

## Laboratori d'ampliació d'Electromagnatisme

## PROPAGACIÓ D'IMPULSOS EN UN CABLE COAXIAL.

### 1. Introducció

Com a conseqüència de la naturalesa ondulatoria de la propagació de senyals electromagnètics en una línia de transmissió, es pot observar un fenomen de reflexió quan un impuls elèctric, de curta durada, s'aplica a l'entrada d'una línia de transmissió (cable coaxial, d'impedància característica  $Z_C$ ), al final de la qual s'ha connectat una impedància,  $Z$ , que en general és diferent de  $Z_C$ . Podem distingir tres casos particulars notables (figura 1):

- Si el cable acaba en un circuit obert ( $Z = \infty$ ), la pertorbació elèctrica es reflecteix sense canvi de fase (impuls reflectit de la mateixa polaritat que l'inicial).
- Si el cable acaba en curtcircuit ( $Z = 0$ ), hi ha inversió de fase (impuls reflectit de polaritat oposada).
- Si  $Z = Z_C$ , no hi ha reflexió. Tota l'energia de l'impuls es dissipa a la impedància terminal.

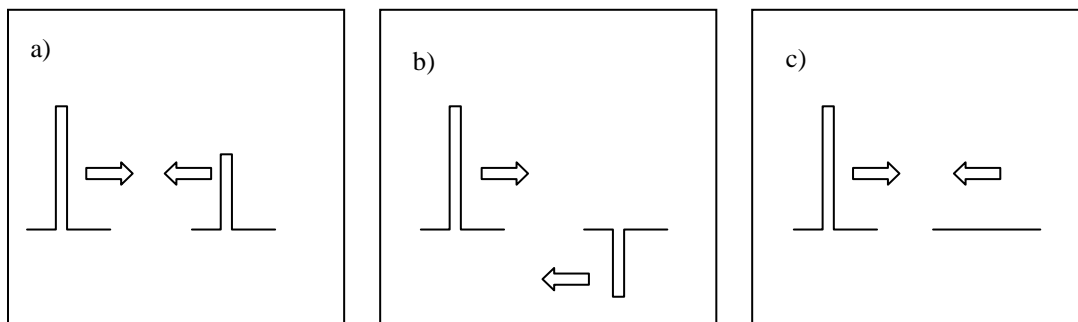


Figura 1

### 2. Muntatge experimental

- Es disposa d'un cable coaxial de longitud  $L = 28,7$  m i d'impedància característica  $Z_C = 75 \Omega$ . Figura 2.
- Un commutador, al final del cable, permet de curtcircuitar-lo, deixar-lo en circuit obert, o bé connectar-lo a una resistència variable (figura 3).
- A l'entrada del cable connectem una font (a la sortida *Output+* d'aquest) que subministra els impulsos elèctrics. Figura 4.
- Un oscil·loscopi enregistra els pulsos (tant l'aplicat com el reflectit). Figura 5.
- Càrrega adaptada ( $75 \Omega$ ) en paral·lel a l'entrada de l'oscil·loscopi (figura 5). Aquesta càrrega s'utilitza per a evitar reflexions a l'entrada de l'oscil·loscopi (impedància d'entrada  $\sim 1M\Omega$ )

La sincronització de l'oscil·loscopi amb el generador de polsos es fa connectant la sortida *Trigger output* del generador al segon canal de l'oscil·loscopi, i fent que aquest l'utilitzi com a disparador (*trigger*). Feta d'aquesta manera, la sincronització no queda modificada tot i que es modifiquin l'amplitud o la durada dels impulsos de sortida *Output+*.



Figura 2



Figura 3



Figura 4

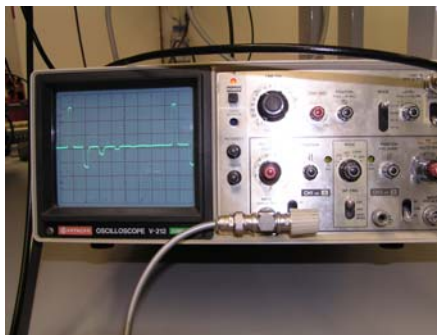


Figura 5

### 3. Mesura del senyal

*Inicialització del generador d'impulsos (figura 4):*

- 3.1. Control del període dels impulsos (*Pulse Period i Vernier*): permet ajustar l'interval de temps entre dos impulsos generats:
  - Podeu escollir una posició entre 20 ns i 1  $\mu$ s
  - Regulació entre dos punts: es recomana posar *Vernier* tot a la dreta.
- 3.2. Control de la durada de l'impuls (*Pulse Width*):
  - Podeu escollir una posició entre 10 ns i 1  $\mu$ s
  - Regulació entre dos punts: es recomana posar *Vernier* tot a l'esquerra.
- 3.3. Control de sortida (*Output (+): Amplitude*): permet ajustar l'amplitud de l'impuls:
  - Podeu escollir una posició entre 2,0 i 5,0 V
  - Regulació entre dos punts: es recomana posar *Vernier* tot a la dreta
  - Regulació del offset (posició del zero): es recomana escollir *Offset: Off*.
- 3.4. Control del retard (*Pulse Delay*): introdueix un retard variable entre els impulsos de sincronisme i els de sortida. Es pot utilitzar per a centrar el senyal en la pantalla de l'oscil·loscopi.

*Oscil·loscòpi i impedància de càrrega:*

- 3.5. Per tal d'analitzar el comportament dels pulsos dins del cable coaxial, cal que connecteu l'oscil·loscopi i el generador d'impulsos a l'entrada del cable coaxial en estudi (figures 2 i 3).

*Mesures de l'amplitud relativa:*

Cas a)

- 3.6. Si seleccioneu la posició *C. O.* en el commutador d'impedàncies del final del cable coaxial, estareu en el cas *a*) impedància de càrrega en circuit obert.
- 3.7. Per tal de visualitzar el senyal, convé que ajusteu la base de temps de l'oscil·loscopi a la posició més ràpida. Podreu observar els impulsos del generador i la influència dels seus controls.
- 3.8. Podreu comprovar que amb el control *Pulse Delay* del generador, podeu desplaçar horitzontalment la imatge, sense que variï la posició dels impulsos de sincronisme de l'altre canal.
- 3.9. També podreu observar que l'impuls reflectit apareix amb el mateix signe que l'impuls incident (figura 6).
- 3.10. Si mesureu les amplituds de l'impuls incident i del reflectit (figura 1a), podreu determinar l'amplitud relativa de l'impuls reflectit respecte a l'impuls incident.

Cas b)

- 3.11. Si seleccioneu el commutador a *C. C* en el commutador d'impedàncies, estareu en el cas *b*) impedància de càrrega nul·la (curt-circuit)
- 3.12. L'oscil·loscopi mostrarà una inversió del signe de l'impuls reflectit (figura 7), respecte al cas *C. O.*
- 3.13. Ara podreu calcular l'amplitud relativa com en l'apartat 3.10.

Cas c)

- 3.14. Passeu el commutador a *R*. Cas *c*), resistència de càrrega variable.
- 3.15. Si ajusteu la resistència final del cable coaxial podreu observar que l'impuls reflectit pot ser del mateix signe que l'impuls incident (quan  $R > Z_C$ ), o bé de signe contrari (quan  $R < Z_C$ ).
- 3.16. Observeu, tanmateix, que la variació de *R* provoca una variació en l'amplitud de l'impuls reflectit. En el cas particular que  $R = Z_C$ , l'amplitud reflectida és nul·la.

*Mesures de l'atenuació:*

- 3.17. Amb el commutador un altre cop a *C. C.*, i si augmenteu la durada de l'impuls (*Pulse Width*) fins que es vegi clarament la part plana que segueix la petita oscil·lació inicial, podreu determinar les amplituds (d'aquesta part plana) de l'impuls inicial i del reflectit.
- 3.18. Calculeu l'atenuació del cable, en dB/m.

*Mesura de la velocitat de propagació de l'impuls:*

- 3.19. Si mesureu el temps entre el començament de l'impuls inicial i el del reflectit podreu determinar la velocitat de propagació dels pulsos dins del cable coaxial.

- 3.20. Per tal de mesurar amb més precisió, es recomana que estireu el botó  $Mag \times 10$  de l'oscil·loscopi. D'aquesta forma, la velocitat de la base de temps quedarà multiplicada per 10.
- 3.21. Ara, amb el *Pulse Delay* podreu desplaçar la imatge i visualitzar millor els impulsos. També amb el control *Time/Div*, podreu aconseguir que els dos impulsos inicial i reflectit càpiguen a la pantalla.
- 3.22. Determineu la velocitat de propagació dels impulsos:  $v = 2 L/t$
- 3.23. Calculeu el factor de velocitat del cable:  $v/c$ .
- 3.24. Calculeu el valor de la constant dielèctrica del material que separa els dos conductors del cable.
- 3.25. Si augmenteu la durada de l'impuls fins que se sobreposi a l'impuls reflectit, podreu observar i interpretar les imatges obtingudes amb el cable en curt-circuit i en circuit obert.
- 3.26. Es podria mesurar la velocitat de propagació amb aquestes imatges?

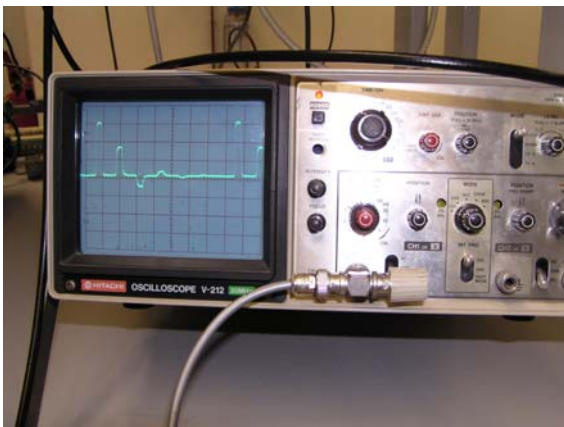


Figura 6

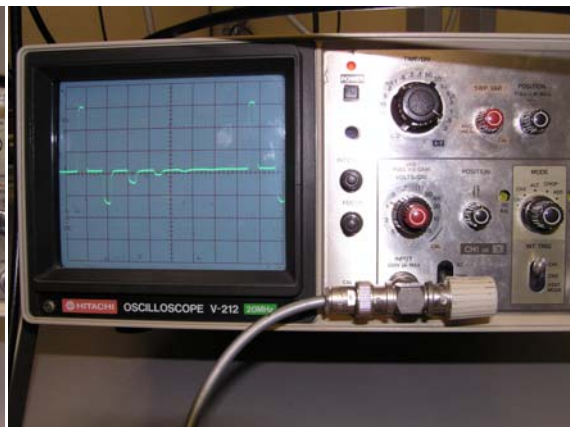


Figura 7

## ESTUDI D'UNA CAVITAT RESSONANT

### 1 Introducció

L'objecte d'aquesta pràctica és determinar el coeficient de sobretensió en buit ( $Q_0$ ) d'una cavitat ressonant en el mode  $TE_{101}$ .

La cavitat està formada per un segment de guia rectangular, acabat en un curt-circuit mòbil, que està acoblat a la guia principal per mitjà d'un diafragma.

### 2 Material

El banc de mesura utilitzat està format per:

- a) generador HP 8620C/86245A (figura 1)
- b) aïllador de ferrita (figura 2)
- c) freqüencímetre (figura 3)
- d) acoblador direccional i detector (figura 4)
- e) cavitat (figura 5)
- f) oscil·loscopi digital HP 54600A (figura 6).



Figura 1



Figura 2

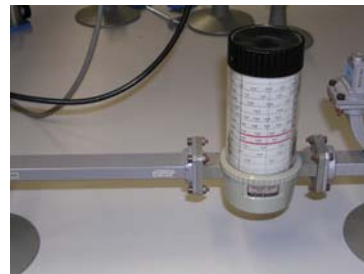


Figura 3

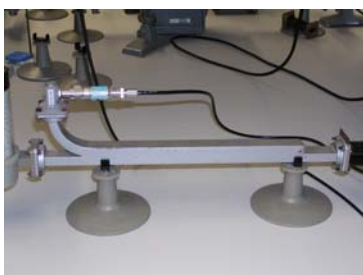


Figura 4



Figura 5

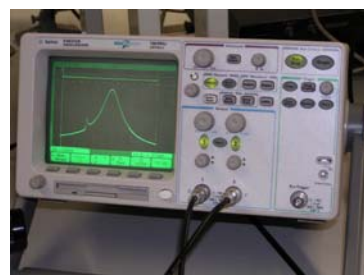


Figura 6

### 3 Posta en marxa dels instruments

#### 3.1 Ajust del generador de microones

- 3.1.1 En el mòdul d'alta freqüència (fig. 7), poseu el selector (7) en posició *OFF* i gireu el botó (2), *POWER LEVEL*, tot a la dreta. La sortida (6) ha d'estar connectada a la guia i el selector (5) en *OFF* (senyal intern).

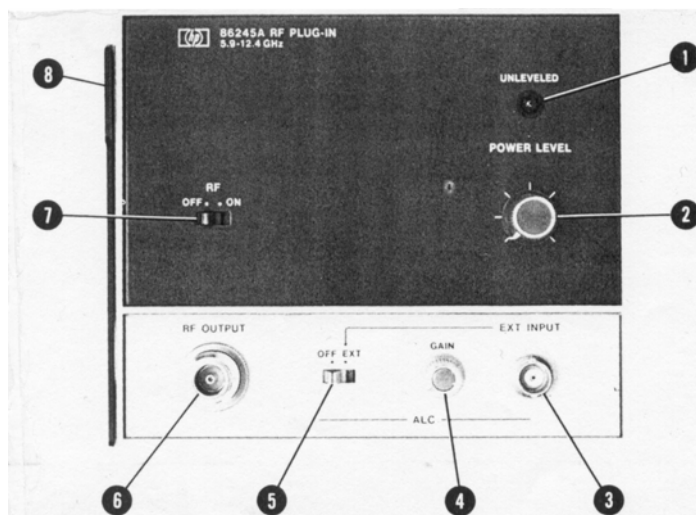


Figura 7

- 3.1.2 En el mòdul de control (fig. 8), cal accionar el botó (14) per posar en marxa el generador. Aleshores, podeu ajustar:

- Selector *MODE* (12) en *AUTO*
- Selector *TRIGGER* (10) a *INT*
- Selector *TIME* (9) entre 0,1 i 0,01
- Botó (8) girant tot a la dreta.

