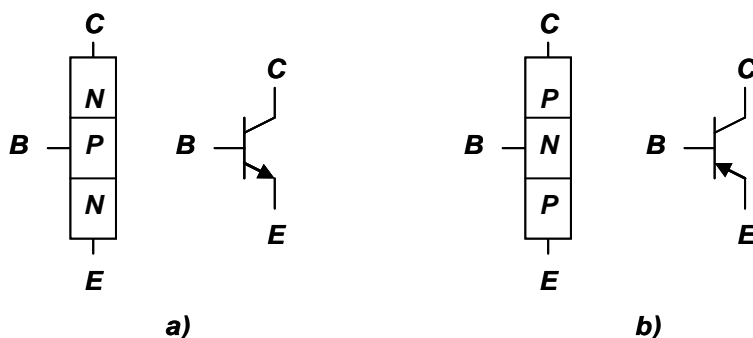


Figura 11.1.- Estructura bàsica i símbol circuital dels dos tipus de transistors bipolars.

Una forma habitual de connectar el transistor consisteix en estendre el terminal d'emissor per a que sigui comú a l'entrada i a la sortida del circuit, aquesta configuració s'anomena emissor comú i es mostra a la figura 11.2a. El seu comportament segueix el model circuital de la figura 11.2b. Entre els terminals base-emissor hi ha un díode, que denominarem díode emissor, pel que circula un corrent  $I_{be}$ . Entre els terminals base-col·lector hi ha un altre díode, que denominarem díode col·lector, pel que circula un corrent  $I_{bc}$ . Finalment, entre els terminals col·lector-emissor hi ha una font dependent de valor  $(\beta_F I_{be} - \beta_R I_{bc})$ , on  $\beta_F$  i  $\beta_R$  són unes constants específiques de cada transistor que s'anomenen respectivament guany de corrent directe i guany de corrent invers en emissor comú.

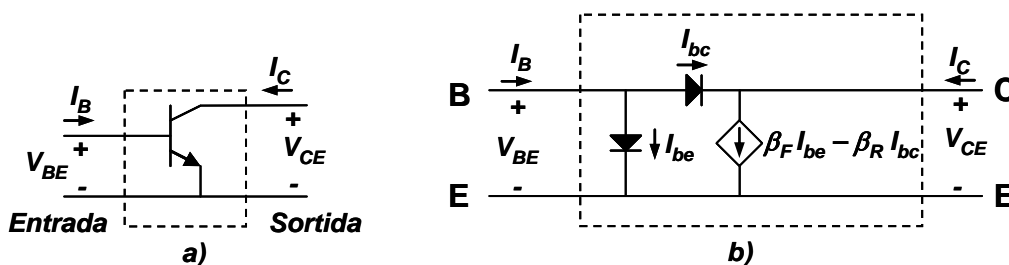


Figura 11.2.- Model del transistor NPN.

Les expressions dels corrents  $I_{be}$ ,  $I_{bc}$  que passen a través del díodes emissor i col·lector segueixen el model exponencial del díode:

$$I_{be} = I_{se} (e^{V_{BE}/V_t} - 1) \quad I_{bc} = I_{sc} (e^{V_{BC}/V_t} - 1) \quad (1)$$

on  $I_{se}$  i  $I_{sc}$  són els corrents en inversa de saturació i  $V_t$  és la tensió tèrmica ( $V_t = 25$  mV a 300 K).

Els díodes estan polaritzats en l'estat directa quan se'ls hi aplica una tensió positiva major que la tensió llindar de conducció, aleshores circularà un corrent elevat i positiu. Quan se'ls hi aplica una tensió menor, el díodes es troben en l'estat inversa i hi circularà un corrent negatiu pròxim a zero. Les tensions llindars de conducció s'anomenen  $V_{BEon}$  pel díode emissor i  $V_{BCon}$  pel díode col·lector.

La taula 11.1 mostra els modes de funcionament en que pot treballar el transistor segons els estats dels dos díodes:

		<b>Díode emissor</b>	
		<i>Directa</i>	<i>Inversa</i>
<b>Díode Col·lector</b>	<i>Directa</i>	Saturació	Invers
	<i>Inversa</i>	Actiu	Tall

Taula 11.1.- Modes de funcionament del transistor bipolar

### 11.2. Corbes característiques del transistor NPN en emissor comú

El comportament elèctric del transistor en els diferents modes de funcionament es pot visualitzar en dues corbes característiques:

- Corba característica d'entrada: És la representació gràfica del corrent d'entrada  $I_B$  en funció de la tensió d'entrada  $V_{BE}$ .
- Corba característica de sortida: És la representació gràfica del corrent de sortida  $I_C$  en funció de la tensió de sortida  $V_{CE}$ , per diferents valors del corrent d'entrada  $I_B$ .

En la figura 11.3 es representen les corbes característiques d'entrada i sortida.

Quan el transistor està en mode tall els dos díodes estan polaritzats en inversa i per tant  $I_{be} \approx 0$ ,  $I_{bc} \approx 0$ , això fa que tots el corrents del transistor també siguin nuls  $I_B \approx 0$ ,  $I_C \approx 0$ .

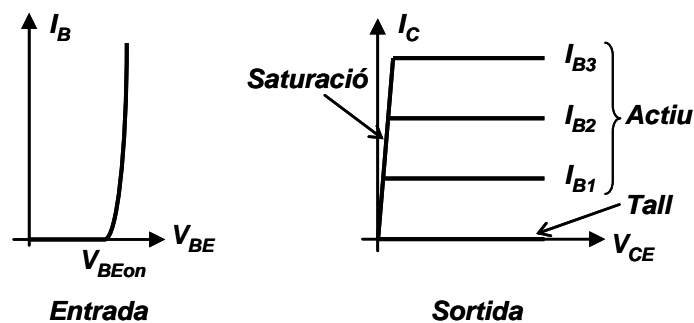


Figura 11.3.- Corbes característiques del transistor bipolar NPN en emissor comú

En el mode actiu, el díode emissor està en directa  $V_{BE} \geq V_{BEon}$ , mentre que el de col·lector està en inversa ( $V_{BC} \leq V_{BCon}$ ;  $I_{bc} \approx 0$ ). Per tant, el corrent de base  $I_B \approx I_{be}$  i el corrent de col·lector  $I_C \approx \beta_F \cdot I_B$ . D'aquesta manera, tal i com es mostra en la figura 11.3, per a cada valor d' $I_B$  hi haurà un valor d' $I_C$  independent de la tensió de sortida  $V_{CE}$ . Noteu que com  $V_{BE} \geq V_{BEon}$  i  $V_{BC} \leq V_{BCon}$ , si considerem que les dues tensions llindars són similars aleshores  $V_{BE} \geq V_{BC}$  i per tant  $V_{CE} = V_{BE} - V_{BC} \geq 0$ . Per assegurar que la tensió col·lector emissor sigui sempre positiva en mode actiu els fabricants prenen un marge de seguretat que anomenarem  $V_{CEsat}$ .

En el mode de saturació els dos díodes condueixen i per tant la tensió col.lector-emissor pren valors pròxims a zero  $V_{CE} = V_{BE} - V_{BC} = V_{CEsat}$  ja que les tensions llindars són similars  $V_{BE} \geq V_{BEon}$  i  $V_{BC} \geq V_{BCon}$ . El corrent de base augmenta respecte al mode actiu degut a la introducció d' $I_{bc}$  ( $I_B = I_{be} + I_{bc}$ ) però gairebé no es nota ja que  $I_B$  puja quasi verticalment per tensions  $V_{BE} \geq V_{BEon}$ . En canvi en el corrent de col.lector produeix una baixada brusca respecte el valor en el mode actiu ( $\beta_F I_{be}$ ):

$$I_C = \beta_F I_{be} - (\beta_R + 1) I_{bc} \quad (2)$$

Finalment l'anàlisi de les corbes característiques del transistor permet fer les aproximacions que es mostren a la taula 11.2. També figuren en aquesta taula les condicions que s'han de complir per a que el transistor treballi en un determinat mode.

Mode	Aproximacions	Condicions
ACTIU	$V_{BE} = V_{BEon}$ $I_C = \beta_F I_B$	$I_B > 0$ $V_{CE} > V_{CEsat}$
TALL	$I_B = 0$ $I_C = 0$	$V_{BE} < V_{BEon}$ $V_{CE} > V_{CEsat}$
SATURACIÓ	$V_{BE} = V_{BEon}$ $V_{CE} = V_{CEsat}$	$I_B > 0$ $I_C < \beta_F I_B$

Taula 11.2.- Modes de funcionament del transistor NPN

### 11.3.- El transistor bipolar com interruptor

El transistors s'utilitzen tant en circuits analògics on els senyals varien de forma contínua, com en circuits digitals caracteritzats per treballar amb senyals que prenen només dos valors. Aquests dos valors es simbolitzen per "1" i per "0", amb molta freqüència el símbol "1" indica una tensió de valor elevat, mentre que el "0" indica una tensió de valor baix.

En els circuits analògics és molt freqüent utilitzar el transistor com amplificador per tal d'augmentar l'amplitud del senyal mantenint la seva forma, on el transistor treballa en mode actiu. En els circuits digitals s'utilitza com a interruptor on el mode de treball del transistor va canviant entre tall i saturació. En aquest apartat descriurem un circuit digital molt simple, l'inversor, que permet il·lustrar la utilització del transistor com a interruptor.

Considerem el circuit de la figura 11.4. El senyal d'entrada és la tensió  $V_i$  i el senyal de sortida és la tensió entre col.lector-emissor  $V_0 = V_{CE}$ .

L'aplicació de la llei de Kirchoff de les tensions a la primera malla condueix a l'equació:

$$I_B = \frac{V_i - V_{BE}}{R_B} \quad (3)$$

Si  $V_i = 0$  V, que es pot simbolitzar per un "0", el díode emissor estarà en inversa fent que el corrent  $I_B = 0$  i per tant també  $V_{BE} = 0$ . En aquesta situació el transistor estarà en mode de tall, i per tant  $I_C = 0$ . Al no haver-hi caiguda de tensió en  $R_C$ , el valor de la tensió de sortida  $V_0 = V_{CC}$ , que és un valor alt i per tant el simbolitzem amb un "1".

Quan  $V_i = V_{CC}$ , l'equació (3) mostra que  $I_B$  serà positiva ja que el díode emissor estarà en conducció  $V_{BE} = V_{BEon}$ . Per tant, el transistor estarà en mode actiu o en mode saturació.

