Radiación y Propagación (2B)

Prácticas Laboratorio

Enunciados y problemas del estudio previo

Julio 2013

Ignasi Corbella Sanahuja
Xavier Fàbregas Cánovas
Francesc Torres Torres
Merce Vall-llossera Ferran

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN

PRÁCTICA I:
MEDIDA DE PULSOS EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

PRÀCTICA II.
RÈGIM PERMANENT SINUSOIDAL EN LA LÍNIA DE TRANSMISSIÓ

PRÁCTICA III.
POLARIZACIÓN Y REFLEXIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

PRÁCTICA IV.
MEDIDA DE ANTENAS

PRÁCTICA V.
MEDIDAS EN BANDA X CON GUÍA DE ONDAS RANURADA

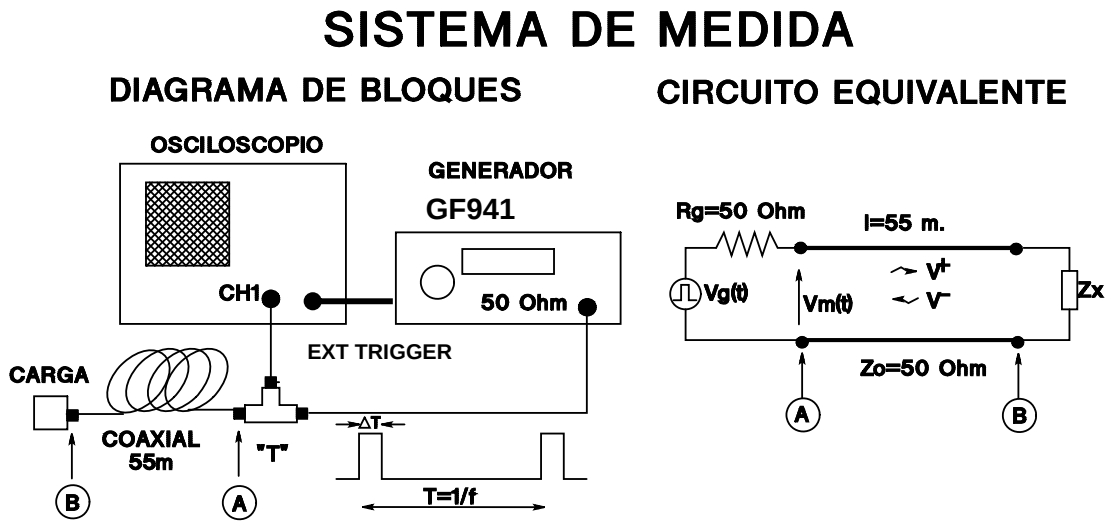
RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN. PRÁCTICA I
MEDIDA DE PULSOS EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

1. OBJETIVOS

La medida de pulsos en una línea de transmisión se utiliza para la caracterización de las propias líneas de transmisión, así como para el análisis de discontinuidades alejadas o difícilmente accesibles. En esta práctica se pretende introducir al alumno en esta técnica, la cual permite además afianzar los conocimientos sobre propagación de ondas de tensión estudiados en clase. Las medidas realizadas muestran las características fundamentales de propagación y reflexión de ondas en una línea de transmisión. También permiten determinar sus parámetros fundamentales, como la velocidad de propagación, la impedancia característica y la atenuación. Es muy importante que el alumno, antes de asistir al laboratorio, resuelva los ejercicios propuestos como estudio previo, cuyo enunciado se encuentra más adelante en este documento.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA

En la figura se observa el diagrama de bloques del montaje de laboratorio, así como su circuito equivalente. Consta de un generador de impulsos de 50Ω de impedancia interna conectado a un cable coaxial de 55 m. de longitud a través de una "T" coaxial. Ésta permite conectar el osciloscopio de alta impedancia (1 MΩ) para medir la tensión a la entrada de la línea sin perturbar las señales transmitidas y reflejadas. Siempre que el retardo introducido por el cable sea mayor que la duración del pulso, el primer impulso que aparece en pantalla corresponde al enviado por el generador, y el segundo a su reflexión. Es necesario enviar un tren de pulsos para mantener una imagen estable en el osciloscopio. Si se reduce el tiempo de barrido horizontal del osciloscopio lo suficiente, en pantalla únicamente aparecerán el pulso transmitido y su reflexión.