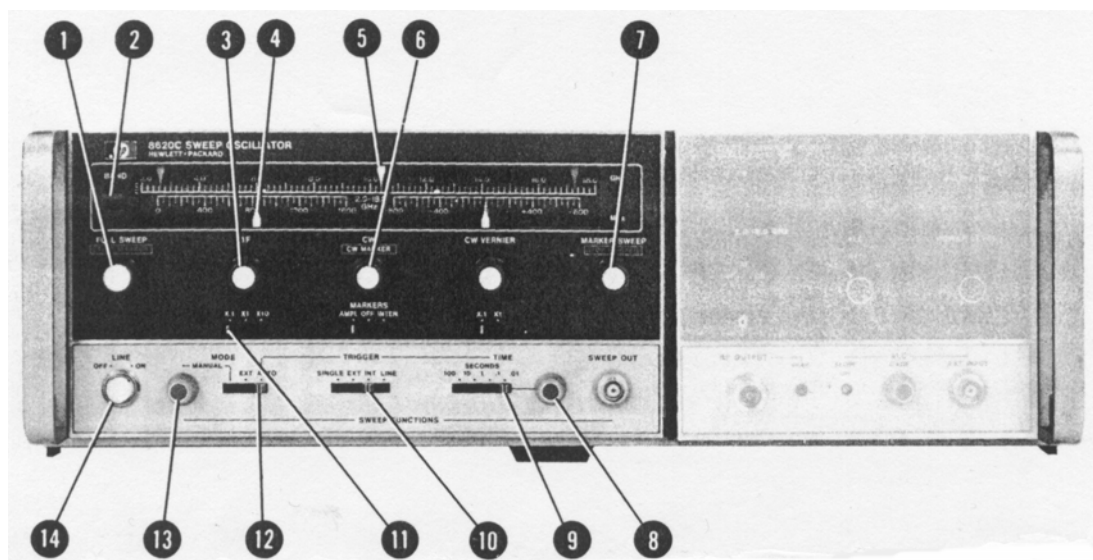


Figura 8.  $\Delta F$  sweep mode front

### 3.1.3 Finalment:

- Si premeu  $\Delta F$  (3) s'encendran els pilots de (3) i de (6) i s'activaran les funcions corresponents.
- Per tal de que el generador faci un rastreig de freqüència de  $600 \text{ X.1} = 60 \text{ MHz}$ , és a dir,  $\pm 30 \text{ MHz}$  al voltant de la freqüència central, cal que ajusteu el selector (11) a  $\text{X.1}$  i, amb el botó (3), situeu l'índex (4) a 600.
- Per acabar la posta en marxa, amb el botó (6) seleccionarem la freqüència central a  $9,0 \text{ GHz}$  (índex (5)).

## 3.2 Ajust de l'oscil·loscopi

Podeu posar l'oscil·loscopi (figura 6) en marxa i comprovar que està en mode X-Y. Si no hi estigués, podeu prémer *Main/delayed* i seleccionar XY en el menú del peu de la pantalla.

Aleshores podeu ajustar els canals:

*Canal X: 1V/div.; Coupling: DC; BW Lim.: Off; Invert: Off; Vernier: Off; Probe: 1.* Connectat a *Sweep Out* del mòdul de control del generador.

*Canal Y: 100 mV/div.; Coupling: DC; BW Lim.: Off; Invert: Off; Vernier: Off; Probe: 1.* Connectat al detector de l'acoblador direccional.

Heu de tenir en compte que el detector de l'acoblador direccional dóna un senyal negatiu. Situeu, doncs, el zero de l'oscil·loscopi a la part superior de la pantalla.

## 3.3 Calibratge de la pantalla

Gireu el pistó de curtcircuit cap al zero, tot el que es pugui. Això anul·la el volum de la cavitat i fa que la guia estigui, pràcticament, acabada en un curtcircuit.

Poseu el selector *RF* (7) del mòdul d'alta freqüència (fig. 1) a *ON*. Amb el botó (2) girat tot a la dreta, s'encendrà el pilot (1). Gireu (2) a poc a poc cap a l'esquerra, fins que s'apagui (1). Això indica que el generador controla el nivell de sortida i el manté constant.

A la pantalla de l'oscil·loscopi observareu la figura 9:

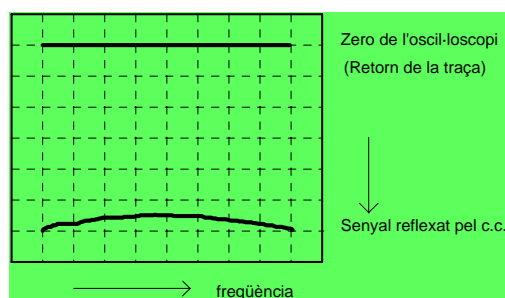


Figura 9



Com que la guia acaba en un curtcircuit, el senyal reflectit hauria de ser constant; per tant, la línia inferior de la pantalla hauria de ser horitzontal. La curvatura que presenta és deguda a la resposta en freqüència de l'acoblador direccional, que no és del tot constant. Caldrà tenir en compte aquesta característica.

Per tal de calibrar en freqüència l'eix X de l'oscil·loscopi, espereu que faci uns *30 min* que el generador estigui en funcionament. Aleshores, seleccionant el botó **Cursors** del panell de l'oscil·loscopi i seleccionant ☒ X en el menú de sota de la pantalla, podreu col·locar els dos cursors a la posició horitzontal desitjada (figura 10).



Figura 10

Ara podreu ajustar el freqüencímetre (figura 11) a  $8,975\text{ GHz}$  i situar el cursor *X1* de l'oscil·loscopi al centre de la marca com a la figura 12:

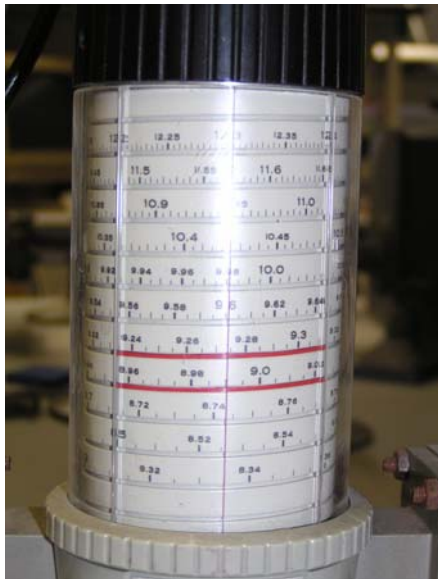


Figura 11

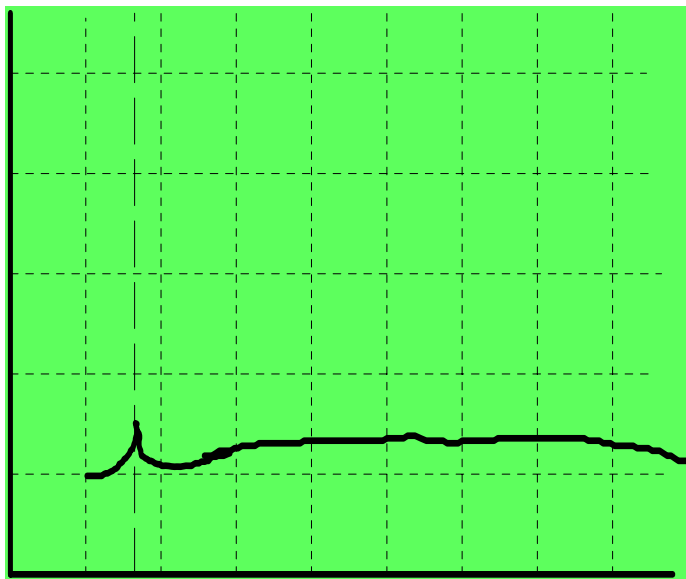


Figura 12

Si no arribés a aparèixer la marca, podeu accionar lleugerament el botó (6) del mòdul de control (fig. 8). Convé que el màxim de la marca es vegi clarament, i que quedi ben a l'esquerra de la imatge.

Ajusteu el freqüencímetre a  $9,025\text{ GHz}$  i situeu el cursor  $X2$  a la marca corresponent. Anoteu el valor de  $\Delta X$  indicat per l'oscil·loscopi. No modifiqueu la posició del cursor  $X1$ . Com que la variació de freqüència del generador és lineal amb el senyal aplicat al canal  $X$ , a cada posició del cursor  $X2$  li correspondrà un nou valor  $\Delta X'$  i la freqüència en aquest punt de la pantalla serà:

$$f = 8,975 + \frac{9,025 - 8,975}{\Delta X} \Delta X'$$

### 3.4 Mesura del senyal incident

Convé que ajusteu el freqüencímetre fora del marge de freqüències que apareixen a la pantalla, de manera que no surti la marca.

Per tal de determinar la magnitud del senyal, podeu activar els cursors verticals mitjançant la selecció de ☒ Y en el menú de sota de la pantalla.

Ara podeu situar el cursor  $Y2$  al zero de l'oscil·loscopi (traça horitzontal superior). Desplaceu el cursor  $X2$  fins que coincideixi amb  $X1$  ( $\Delta X' = 0$ ), i situeu el cursor  $Y1$  a la intersecció de  $X2$  amb la traça que representa el senyal reflectit.  $\Delta Y$  és la mesura del senyal reflectit a la freqüència  $8,975\text{ GHz}$ . Desplaceu el cursor  $X2$  a intervals  $\Delta X'$  regulars (almenys cada mig quadre) fins al final de la pantalla. A cada nou interval, feu coincidir el cursor  $Y1$  amb la intersecció de  $X2$  amb la traça, i anoteu el valor de  $\Delta Y$ .

Prepareu una taula de cinc columnes. La primera, l'omplireu amb els valors de  $\Delta X'$ ; la segona, amb els valors corresponents de  $f$ , calculats amb la fórmula de l'apartat anterior; a la tercera, anoteu-hi els valors  $\Delta Y$ , que corresponen al valor del senyal incident ( $V_i$ ).

### 3.5 Estudi de la cavitat

Per tal de veure el senyal de l'absorció per ressonància de la cavitat, podeu desplaçar el pistó de curtcircuit fins que la cavitat tingui una freqüència de ressonància igual a la freqüència central del generador (aprox.  $22\text{ mm}$ ). Centreu el màxim de la corba (absorció per ressonància) al mig de la pantalla (figura 13).



Figura 13

Seguint el mètode dels apartats anteriors i per les mateixes freqüències (mateixos  $\Delta X'$ ), podreu mesurar els nous intervals  $\Delta Y'$ , que ara corresponen al senyal reflectit per la cavitat ( $V_r$ ). Anoteu aquests valors a la quarta columna de la taula.

En acabar les mesures, desconnecteu l'oscil·loscopi i el generador amb el botó (14) del mòdul de control (fig. 8).

A la última columna de la taula, poseu-hi els valors del mòdul del coeficient de reflexió, calculats com  $(V_r/V_i)^{1/2}$ .

3.6. Traceu la corba de variació del mòdul del coeficient de reflexió en funció de la freqüència.

3.7. Sobre el gràfic anterior, determineu les dues freqüències  $f_1$  i  $f_2$  a les quals correspon un mòdul:

$$|\Gamma_i| = \sqrt{\frac{(|\Gamma_0|^2 + 1)}{2}} \quad |\Gamma_0| = \text{mòdul del coeficient de reflexió a la}$$

freqüència de ressonància.

$$\text{Calculeu: } Q_0 = \frac{2f_0}{\Delta f_i (1 - |\Gamma_0|)} \quad \text{amb } \Delta f_i = |f_2 - f_1| \quad \text{i} \quad f_0 = f \text{ de}$$

ressonància

## ESTUDI D'UN CLISTRÓ REFLEX

### 1 Introducció

L'objecte d'aquesta pràctica és l'observació experimental de les característiques d'un clistró *reflex*, model **2K25** (figura 1), que és un tub oscil·lador que cobreix la part central (aproximadament de 8,4 a 10,0 GHz) de la banda X (7-12 GHz).

Les principals característiques que es mesuraran, en funció de la freqüència d'oscil·lació, són:

- La potència generada en un mode d'oscil·lació determinat.
- La tensió del reflector que correspon al màxim del mode.
- La banda de sintonia electrònica. Degut a que la potència generada i la freqüència varien en modificar la tensió del reflector, es defineix la *banda de sintonia* com la diferència entre les dues freqüències a cada costat del mode d'oscil·lació per les quals la potència emesa ha disminuït 3 dB respecte al seu màxim.



Figura 1

### 2 Material

El banc de mesura que s'utilitzarà (guia conductora de secció rectangular 0,9"x 0,4") comprèn (figura 2):

- Clistró 2K25, muntat en un suport d'adaptació a la guia (fig. 3a).
- Font d'alimentació del clistró (fig. 3a).
- Voltímetre DC, incorporat a la font (b).
- Modulador de la tensió del reflector (fig. 3a).
- Aïllador de ferrita de banda ampla (fig. 3a).
- Atenuador (fig. 3b).
- Freqüencímetre (fig. 3c).
- Atenuador calibrat (fig. 3d).
- Suport de díode de banda ampla (fig. 4a).
- Oscil·loscopi (fig. 4b).
- Suport de termistància (fig. 4c).
- Wattímetre (fig. 4d).