L' aplicació de la llei de Kirchoff de les tensions a la segona malla condueix a l'equació:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \quad (4)$$

Si volem que el transistor estigui en mode de saturació per aconseguir una tensió de sortida pròxima a zero  $V_o = V_{CEsat}$ , hem de complir la següent condició entre les resistències de base i col·lector:

$$I_C < \beta_F I_B \quad \Rightarrow \quad \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_C} < \beta_F \frac{V_i - V_{BEon}}{R_B} \quad \Rightarrow \quad \frac{R_B}{R_C} < \beta_F \frac{V_{BB} - V_{BEon}}{V_{CC} - V_{CEsat}} \quad (5)$$

En definitiva, aquest circuit converteix un "1" en un "0" i un "0" en un "1" i per aquest motiu s'anomena inversor. Observem que el transistor actua com un interruptor controlat pel corrent de base: si el corrent de base és zero, el corrent de col·lector és també zero actuant com un circuit obert entre els terminals de col·lector i d'emissor. Pel contrari, si el corrent de base és gran, el transistor està saturat i  $V_{CE} = V_{CEsat}$ , que és un valor molt proper a zero i es pot aproximar per un curtcircuit entre col·lector i emissor.

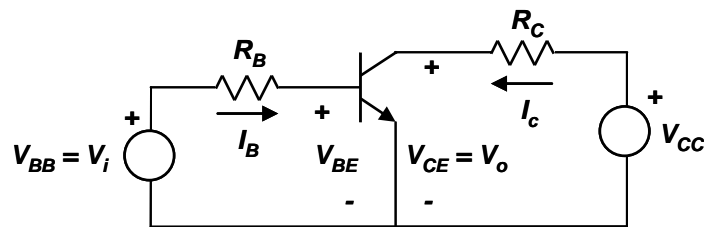


Figura 11.4.- El transistor bipolar com interruptor

## ESTUDI PREVI

1.- Dibuixa la corba característica d'entrada que resultaria d'aplicar el model aproximat de la taula 11.2 suposant  $V_{BEon} = 0,8$  V.

2.- Dibuixa les corbes característiques de sortida que resultarien d'aplicar el model aproximat de la taula 11.2 per  $I_B = 5 \mu A$  i per  $I_B = 10 \mu A$ , suposant  $\beta_F = 350$  i  $V_{CEsat} = 0,2$  V.

3.- Considera el circuit de la figura 11.4. Calcula el corrent de base  $I_B$ , el corrent de col·lector  $I_C$  i la tensió col·lector-emissor  $V_{CE}$ . Fes la hipòtesi de que el transistor treballa en mode actiu. Una vegada obtinguts els resultats cal verificar que aquests no estan en contradicció amb les condicions del mode actiu de la taula 11.2. Nota que per  $R_B$  hi circula  $I_B$  i per  $R_C$ ,  $I_C$ .

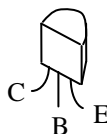
Dades:  $V_{BB} = 5$  V,  $V_{CC} = 12$  V,  $R_B = 820$  k $\Omega$ ,  $R_C = 3,9$  k $\Omega$ ,  $V_{BEon} = 0,8$  V,  $V_{CEsat} = 0,2$  V,  $\beta_F = 350$ .

4.- Volem fer funcionar el mateix transistor de l'apartat anterior com un interruptor. Calculeu la tensió de sortida si l'entrada  $V_i = 0$ . Quan l'entrada sigui un valor elevat  $V_i = 5$  V volem aconseguir que la sortida s'aproximi a 0V, per tant que el transistor estigui en saturació. Calculeu la relació que han de complir les resistències  $R_B$  i  $R_C$  en aquest cas. Dada:  $V_{CC} = 5$  V.

## **PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI**

### **1.- MESURA DE LA CARACTERÍSTICA DE SORTIDA**

El transistor que es farà servir en aquesta pràctica és el BC547, la identificació dels terminals del qual es mostra a la figura 11.5.



*Figura 11.5.- Identificació dels terminals del transistor BC547.*

Munteu el circuit de la figura 11.4. Seleccioneu una  $R_B$  de 820 k $\Omega$  i una  $R_C$  de 3,9 k $\Omega$ . Connecteu a  $V_{BB}$  la sortida fixa de 5 V de la font d'alimentació ( $V_{BB} = 5$  V); i a  $V_{CC}$  la sortida ajustable de la font d'alimentació i ajusteu la tensió fins aconseguir 12 V ( $V_{CC} = 12$  V).

Mesureu amb el voltímetre en mode DC la tensió  $V_{BB}$  i la tensió base-emissor  $V_{BE}$ . Anoteu aquests valors en un full excel i aplicant la llei d'Ohm calculeu el valor del corrent de base  $I_B$  que passa per la resistència  $R_B$ .

Aneu disminuint  $V_{CC}$  amb passos d'1 V aproximadament fins que arribeu al voltant de 0 V. Mesureu per a cada pas, amb el voltímetre en mode DC, la tensió  $V_{CC}$ , la tensió col·lector-emissor  $V_{CE}$  i calculeu el valor del corrent de col·lector  $I_C$ . Anoteu en el full excel els diferents valors.

Considerant que el corrent de base  $I_B$  es manté aproximadament constant al variar  $V_{CC}$ , calculeu i anoteu per cada pas el guany de corrent  $\beta_F$ .

Representeu gràficament (mitjançant l'excel) la corba característica de sortida  $I_C$  en funció de  $V_{CE}$ . Quin és aproximadament el valor de la tensió col·lector-emissor en saturació  $V_{CEsat}$ ? Indiqueu-ho en el full excel i imprimiu-lo.

### **2.- MESURA DELS SENYALS DE SORTIDA I D'ENTRADA D'UN INVERSOR**

El mateix circuit de la figura permet realitzar un inversor quan connectem un senyal d'entrada a  $V_{BB}$  i mesurem la sortida entre col·lector-emissor. Desconnecteu la sortida fixa de la font d'alimentació i connecteu-hi en el seu lloc, la sortida del generador de funcions. Ajusteu el generador de funcions per tal d'aconseguir un senyal quadrat de 0 a 5V d'amplitud i 1kHz de freqüència. Varieu la sortida ajustable de la font d'alimentació fins que aconseguiu  $V_{CC} = 5$ V.

Mesureu la tensió d'entrada ( $V_{BB}$ ) en el canal I de l'oscil·loscopi en mode DC i la sortida ( $V_{CE}$ ) en el canal II en mode DC.

Dibuixeu a mà en el mateix full excel imprès les formes dels senyals obtinguts. Inverteix el senyal de sortida respecte el d'entrada?

## PRÀCTICA 12. CIRCUIT ESTABILITZADOR I PROTECCIÓ A CURTCIRCUITS. MUNTATGE DE LA FONT D'ALIMENTACIÓ

**Part obligatòria: L'estabilitzador amb zener i transistor bipolar**

**Part optativa: Protecció a curtcircuits, sortida regulada de 5 V i muntatge de la font en una capsa.**

### A.- Part obligatòria: L'estabilitzador amb zener i transistor bipolar

Aquesta pràctica té per objectiu realitzar un circuit senzill d'estabilització de la tensió de sortida de la font d'alimentació. L'estabilitzador pròpiament dit està constituït per tres components: una resistència, un díode zener i un transistor bipolar. En primer lloc s'analitza l'estabilitzador basat només en el zener i es mostren les seves limitacions. A continuació es millora el disseny incorporant-hi un transistor bipolar. El circuit es finalitza amb un senyalitzador de funcionament basat en un LED i s'incorpora un condensador per evitar oscil·lacions paràsites d'alta freqüència. Per evitar que el resultat de la pràctica 8 condicioni la realització de la part obligatòria d'aquesta pràctica, utilitzarem com entrada la font d'alimentació del laboratori. A la part optativa l'entrada del estabilitzador serà la font no regulada (transformador, rectificador i filtre) realitzada en la pràctica 8.

#### 12.1. El circuit estabilitzador amb un díode zener

La tensió de sortida de la font d'alimentació realitzada en la pràctica 8 disminueix apreciablement i l'arriusat augmenta quan augmenta el corrent de sortida, degut a que així ho fa la tensió en el secundari del transformador.

Per a moltes aplicacions la magnitud d'aquesta variació amb el corrent no és acceptable, per la qual cosa convé realitzar un circuit anomenat estabilitzador que es connecta després del rectificador i del condensador. La realització més simple d'aquest circuit és amb una resistència i un díode zener tal com es mostra a la figura 12.1.

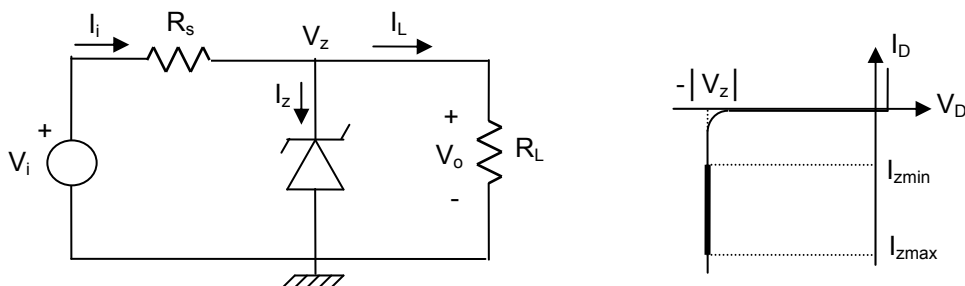


Figura 12.1.- a) Circuit estabilitzador amb zener. b) Regió de treball del zener.