OSCILOSCOPIO

Time/Div: **50MS/s // 500ns/div**
Volts/Div: **200 mV**
TRIGGER Menu→ Typ: Flanco
Fuente: **Externa**

GENERADOR DE PULSOS

FRECUENCIA: **0.550 MHz**
FUNCION: **Rectangular**
SYM: **ON**. VARIABLE: **Máx sentido reloj**
AMPLITUD/OFFSET: **Ver [Medida 1]**
ATT: **20dB**

En la misma figura se detalla la posición de las funciones del osciloscopio y el generador de impulsos que se recomienda a fin de poder iniciar la práctica rápidamente. En las cuestiones sucesivas los alumnos operarán ambos instrumentos para obtener la medida del modo más conveniente.

3. MEDIDAS CUALITATIVAS

En este apartado se pretende que el alumno se familiarice con la instrumentación del puesto de trabajo, a la vez que adquiera una visión de los principios de medida y de los objetivos de la práctica. No se han de entregar resultados numéricos pero es importante dedicarle su tiempo.

[Medida 1] En el montaje de la figura desconecte el cable coaxial de 55 m de la "T" (punto A en circuito abierto). Así se está midiendo la tensión del generador en circuito abierto. En la pantalla debe aparecer el tren de pulsos.

-Ajuste los mandos de offset y amplitud del generador para obtener pulsos cuyo nivel mínimo sea de 0 V en el centro de la pantalla y el máximo en la parte superior de la pantalla.

-Conecte la carga de 50Ω a la "T" (punto A). Se comprueba que la impedancia interna del generador es de aproximadamente 50Ω pues la amplitud del pulso se reduce a la mitad.

-Conecte el cortocircuito a la "T" (punto A). La tensión medida ahora debe ser de 0 V (los pulsos no aparecen en pantalla), pues se está cortocircuitando el generador.

[Medida 2] Se pretende ver ahora el efecto del retardo.

- Conecte el cable coaxial de 55 m a la "T" dejando su otro extremo –punto B- en circuito abierto. El pulso transmitido se halla en la misma posición que en el caso anterior, pero su amplitud se ha reducido aproximadamente a la mitad. Se comprueba, pues, que el generador está cargado por la impedancia característica de la línea de transmisión y no por el circuito abierto de su extremo B. Además, aparece un pulso reflejado. Está algo distorsionado y con menor amplitud debido a las pérdidas de la línea, pero su amplitud es grande y positiva, lo que se corresponde con el circuito abierto del otro extremo. Dado que el generador está bastante bien adaptado a la línea no se observan nuevas reflexiones.

-Repita el apartado anterior cargando el extremo del coaxial con el cortocircuito, la carga de 50Ω y la carga de 75Ω. Observe como el pulso transmitido no cambia ya que solo depende de la impedancia del coaxial. Sin embargo el pulso reflejado varía acorde con la carga utilizada. Tómese un tiempo para interpretar los resultados y discutirlos con su compañero de equipo.

4. CARACTERIZACIÓN DE LÍNEAS Y DISCONTINUIDADES

Con estas medidas el alumno evaluará las ventajas y limitaciones de la reflectometría en la caracterización de líneas de transmisión y discontinuidades. Se suministran las especificaciones típicas del cable tipo coaxial utilizado, con las cuales el alumno podrá comparar las medidas realizadas. **Los resultados numéricos obtenidos deben consignarse en la hoja de respuestas facilitada como separata**.

[Medida 4] Caracterización del dieléctrico de la línea de transmisión. Con el coaxial en circuito abierto mida el retardo introducido por la línea y a partir de este, calcule la velocidad de propagación y la permitividad. Utilice los cursores del osciloscopio para obtener, por ejemplo, el

retardo entre el inicio de los flancos de subida de los pulsos transmitido y reflejado. Ajuste los mandos del osciloscopio para obtener buena precisión en la medida.

[Medida 5] Medida de la impedancia característica. Ésta se puede determinar de forma aproximada midiendo la caída de tensión que produce la conexión del cable al generador.