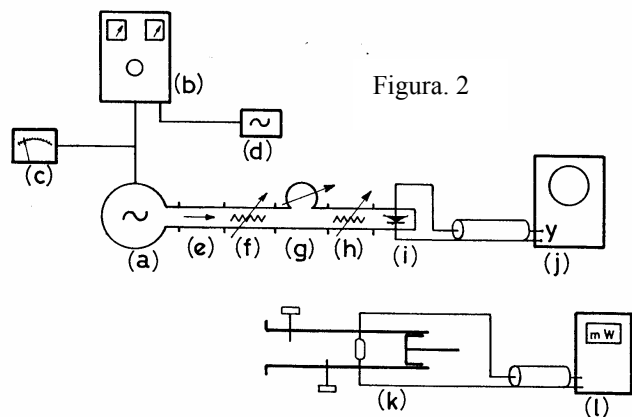
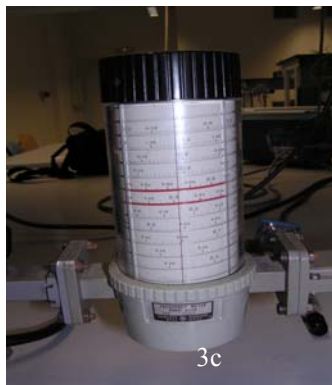
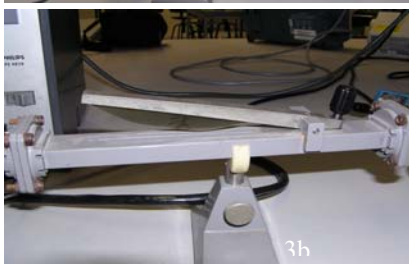


Figura 2



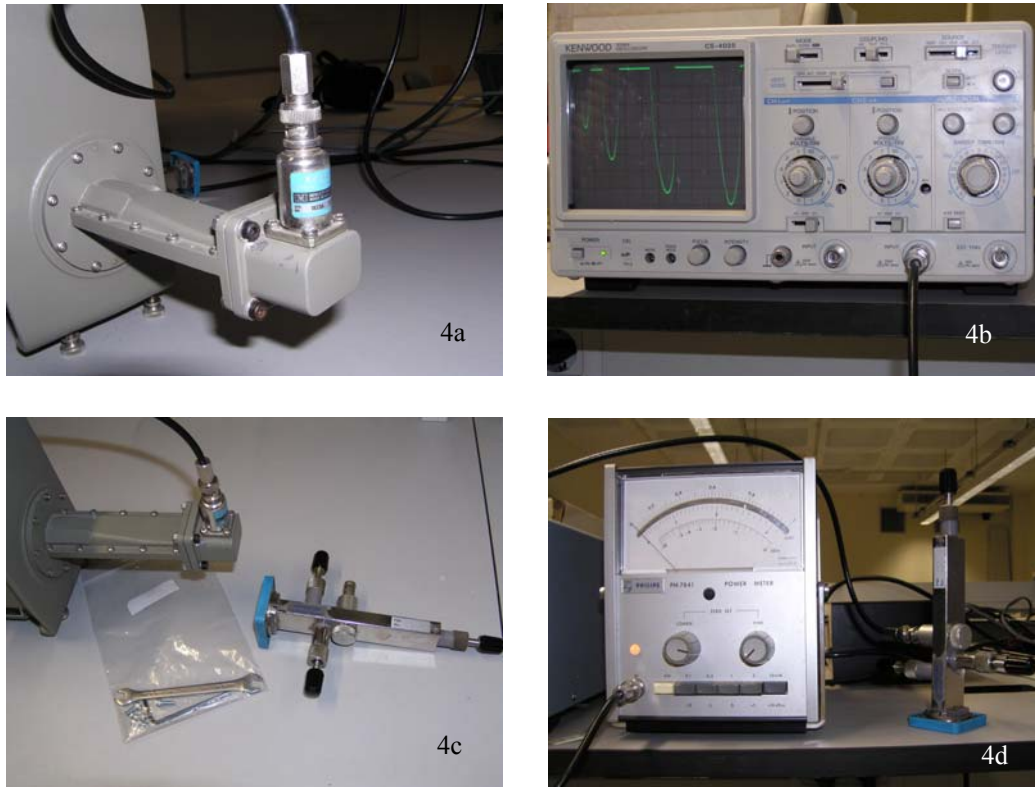


Figura 4

### 3 Ajust inicial

- 3.1 Inicialització del banc de microones. Convé que tots els atenuadors estiguin en la posició de màxima atenuació (figures 3b i 3d).
- 3.2 Connexió de l'oscil·loscopi i del interruptor general de la font d'alimentació del clistró (figura 3a) (commutador de l'esquerra, marcat amb  $\sim$ ).
- 3.3 Al cap d'un minut, aproximadament, podreu aplicar tensió amb el interruptor de la dreta ( $\bullet\bullet\bullet$ ). Aquest interruptor connecta l'alta tensió positiva a la cavitat ressonant i la tensió negativa al reflector. Amb el botó central, podreu ajustar la tensió del reflector aproximadament a 150 V.
- 3.4 Configuració de l'oscil·loscopi (fig. 4b). Per tal d'observar el senyal emès pel clistró reflex, es recomana efectuar els següents controls de l'oscil·loscopi:
  - Sincronisme: *Line*.
  - Amplificador vertical: 5 mV/cm.
  - Convé que situeu la traça sobre la primera línia superior de la retícula de la pantalla, que servirà de referència de nivell 0. Com que la tensió contínua detectada pel díode (i) és negativa, la traça es desplaçarà cap a la part inferior de la pantalla en augmentar el senyal detectat.
- 3.5 Visualització del senyal emès pel clistró reflex amb l'oscil·loscopi (figura 4b). Podreu visualitzar el senyal si obriu l'atenuador (f) fins a la meitat (fig. 3b), aproximadament, i després, obriu l'atenuador calibrat (h) (fig. 3d) (lentament) fins que observeu un desplaçament vertical de la traça d'1 o 2 cm (quadres) en la pantalla de l'oscil·loscopi. En cas que la traça no es desplaçés, hauríeu d'ajustar la tensió del reflector per tal d'activar algun dels modes de l'oscil·lador.



- 3.6 Visualització d'un dels modes d'oscil·lació. Es recomana que ajusteu la tensió del reflector fins a obtenir la màxima desviació. Si la traça sortís fora de la pantalla, tanqueu l'atenuador calibrat (fig. 3d). En aquestes condicions, el clístró estarà oscil·lant al màxim d'un dels modes d'oscil·lació.

- 3.7 Visualització del conjunt de modes del clístró. Es recomana que connecteu el circuit de modulació de la tensió del reflector (fig. 5), que suma una tensió sinusoidal variable de 50 Hz a la tensió contínua fixada pel botó de regulació de la font. A la pantalla de l'oscil·loscopi apareixeran els modes d'oscil·lació del clístró. Variant la tensió de modulació, la tensió contínua del reflector i la base de temps de l'oscil·loscopi, es poden observar tots els modes, o només un de sol.

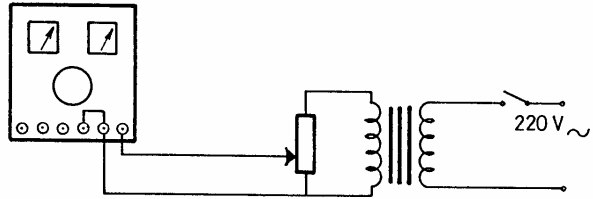


Figura 5

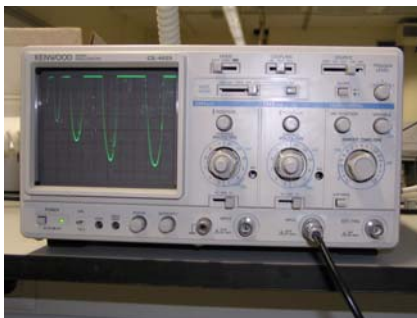
- 3.8 Espereu uns 15 min perquè s'estabilitzi tèrmicament el clístró.

## 4 Mesures relatives

Per tal d'analitzar el comportament del clístró farem un seguit de mesures relatives a diverses freqüències d'emissió del clístró.

- 4.1 Sintonització de la cavitat del clístró a la freqüència més alta. Gireu lentament el botó d'ajust de la cavitat (figura 3a) en sentit antihorari fins al final (sense forçar-lo).
- 4.2 Si varieu la tensió de modulació, podreu observar a la pantalla els diferents modes d'oscil·lació (fig. 6a).

a)



b)

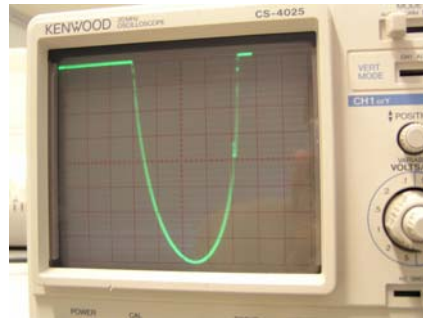


Figura 6

- 4.3 Mesura de l'atenuació. Si centreu a la pantalla el mode de més amplitud i ajusteu l'amplitud del mode amb l'atenuador calibrat, podreu aconseguir que ocupi gairebé tota la pantalla (fig. 6b). Convé que deixeu l'atenuador calibrat en un valor exacte de dB (A). Aleshores, amb l'atenuador (f), podreu fer que el màxim del mode arribi fins a la penúltima o la última divisió de la pantalla.

*Per tal de no perdre la referència de potència emesa pel clístró, convé que en totes les mesures que segueixen de l'apartat 4, **no modifiqueu la posició de l'atenuador (f)**. Des d'ara, només haureu d'ajustar les amplituds amb l'atenuador calibrat.*

- 4.4 Mesura de la freqüència  $f_0$ . Si gireu el control de sintonia del freqüencímetre, fins que aparegui sobre la corba del mode el *dip* produït per l'absorció de potència a la cavitat, podreu fer-lo coincidir amb el màxim del mode (fig. 7a). En aquesta posició podreu llegir la freqüència  $f_0$  sobre l'escala del freqüencímetre (fig. 3c) (entre les dues línies vermelles).

- 4.5 Mesura de la tensió del reflector,  $V_r$ . Si anul·leu la tensió de modulació i ajusteu la tensió del reflector, podreu aconseguir que la traça se situï al nivell del mode de més amplitud. Aleshores, podreu llegir la tensió de reflector  $V_r$  en el voltímetre (c).

Atenció: convé que sempre mesureu sobre el mode de més amplitud.

- 4.6 Determinació de la banda de sintonia. Si restabliu la tensió de modulació i disminuïu l'atenuació 3 dB, l'oscil·lograma apareixerà com a la figura 7b. Ara podreu ajustar el freqüencímetre perquè el *dip* de ressonància aparegui successivament en els dos punts de la corba que són al nivell on hi havia el màxim del mode abans de desatenuar-lo. Si anoteu les freqüències  $f_1$  i  $f_2$ , podreu determinar la banda de sintonia electrònica mitjançant:  $\Delta f = |f_1 - f_2|$ .

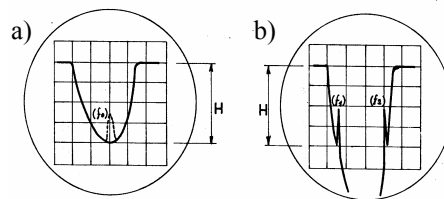


Figura 7

- 4.7 Canvi de la freqüència del clístró. Si gireu el control de sintonia del clístró en sentit horari (dues voltes), el tub oscil·larà a una freqüència  $f_o'$  més baixa. Aleshores, com heu fet en les operacions 4.2 i 4.3, escolliu i centreu a la pantalla el mode de més amplitud.
- 4.8 Determinació de l'atenuació  $A'$ . Sense modificar la posició de l'atenuador (f), ajusteu l'atenuador calibrat perquè el màxim del mode aparegui al mateix nivell que en l'apartat 4.3. Anoteu la nova atenuació  $A'$ . El quocient, expressat en dB, entre la potència emesa a la freqüència  $f_o'$  i la emesa a la freqüència  $f_o$ , val:
- $$P(\text{dB}) = 10 \log_{10} (P_o'/P_o) = A' - A.$$
- 4.9 Determinació de  $f_o'$ ,  $V_r$  i la banda de sintonia electrònica, com en els apartats 4.4, 4.5 i 4.6.
- 4.10 Repetiu aquestes operacions a diferents freqüències, fins a arribar a la més baixa que es pugui mesurar. Convé mesurar de 6 a 8 punts, repartits regularment sobre la banda (8,4-10 GHz). Els valors de  $P$  es referiran sempre a l'atenuació de la primera freqüència mesurada ( $A$ ).
- 4.11 Representeu les corbes  $V_r(f_o)$ ,  $P(f_o)$  i  $\Delta f/f_o(f_o)$  en %.

## 5 Mesura de potència en valor absolut

Les mesures de l'apartat 4 només donen la variació relativa de potència del mode principal, en funció de la freqüència de ressonància de la cavitat del clístró.

Per obtenir els valors absoluts, només cal mesurar la potència absoluta a una freqüència. Això ens donarà un punt de referència per convertir els valors relatius en absoluts.

- 5.1 Amb el clístró sintonitzat a l'última freqüència de l'apartat 4.10, anul·leu la modulació i ajusteu la tensió contínua del reflector perquè el clístró oscil·li al màxim del mode principal.
- 5.2 Configuració del wattímetre (l a la fig.2). Amb el suport de termistància (fig.4d) connectat al wattímetre (però separat del banc de microones), polseu els botons *ON* i *10 mW* del wattímetre. Si l'agulla surt fora d'escala, porteu-la al zero amb els botons *Zero Set*.
- 5.3 Sense tocar l'atenuador (f), ajusteu al màxim l'atenuador calibrat. Mentre el wattímetre s'equilibra tèrmicament, desmunteu de la guia d'ones el suport del díode (fig.4a). Atenció: cal evitar xocs mecànics i manipulacions brusques.
- 5.4 Muntatge i posta a zero de la termistància. Munteu el suport de termistància a l'extrem de la guia (fig.4c). Ajusteu de nou el zero del wattímetre i *desateneu al màxim (ara sí) l'atenuador (f)*.