El circuit es dissenya de forma que el zener treballi sempre a la regió de ruptura en la que la tensió entre els seus terminals és aproximadament  $V_z$  (figura 12.1b). Si s'aconsegueix aquesta condició, la tensió de sortida serà  $V_z$  encara que variï la tensió a l'entrada del circuit i el corrent de sortida  $I_L$ . Noteu que en el circuit el corrent que circula pel zener,  $I_z$ , és un corrent en sentit negatiu,  $I_z = -I_D$ . En el circuit es compleix:

$$I_z = I_i - I_L \quad (1)$$

El corrent  $I_z$  serà mínim quan  $I_i$  sigui mínim i al mateix temps  $I_L$  sigui màxim. Per altra banda, el corrent  $I_z$  serà màxim quan  $I_i$  sigui màxim i  $I_L$  sigui mínim. Si suposem en primera aproximació que  $V_i$  es manté constant, el corrent  $I_i$  serà:

$$I_i = \frac{V_i - V_z}{R_s} \quad (2)$$

El valor de  $R_s$  es tria de forma que la  $I_z$  sigui més gran que  $I_{z\min}$ , que és un valor que assegura que el punt de treball del zener està en la part vertical de la característica. Com que  $I_z$  mínima es dona quan  $I_i$  és mínima i per tant quan  $V_i$  és mínima, es força que:

$$I_z = \frac{V_{i\min} - V_z}{R_s} - I_{L\max} > I_{z\min} \quad (3)$$

Aïllant  $R_s$  en aquesta expressió resulta:

$$R_s < \frac{V_{i\min} - V_z}{I_{L\max} + I_{z\min}} \quad (4)$$

Per il·lustrar aquests resultats amb xifres, suposem que  $V_{i\min} = 17$  V,  $V_{i\max} = 22$  V,  $V_z = 7,5$  V,  $I_{L\max} = 400$  mA,  $I_{L\min} = 0$  i que  $I_{z\min} = 5$  mA. Aplicant (4) resulta  $R_s < 23,45$   $\Omega$ . Si triéssim  $R_s = 23$   $\Omega$ , per a complir la condició anterior, resultaria que  $I_z = 13$  mA, la qual cosa ens asseguraria que treballem a la part vertical de la corba del zener.

Però per seleccionar el zener necessitem saber també quina potència ha de ser capaç de dissipar. Aquesta potència es calcula pel cas que el zener treballi en les circumstàncies més desfavorables des d'aquest punt de vista. Aquestes seran quan treballi en el punt corresponent a  $I_{z\max}$ . En aquesta situació:

$$P_{D\max} = I_{z\max} \cdot V_z \quad (5)$$

El valor de  $I_{z\max}$  es dona quan  $V_i$  és màxima i  $I_L$  és mínima. Per l'exemple numèric anterior aquest valor serà  $I_{z\max} = 0,63$  A. Per tant, el díode zener hauria de ser capaç de dissipar una potència de  $P_D = 0,63 \cdot 7,5 = 4,74$  W. Un valor tant alt com aquest implica un cost molt elevat del díode zener. Per tant, convé trobar un circuit que no requereixi una potència a dissipar tant elevada.

Suposem ara que triem una  $R_s$  de 1 k $\Omega$ . Ens podem preguntar quins corrents de sortida podria proporcionar la font mantenint  $V_z$  constant a la sortida i quina potència hauria de poder dissipar ara el zener. L'expressió (2) ens indica que  $I_i$  podrà variar entre 9,5 mA (per  $V_{i\min} = 17$  V) i 14,5 mA ( $V_{i\max} = 22$  V). Per tant, com que  $I_z$  és de 5 mA, resultarà de (3) que  $I_{L\max}$  ha de ser menor que  $I_i - I_{z\min} = 9,5$  mA - 5 mA = 4,5 mA. Si el corrent  $I_L$  supera aquest valor,  $I_z$  disminuirà i el zener començarà a treballar a la part corba de la seva característica inversa i deixarà de mantenir el valor constant de  $V_z$ .

La potència que hauria de ser capaç de dissipar el zener en aquest cas seria  $I_{z\max} \cdot V_z = 109$  mW. En aquest segon exemple numèric la potència que hauria de poder dissipar el zener seria acceptable a la vista dels valors comercials típics, però el corrent màxim que podria lliurar la font, 4,5 mA, no seria útil per a les aplicacions habituals de les fonts d'alimentació. Per això cal cercar un nou circuit que permeti utilitzar un zener que dissipï poca potència, però permeti lliurar un corrent de centenars de miliAmpère com a mínim. Un dels circuits més simples per aconseguir-ho és el descrit en el proper apartat.

Cal fer notar que l'anàlisi que s'acaba de realitzar és una aproximació, doncs la característica de la regió de ruptura en els díodes zener reals no és vertical, sinó que té un cert pendent, per la qual cosa a l'augmentar  $I_z$  augmentarà lleugerament  $V_z$ .

## 12.2. El circuit estabilitzador amb un díode zener i un transistor bipolar

Com es pot observar en la figura 12.2, s'afegeix un transistor bipolar al circuit anterior. La resistència  $R_s$  fa passar corrent pel zener, com en el circuit anterior i suposarem que aquest corrent és suficient per a que  $I_z$  sigui superior sempre a  $I_{zmin}$ . Per tant, la tensió a la base del transistor serà  $V_z$ . Com que entre la base del transistor i l'emissor cau 0,7 V quan circula corrent per l'emissor, la tensió de sortida serà:

$$V_o = V_z - 0,7 \quad (6)$$

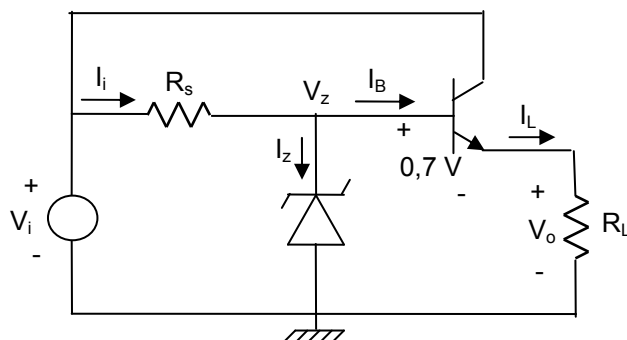


Figura 12.2.- Circuit estabilitzador amb zener i transistor bipolar.

Noteu que ara el corrent  $I_z$  serà  $(I_i - I_B)$  enlloc de  $(I_i - I_L)$  com passava en el circuit anterior, i que  $I_B$  és igual a  $I_L/\beta_F$  suposant que el transistor treballi en mode actiu. La gran part del corrent de sortida circula ara pel col·lector sense afectar al circuit del zener. Prenent les dades numèriques del circuit anterior, el zener estabilitzarà la tensió entre els seus terminal mentre  $I_B$  sigui inferior a 4,5 mA, la qual cosa vol dir que ara la  $I_L$  podrà arribar fins a 450 mA ( $I_L = \beta_F \cdot I_B$ ) per a un transistor amb  $\beta_F = 100$ .

Per obtenir una sortida de 7,5 V com en el circuit anterior caldrà ara un zener de 8,2 V com indica la equació (6). Seguirem suposant una  $R_s$  de 1 k $\Omega$ , que  $\beta_F$  val 100, i que  $V_i$  varia entre 22 V i 17 V. El transistor treballa en mode actiu, ja que circularà un corrent de base que polaritzarà en directe el díode d'emissor, i el díode de col·lector estarà en inversa per ser  $V_{CE}$  més gran que zero. Per tant,  $I_L = I_E \approx I_C = \beta_F \cdot I_B$ .

El corrent  $I_i$  es pot calcular per l'expressió (2) amb  $V_z = 8,2$ , i variarà entre 8,8 mA i 13,8 mA. Per tant, a partir de (3) resulta que  $I_{Bmax}$  ha de ser menor o igual que  $I_{imin} - I_{zmin} = 8,8 \text{ mA} - 5 \text{ mA} = 3,8 \text{ mA}$ . En conseqüència,  $I_{Lmax}$  podrà arribar fins a  $\beta_F \cdot I_{Bmax} = 380 \text{ mA}$ . La potència que haurà de dissipar aquest zener serà de 114 mW (13,8 mA x 8,2 V), que és un valor perfectament viable en els díodes comercials típics.

Per tant, aquest circuit permet utilitzar un zener estàndard i la font pot proporcionar valors de corrent entre 0 i 380 mA, que són valors acceptables. El transistor bipolar haurà de ser capaç de dissipar una potència donada pel producte de  $I_L$  per  $V_{CEmax}$ , que en el pitjor cas, quan  $V_i$  sigui 22 V serà de 5,5 W [0,38 A x (22 V - 7,5 V)]. Existeixen molts transistors bipolars comercials barats capaços de dissipar aquesta potència. Per tant, aquest circuit permet fer un disseny acceptable d'una font d'alimentació.

## 12.3. Senyalització amb LED

Per indicar que la font està activa utilitzarem un díode LED connectat a la sortida del transistor, tal com s'indica a la figura 12.3. Quan hi hagi tensió a la sortida farem que passin uns 10 mA pel LED, amb la qual cosa s'il·luminarà. Suposant una tensió de colze del LED d'uns 1,5 V, farà falta una resistència en sèrie  $R_v$  d'uns 600  $\Omega$ . Quan no hi hagi tensió a l'entrada ( $V_i = 0$ ), no hi haurà tensió a la sortida i el LED estarà apagat.



En el circuit també s'inclourà un condensador entre l'emissor del transistor i massa per evitar oscil·lacions paràsites que sovint es produeixen.

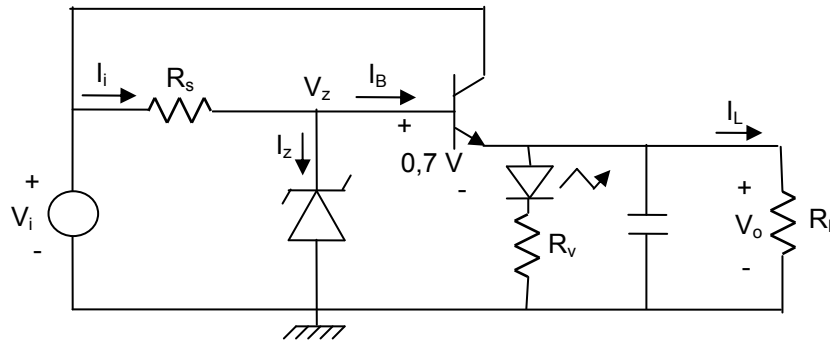


Figura 12.3.- Circuit estabilitzador amb zener, transistor bipolar, LED de senyalització i condensador per evitar oscil·lacions d'alta freqüència.