- - El procedimiento es más preciso si la impedancia de generador se mide previamente. Para ello conecte directamente en el punto A la impedancia de 50Ω y mida la tensión que cae en ella. Utilice las expresiones del divisor de tensión para obtener la impedancia de generador y utilice este resultado en el cálculo anterior para obtener la impedancia característica del cable.

-Con ayuda de los cursores, mida la tensión del generador en circuito abierto y a continuación la amplitud del pulso transmitido, tal como hizo cualitativamente en [Medida 1]. Para disminuir el error debe aumentar la duración del impulso de forma que se minimice el efecto del tiempo de subida. Utilice los dos cursores y use la medida ΔV para evitar errores de offset.Conociendo la impedancia interna del generador, la impedancia característica del cable se calcula como un divisor de tensión resistivo.

[Medida 6] Medida de una carga resistiva incógnita. Conocida la Z_0 del coaxial, puede determinarse el valor resistivo de una carga a partir del coeficiente de reflexión que produce. En este caso el coeficiente de reflexión es real ya que la carga es resistiva. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que las pérdidas de la línea coaxial introducen un error si no se corrigen. Para ello se considera que el pulso que incide sobre la carga R_x es el mismo que se refleja en un circuito abierto ya que la atenuación afecta a las dos medidas por igual.

- Conecte la carga incógnita R_x en el extremo del coaxial y mida la amplitud del pulso reflejado. Para minimizar el efecto del tiempo de subida del pulso, aumente su duración al máximo, sin que se produzca superposición de la señal transmitida y reflejada.

- Deje ahora el coaxial en circuito abierto y mida la amplitud del pulso reflejado.

- Calcule el valor de R_x utilizando el valor de Z_0 hallado anteriormente.

[Medida 7] Medida de la atenuación del cable. Método 1. Si se supone que el circuito abierto es ideal, la diferencia de amplitudes entre el pulso reflejado y el transmitido se debe a la atenuación que sufre la señal al viajar un camino 2ℓ=110 m. En este caso, la atenuación puede calcularse fácilmente, pues la amplitud del pulso reflejado es

$$V_{ca}^{-} = V_{ca}^{+} e^{-\alpha(2l)}$$

La atenuación α de la señal es, aproximadamente, la atenuación a la frecuencia del armónico principal del tren de pulsos, la cual se puede leer en el display del generador o en el osciloscopio.

-Con el coaxial en circuito abierto mida la amplitud de los dos pulsos y calcule la atenuación de 100 m de cable.

[Medida 8] Medida de la atenuación del cable. Método 2. La atenuación del pulso puede medirse directamente midiendo su amplitud a la entrada y la salida del cable.

-Con la carga de 50 Ω en el punto B, mida la amplitud del pulso transmitido $V^{+}(0)$ a la entrada del cable z=0. Punto A.

-Ahora conecte la carga de 50 Ω en el punto A y la salida del generador en el punto B. Así, el osciloscopio está midiendo el pulso en el extremo del cable $V^{+}(\ell)$ -nótese que el cable es simétrico-

-La atenuación del cable se puede medir obtener directamente e la expresión $V^+(\ell) = V^+(0)e^{-\alpha\ell}$. Sin embargo, como la impedancia del cable no es exactamente de 50 Ω, para ser más precisos hay que tener en cuenta que en la segunda medida se esta midiendo la tensión absoluta $V(\ell) = V^+(\ell)(1+\rho_L)$, obteniéndose el valor de la onda progresiva como

$V^+(\ell) = \dfrac{V(\ell)}{1+\rho_L}$ donde $\rho_L = \dfrac{50 - Z_0}{50 + Z_0}$ y Z_0 la impedancia del cable coaxial medida en apartados anteriores

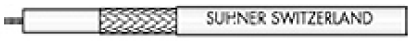
-Obtenga el valor de la atenuación por este segundo método y compare el resultado con el caso anterior.

HUBER+SUHNER® DATA SHEET
Coaxial Cable: RG_58_C/U

Rev.: I

Description

Single screened coaxial cable



Technical Data

Construction

	Material	Detail	Diameter	
Centre conductor	Copper, Tin plated	Strand-19	0.94	mm
Dielectric	PE		2.95	mm
Outer conductor	Copper, Tin plated	Braid, 96 %	3.6	mm
Jacket	PVC II (non migration)	RAL 9005 - bk	4.95	mm +/- 0.15
Print	HUBER+SUHNER RG 58 C/U 50 Ohm (PA no.)			