- 5.5 Adaptació de la termistància a la guia d'ones. Ajusteu l'atenuador calibrat fins a obtenir una desviació significativa de l'agulla, sense arribar al fons d'escala. El suport de termistància té tres elements d'adaptació, que cal ajustar per estar segurs que la termistància absorbeix tota la radiació que es propaga per la guia. Comenceu pel pistó de curtcircuit de l'extrem, buscant la màxima desviació de (h). Ajusteu successivament les dues varetes verticals. Aquests tres elements es poden influir mútuament; caldrà repetir-ne l'ajust fins a obtenir la màxima desviació de l'agulla.
- 5.6 Determinació de la potència absoluta. Determineu la potència que circula per la guia a partir de les lectures del wattímetre (fig.8) i de l'atenuador calibrat (fig.3d).
- 5.7 A partir d'aquest valor i dels valors de potència relativa  $P$  (dB), dibuixeu la corba de potència absoluta (en mW) generada pel clistró en funció de la freqüència.
- 5.8 Desconnecteu els instruments seguint l'ordre següent:
- Tensió de cavitat i de reflector del clistró (•••).
  - Interruptor general de la font d'alimentació, wattímetre i oscil·loscopi.



Figura 8



## MESURA DE CONSTANTS DIELÈTRIQUES. GUIA RANURADA

### 1 INTRODUCCIÓ

L'objecte d'aquesta pràctica és determinar la constant dielèctrica i l'angle de pèrdues de materials aïllants sòlids.

Si anomenem  $\epsilon_r$  la constant dielèctrica relativa d'un material i  $\delta$  el seu angle de pèrdues, podem definir una quantitat complexa anomenada *constant dielèctrica relativa complexa*:  $\epsilon'_r$ , mitjançant:

$$\epsilon'_r = \epsilon_r (1 - j \cdot \tan(\delta)). \quad (1)$$

Amb aquesta notació també podem definir la constant de propagació  $K_g$  (complexa):

$$K_g = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon'_r - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2} \quad (2)$$

També podem definir la impedància d'ona  $Z_g$  d'una guia sense pèrdues que treballi en un mode TE, plena d'un dielèctric caracteritzat per  $\epsilon'_r$ :

$$Z_g = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon'_r - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}}, \quad (3)$$

amb  $\lambda_0 = \frac{c}{f}$ , longitud d'ona a l'espai lliure i  $\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \Omega$ , impedància d'ona de l'espai lliure.

Suposem una guia d'ones (fig. 1) que tingui la part dreta plena d'un dielèctric de constant complexa  $(\epsilon'_r)_2$ , i la part esquerra plena d'un dielèctric de constant  $(\epsilon'_r)_1$ . La superfície de separació dels dielèctrics és una secció recta de la guia.

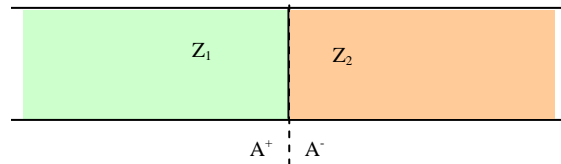


Figura 1

Si  $z_2$  és el valor de la impedància reduïda en el punt  $A^-$  del medi 2, aquesta impedància es veurà des de l'altre costat de la superfície de separació, punt  $A^+$  del medi 1, amb un valor igual a  $z_1$ , tal que:

$$z_1 = \frac{Z_{g2}}{Z_{g1}} z_2 = \frac{K_{g1}}{K_{g2}} z_2 \quad (4)$$

i aquesta és la relació que servirà de base per a la mesura de  $\varepsilon'_r$ .

## 2 MÈTODE DEL CURTCIRCUIT DESPLAÇABLE

El tros de guia que conté el dielèctric 2 acaba en un pistó de curtcircuit desplaçable (fig. 2). El dielèctric 1 és aire i el conjunt està connectat a una línia de mesura.

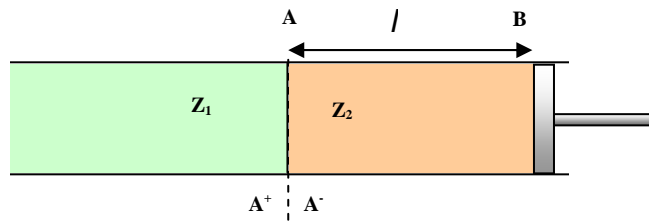


Figura 2

### 2.1 Pistó en contacte amb la cara posterior de la mostra

En aquest cas,  $z_2$  correspon al valor reduït de la impedància d'entrada d'una guia d'ones curtcircuitada, de longitud  $l = AB$

$$z_2 = \tanh(K_{g2} \cdot l) \quad (5)$$

i, segons (4):

$$z_1 = \frac{K_{g1}}{K_{g2}} \tanh(K_{g2} \cdot l). \quad (6)$$

### 2.2 Desplaçament del pistó $\frac{\lambda_{g2}}{4}$ cap enrere

Si desplacem cap endarrere el pistó una distància igual a  $\lambda_{g2}/4$ , la cara posterior del dielèctric 2 es troba ara amb un tros de guia curtcircuitada que li presenta una impedància infinita.  $z'_2$  representa ara la impedància d'un tros de guia oberta, plena del dielèctric 2 i, per tant:

$$z'_2 = \coth(K_{g2} \cdot l) \quad \text{i} \quad z'_1 = \frac{K_{g1}}{K_{g2}} \coth(K_{g2} \cdot l). \quad (7)$$

Les inverses de  $z_1$  i de  $z'_1$  són les admitàncies reduïdes  $y_1$  i  $y'_1$ . El seu producte dóna:

$$K_{g2}^2 = K_{g1}^2 \cdot y_1 \cdot y_1' \quad (8)$$

d'on es dedueix, tenint en compte l'equació (3) i la relació  $\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}}$ :

$$\varepsilon_r = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{g1}}\right)^2 \operatorname{Re}\{y_1 \cdot y_1'\} + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2 \quad (9)$$

$$\tan \delta = -\frac{1}{\varepsilon_r} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{g1}}\right)^2 \operatorname{Im}\{y_1 \cdot y_1'\}. \quad (10)$$

### 3 MATERIAL

Es disposa d'un banc de mesura format per:

- Generador d'efecte Gunn, amb la seva font d'alimentació (figures 3 i 4).
- Aïllador de ferrita (figura 3).
- Atenuador variable (figura 5).
- Guia ranurada motoritzada (figura 6).
- Font d'alimentació del motor de la guia (figura 7).
- Pistó de curtcircuit (figura 7).
- Regla, clau fixa i clau *Allen*, peu de rei (figura 7).
- Dues mostres de dielèctric amb les dimensions transversals de la secció recta de la guia (baquelita: marró; PVC: verda) (figura 8).
- Ordinador amb programa de control del motor de la guia amb sistema d'adquisició de dades (figura 9).



Figura 3



Figura 4



Figura 5



Figura 6

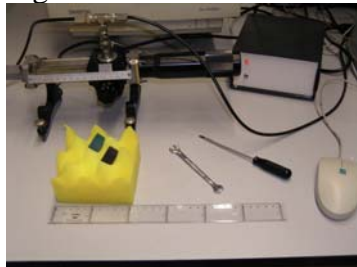


Figura 7



Figura 8

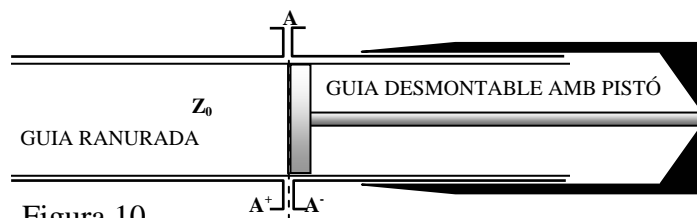


Figura 9

#### 4 REALITZACIÓ DE LA PRÀCTICA

Per cada mostra de dielèctric cal fer tres mesures de l'admitància:

1. Una primera mesura, sense mostra, de l'admitància d'un curtcircuit situat en el mateix punt on hi haurà la cara anterior de la mostra, per tenir una referència de la seva posició dins de la guia (figura 10).



2. Una mesura amb el curtcircuit (pistó) tocant a la mostra colocada a l'interior del tros de guia amb pistó (cilindre negre).

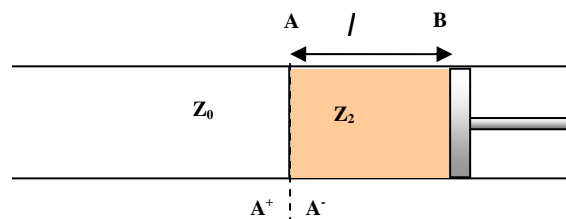


Figura 11

3. Una darrera mesura de l'admitància amb el curtcircuit desplaçat un quart de longitud d'ona des de la mostra.

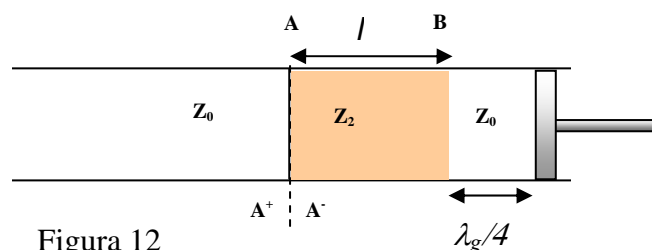


Figura 12

#### 4.1 Mesura del curtcircuit de referència

##### 4.1.1 Inicialització del banc de mesura:

- Podeu connectar el interruptor general de la font d'alimentació del generador Gunn (fig. 4), (8 V de tensió que tenen que donar 125 mA de corrent).
- Per tal de donar temps al generador a establir-se tèrmicament, convé que espereu al voltant de 15 min abans de fer les mesures.
- Per a realitzar la primera mesura de l'admitància, cal que a l'extrem de la guia ranurada es munti el pistó amb el curtcircuit desplaçable sense la mostra (figura 10).
- Per tal d'evitar errors deguts al joc mecànic del cargol micromètric, quan tingueu que situar el pistó en una certa posició, convé que gireu sempre el cargol en el mateix sentit.
- A la corona del pistó hi ha una escala amb divisions cada 2 centèsims de mil·límetre. Si us passeu del valor buscat, haureu de tornar endarrere una volta sencera (a valors més alts) i tornar a aproximar-vos-hi.
- Per començar, doncs, gireu la corona del pistó fins que el pistó es trobi a zero (girant des d'un valor superior a zero).

##### 4.1.2 Mesura del coeficient de reflexió complex de la càrrega

- a) *Connexió del sistema de control i mesura:* Connecteu l'ordinador, la font d'alimentació del motor de la guia ranurada i el oscil·loscopi (opcional, per a veure el nivell del senyal de la sonda). Apareixerà una pantalla com la de la figura 13.



Figura 13

- b) *Posta en marxa del programa de control de la posició de l'antena i d'adquisició de dades:* Si premeu l'accés directe "lmd.bat", es carregarà el programa de control del posicionament de l'antena i de l'adquisició de dades. Aquest programa treballa a l'entorn DOS i està programat amb *Quick Basic* (figura 14).

NOTA: En el cas que hagueu entrat a l'entorn DOS, sense l'accés directe, podreu entrar al programa lmd.bas, cridant-lo des de la pantalla del Quick-Basic. Aleshores haureu d'introduir les instruccions següents:

**Alt-F**                      **Open program**

A la finestra **File name** podreu escollir (e:\microona\pract\_lab\):

**lmd.bas**                      **Enter**

S'obrirà el programa de control i adquisició i aleshores podreu arrencar el programa fent:

**Alt-R**                      **Start**

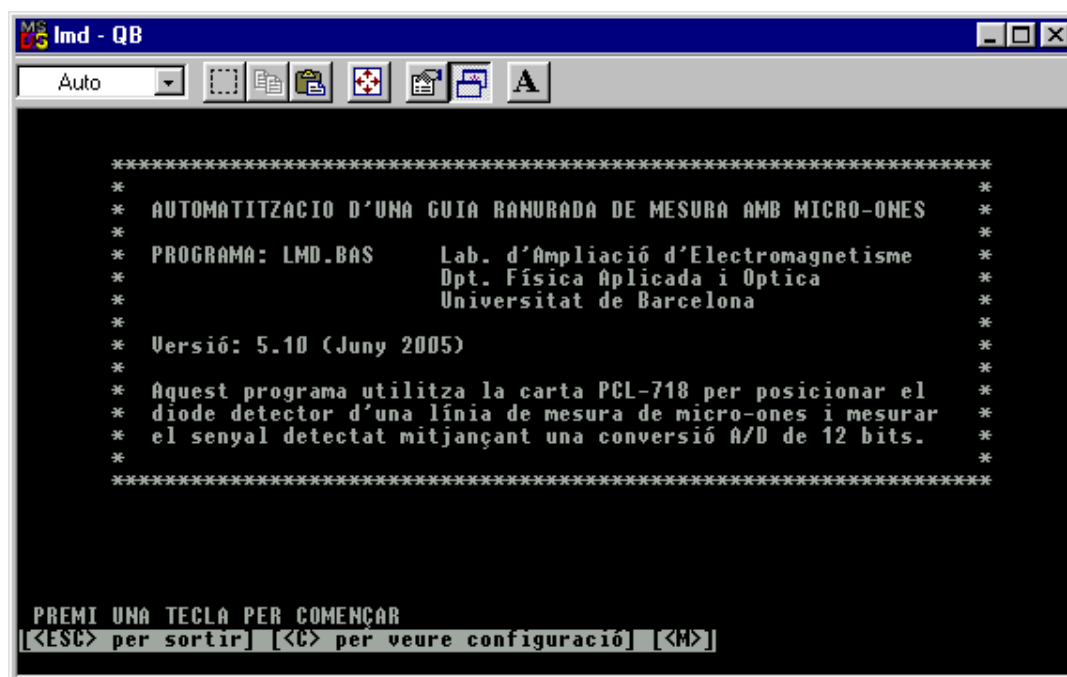


Figura 14

c) *Inicialització del programa:* Apareixerà el menú principal del programa (figura 15).