## ESTUDI PREVI

- 1.- Considereu l'estabilitzador zener de la figura 12.1. Si  $R_s$  val  $1 \text{ k}\Omega$ ,  $V_z = 7,5 \text{ V}$ , i  $V_i = 17 \text{ V}$ , per a quins valor de  $R_L$  el corrent pel díode zener serà inferior a  $5 \text{ mA}$ ?
- 2.- Si la característica inversa del zener no fos vertical sinó que es pogués aproximar per un tram lineal que passés pel punt  $(V_z, I_{zref})$  i tingués un pendent de  $(20 \Omega)^{-1}$ , quina tensió hi hauria entre els terminals del zener quan el corrent fos  $I_z = 20 \text{ mA}$ ? Preneu  $V_z = 7,5$  i  $I_{zr} = 5 \text{ mA}$ .
- 3.- Considereu el circuit estabilitzador amb zener i transistor bipolar de la figura 12.2. Si  $R_s$  val  $1 \text{ k}\Omega$ ,  $V_z = 7,5 \text{ V}$ ,  $V_i = 17 \text{ V}$ , i  $\beta_F = 100$ ,  $V_{BE(on)} = 0,7 \text{ V}$ , per a quins valors de  $R_L$  el corrent pel díode serà inferior a  $5 \text{ mA}$ ?
- 4.- Si enlloc de  $R_L$  poséssim un curtcircuit, quin corrent  $I_L$  proporcionaria el circuit? Supposeu que  $I_z$  es zero,  $V_i = 17 \text{ V}$ ,  $\beta_F = 100$ ,  $V_{BE(on)} = 0,7 \text{ V}$
- 5.- En la part optativa d'aquesta pràctica s'afegirà una protecció a curts circuits i veurem que quan s'activa aquesta protecció la font es comporta com una font de corrent proporcionant un corrent límit, de manera similar a la font d'alimentació del laboratori. Si suposem que el corrent mínim per a que la llum del LED sigui visible és de  $3 \text{ mA}$ , per a quins valor de la tensió de sortida el LED no farà gairebé llum? Supposeu pel LED  $V_\gamma = 1,5 \text{ V}$  i  $R_v = 560 \Omega$ .

## PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI

### 1.- CIRCUIT ESTABILITZADOR AMB ZENER

Munteu el circuit de la figura 12.1 a la placa de connexions fent servir una resistència de  $1 \text{ k}\Omega$  com  $R_s$ , un zener de  $8,2 \text{ V}$  i una resistència de  $10 \text{ k}\Omega$  com  $R_L$ . La tensió d'entrada  $V_i$  la prendrem de la font d'alimentació ajustant-la a  $17 \text{ V}$  i fixant un corrent límit de  $500 \text{ mA}$ .

Mesureu la tensió en els terminals de zener. A partir d'aquesta mesura calculeu els corrents  $I_i$  (per la resistència  $R_s$ ), el corrent  $I_L$  (per la resistència  $R_L$ ) i  $I_z$  (pel zener). Anoteu la tensió mesurada en el zener i els tres corrents calculats.

Qüestió 1.- Quins són els valors de la tensió en el zener, i dels corrents  $I_i$ ,  $I_L$  i  $I_z$ ?

Canvieu la resistència  $R_L$  de  $10\text{ k}\Omega$  per una de  $1\text{ k}\Omega$  i repetiu la mesura i els càlculs anteriors i anoteu els resultats. Torneu a canviar la resistència  $R_L$  de  $1\text{ k}\Omega$  per una de  $560\ \Omega$  i després per una de  $27\ \Omega$ .

*Qüestió 2.- Feu una taula amb els valors de tensió en el zener, i dels corrents  $I_i$ ,  $I_L$  i  $I_z$ .*

*Qüestió 3.- Representeu en una gràfica aproximada la característica corrent-tensió del zener de la taula anterior.*

## 2.- CIRCUIT ESTABILITZADOR AMB ZENER I TRANSISTOR BIPOLAR

Munteu el circuit de la figura 12.2 amb una resistència  $R_s$  de  $1\text{ k}\Omega$ , el zener de  $8,2\text{ V}$ , el transistor bipolar BD139 i una resistència de  $10\text{ k}\Omega$  per  $R_L$ . El transistor BD139 ha d'anar muntat sobre un dissipador tèrmic, ja que sense ell no seria capaç de dissipar la potència requerida i es faria malbé. Per fer-ho, cal posar una petita gota de pasta tèrmica que millora el contacte tèrmic entre el transistor i el dissipador, i cal prémer el transistor sobre el dissipador fent passar un cargol pel forat del cos del transistor, amb femella a l'altre costat. Noteu que la part metàl·lica del transistor ha de fer contacte amb el dissipador. Els terminals del transistor s'indiquen a la figura 12.7.

Mesureu la tensió a la base del transistor (es a dir, entre terminals del zener), i la tensió de sortida. Calculeu  $I_i$ ,  $I_L$  i  $I_z$  suposant una  $\beta_F$  de 100. Anoteu aquests valors.

Substituïu la resistència de  $10\text{ k}\Omega$  per una de  $1\text{ k}\Omega$ , després per una de  $560\ \Omega$  i finalment per una de  $27\ \Omega$  que pugui dissipar almenys  $3\text{ W}$ . Anoteu els valors de les tensions i dels corrents calculats.

*Qüestió 4.- Feu una taula amb els valors de tensió en el zener, la tensió a la sortida i els corrents  $I_i$ ,  $I_L$  i  $I_z$ .*

*Qüestió 5.- Expliqueu les diferències respecte de la taula anterior.*

*Qüestió 6.- Representeu gràficament la tensió de sortida  $V_o$  respecte del corrent  $I_L$  que lliura la font.*

## 3.- CIRCUIT SENYALITZADOR AMB LED

Per donar un senyal visual de que la font està funcionant es connectarà a la sortida una resistència de  $560\ \Omega$  ( $1/4\text{ W}$ ) i un LED vermell de  $3\text{ mm}$ . Quan la sortida sigui  $7,5\text{ V}$  circularà un corrent pel LED aproximadament d'uns  $10\text{ mA}$ , i per tant, s'il·luminarà. Munteu aquest circuit, mesurant prèviament la resistència. Mesureu el corrent que circula pel LED a través de la caiguda de tensió en la resistència de  $560\ \Omega$ .

*Qüestió 7.- Quin corrent circula pel LED?*

## **FULL DE RESULTATS. Pràctica 12**

Nom dels components de l'equip:

Lloc de treball:

### **Circuit estabilitzador amb zener**

Qüestió 1.- Quins són els valors de la tensió en el zener, i dels corrents  $I_i$ ,  $I_L$  i  $I_z$  per  $R_L=10\text{ k}\Omega$ ?

Qüestió 2.- Feu una taula amb els valors de tensió en el zener, i dels corrents  $I_i$ ,  $I_L$  i  $I_z$ .

Qüestió 3.- Representeu en una gràfica aproximada la característica corrent-tensió del zener de la taula anterior.

### **Circuit estabilitzador amb zener i transistor bipolar**

Qüestió 4.- Feu una taula amb els valors de tensió en el zener, la tensió a la sortida i els corrents  $I_i$ ,  $I_L$  i  $I_z$ .

Qüestió 5.- Expliqueu les diferències respecte de la taula anterior.

Qüestió 6.- Representeu gràficament la tensió de sortida  $V_o$  respecte del corrent  $I_L$  que lliura la font.

### **Circuit senyalitzador amb LED**

Qüestió 7.- Quin corrent circula pel LED?

## B.- Part optativa: Protecció a curtcircuits, sortida regulada de 5 V i muntatge de la font en una caixa.

En aquest apartat optatiu es completarà el circuit anterior en tres aspectes: s'inclourà una protecció a curtcircuits a la sortida, una nova sortida estabilitzada de 5 V que és típica per a carregar la bateria de telèfons mòbils, i es muntarà el circuit en una capsa per facilitar la seva utilització.

### 12.4. La protecció en front a curt circuits

La figura 12.4 mostra el circuit protector a curtcircuits. La resistència  $R_e$  és de valor petit (per aquesta aplicació hem triat  $2 \Omega$ ) i serveix com a sensor per detectar un corrent de sortida excessiu. Si el corrent que travessa  $R_e$ , essencialment  $I_L$ , és petit, la caiguda de tensió en  $R_e$  serà petita i T2 estarà tallat, la qual cosa equival a la no presència del transistor T2 en el circuit. Quan la caiguda en  $R_e$  s'aproxima a  $0,7 \text{ V}$ , el transistor T2 començarà a conduir i a absorbir corrent de la base del transistor T1.

Si  $R_L$  es fa zero, és a dir, es fa un curtcircuit a la sortida, la tensió a l'emissor de T1 serà  $0,7 \text{ V}$  degut a la caiguda entre la base i l'emissor de T2 quan condueix T2, i a la base de T1 hi haurà  $1,4 \text{ V}$ , degut a la nova caiguda de  $0,7 \text{ V}$  des de l'emissor a la base de T1. Per tant el corrent  $I_i$  serà  $(V_i - 1,4)/R_s$  i limitarà el corrent de sortida  $I_L$ . El corrent límit que proporciona aquesta font serà, per tant,  $I_{L\max} = 0,7/R_e$ . Si triem  $R_e = 2 \Omega$ , el aquest corrent serà de  $350 \text{ mA}$ .

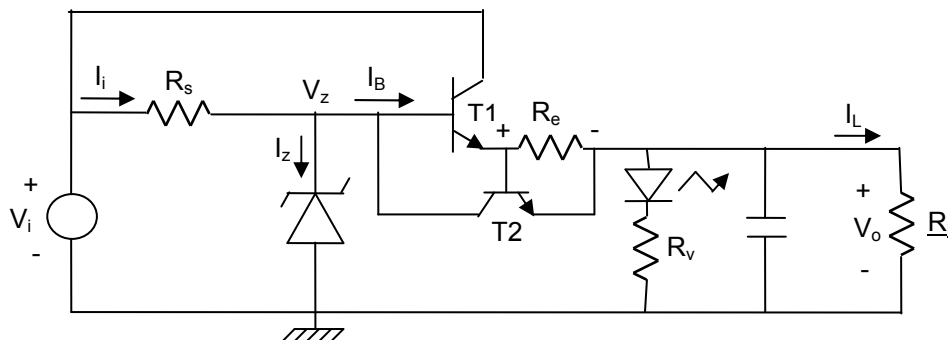


Figura 12.4.- Protecció a curt circuits a través de T2 i  $R_e$ .

### 12.5. Dissipació tèrmica

Quan es dissenya un circuit electrònic cal verificar que tots els components són capaços de dissipar la potència que absorbeixen del circuit. Ja hem calculat la dissipació del zener i és fàcil verificar que totes les resistències dissipin potències petites, per la qual cosa poden ser totes de  $\frac{1}{4}$  de Watt. L'única excepció és la resistència  $R_L$ . Si la triem de  $27 \Omega$  per simular un corrent  $I_L$  de  $280 \text{ mA}$ , la potència que haurà de dissipar serà de  $2 \text{ W}$ , ja que aquest és el valor de  $V_o^2/R_L$ .