Electrical Data

Impedance	50	Ω +/- 2
Max. operating frequency	1	GHz
Capacitance	101	pF/m
Velocity of signal propagation	66	%
Signal delay	5.03	ns/m
Insulation resistance	≥1 x	10^8 MΩm
Min. screening effectiveness	>38	dB (up to 1 GHz)
Max. operating voltage	2.5	kV_{rms} (at sea level)
Test voltage	5	kV_{rms} (50 Hz/1 min)

Mechanical Data

Weight		3.7	kg/100 m
Min. bending radius	static	25	mm
	dynamic	74	mm

Environmental Data

Temperature range	-25 °C... + 85 °C
Installation temperature	-20 °C... + 60 °C
2002/95/EC (RoHS)	compliant

Ordering Information

Order as RG_58_C/U

Suitable Connectors

Cable group: crimped (U7), clamped (U7), soldered —

Coefficients: **Matrix** **Attenuation** [formula: (a*f^0.5 + b*f)] **and Power CW** [formula: (p*/ f^0.5)]

a=	0.4617	b=	0.2295	$f_{max.}$=	1	$p_{at\ 1GHz}$ =	105
	Frequency		**Nom. attenuation**		**Nom. attenuation**		**Max. CW power**
	(GHz)		**(dB / m)**		**(dB / ft)**		**(watt)**
			sea level 25° C ambient temperature		sea level 25° C ambient temperature		sea level 40° C ambient temperature
	0.05		0.11		0.034		470
	0.10		0.17		0.052		332
	0.15		0.21		0.064		271
	0.20		0.25		0.076		235
	0.25		0.29		0.088		210
	0.30		0.32		0.098		192
	0.35		0.35		0.107		177
	0.40		0.38		0.116		166

ESTUDIO PREVIO

Si se inyecta un pulso en un extremo de una línea de transmisión, éste es devuelto con un cierto retardo y forma que dependen de la carga situada en el extremo de la línea. El retardo permite determinar la velocidad de propagación de la señal en el cable, o bien determinar la distancia a la carga si ésta es conocida. La forma de la onda reflejada permite estudiar el carácter de la carga: cortocircuito, circuito abierto, carga resistiva, carga reactiva.

Un reflectómetro es un instrumento profesional que permite la caracterización de discontinuidades en la línea de transmisión basándose en el principio anteriormente expuesto. También permite la medida de los propios parámetros de la línea: impedancia característica y la velocidad de propagación. En esta práctica se ha dispuesto un reflectómetro rudimentario, que sin embargo permite ilustrar perfectamente las posibilidades y limitaciones de este tipo de medidas. Los problemas que se proponen a continuación constituyen una primera aproximación a las medidas que se realizarán en la práctica. El esquema del reflectómetro utilizado se muestra en la primera página del enunciado de la práctica.

PROBLEMAS

1) En la práctica se utiliza como línea de transmisión el cable coaxial RG-58 C/U cuyos datos se suministran en el anexo. Identifique sus parámetros primarios y secundarios: Z_o [Ω], v_p [m/s], C [pF/m] y L [μH/m]. Determine también la permitividad relativa del dieléctrico ε_r. Por último, calcule la atenuación en dB/100m a la frecuencia de 0.55 MHz utilizando la fórmula que facilita el fabricante.

2) Calcule qué longitud de línea coaxial es necesaria para introducir un retardo de 250 ns en la propagación de un pulso entre sus extremos. Si dicha línea se carga ahora con un circuito abierto, con qué retardo aparecerá el pulso anterior otra vez a la entrada de la línea.

3) En el generador utilizado en la práctica la duración mínima de los pulsos es de 280 ns y la frecuencia de repetición entre pulsos de 0.55 MHz. Determine cuál es la longitud máxima y mínima de la línea coaxial para que no se produzca superposición de los pulsos transmitidos y reflejados en la entrada de la línea. ¿Es razonable la elección de 55 m?