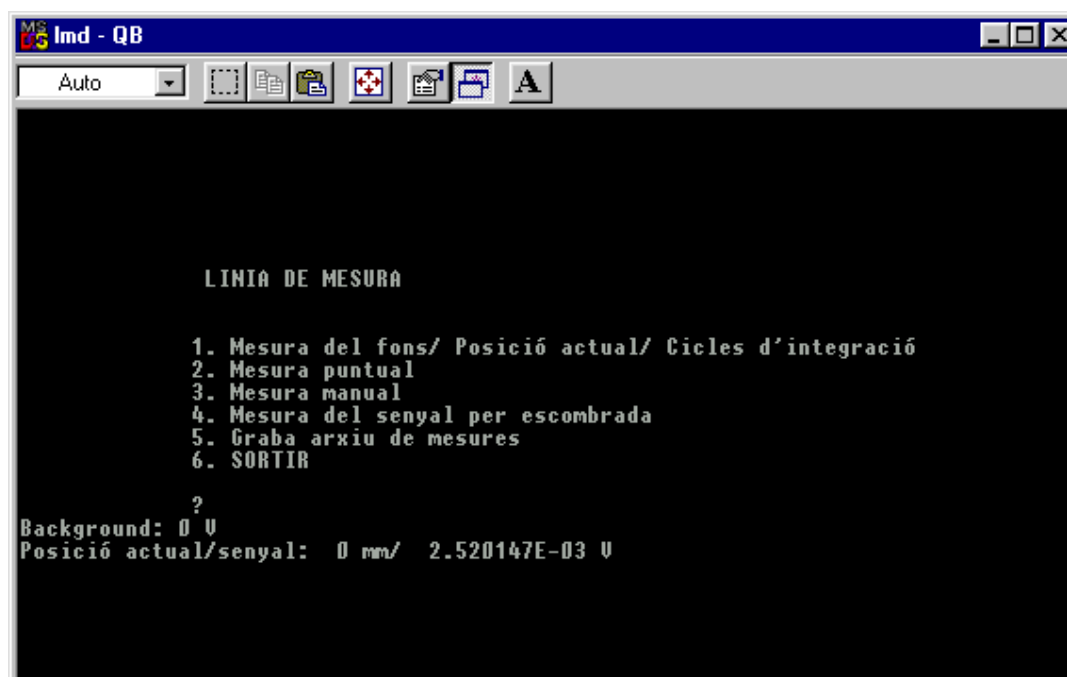


Figura 15

Introduïu:

**1** **Enter**

El programa demanarà (figura 16):

**posició actual de la sonda**  
**nombre de cicles d'integració**

La posició actual la podreu llegir sobre l'escala (amb nònius) de la guia ranurada (la sonda no pot estar per sota de 43 mm). Després podreu introduir:

**100**                      **Enter**

**Important:** en el cas que tingueu de desplaçar manualment la sonda, primer desconnecteu la font d'alimentació del motor (centre de la figura 9); ajusteu la posició de la sonda i torneu a connectar l'alimentació. Pot ser que, en connectar-la, el motor es desplaci una mica. És normal. El motor té uns increments mínims i no es pot situar a qualsevol lloc. Introduïu a l'ordinador la nova posició on s'hagi quedat la sonda després de connectar l'alimentació del motor.

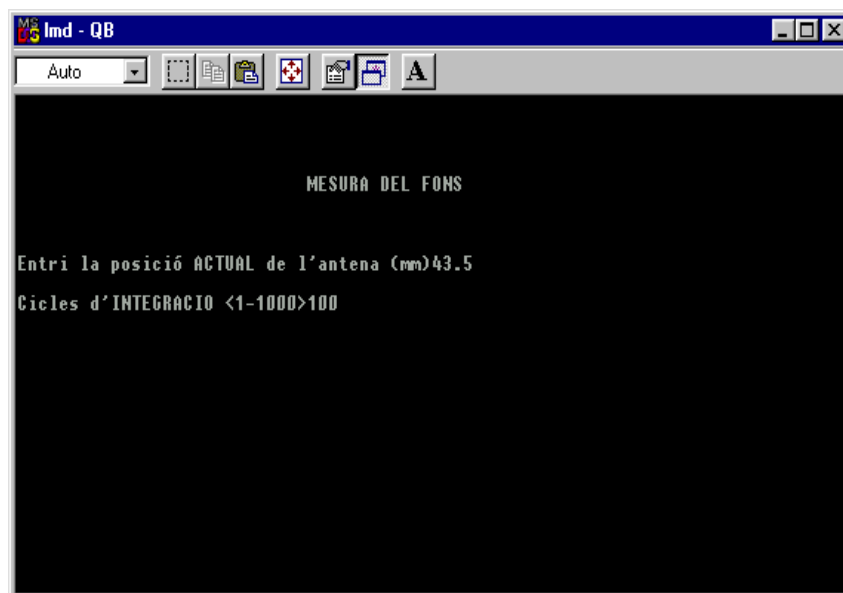


Figura 16

Un avís us recordarà que:

**cal desconnectar el díode Gunn**

Apagueu aleshores la font d'alimentació del generador Gunn.  
Quan polseu:

**Enter**

el programa farà un cicle de mesures de zero i tornarà al menú principal.

d) *Cicle de mesura manual.* Seleccioneu:

**3**                      **Enter**



Ara podeu connectar el generador. A **Senyal mesurat** llegireu el valor de la mesura integrada.

Si desplaceu la sonda manualment (amb l'alimentació del motor encara desconnectada) podreu trobar el màxim del senyal mesurat (opcionalment, podreu llegir-ho també amb un oscil·loscopi).

Convé que ajusteu l'atenuador perquè aquest màxim no arribi a 1 V (per seguretat: entre 0,985 i 0,990). Així no se satura la targeta d'adquisició de dades.

Per sortir i tornar al menú principal premeu:

**ESC**

- e) *Reinicialització de la mesura i cicle de mesura automàtica.* Per a iniciar el cicle de mesura automàtica caldrà que introduïu de nou la posició actual de la sonda. Podeu fer:

**1**

**Enter**

Seleccioneu ara **mesura del senyal per escombratge**:

**4**

**Enter**

A les preguntes del programa podeu respondre (figura 17):

**Rang d'escombratge:**

**44,120**

**Interval entre dues posicions:**

**0.34**

Quan us ho demani el programa, connecteu l'alimentació del generador i premeu:

**Enter**

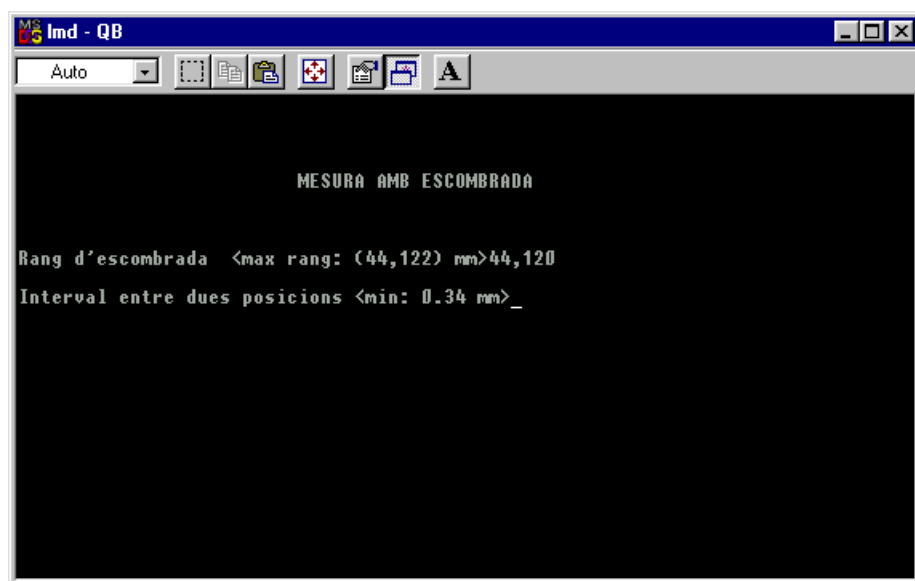


Figura 17

La sonda se situarà a 44 mm i es desplaçarà fins a 120 mm, per intervals de 0,34 mm; a cada posició farà la mitjana de 100 lectures.

En acabar, la sonda tornarà al punt inicial i a la pantalla tindreu de nou el menú principal.

- f) *Arxivament de les dades.* Per tal de salvar les mesures en un arxiu (figura 18), introduïu el disquet de treball (3,5", 1,44 Mb) a la disquetera A i seleccioneu:

**5** **Enter**

Us demanarà:

**nom d'arxiu**

Escriviu:

**"nom"** (sense extensió) **Enter**

Quan hagi acabat d'arxivar el fitxer, el programa tornarà al menú principal.

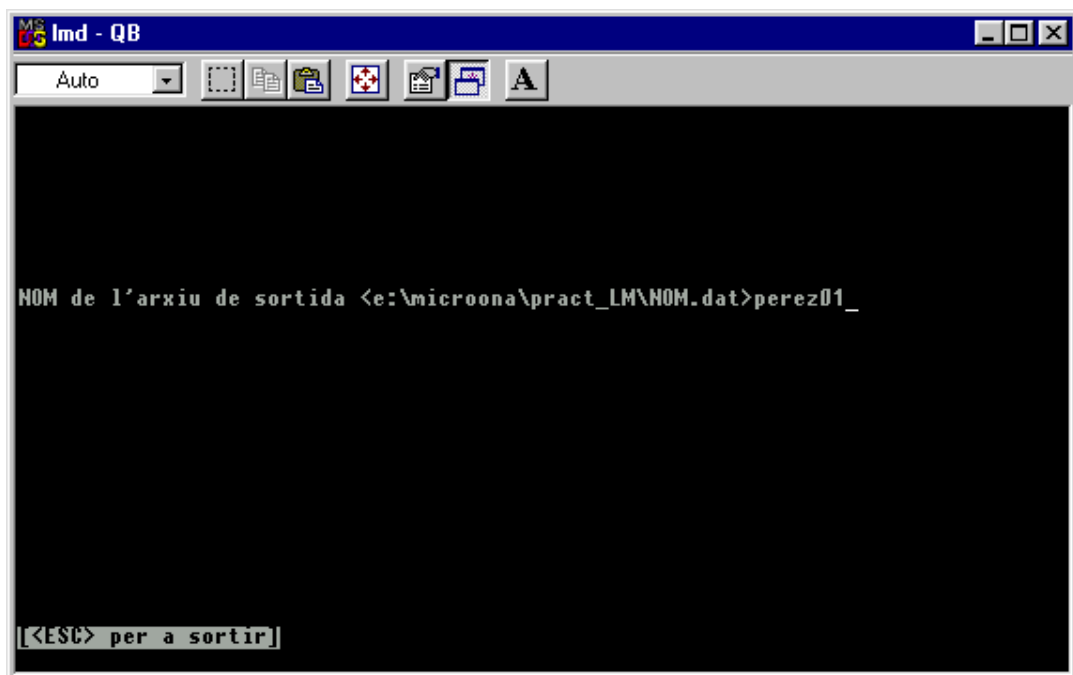


Figura 18

- g) *Sortida del programa d'adquisició de dades.* Per tal de sortir del programa podreu seleccionar:

**6** **Enter**

Premeu una tecla qualsevol per acabar de sortir del programa i tornar a la finestra del *Quick Basic*.

Per tal de tornar a l'entorn *DOS* podeu introduir:

**Alt-F**

h) *Simulació de les mesures amb el full de càlcul.* A continuació, des de l'entorn *Windows* podreu carregar el programa *MS-Excel*, o bé podeu carregar directament el fitxer: *linxc.xls* (figura 13). Aquest fitxer és una simulació del senyal recollit per la sonda que permet comparar les *dades mesurades* amb les *dades calculades* a partir de certs *paràmetres* (amplitud del senyal, coeficient de reflexió, fase i longitud d'ona).

Per tal de visualitzar les vostres mesures, haureu de substituir les dades que hi ha a les columnes *A* i *B* del full de càlcul (posicions de la sonda i els valors mesurats, respectivament), per les dades que acabeu de mesurar, guardades a l'arxiu "*nom*".*dat*.

Al gràfic de la dreta de la pantalla (figura 19) representa la corba de valors mesurats, representats per petits quadrats de color verd junt amb els valors de la simulació amb una línia roja contínua.

A la columna *D* teniu els valors dels *paràmetres* amb els quals es calculen els punts de la columna *E* (simulació) mitjançant les expressions detallades a l'apèndix.

Modifiqueu els valors de la columna *D* fins que la corba roja coincideixi tant com sigui possible amb la sèrie de valors mesurats.