L'altre component que hem d'analitzar és la potència dissipada pels transistors. Aquesta potència essencialment és  $I_C \cdot V_{CE}$ . En el cas del transistor T2, la  $V_{CE\max}$  serà de  $1,4 \text{ V}$  i la  $I_{C\max}$  serà  $I_{\max}$ , que valdrà  $(V_{\max} - 1,4)/1\text{K}\Omega = 20,6 \text{ mA}$ . Per tant, en el pitjor cas haurà de dissipar  $28,8 \text{ mW}$ , una potència molt petita que pot evacuar perfectament el transistor BC547 sense cap dissipador tèrmic.

El transistor BD139 haurà de ser capaç de dissipar una potència d'uns  $6 \text{ W}$  quan hi hagi un curtcircuit a la sortida. En aquestes condicions el corrent serà de  $350 \text{ mA}$  i la tensió entre col·lector i emissor d'uns  $17 \text{ V}$ , ja que l'emissor està a massa. Per tant  $P_D = 17 \times 0,35 = 5,95 \text{ W}$ . El fabricant del transistor (Siemens) indica que aquest dispositiu pot dissipar fins a  $12,5 \text{ W}$ , per la qual cosa és apte per la nostra aplicació. També indica que la temperatura màxima interna sense fer-se malbé és de  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  i que sense dissipador pot evacuar  $1,25 \text{ W}$ . Per tant es

requereix un dissipador. Si suposem una temperatura ambient de 25 °C vol dir que pot haver-hi un increment de temperatura de fins a 125 °C.

L'augment de la temperatura es relaciona amb la potència dissipada a través d'un paràmetre  $\theta_{ja}$ , entre l'interior i l'ambient, que es denomina resistència tèrmica total:

$$\Delta T = \theta_{ja} \cdot P_D \quad (7)$$

com que  $P_D = 6 \text{ W}$ , i  $\Delta T = 125 \text{ °C}$ , la resistència tèrmica total serà de 20 °C/W.

La resistència tèrmica total és la suma de la que hi ha entre l'interior i la càpsula i la que hi ha entre la càpsula i l'ambient. El fabricant ens diu que la resistència tèrmica entre l'interior i la càpsula és menor a 10 °C/W, per la qual cosa hem de seleccionar un dissipador de 10 °C/W.

Per facilitar que hi hagi un bon contacte tèrmic entre la càpsula i el dissipador cal posar una pasta tèrmica entre l'un i l'altre. També cal fer notar que el dissipador està a la mateixa tensió que el col·lector, doncs la part metal·litzada posterior, que està en contacte físic amb el dissipador, correspon al col·lector.

## 12.6.- El circuit integrat LM7805

Per fer més versàtil la font d'alimentació que hem realitzat afegirem una nova sortida que proporcioni 5 V estables, la qual cosa faria possible carregar les bateries de molts telèfons mòbils. Aquesta sortida s'obindrà de un circuit integrat, el LM7805.

El circuit integrat LM7805 és un circuit complex, l'esquema del qual es presenta a la figura 12.5, que proporciona una tensió estabilitzada de 5 V sempre que s'alimenti amb una tensió continua superior a 7 V. El fabricant indica que per evitar oscil·lacions cal connectar un condensador de 1  $\mu\text{F}$  entre la sortida i massa. A la figura 12.6 es mostra la connexió d'aquest regulador i d'aquest condensador, fent servir la sortida estabilitzada de 7,5 V.

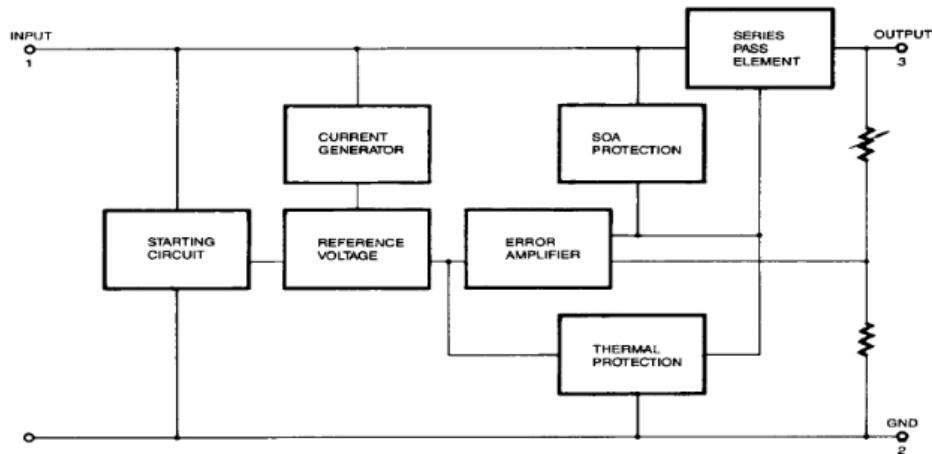


Figura 12.5.- Esquema del circuit integrat LM7805.

## 12.7.- Muntatge del circuit

A continuació cal soldar els components d'aquesta pràctica a la placa de circuit imprès seguint les indicacions de la figura 12.7. A la figura també es mostra la identificació dels terminals dels transistors BD139, BC547 i del LM7805, on s'ha representat la part metal·litzada del darrera del amb un traç més gruix. En primer lloc cal completar el muntatge dels components sobre la placa del circuit imprès que s'havia iniciat a la pràctica 8 amb el muntatge del fusible, el pont rectificador i el filtre de condensador. Ara cal soldar la resta de components del circuit de la figura 12.6. També cal soldar uns fils de connexió que aniran des de la placa als terminals d'entrada del transformador [punts (4,5) i (5,16)], de la placa a la sortida de 7,5 V [punts (16,12)

i (16, 4)], de la placa a la sortida de 5 V [punts (25,21) i (25,20)] i de la placa al LED [punts (18,12) i (18,15)].

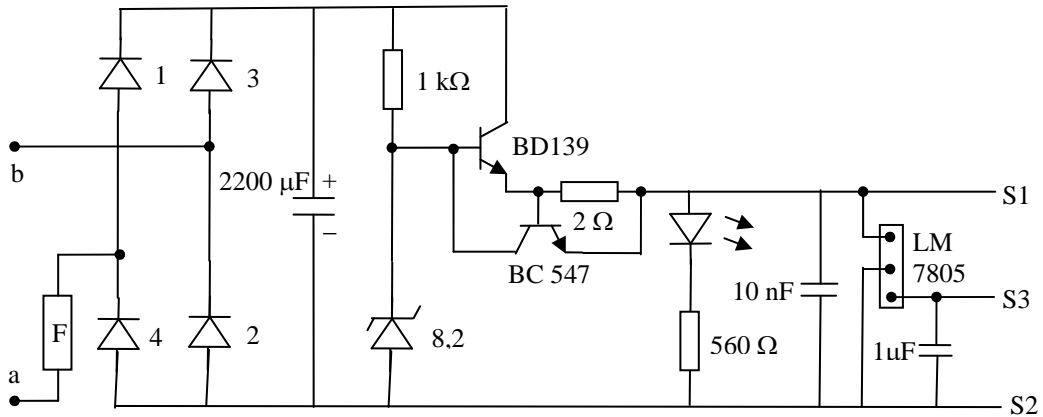


Figura 12.6.- Circuit de la font d'alimentació amb sortida estabilitzada de 7,5 V (S1), i sortida de 5 V (S3). El transformador s'ha de connectar a l'entrada entre a y b.

L'estudiant que vulgui fer aquesta part opcional haurà d'adquirir el transformador, la capsa, els components de connexió d'entrada i de sortida, i el suport pel LED. Les referències d'aquests components són les següents:

Transformador: AC/AC 230VAC/12 VAC, 500 mA, 9580120500

Capsa: CA115NP (capsa de plàstic amb aireació) de Diotronic

Terminal de connexió d'entrada: CBA21 0876682 base alim. 2,1 mm de Diotronic

Terminal de connexió de la sortida de 7,5 V: CJM35B CA110 Jack mono plas 3,5 + CBM35B 87632 Base mono 3,5 Encapsulat de Diotronic

Terminal de connexió de la sortida de 5 V: CJM25B CA001 Jack mono plas 2,5 + CBM25B 06602 Base Hem. mono 2,5 xassís de Diotronic

Suport del LED: "mirilla" per LED de 3,5 mm.

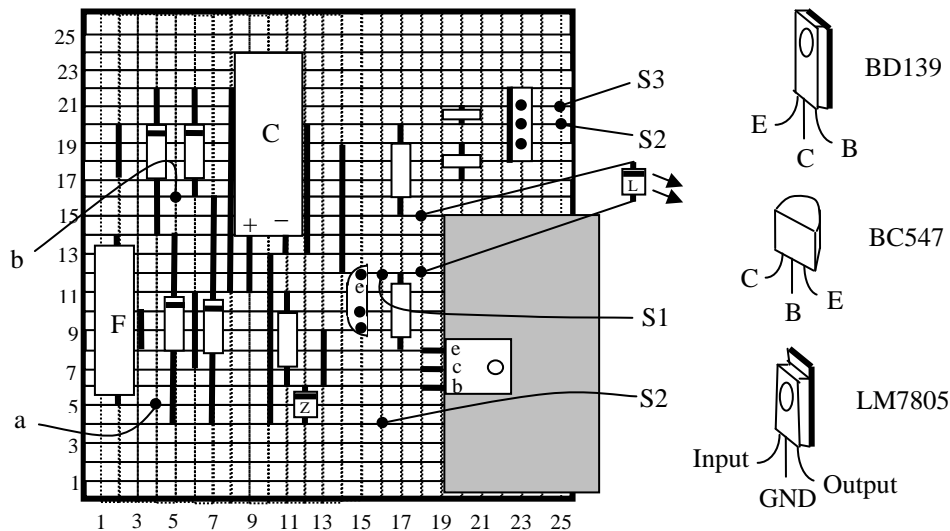


Figura 12.7.- Muntatge dels components a la placa de circuit imprès vist des de la cara superior on hi han els components. El rectangle gris de la dreta és el dissipador on hi va muntat el transistor BD139. Les línies a, b, S1, S2, S3 i els del LED són els fils que connecten les entrades i les sortides. A la figura també s'indiquen els terminals dels transistors i del LM7805.

Les coordenades dels components que cal soldar a la placa de circuit imprès són:  
Fil de connexió 1: (13,6), (13,9); Fil de connexió 2: (14,12), (14,19).  
R(1k $\Omega$ ): (11,6), (11,11); R(560 $\Omega$ ): (17,15), (17,20); R(2  $\Omega$ ): (17,8), (17,12);  
C(10nF): (20,17), (20,19); C(1 $\mu$ F): (20,20), (20,21);  
Zener(8,2V): (12,4), (12,6); LED: (18,12),(18,15);  
BD139: (18,6), (18,7), (18,8); BC547: (15,9), (15,10), (15,12); LM7805: (23,19), (23,20), (23,21).