4) En el sistema de medida de la práctica (Zo=50Ω) la línea de 55 m se termina con una carga resistiva de 75 Ω. El generador, que tiene un tensión en circuito abierto de 700 mV, inyecta a la entrada de la línea un pulso de 280 ns de duración. Calcule el retardo y la amplitud con que aparecerá dicho pulso otra vez a la entrada de la línea. Primero realice el cálculo sin tener en cuenta las pérdidas. Luego tenga en cuenta la atenuación del cable calculada en el primer apartado.

5) Repita los cálculos del apartado anterior para el caso en que se desconecte la carga de 75 Ω, es decir que se deje el cable en circuito abierto. Indique como se podría determinar la resistencia de carga (caso de ser desconocida) a partir de la relación entre la amplitud del pulso calculada en el apartado anterior y la calculada en éste. Considere ambos casos: sin pérdidas y con pérdidas. En este último caso, ¿es preciso conocer la atenuación de la línea?.

6) A partir de la tensión calculada en el apartado anterior y del pulso de la onda positiva, calcule el coeficiente de reflexión que produce, en el punto de conexión del generador, la línea con pérdidas acabada en circuito abierto. Deduzca, a partir de este dato la constante de atenuación de la línea.

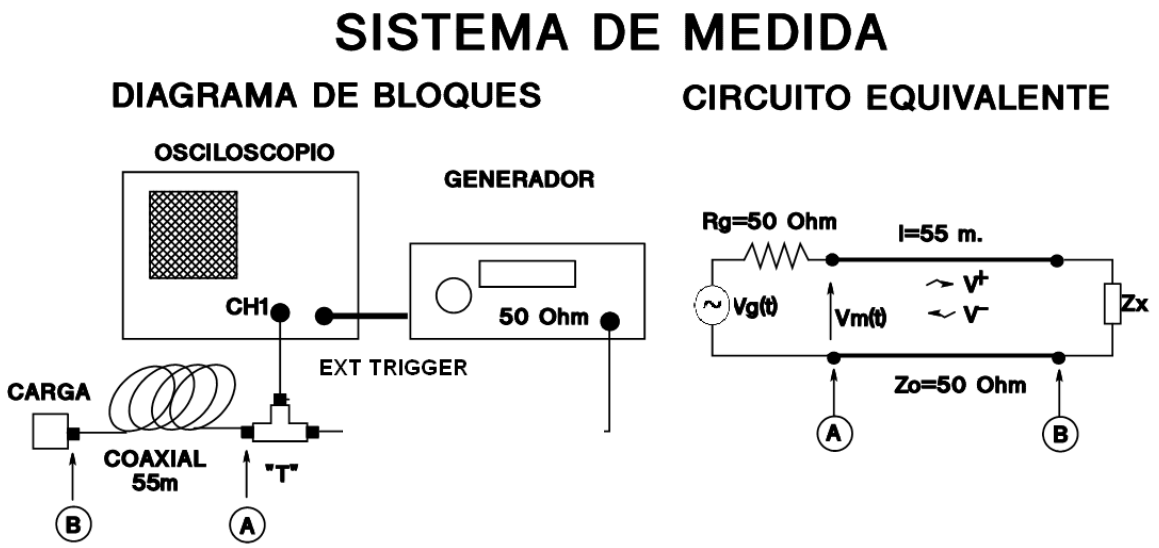
RADIACIÓ I PROPAGACIÓ. PRÀCTICA II
RÈGIM PERMANENT SINUSOIDAL EN LA LÍNIA DE TRANSMISSIÓ

OBJECTIUS

En aquesta pràctica es posa de manifest l'efecte del retard quan l'excitació de la línia és de tipus sinusoïdal. En aquest cas, la longitud de la línia de transmissió s'ha de tenir en compte sempre que sigui de l'ordre de la longitud d'ona del senyal d'excitació. En un sistema que contingui trams de línia de transmissió, el seu efecte és tant més important com més gran sigui la freqüència de treball. Aquesta pràctica pretén consolidar aquests conceptes a partir de mesures simples fetes amb un generador sinusoïdal connectat a un cable coaxial amb diverses terminacions.