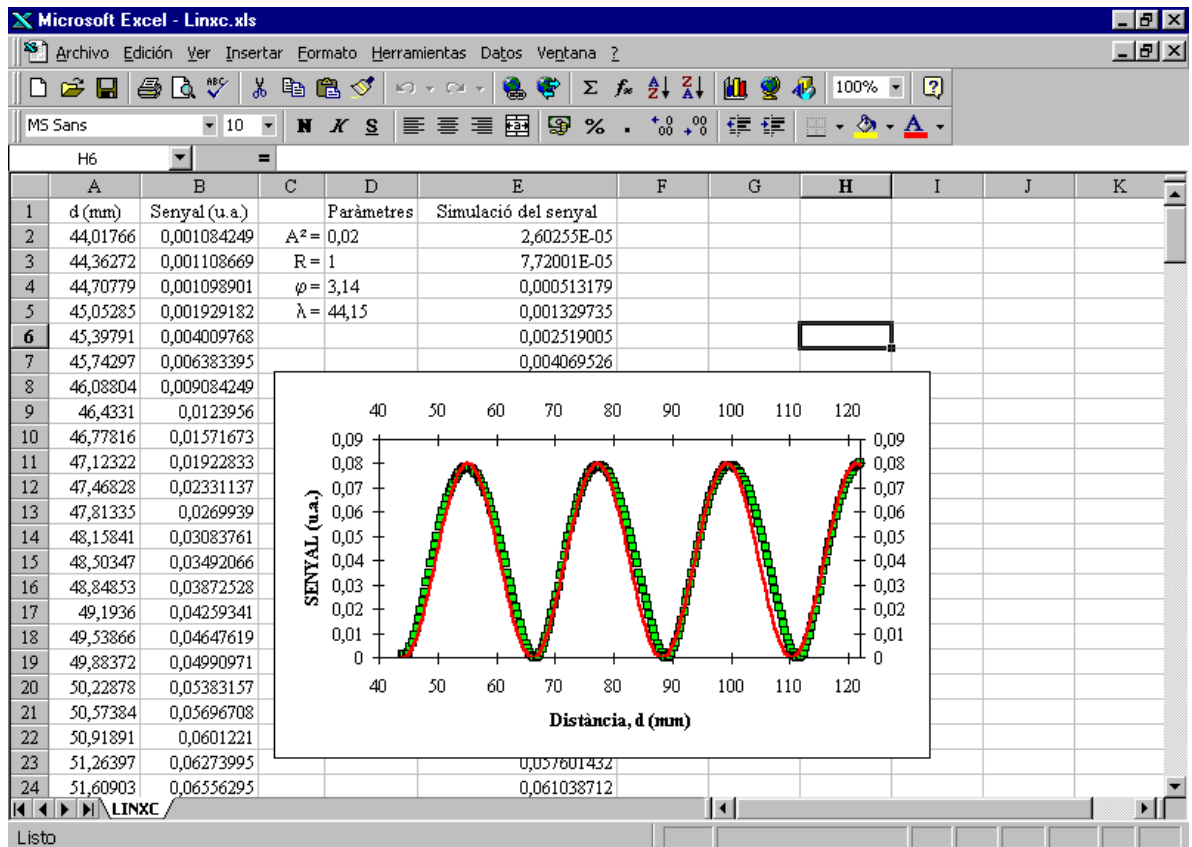


Figura 19

Criteris per a la simulació:

- Si els mínims de la corba estan més junts, o més separats que els mínims dels punts mesurats, modifiqueu la longitud d'ona ( $\lambda$ ).
- Si dos mínims consecutius estan desplaçats tots dos a la dreta, o a l'esquerra, dels mínims mesurats, cal modificar l'angle de fase ( $\varphi$ ) en radians.

- Si el màxim i el mínim de la corba estan tots dos per sobre, o per sota del màxim i el mínim mesurats, modifiqueu  $A^2$ .
- Si el màxim de la corba està per sobre del màxim mesurat i el mínim per sota del mínim mesurat, o al revés, cal modificar  $R$  ( $\leq 1$ ).
- En aquest cas (curtcircuit),  $R$  ha de ser molt proper a 1.
- Reduïu  $A^2$  i augmenteu  $R$  per ajustar el màxim de la corba als punts mesurats, sense que el mínim de la corba quedi aplanat.

Si voleu veure amb més detalls l'adaptació de la corba als punts experimentals, feu dos clics dins de la gràfica.

Cal que anoteu els valors finals de  $R$ ,  $\varphi$  i  $\lambda$  ( $=\lambda_{gr}$ ) ajustats, corresponents a cada arxiu de mesures.

- i) *Determinació de les longituds d'ona de la guia.* A partir del valor de  $\lambda_{gr}$  determinat mitjançant el programa de simulació, i tenint en compte que la longitud d'ona de tall de la guia ( $a=0,4''$  i  $b=0,9''$ ), treballant en el mode  $TE_{01}$  és:  $\lambda_c = 45,72 \text{ mm}$ , i la de la guia ranurada és:  $\lambda_{cr} = 45,61 \text{ mm}$ , podreu calcular  $\lambda_g$  mitjançant les següents expressions:

$$\lambda_{air} \text{ (mm)} = \frac{\lambda_{gr}}{\sqrt{1 + \frac{\lambda_{gr}^2}{\lambda_{cr}^2}}} \quad \lambda_g \text{ (mm)} = \frac{\lambda_{air}}{\sqrt{1 - \frac{\lambda_{air}^2}{\lambda_c^2}}}.$$

En el cas present (pistó en la posició zero), la impedància a la càrrega correspon a la d'un curtcircuit, i per tant,  $\varphi = \pi$ , però, el resultat que s'obté al full de càlcul és diferent. Això és degut a que la posició del pistó no coincideix amb el zero de l'escala de la guia ranurada. Cal, doncs, corregir l'origen de l'escala mitjançant:

$$\pi = \varphi + 4\pi \frac{\Delta d}{\lambda_g},$$

on  $\Delta d$  és la diferència entre la posició real del curtcircuit i el zero de la guia ranurada:

$$\Delta d = \frac{(\pi - \varphi)\lambda_g}{4\pi}.$$

Aquest desplaçament de l'origen s'haurà de mantenir en les mesures que es facin amb les mostres que es proposen en aquest experiment.

## 4.2 Mesura de la mostra de baquelita

- a) *Col·locació de la mostra de baquelita dins de la guia (Figura 11).*

Per tal de posicionar la mostra, es recomana que situeu el pistó de curtcircuit a uns 17 mm i que el desmunteu de la guia.

Després, podreu introduir la mostra de baquelita, com a la figura 11, de manera que ompli tota la secció de la guia (cilindre negre). Per tal que quedi en contacte amb el curtcircuit, cal que l'enfonseu fins a arribar al pistó.

Ara podeu muntar el pistó a la guia.

Si gireu la corona del pistó fins que el curt-circuit se situï a una distància igual a la longitud de la mostra, aleshores, la cara anterior de la mostra es trobarà al mateix punt en què estava el curt-circuit.

Si, donat el cas, us passéssiu de llarg el punt previst, no podreu tornar endarrere. La mostra es quedarà allà on el pistó l'hagi deixat d'empènyer. Aleshores, haureu de desmuntar el pistó i repetir l'operació.

Un cop posicionada la mostra com a la figura 11 podreu repetir els passos de l'apartat 4.1.2 per mesurar  $R$  i  $\varphi$  corresponents a la impedància actual.

En la simulació del full de càlcul, només caldrà que modifiqueu els valors de  $R$  i de  $\varphi$  per ajustar la corba, ja que, en principi,  $\lambda$  i  $A^2$  no hauran variat.

Anoteu els valors finals.

*b) Desplaçament del pistó d'un quart de longitud d'ona (figura 12)*

Amb els resultats del full de càlcul podreu determinar  $\lambda_g/4$ .

Ara, si actueu sobre la corona del pistó podreu posicionar-lo a una distància igual a  $l + \lambda_g/4$ , on  $l$  és la longitud de la mostra (figura 12).

Cal desplaçar el pistó lentament per tal d'evitar que el pistó succioni la mostra i l'arrossegui una mica cap endintre. Només s'ha de moure el pistó, no la mostra.

Arribats a aquest punt, podreu determinar els nous valors de  $R$  i  $\varphi$  i anotar-los.

### 4.3 Càlcul de les constants de la baquelita

*a) Càlcul de l'admitància  $y_l$ .*

Amb els valors obtinguts a l'apartat a) de 4.2 i corregint el valor de  $\varphi$  podreu determinar:

$$y_l = g_l + js_l$$

$$\text{on: } g_l = \frac{1 - R^2}{1 + R^2 + 2R \cos \varphi} \quad \text{i} \quad s_l = \frac{-2R \sin \varphi}{1 + R^2 + 2R \cos \varphi}$$

*b) Càlcul de l'admitància  $y'_l$  i dels paràmetres  $\varepsilon_r$  i  $\tan \delta$ .*

Per tal de determinar les constants de la baquelita, serà convenient repetir les operacions anteriors amb els valors de l'apartat b) de 4.2. Aleshores, calculant el producte  $y_l \cdot y'_l$  i substituint en les equacions (9 i 10) podreu calcular  $\varepsilon_r$  i  $\tan \delta$ .

### 4.4 Mesura de la mostra de PVC

La mesura de la mostra de PVC la podeu realitzar repetint els apartats anteriors igual com heu fet amb la mostra de baquelita. Noteu que la longitud de la mostra de PVC és una mica diferent que la de la baquelita.

## APÈNDIX

Equació de l'ona estacionària en una guia d'ones, o línia de transmissió, produïda per una càrrega no adaptada.

De l'expressió de la solució general de l'equació de propagació d'un camp elèctric que varia sinusoïdalment amb el temps, tenim:

$$E(z) = A \cdot e^{\gamma \cdot z} + B \cdot e^{-\gamma \cdot z}$$

es dedueix l'expressió del quadrat del camp en un punt, en funció del quadrat de l'amplitud de l'ona progressiva ( $A^2$ ), de la longitud d'ona ( $\lambda$ ), del mòdul del coeficient de reflexió ( $R$ ), de la seva fase ( $\varphi$ ) i del coeficient d'atenuació de la guia ( $\alpha$ ):

$$|E^2| = A^2 \cdot \left( e^{2\alpha \cdot z} + R^2 e^{-2\alpha \cdot z} + 2R \cdot \cos\left(\varphi - \frac{4\pi z}{\lambda}\right) \right).$$

En el cas de la guia utilitzada, el coeficient és molt petit i, treballant amb distàncies curtes, es pot suposar amb una bona aproximació que no hi ha pèrdues.

Suposant, doncs, que  $\alpha = 0$ , l'equació anterior es redueix a:

$$|E^2| = A^2 \cdot \left( 1 + R^2 + 2R \cdot \cos\left(\varphi - \frac{4\pi z}{\lambda}\right) \right)$$

## MESURA DE VELOCITATS PER EFECTE DOPPLER

L'efecte Doppler és un fenomen ondulatori, que s'experimenta quan emissor i/o receptor es troben en moviment, i en el qual una ona emesa amb una certa freqüència  $f$  és captada amb una altra freqüència  $f'$ , en general diferent de  $f$ .

Aquest efecte es percep fàcilment en ones sonores quan s'escolta el xiulet d'un tren en moviment. Pel que fa a les ones electromagnètiques, val a dir que presenten una diferència important respecte a les sonores, ja que aquestes es propaguen en un medi que es considera en repòs mentre que en les electromagnètiques aquest medi en repòs no existeix.

En el buit, la propagació es fa a una velocitat constant,  $c$ , que és la mateixa per a tots els sistemes de referència inercials. El tractament matemàtic del fenomen<sup>1</sup> indica que la freqüència  $f'$  captada pel receptor i la freqüència  $f$  emesa estan relacionades per:

$$f' = \frac{\sqrt{1+V/c}}{\sqrt{1-V/c}} \cdot f, \quad (1)$$

on  $V$  és la velocitat d'atansament entre emissor i receptor. En el cas que s'estigui allunyant, cal substituir  $V$  per  $(-V)$  en l'expressió (1).

### *Determinació de velocitats*

El procediment que s'utilitza a la pràctica per a la mesura de velocitats per efecte Doppler segueix l'esquema següent:

- Les ones electromagnètiques, de freqüència  $f$ , es dirigeixen cap a l'objecte en moviment.
- L'objecte en qüestió rep el senyal amb una freqüència  $f'$  donada per (1), i part del senyal rebut és reflectit i torna cap a l'emissor.
- L'antena emissora actua com a receptora, i capta el senyal reflectit, que presenta una freqüència  $f''$ , resultat d'aplicar l'expressió (1) a  $f'$ .
- El senyal de freqüència  $f''$  es combina amb el senyal original, de freqüència  $f$ , i dóna lloc a pulsacions,<sup>2</sup> la freqüència de les quals és

$$f_p = |f'' - f|. \quad (2)$$

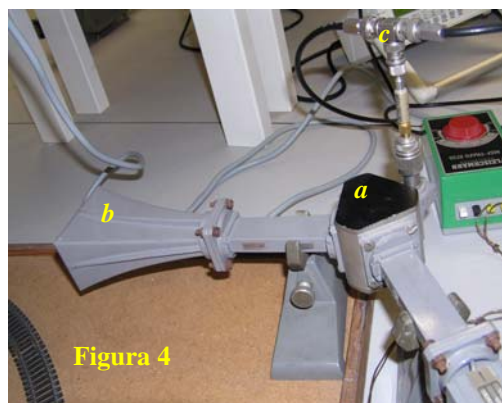
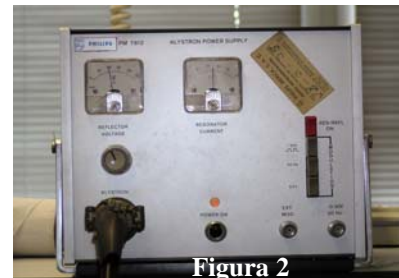
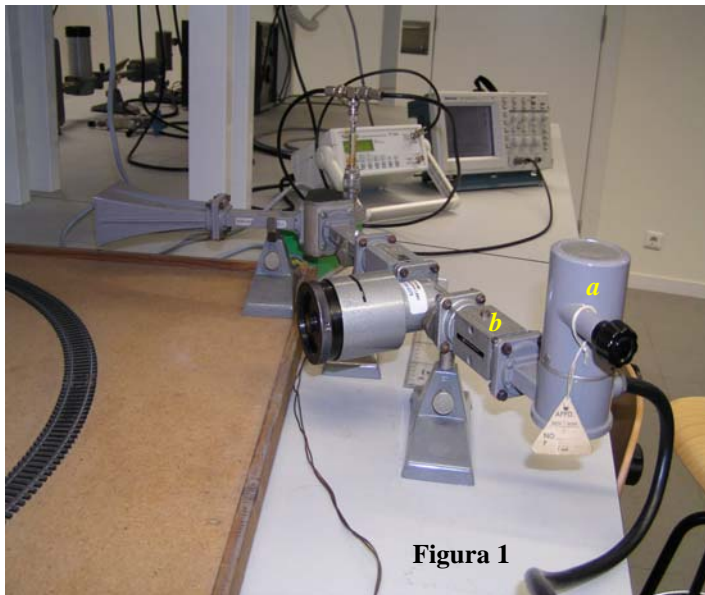
Així doncs, la velocitat del mòbil es pot determinar a partir de (1) i (2) i, si  $V \ll c$ , resulta:

$$V = \frac{f_p c}{2f}. \quad (3)$$

## 1. Dispositiu experimental

El dispositiu experimental consta bàsicament de:

- Generador de microones. En el nostre cas un clístró de reflex (*a* en la figura 1).
- Font d'alimentació del generador (fins a 250 V i 50 mA) (figura 2).
- Element aïllador de ferrita (*b* en la fig.1). Té la missió d'evitar que les microones retornin al generador.
- Cavitat ressonant per a la mesura de la freqüència (freqüencímetre) (fig.3).
- Circulador de tres entrades (*a* en la fig.4). La característica pròpia d'aquest dispositiu és que l'ona que s'aplica a una de les boques surt majoritàriament per la boca situada correlativament en el sentit de la fletxa, mentre que només una part petita va a parar a la tercera boca. El disseny simètric del circulador fa que això s'apliqui a qualsevol de les tres entrades.
- Antena (*b* en la fig.4). En aquest muntatge actua alhora com a emissora i receptora.
- Detector (*c* en la fig.4). La tensió contínua entre els borns és proporcional a l'amplitud de l'ona.
- Un oscil·loscopi digital que enregistra el senyal procedent del detector (fig.5).
- Un freqüencímetre de baixa freqüència (fig.5).
- Cronòmetre de mà (fig.6).
- Trenet elèctric (figures 6 i 7). Incorpora una pantalla conductora que n'augmenta la reflectivitat.





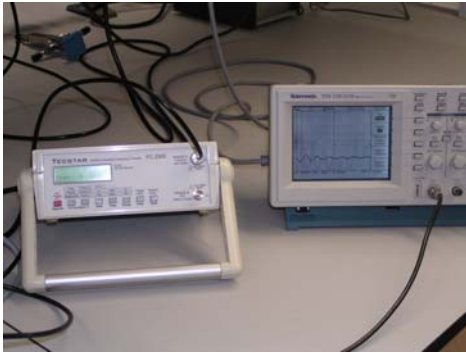


Figura 5

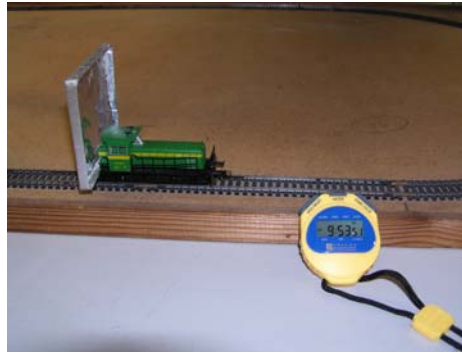


Figura 6

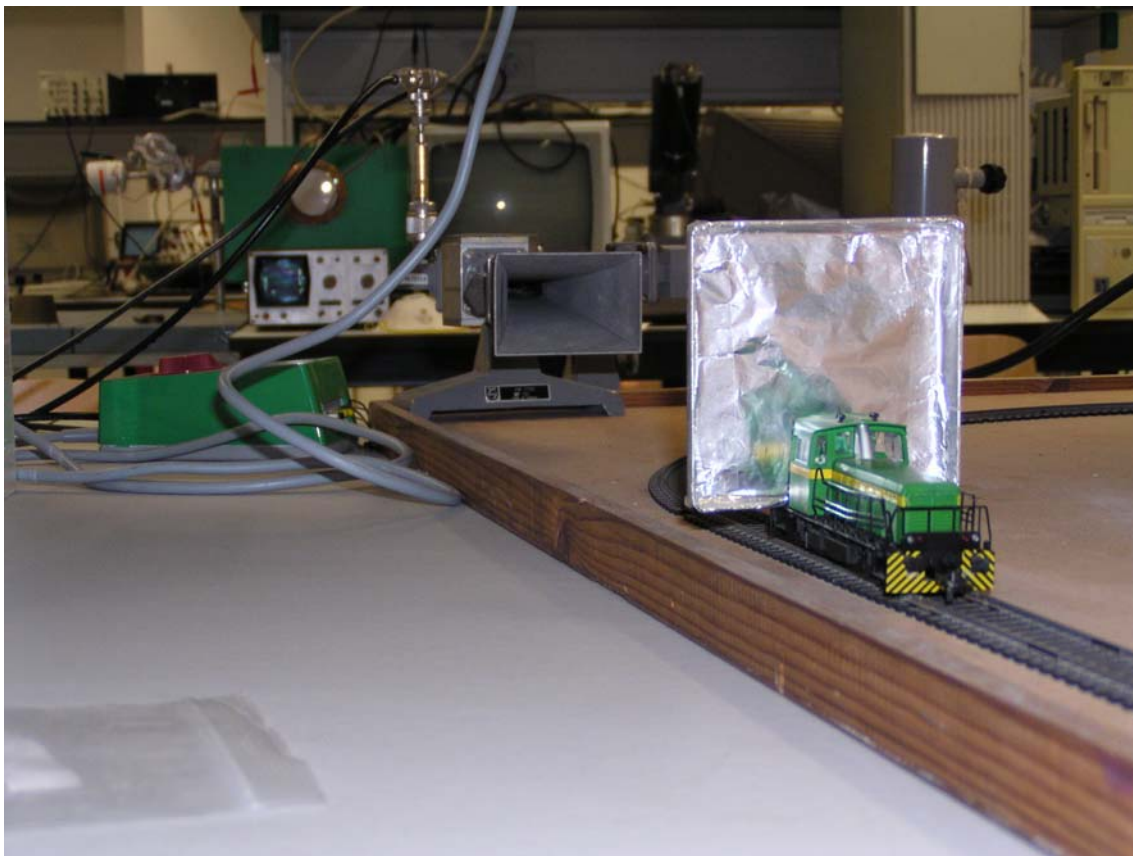


Figura 7

## 2. Procediment experimental

### *Ajust inicial*

- 2.1. Per tal de poder visualitzar el senyal provinent del detector cal que connectem l'oscil·loscopi i el freqüencímetre de baixa freqüència (figura 5).
- 2.2. Aleshores, connectem l'alimentació del generador de microones (fig. 2).
- 2.3. Assegureu-vos que el generador està oscil·lant i que, per tant, l'oscil·loscopi detecta un màxim de tensió contínua (en aquest cas uns 100 mV negatius). Si no fos el cas, podreu variar el potencial del reflector del clistró fins que això es

produeixi. Un cop el generador està oscil·lant, espereu uns 10 min per tal d'estabilitzar el generador d'ones.

### *Mesura de la freqüència de les microones*

- 2.4. La mesura de la freqüència s'efectua variant lentament la sintonia (cavitat ressonant) del freqüencímetre de microones (figura 3) mentre s'observa la pantalla de l'oscil·loscopi.
- 2.5. Quan coincideixen les freqüències del generador i la de la cavitat ressonant del freqüencímetre, aquest absorbeix part del senyal i en resulta una disminució del valor absolut de la tensió que detecta l'oscil·loscopi.
- 2.6. Cal anotar, aleshores, el valor,  $f$  (MHz), que assenyalava el freqüencímetre.

### *Observació de les pulsacions*

- 2.7. L'efecte Doppler es manifesta a través de les pulsacions de molt baixa freqüència captades pel detector, que apareixen en superposar dues ones de freqüències molt semblants. Si engegueu el trenet podreu observar que, quan aquest passa pel tram de via que està alineat amb l'antena, l'oscil·loscopi enregistra tot un seguit d'oscil·lacions. Es recomana que selecciona una base de temps de 10 a 25 ms per tal d'obtenir una bona imatge en la pantalla (figura 8).

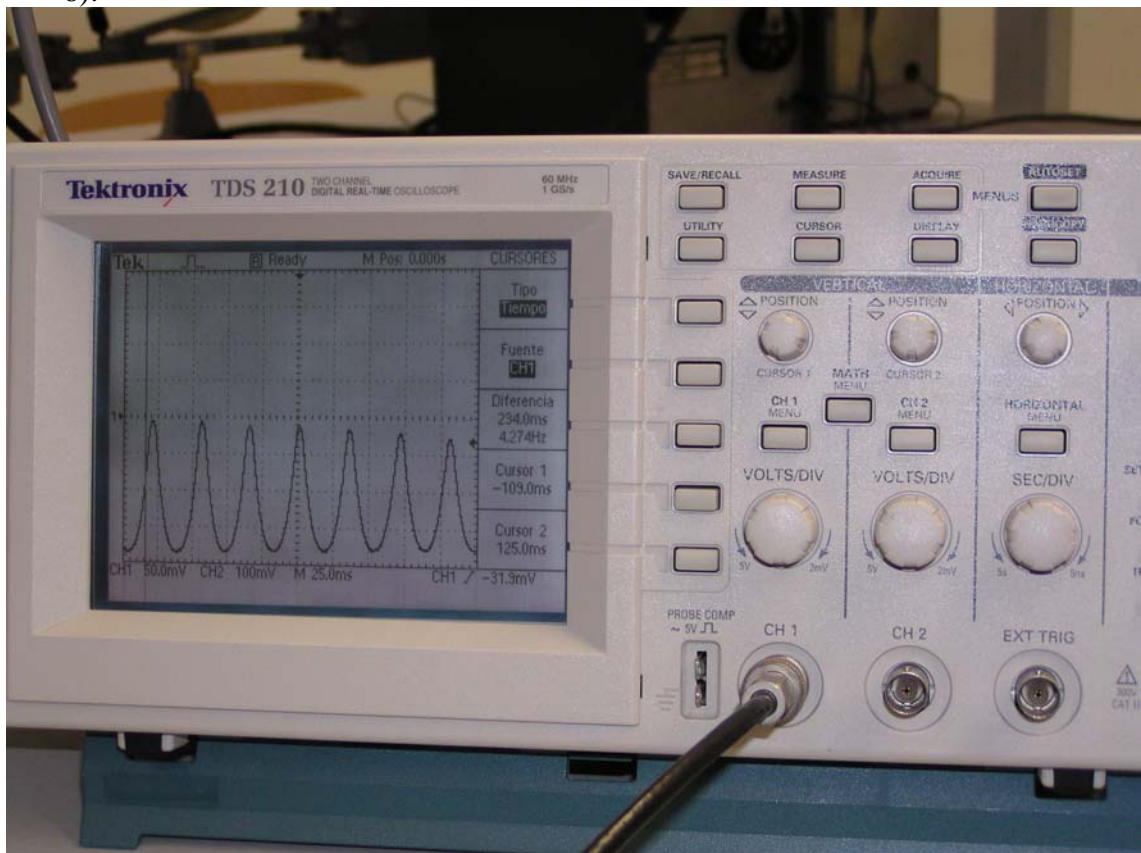


Figura 8

### *Mesura de $f_p$*

- 2.8. Per tal d'efectuar mesures cal fixar una de les pantalles de l'oscil·loscopi. Es recomana utilitzar els cursors per a determinar la distància temporal entre dos màxims, que és justament l'invers de  $f_p$ .
- 2.9. Podreu comprovar la mesura de la freqüència en el freqüencímetre (figura 5).
- 2.10. Tanmateix, podreu optimitzar la mesura si anoteu una taula de temps,  $t$ , en funció de l'ordre,  $n$ , del màxim, fent que  $n = 0$  i que  $t = 0$  correspongui al primer màxim de l'esquerra. La representació gràfica  $n(t)$  ha de resultar lineal si la velocitat del mòbil és uniforme, amb un pendent igual a  $f_p$ .

### *Determinació de la velocitat, V*

- 2.11. A partir de  $f_p$  podreu determinar la velocitat del tren si utilitzeu l'expressió (3).
- 2.12. Podreu determinar també la velocitat del tren amb el cronòmetre (figura 6), si mesureu el temps que tarda en recórrer els 87,5 cm que separen dues marques dibuixades arran de via.
- 2.13. Finalment, podreu contrastar els resultats obtinguts amb els dos mètodes.

## **3. Elaboració del informe**

- Presenteu un resum (½ pàgina) de la totalitat de la pràctica (fonament, dispositiu i procediment experimental, i resultats).
  - Deduïu l'expressió (3).
  - Presenteu una gràfica  $n(t)$  i la seva corresponent regressió lineal.
- Presenteu una taula amb diverses velocitats del tren, cadascuna mesurada amb els dos procediments descrits en l'apartat *Determinació de la velocitat* de la secció 2.
- Feu una breu valoració dels dos procediments emprats en la determinació de la velocitat.
  - Feu un dibuix aproximat del que s'observaria en la pantalla de l'oscil·loscopi si la velocitat del trenet no fos uniforme, és a dir, si durant la mesura de la velocitat estigués experimentant una acceleració apreciable.

## **4 Referències bibliogràfiques**

- <sup>1</sup> TIPLER, Paul A., *Física*, Barcelona, 1994, vol. 2, pàg. 1118.
- <sup>2</sup> TIPLER, Paul A., *Física*, Barcelona, 1994, vol. 1, pàg. 452.