Per muntar el circuit a l'interior de la capsula cal en primer lloc obrir-la, traient-li els cargols que estan a la part inferior, tapats pels suports de la capsula. A continuació cal treure les dues peces rectangulars que tanquen la capsula i fer en elles, amb broques adients, els forats per col·locar els terminals de connexió i el suport del LED. A la figura 12.8 hi ha una fotografia de detall de com estan integrats a la capsula aquests components.

Els diàmetres dels forats que s'han de fer en aquestes peces rectangulars són:

Terminal d'entrada: 8 mm  
Terminal de sortida de 7,5 V: 6 mm  
Terminal de sortida de 5 V: 4 mm  
Suport del LED: 7 mm

Com es pot veure a la fotografia, el transformador va en una capsula que s'endolla directament a la xarxa elèctrica. El secundari acaba en un terminal tipus jack, que s'endolla a la base que hi ha a la part dreta de la capsula. Dins la capsula es pot apreciar fàcilment el portafusible i el fusible de 500 mA, el pont rectificador de díodes, el condensador de 2200 mF, el transistor BD139 muntat en el seu dissipador tèrmic. Al costat de la capsula hi ha la tapa superior, amb forats per facilitar l'evacuació de calor, i que es subjecta a la capsula amb cargols. A la part esquerra de la capsula es poden veure dos terminals tipus jack, un de prim, per la sortida de 5 V, i l'altre una mica més gran, per la sortida de 7,5 V. Al final d'aquest costat hi ha el LED, dins d'un suport muntat a la capsula, i on arriba el fil groc del ànode i el negre del càtode. L'estudiant haurà de connectar als terminals de l'esquerra els cables corresponents acabats amb terminals adequats com l'aplicació que en vulgui fer.

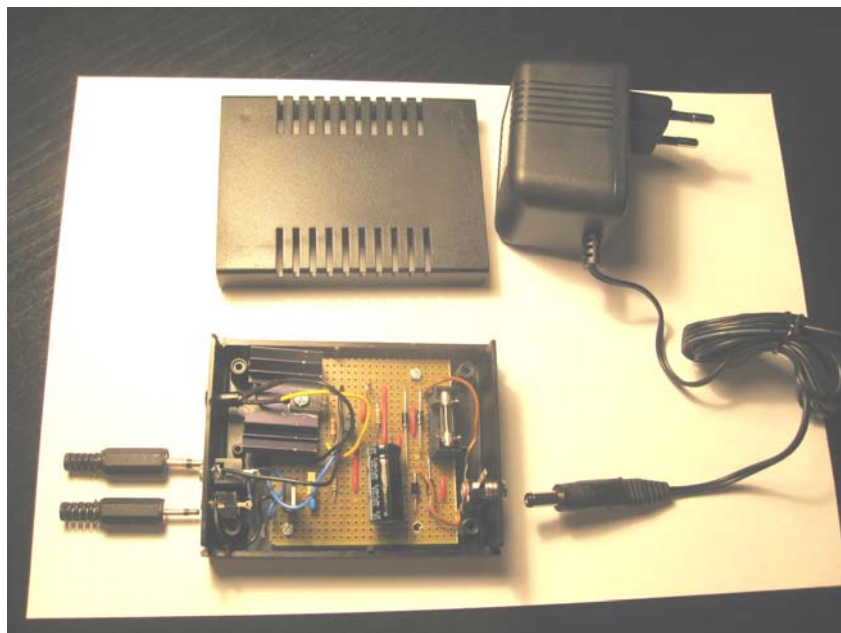


Figura 12.8.- Fotografia del circuit muntat en la capsula

## PRÀCTICA 13. INTERFERÈNCIA D'ONES

Aquesta pràctica té per objectiu estudiar unes propietats específiques de les ones que les diferencien radicalment de les partícules, l'anomenada interferència d'ones. Aquesta propietat es basa en la superposició o suma d'amplituds de les ones que coincideixen en un mateix punt, i que va associada al caràcter lineal de l'equació d'ona. Un altre fenomen que s'analitzarà és el de les ones estacionàries, que es produeixen quan es superposen ones iguals que es propaguen en sentits oposats.

### 13.1. Superposició d'ones

Dues o més ones poden coincidir en un mateix lloc. Quan això succeeix les ones es combinen entre sí, i l'ona resultant és la suma algebraica de les ones individuals. Després cadascuna segueix el seu camí, el mateix que hagués seguit de no haver coincidit amb les altres ones. Aquesta propietat, anomenada superposició, és característica i única del moviment ondulatori i no existeix en el moviment newtonià de partícules.

La superposició deriva d'una propietat de l'equació d'ona: la seva linealitat. En els sistemes lineals, si  $y_1$  és una solució, i  $y_2$  una altra solució, qualsevol combinació lineal de  $y_1$  i  $y_2$  és també solució del sistema:

$$y_3 = C_1 \cdot y_1 + C_2 \cdot y_2 \quad (1)$$

on  $C_1$  i  $C_2$  són dues constants qualsevol. Aquesta propietat es pot comprovar substituint  $y_3$  donada per l'expressió (1) en l'equació d'ona.

Suposem que  $y_1$  i  $y_2$  són ones harmòniques de la mateixa amplitud  $A$ , freqüència  $\omega$ , i nombre d'ona  $k$ . La superposició de  $y_1$  i  $y_2$  serà:

$$y_1 + y_2 = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx - \omega t + \delta) \quad (2)$$

essent  $\delta$  el desfasament entre les dues ones. Aquesta expressió es pot transformar utilitzant la identitat trigonomètrica:

$$\sin(\alpha_1) + \sin(\alpha_2) = 2 \cos\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) \quad (3)$$

donant per resultat:

$$y_1 + y_2 = \left[ 2A \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \right] \sin\left(kx - \omega t + \frac{\delta}{2}\right) \quad (4)$$

que no és més que una ona harmònica de la mateixa freqüència  $\omega$  i nombre d'ona  $k$  que les ones incidents, i amb un desfasament  $\delta/2$  i amplitud  $2A \cos(\delta/2)$ .

Si les dues ones que interfereixen tenen un desfasament  $\delta$  igual a zero, l'amplitud de l'ona resultant és  $2A$ , i es diu que es tracta d'una *interferència constructiva*. Si el desfasament  $\delta$  fos de  $180^\circ$  ( $\pi$  radians), l'amplitud és zero, i s'anomena *interferència destructiva*.

### 13.2. Reflexió i refracció d'ones

Quan una ona incideix sobre una superfície que separa dues regions en les que la velocitat de propagació de l'ona és diferent, part de l'ona es reflecteix i part de l'ona es transmet a l'altre regió. A la figura 13.1 es mostra com una ona incident es reflecteix i es refracta en una superfície.



L'ona reflectida forma un angle amb la perpendicular a la superfície  $\alpha_r$  igual al que forma l'ona incident  $\alpha_i$ . L'ona refractada a l'altre medi ho fa amb un angle  $\alpha_t$  que depèn de la relació entre les velocitats de propagació en els dos medis (Llei de Snell).

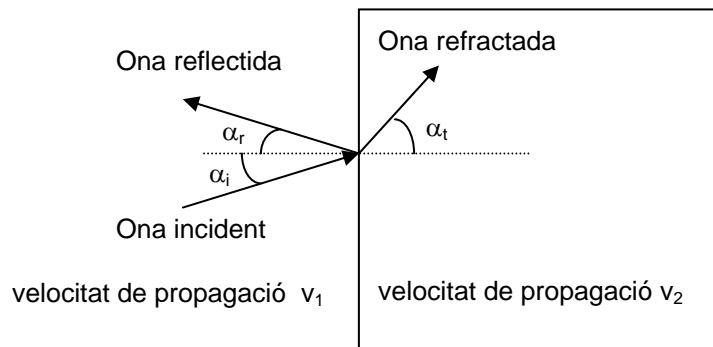


Figura 13.1.- Reflexió i refracció d'una ona que incideix en una superfície que separa dos medis en els que l'ona es propaga amb una velocitat diferent. En el cas d'ones sonores l'energia de l'ona refractada sol ser gairebé nul·la en la majoria de casos.

### 13.3. Diagrames d'interferència

Sovint es produeixen fenòmens d'interferència quan es superposen ones que procedeixen d'un mateix focus emissor però que recorren diferents camins. Tal és el cas que es dona quan en un determinat punt arriba una ona directament de l'emissor i una ona reflectida per obstacles però que procedeix del mateix emissor. Aquesta segona ona ha fet un trajecte més llarg que la primera i per tant tindrà un angle de fase diferent.

Si una ona  $y_1$  ha fet un trajecte  $x_1$  la seva fase serà  $(kx_1 - \omega t)$ , mentre que si l'ona  $y_2$  fa un camí  $x_2$ , la seva fase serà  $(kx_2 - \omega t)$ , suposant que les dues es propaguin en la mateixa direcció en el punt d'interferència. La superposició de les dues ones vindrà donada per (4) on el desfasament serà  $\delta = k(x_2 - x_1) = 2\pi(x_2 - x_1)/\lambda$ . Segons sigui el valor de  $(x_2 - x_1)$  la interferència podrà ser constructiva o destructiva.