DESCRIPCIÓ DEL SISTEMA DE MESURA

A la figura adjunta es mostra el diagrama de blocs del muntatge de laboratori així com el seu circuit equivalent. Consta d'un generador de senyal de freqüència variable fins a 2 MHz, de 50 Ω d'impedància interna, que es connecta a un cable coaxial de 55 m de longitud a través d'una "T" coaxial. Aquesta permet connectar un oscil·loscopi d'alta impedància (1MΩ) per mesurar la tensió a l'entrada de la línia sense pertorbar els senyals. Per tal de tenir una referència de fase absoluta, la base de temps de l'oscil·loscopi es controla amb un senyal extern provinent del mateix generador (*external trigger*). A la mateixa figura es detalla la posició recomanada per a les funcions de l'oscil·loscopi i el generador que permeten iniciar la pràctica ràpidament.



OSCIL·LOSCOPI

Time/Div: **250MS/s // 100ns**
Volts/Div: **200 mV**
TRIGGER Menu→ Tipo: **Flanco**
Fuente: **Externa**

GENERADOR

FREQÜÈNCIA: **1.9 MHz**
FUNCIÓ: **Sinusoïdal**
SYM: **OFF**. ATT: **20dB**
OFFSET: **OFF**

MESURES QUALITATIVES

Les primeres mesures ajuden l'alumne a familiaritzar-se amb la instrumentació del lloc de treball i al mateix temps el permeten adquirir una visió global dels principis de mesura i els objectius de la pràctica. En aquesta primera part no cal entregar resultats numèrics però és important que l'alumne li dediqui el seu temps.

a) Al muntatge de la figura, desconnecteu el cable coaxial de 55m de la "T" (punt A en circuit obert). Esteu mesurant la tensió en circuit obert del generador. Ajusteu els comandaments de l'oscil·loscopi i del generador per tal de visualitzar uns pocs cicles complets amb una amplitud pic a pic que ocupi aproximadament tota la pantalla.

b) Connecteu ara la càrrega de 50Ω directament a la sortida del generador –Punt A-. La tensió mesurada baixa aproximadament a la meitat. Es comprova així que la impedància interna del generador és de 50 Ω.

c) Substituïu la càrrega de 50Ω per un curtcircuit. La tensió mesurada ara és 0 V (el senyal desapareix de la pantalla) ja que esteu curtcircuitant el generador.

d) Repetiu ara l'apartat b) però intercalant el cable de 55 m entre el generador i la càrrega. És a dir, connecteu el cable al punt A i una càrrega de 50Ω al punt B. Comprovareu que la tensió mesurada és pràcticament la mateixa que en l'apartat b). El fet d'intercalar el cable no te doncs cap efecte i això és degut a que la seva impedància característica és també de 50 Ω, aproximadament.

e) Substituïu ara la càrrega del punt B per un curtcircuit. Contràriament al cas anterior, ara la mesura és diferent de la de l'apartat c). Efectivament, ara es mesura una tensió sinusoïdal amb una amplitud no negligible. Desconnecteu el curtcircuit, tot deixant el punt B en circuit obert. L'amplitud del senyal ha canviat, però no és la mateixa que en el punt a), en què el circuit obert estava directament a la sortida del generador. La línia de transmissió, doncs, te ara un efecte important.

f) Modifiqueu la freqüència del generador. Veureu que no només varia el període sinó també l'amplitud, tot i que el generador proporciona una amplitud independent de la freqüència, com es pot fàcilment comprovar en desconnectar el cable del punt A.

g) Dediqueu un temps a interpretar els resultats anteriors i a discutir-los amb el company i el professor.

MESURES QUANTITATIVES

En aquest apartat s'utilitza el muntatge de la figura per a determinar diverses característiques del cable, com ara la constant dielèctrica i l'atenuació. A més es comparen resultats de mesures de tensió d'entrada amb prediccions teòriques fetes a l'estudi previ. Els alumnes han de consignar els resultats en el full de respostes de què disposen en forma de separata i lliurar-lo al professor de pràctiques.

Constant dielèctrica

La constant dielèctrica es pot mesurar identificant aquella freqüència a la qual la longitud de la línia és una fracció coneguda de longitud d'ona, per exemple $\lambda/2$ o $\lambda/4$.

a) Amb el muntatge de l'apartat anterior, connecteu un curtcircuit al punt B i varieu la freqüència del generador fins a mesurar el primer mínim de tensió. Quina fracció de λ representa la longitud del coaxial a aquesta freqüència? Calculeu la constant dielèctrica de la línia i la velocitat de propagació a partir de la mesura anterior.