## GUIA DIELÈCTRICA. VELOCITAT DE LA LLUM

### 1. Introducció

Una guia dielèctrica és un dels sistemes que permeten la propagació guiada d'una ona electromagnètica pel seu interior. En general les guies dielèctriques estan constituïdes per un o diversos medis dielèctrics de molt baixa absorció en forma de làmines planes o d'estructures cilíndriques indefinides al llarg de l'eix  $z$ . A diferència de les guies d'ona, les guies dielèctriques no necessiten la presència d'un medi conductor per confinar l'ona. En una primera aproximació podem dir que el confinament és degut a la tendència de l'ona a propagar-se pel medi amb constant dielèctrica més elevada. En el cas de la llum, aquest confinament en el medi d'índex de refracció més elevat és conseqüència de la reflexió total en la superfície de separació dels dos medis (quan l'angle d'incidència és més petit que l'angle crític).

L'aplicació de les condicions de contorn a les solucions de l'equació d'ones ens porta a l'existència de diversos modes de propagació associats a certs valors de les constants de propagació transversals  $\alpha$  i  $\beta$ , corresponents als medis 1 —interior— i 2 —exterior—, respectivament.

La constant de propagació  $k_z$  ( $k_z = \frac{\omega}{v}$ ) d'una ona monocromàtica de freqüència angular  $\omega$ , que es propaga per la guia a velocitat  $v$ , en el mode de propagació corresponent, verifica les relacions:

$$k_z^2 = \omega^2 \varepsilon_1 \mu_1 - \alpha^2 = \omega^2 \varepsilon_2 \mu_2 + \beta^2 \quad (1)$$

on  $\alpha$  i  $\beta$  presenten valors diferents per a cada mode de propagació. De (1) podem escriure:

$$\frac{\beta}{\alpha} = \sqrt{\frac{\omega^2 (\varepsilon_1 \mu_1 - \varepsilon_2 \mu_2)}{\alpha^2} - 1} \quad (2)$$

Si apliquem les condicions de contorn a les constants  $\alpha$  i  $\beta$ , en el cas d'una guia dielèctrica circular de radi  $a$  gran ( $a > 100 \lambda$ ), trobem que per a cada mode de propagació es verifica l'expressió:

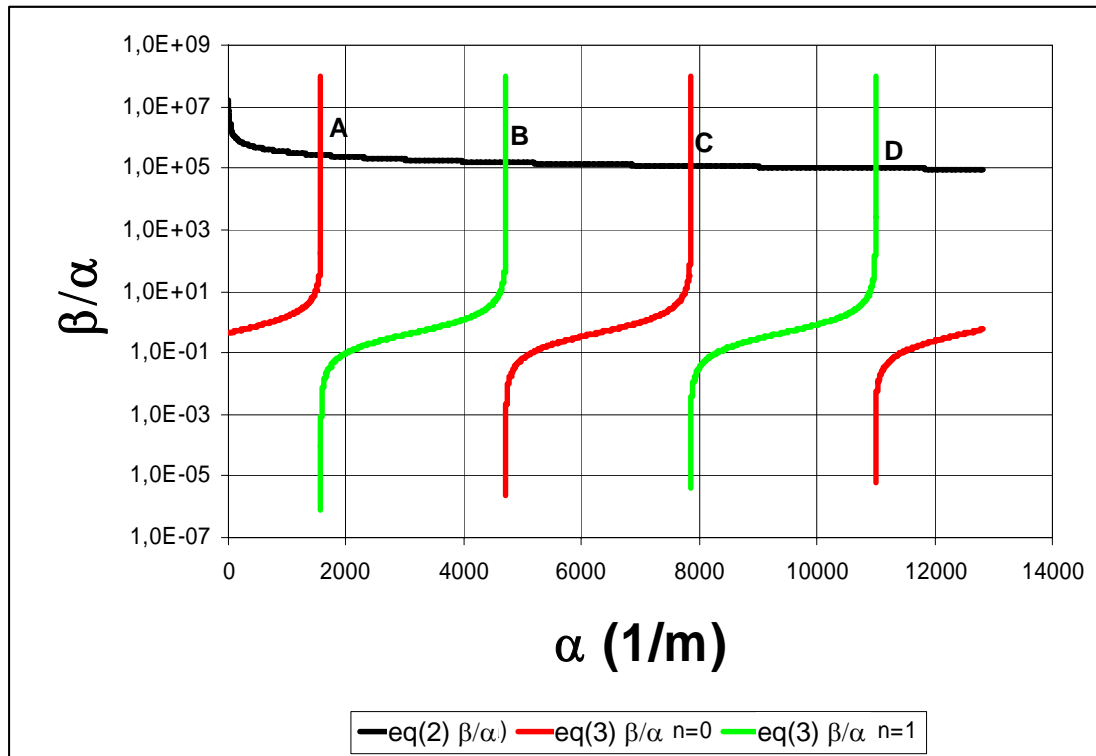
$$\frac{\beta}{\alpha} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cot\left(\alpha a - n \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \quad (3)$$

on  $n$  és un nombre enter ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ).

En la figura 1 s'han representat les expressions (2) i (3) en el pla  $(\beta/\alpha, \alpha)$  pel cas particular de la guia de plàstic de radi  $a = 0,5 \text{ mm}$  immersa en aire, tal com la que utilitzarem en l'experiment, i del valor de  $\varepsilon_2$ , i per a diferents valors de  $n$  (0, 1; els valors de  $n$  superiors se superposen als anteriors, tal com es pot veure en l'equació (3)).

Els valors de  $\alpha$  i  $\beta$  corresponents a cada mode de propagació s'obtenen gràficament de la intersecció entre les corbes (3) i la corba quasivertical (2) (punts A, B, C... en la fig.1).

Per a angles d'incidència petits, els primers modes són els més importants energèticament. Això fa que els corresponents valors de  $\alpha^2$  siguin negligibles davant de  $\omega^2 \varepsilon_1 \mu_1$  en la relació (1) i, per tant, que podem considerar la velocitat de propagació com si fos la del medi dielèctric lliure.



**Figura 1**

## 2. Aplicació pràctica de les fibres òptiques

Per tal d'evitar els efectes del soroll d'origen elèctric en els cables de comunicacions, s'utilitzen fibres òptiques de plàstic per a la transmissió de senyals digitals entre ordinadors i perifèrics de curt abast. Els efectes de la dispersió no seran importants perquè les distàncies utilitzades són de l'ordre d'algunes desenes de metres i perquè la llum, produïda generalment per un díode emissor, és suficientment monocromàtica.

## 3. Muntatge experimental

El material disponible és el següent:

- *generador de polsos elèctrics* (figura 2)
- *díode emissor i díode receptor* (figura 3)
- *guia dielèctrica* (figura 4)
- *oscil·loscopi* (figura 5)

El primer element consisteix en un *generador de polsos elèctrics* de molt curta durada, el qual es connecta a un *díode emissor*, format per un díode electroluminescent (LED), que envia un pols lluminós a l'interior de la *guia dielèctrica*. La sortida de la guia es connecta a un *díode receptor*, constituït per un fotodíode (fig.3). L'experiment es realitza en diverses guies dielèctriques de plàstic de diferents longituds (0,201 m, 45 m i altres de longituds desconegudes).

Per a l'observació dels polsos utilitzarem l'*oscil·loscopi* sincronitzat amb el generador de polsos. També disposem d'una càrrega adaptada ( $75\ \Omega$ ) en paral·lel a l'entrada de l'oscil·loscopi (figura 5). Aquesta càrrega s'utilitza per a evitar reflexions a l'entrada de l'oscil·loscopi (impedància d'entrada  $\sim 1\text{M}\Omega$ ).



Figura 2

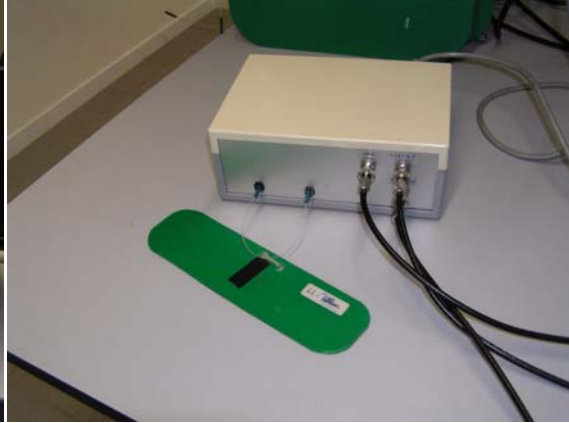


Figura 3



Figura 4

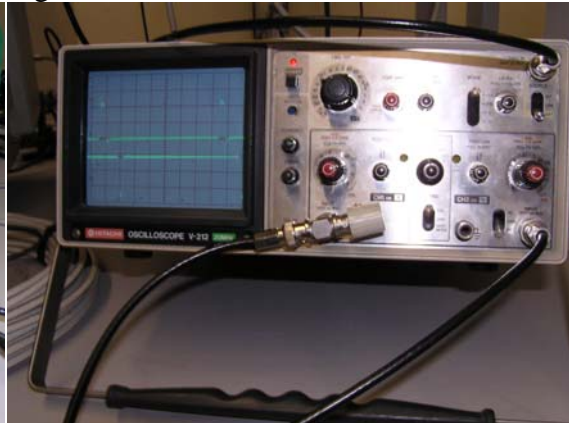


Figura 5

La sincronització de l'oscil·loscopi amb el generador de polsos es fa connectant la sortida *Trigger output* del generador al segon canal de l'oscil·loscopi, i fent que aquest l'utilitzi com a disparador (*trigger*). Feta d'aquesta manera, la sincronització no queda modificada tot i que es modifiquin l'amplitud o la durada dels impulsos de sortida *Output*+

En la figura 6 mostrem una representació del muntatge experimental complet.



#### 4. Realització pràctica

- 4.1. Si obriu la caixa que conté els díodes emissor i receptor de polsos podreu identificar els elements (díodes emissor i receptor, font d'alimentació de 5 V) i les connexions d'entrada i de sortida.
- 4.2. Cal que connecteu l'oscil·loscopi i el generador de polsos a la caixa dels díodes, i les altres connexions necessàries, tal com es mostra en la figura 6.
- 4.3. Per tal de determinar els retard introduït pel propi sistema electrònic, *retard instrumental*, caldrà que primer connecteu la guia dielèctrica més curta (~12 cm).
- 4.4. Podreu observar a la pantalla de l'oscil·loscopi el pols de la sortida del díode receptor (*Output 2*) i el pols elèctric que polaritza el díode emissor (*Output 1*).
- 4.5. Mitjançant els cursors o amb la graella graduada de la pantalla podreu determinar la diferència de temps entre els dos polsos. Donat que la guia dielèctrica és molt curta i que no explica un retard tan gran, on creieu que es produeix aquest retard instrumental?
- 4.6. Ara, podreu mesurar el retard entre els polsos d'entrada i sortida de la guia per a les altres tres guies dielèctriques més llargues. Tingueu present que part del retard observat és degut al dispositiu experimental i que ja era present quan la fibra era molt curta (vegeu l'apartat anterior). El retard degut solament a la propagació en la fibra serà el mesurat amb l'oscil·loscopi menys el retard instrumental obtingut en l'apartat 4.5.
- 4.7. A partir del retard mesurat (i corregit apropiadament) i la longitud de la guia coneguda (45 m) podreu calcular la velocitat de propagació  $v$  en la guia. També podreu determinar la constant dielèctrica  $\epsilon_r$  de la guia.
- 4.8. Les longituds de les altres guies les podreu determinar a partir de la velocitat de propagació i del temps de retard mesurat per cada una d'elles.

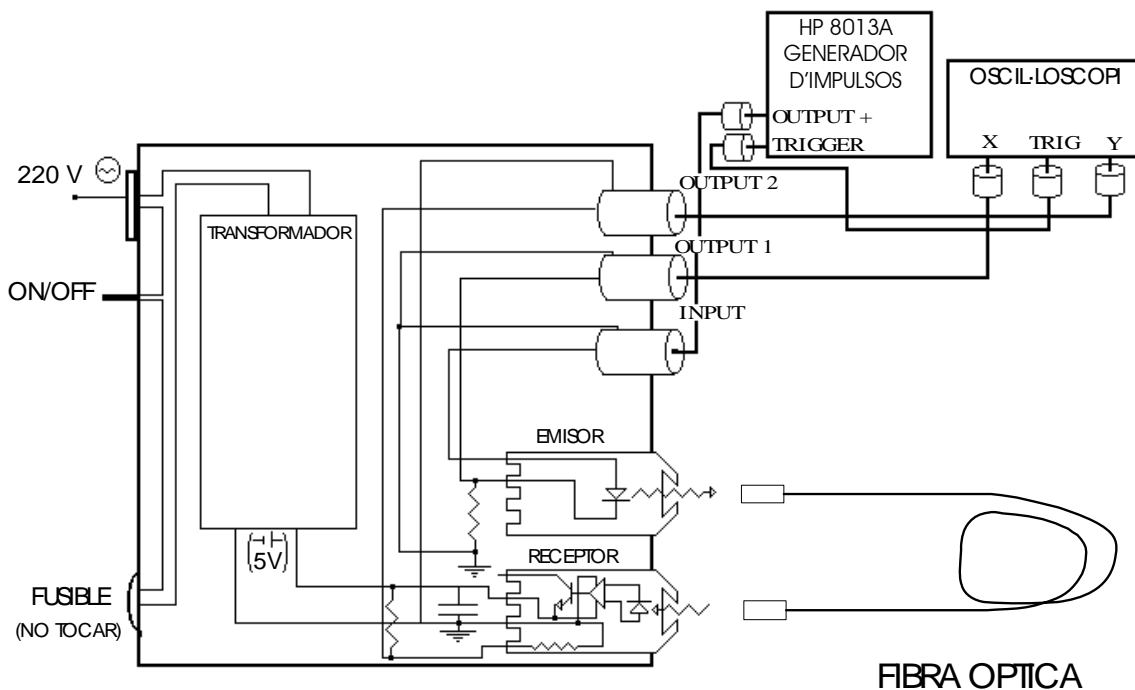


Figura 6