S'anomena interferència el resultat de la superposició de varies ones. Un dels casos més senzills és el de la superposició de dues ones harmòniques d'igual amplitud i freqüència. Suposem dues fonts puntuals  $F_1$  i  $F_2$  separades una distància  $2d$  que emeten ones esfèriques de la mateixa freqüència i fase. Estudiarem la interferència de les dues ones en un punt  $P$  tal com es mostra en la figura 13.2a. Observeu que l'ona generada per la font  $F_2$  fa un camí més llarg fins a  $P$  que la generada per  $F_1$ . Per tant hi haurà un desfasament entre les dues ones en el punt  $P$ , i l'ona resultant serà:

$$y_1 + y_2 = \left[ 2A \cos\left(\frac{k\Delta r}{2}\right) \right] \sin\left(kr - \omega t + \frac{k\Delta r}{2}\right) \quad (5)$$

La interferència serà constructiva quan  $\cos(k\Delta r/2)$  sigui 1 o -1, la qual cosa succeirà si:

$$\frac{k\Delta r}{2} = n\pi \quad \Rightarrow \quad \Delta r = n\lambda \quad \text{amb } n = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

La interferència serà destructiva quan  $\cos(k\Delta r/2)$  sigui 0, la qual cosa succeirà si:

$$\frac{k\Delta r}{2} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi \quad \Rightarrow \quad \Delta r = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \text{amb } n = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

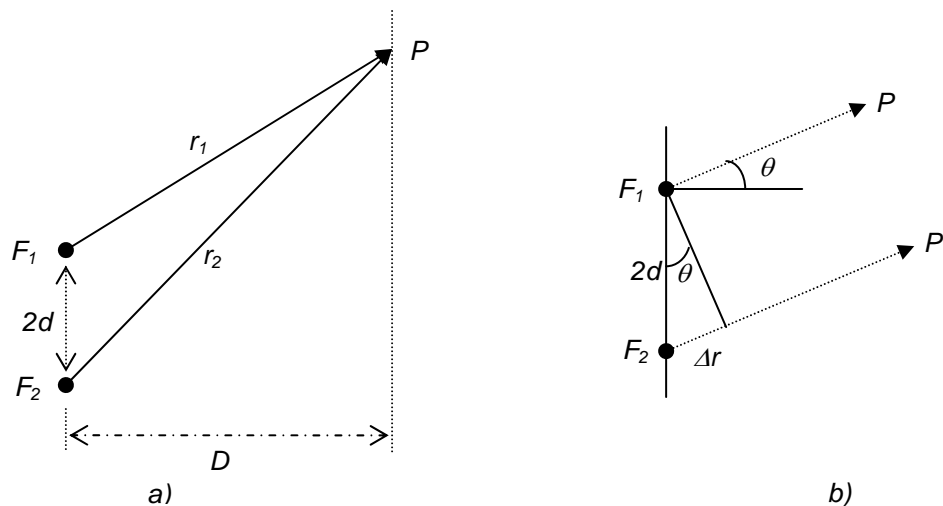


Figura 13.2.- a) Interferència de dues ones en un punt  $P$  generades per  $F_1$  i  $F_2$  separades una distància  $2d$ . b) Aproximació de  $\Delta r$  quan  $P$  està allunyat de les fonts.

Quan  $D \gg 2d$  es pot aproximar  $\Delta r$  per  $2d \sin \theta$ , tal com es mostra a la figura 13.2b. Per tant, la condició (6) per interferència constructiva es converteix en:

$$2d \cdot \sin \theta = n\lambda \quad \Rightarrow \quad \sin \theta_n = n \frac{\lambda}{2d} \quad \text{amb } n=0,1,2,\dots \quad (8)$$

i la condició (7) d'interferència destructiva es donarà per:

$$2d \cdot \sin \beta = (n + \frac{1}{2})\lambda \quad \Rightarrow \quad \sin \beta_n = (n + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{2d} \quad \text{amb } n=0,1,2,\dots \quad (9)$$

Noteu que les direccions d'interferència destructiva  $\beta_n$  estan intercalades entre les d'interferència positiva  $\theta_n$ . A la figura 13.3 es representa les zones d'interferència constructiva en blanc, i les d'interferència destructiva en negre, per dues distàncies  $d$  entre les fonts.

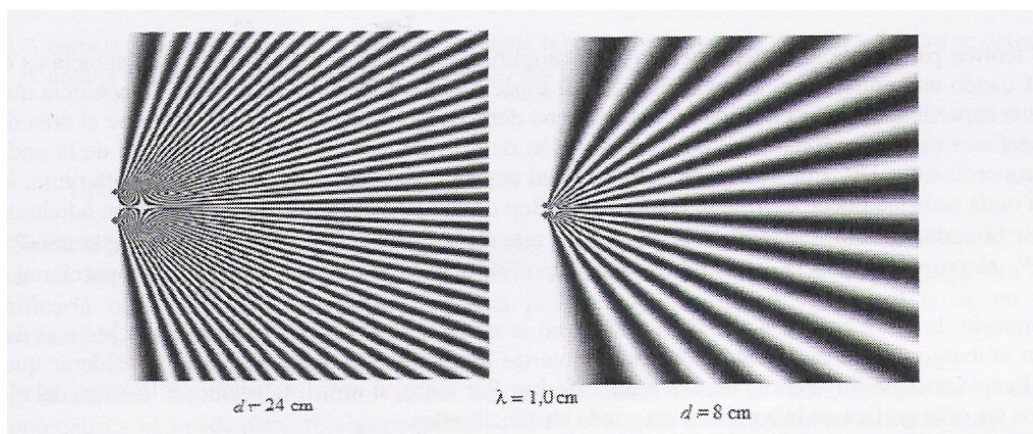


Figura 13.3.- Zones d'interferència constructiva (en blanc) i destructiva (en negre) produïdes per dues fonts separades una distància  $d$  i per una  $\lambda = 1 \text{ cm}$ . a)  $d = 24 \text{ cm}$ . B)  $d = 8 \text{ cm}$ .

Observeu que si col·loquéssim una pantalla a una distància  $D$  de les dues fonts, tal com s'indica en la figura 13.2, es veuria una successió de franges il·luminades i de franges fosques, tal com es veu en el costat dret de les figures 13.3.

Els fenòmens d'interferència no són específics de les ones acústiques. Es donen en totes les magnituds que tenen naturalesa ondulatòria, essent un exemple significatiu el cas de les ones

electromagnètiques. Normalment arriben a l'antena receptora ones electromagnètiques emeses per la mateixa antena emissora que han recorregut camins diferents, i que per tant tenen desfasaments entre elles. Aquestes ones es superposen i produeixen interferències entre elles que a vegades són destructives i es perd el senyal de l'emissora. Aquests diferents trajectes que fan les ones inclouen la reflexió i refracció amb la ionosfera, la reflexió pels mars, i la reflexió deguda a muntanyes i edificis. A la figura 13.4 es representa un exemple de combinació de senyals de ràdio que arriben a la antena d'un cotxe seguint cadascuna un camí diferent i un diagrama típic de recepció de senyal que mostra profundes baixades de nivell degut al fenomen de la interferència.

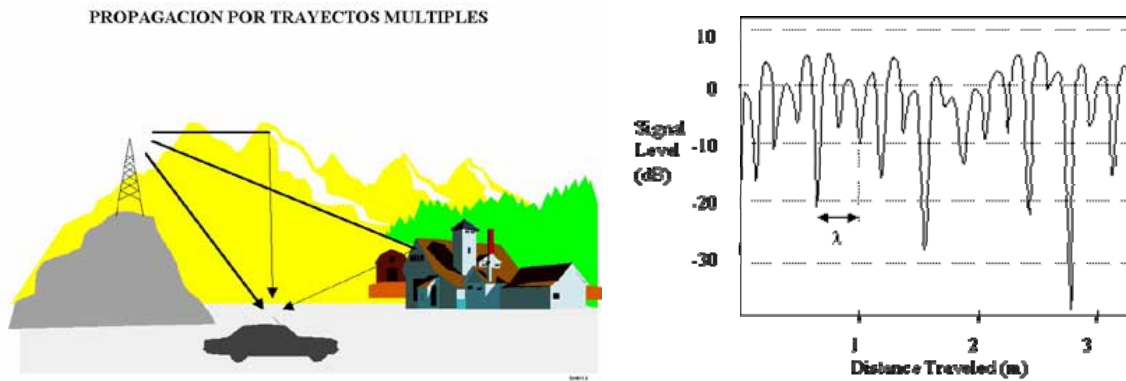


Figura 13.4.- Diferents ones de ràdio emeses per la mateixa emissora que arriben a l'antena d'un cotxe, i variació del nivell de senyal degut a les interferències entre les ones.

En aquesta pràctica estudiarem la interferència d'ones d'ultrasons utilitzant el muntatge de la figura 13.5. Al receptor hi arriben ones directament de l'emissor i ones reflectides pel reflector que procedeixen també de l'emissor. Aquestes ones es superposen i donen lloc a diagrames d'interferència com els presentats en la figura 13.3.

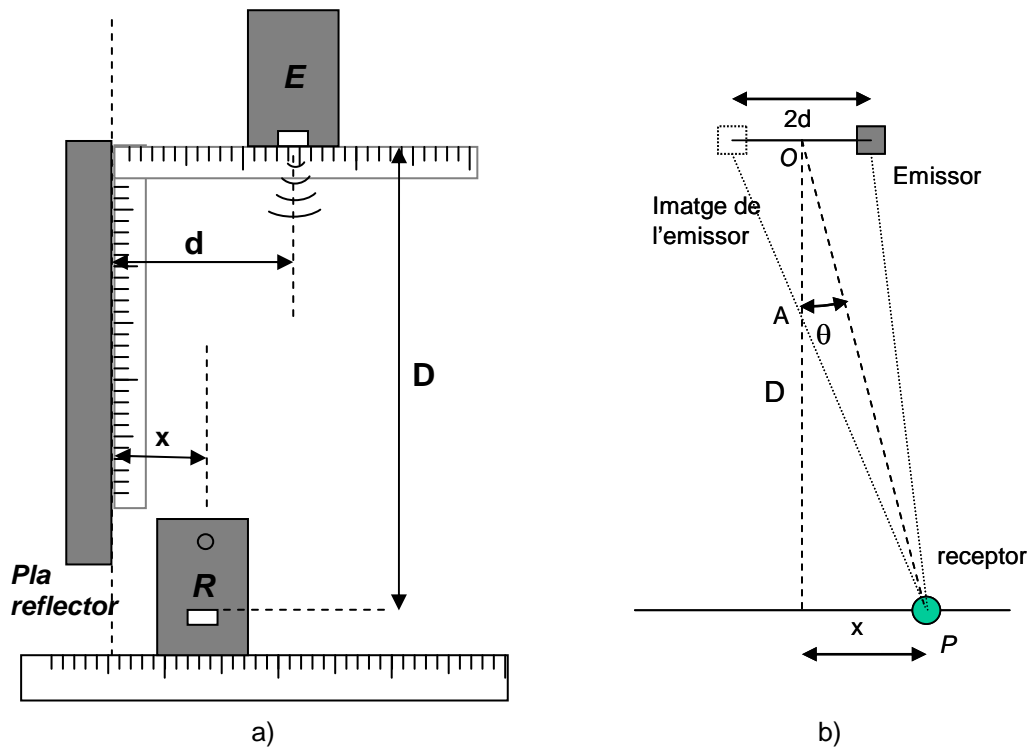


Figura 13.5.-a) Estudi de la interferència de les ones procedents directament de l'emissor i de les que procedeixen del pla reflector. b) Model equivalent d'aquest sistema.

Aquest sistema pot ser estudiat pel seu model equivalent representat a la figura 13.5b, en el que el pla reflector ha estat substituït per una "imatge" de l'emissor situada a una distància  $d$  a la dreta del pla reflector, i a la mateixa alçada que l'emissor real. Aquest model equivalent es basa en dos principis. Primer, la longitud del trajecte recorregut per l'ona "emesa" per "la imatge" del emissor fins al receptor és el mateix que el de l'ona real des de l'emissor cap al pla reflector i d'aquest al receptor, ja que la longitud de A fins a l'emissor és igual a la de A fins a la imatge de l'emissor. Segon, l'angle que fa el raig que surt de l'emissor amb la perpendicular al pla reflector en el punt A és igual a l'angle entre la perpendicular i el raig que surt de la imatge de l'emissor, tal com s'estableix en la llei de la reflexió (figura 13.1).

Observeu en aquest model que l'angle  $\theta$  que fa la recta que uneix el punt d'observació P amb la perpendicular a la recta que uneix els dos generadors d'ones és el mateix angle que el que s'indica a la figura 13.2. Per tant, les expressions (8) i (9) dels angles d'interferència constructiva i destructiva seguiran sent vàlids.

### 13.4. Ones estacionàries

Una ona estacionària es forma per la interferència de dues ones de igual amplitud i freqüència que es propaguen en sentits contraris. En efecte, la superposició d'una ona progressiva  $y_1$  i d'una ona regressiva (es a dir que viatja en sentit contrari)  $y_2$  serà:

$$y_1 + y_2 = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t) = 2A \sin(kx) \cos(\omega t) \quad (10)$$

on el canvi de sentit de propagació es manifesta en el canvi de signe del terme  $\omega t$  de l'ona  $y_2$ . Observeu que per alguns valors de  $x$  l'amplitud de l'ona serà nul·la, mentre que per altres valors serà el doble que l'amplitud de les ones que interfereixen (figura 13.6). Els punts d'amplitud zero s'anomenen nodes, mentre que els d'amplitud màxima es diuen ventres o antinodes.

Els nodes (punts  $x$  en els que l'amplitud de l'ona estacionària és sempre zero) es donen per  $kx = n\pi$ , amb  $n = 0, 1, 2, \dots$ . És a dir, per  $x = n \cdot (\lambda/2)$  amb  $n$  sencer, ja que  $k = 2\pi/\lambda$ . Observeu que per aquests valors de  $x$ , en un instant en el que el valor de l'ona progressiva sigui  $M$ , resulta que el de la ona regressiva és  $-M$ , i per tant, la seva suma és nul·la.

En realitat les ones estacionàries són modes de vibració del medi en el que es produeixen, ja que no propaguen energia. Hi ha punts del medi que estan quiets i altres que vibren a la freqüència  $\omega$  amb una certa amplitud.

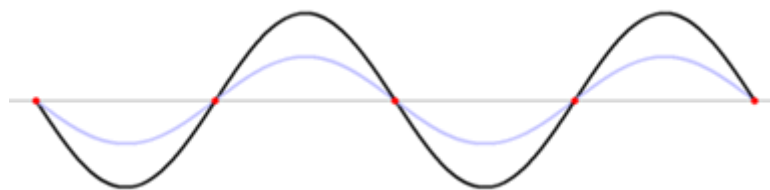


Figura 13.6.- Ona estacionària. En els nodes (punts de pas per zero) el valor de l'ona és sempre zero.

En aquesta pràctica es generaran ones estacionàries utilitzant un dispositiu emissor d'ultrasons que emet ones "progressives" cap a la esquerra, les quals seran reflectides per un "pla reflector" i viatjaran cap a la dreta com ones "regressives", tal com s'indica a la figura 13.7. Per tant, en l'espai comprès entre l'emissor i el pla reflector viatjaran ones en els dos sentits i la seva superposició pot originar ones estacionàries.

Per mesurar aquestes ones estacionàries fem que un element difusor situat prop del receptor enviï cap aquest les ones presents en el punt on hi ha el difusor. Per això, cal que el difusor estigui a l'altura de l'emissor.

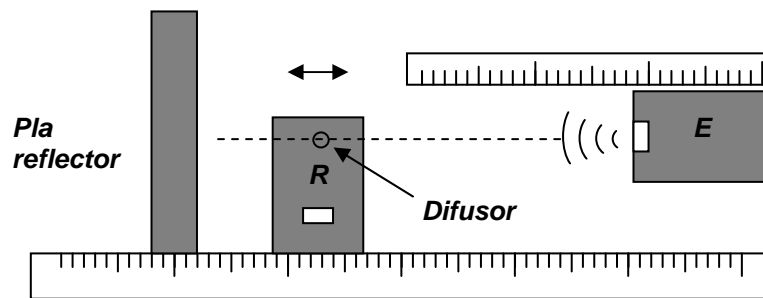


Figura 13.7. Estudi de les ones estacionàries generades per la superposició de les ones emeses per l'emissor E i les reflectides pel pla reflector.

## ESTUDI PREVI

Considereu l'esquema de la figura 13.7.

- 1.- Escriviu la funció d'ona que hi haurà en el difusor procedent directament de l'emissor, en funció de la distància  $x_E$  entre l'emissor i el difusor. Escriviu, per altra banda, la funció d'una ona en el difusor que hagi fet el camí emissor-reflector-difusor, en funció de  $x_E$  i de la distància entre el difusor i el pla reflector  $x_R$ .
- 2.- Escriviu la superposició d'aquestes dues ones en el difusor, suposant-les d'igual amplitud.
- 3.- Quina condició hauran de complir les distàncies anteriors per a que hi hagi un node?

Considereu ara l'esquema de la figura 13.5.

- 4.- Raoneu si en el punt  $x = 0$  hi haurà un màxim o un mínim.
- 5.- Si la  $x$  augmenta, raoneu quins seran els valors d'aquest paràmetre per els que hi hauran màxims
- 6.- Si la  $x$  augmenta, raoneu quins seran els valors d'aquest paràmetre per els que hi hauran mínims.
- 7.- Representeu l'expressió  $\Delta r$  en funció de  $n$  segons l'expressió (6) i representa sobre aquesta gràfica els punts en els que hi haurà interferència positiva.

## PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI

### 1.- ONES ESTACIONÀRIES

Es realitzarà el muntatge de la figura 13.7. En primer lloc cal ajustar la freqüència del generador de funcions tal com es va fer en la pràctica 10 buscant que la resposta sigui màxima.

A continuació munteu l'element difusor sobre el receptor de tal forma que, a través del difusor, pugui rebre senyals que provenen dels dos costats per igual.

Disposeu l'emissor perpendicularment al receptor de forma que el centre del feix d'ultrasons passi pel difusor. El pla reflector se situa de forma que reflecteixi l'ona altre cop cap al difusor, que rep així senyals dels dos costats: una directa des del emissor i l'altre reflectida pel pla. Convé situar el pla a prop del receptor, mentre que cal deixar un mínim de 30 cm entre l'emissor i el receptor.

Moveu el receptor al llarg del feix (direcció  $x$ ) i comproveu que s'obtenen màxims i mínims. Mesureu la distància entre màxims. Optimitzeu la mesura, realitzant-la sobre un conjunt d'oscil·lacions, de manera semblant al procediment utilitzat per mesurar la longitud d'ona. Compareu la longitud d'ona amb la distància mitja entre màxims. Interpreteu-ho.

*Qüestió 1.- Quina és la distància mínima entre màxims? Interpreteu el resultat comparant-la amb la longitud d'ona mesurada a la pràctica anterior.*

Moveu el pla reflector en la direcció  $x$ , i comproveu que es produeixen també màxims i mínims.

*Qüestió 2.- Expliqueu perquè apareixen màxims i mínims.*

Proveu de fer el mateix movent l'emissor.

*Qüestió 3.- Interpreteu el resultat*

## 2.- INTERFERÈNCIES PRODUÏDES PER DUES FONTS PUNTUALS

Per obtenir les interferències utilitzarem el muntatge de la figura 13.5, fent servir un únic emissor junt amb la seva imatge produïda per un reflector pla. Un petit regle ens ajudarà a col·locar el reflector al seu lloc amb precisió. Cal mesurar la distància  $D$  que hi ha entre la línia per on es mou l'emissor i la línia del receptor (són paral·leles).

Poseu l'emissor a 4 cm del pla reflector. Desplaceu el receptor al llarg de l'eix  $x$ , a fi de trobar els màxims i els mínims. Doneu a cada un d'aquests punts un nombre d'ordre  $n$  (els parells correspondran al màxims i els imparells als mínims). Mesureu-ne les posicions  $x_n$  i apunteu-les en una taula.

En una nova columna de la taula calculeu  $\theta_n = \arctan(x_n/D)$  per a cada posició d'un màxim o d'un mínim. L'angle  $\theta_n$  és el que forma el pla reflector amb la línia que va des de  $O$  fins al receptor.

Calculeu  $2d \cdot \sin(\theta_n)$ , que no és altra cosa que la diferència de camins entre la ona directa i la reflectida. Representeu-ho respecte al nombre  $n$  i calculeu-ne el pendent.

*Qüestió 4.- Escriviu la taula de valors que heu trobat*

Tenint en compte que quan  $n$  s'incrementa en una unitat s'espera que el desfasament entre les dues ones s'hagi incrementat en  $\pi$  radians, determineu  $\lambda$  per aquest procediment i compareu-lo amb el valor obtingut en la pràctica 10.

*Qüestió 5.- Escriviu el valor de  $\lambda$  trobat per aquest procediment.*

Repetiu el procés amb una distància  $d = 10$  cm. Representeu els resultats sobre la mateixa gràfica. Determineu-ne el pendent i compareu-lo amb el del cas anterior. Calculeu de nou  $x$  a partir d'aquestes dades.

*Qüestió 6.- Quin és el nou valor de  $\lambda$ ? Comenteu el resultat.*

## **FULL DE RESULTATS. Pràctica 13**

Nom dels components de l'equip:

Lloc de treball:

### **Ones estacionaries**

Qüestió 1.- Quina és la distància mínima entre màxims? Interpreteu el resultat comparant-la amb la longitud d'ona mesurada a la pràctica anterior.

Qüestió 2.- Expliqueu perquè apareixen màxims i mínims.

Qüestió 3.- Interpreteu el resultat

### **Interferències produïdes per dues fonts puntuals**

Qüestió 4.- Escriviu la taula de valors que heu trobat

Qüestió 5.- Escriviu el valor de  $\lambda$  trobat per aquest procediment. Expliqueu les diferències que hi ha respecte el valor obtingut en la pràctica 10.

Qüestió 6.- Quin és el nou valor de  $\lambda$ ? Comenteu el resultat.