Constant d'atenuació

En aquest apartat s'utilitza el muntatge de la pràctica per tal de fer una mesura aproximada de la constant d'atenuació del coaxial.

a) Amb el cable coaxial curtcircuitat al punt B, ajusteu la freqüència fins a obtenir a l'entrada el primer mínim (situació idèntica que en l'apartat anterior). Mesureu l'amplitud de tensió de pic utilitzant el menú de "measure".

b) Desconnecteu el cable del punt A i mesureu la tensió de pic en circuit obert del generador.

c) A partir de les mesures anteriors, calculeu la resistència equivalent del cable curtcircuitat utilitzant la fórmula del divisor de tensió.

d) Del resultat anterior, obteniu el coeficient de reflexió i deduïu el valor de la constant d'atenuació α. Expresseu els resultats en Nep/m i també amb dB/m i dB/100m.

e) Com a comprovació, mesureu l'atenuació directament en transmissió. Per fer-ho substituïu el curtcircuit per una càrrega de 50Ω i mesureu la tensió. A continuació connecteu el generador al punt B i la càrrega de 50Ω al punt A i torneu a mesurar. Calculeu l'atenuació a partir de la relació entre aquestes dues mesures.

f) Compareu el resultat obtingut amb les característiques del cable facilitades pel fabricant.

Ona estacionària

En aquest apartat es mesura una resistència incògnita a partir de la relació d'ona estacionària.

a) Connecteu el generador al punt A i la càrrega incògnita al punt B. Varieu la freqüència del generador fins a passar per un màxim i un mínim consecutius. Esteu visualitzant l'ona estacionària. Mesureu l'amplitud de tensió per aquestes dues freqüències. Calculeu la relació d'ona estacionària, el coeficient de reflexió i la resistència de càrrega a partir de les mesures anteriors. Utilitzeu les expressions de l'estudi previ.

Amplitud i fase de la tensió a l'entrada de la línia

En aquest apartat es mesura la tensió a l'entrada de la línia de transmissió per tres càrregues diferents i es comparen els resultats amb previsions teòriques.

1. Ajusteu la freqüència del generador de tal manera que la longitud del cable correspongui a $3\lambda/16$. Utilitzeu els resultats de la mesura de la ε_r de l'apartat 4.1.

2. Desconnecteu el cable del punt A per deixar el generador en circuit obert. Ajusteu els comandaments del generador i de l'oscil·loscopi per tal de visualitzar un únic cicle de la funció $V_0\sin(\omega t)$ amb t=0 al centre de la pantalla i V_0=1V.

3. Connecteu el cable al punt A i deixeu l'altre extrem (punt B) en circuit obert. Mesureu el desplaçament en temps (retard) del senyal, així com la seva amplitud.

4. Connecteu ara un curtcircuit al punt B i repetiu l'operació. Finalment, torneu a repetir la mesura substituint el curtcircuit per la càrrega de 50Ω.

5. Compareu les mesures dels dos apartats anteriors amb els fets càlculs de l'estudi previ. Nota: per tal d'ajustar millor les mesures amb els càlculs, podeu refer aquests utilitzant la constant d'atenuació del cable mesurada al punt 4.3.

ESTUDI PREVI

L'objectiu dels exercicis proposats és aprofundir en els conceptes necessaris per poder fer les mesures proposades a la pràctica. Els resultats teòrics obtinguts en aquests exercicis es corroboraran mitjançant la mesura durant la sessió de pràctiques. És per això del tot imprescindible haver-los realitzat prèviament.

1. Considereu el muntatge de la pràctica descrit a la figura de la primera pàgina de l'enunciat. El generador és sinusoïdal, de freqüència variable i te una tensió de pic en circuit obert de 1V. Quan Z_x=0 (punt B curtcircuitat) es mesura la tensió a l'entrada de la línia $v_m(t)$ a diferents freqüències i es troba que la seva amplitud te un primer mínim a f=1.7MHz. Quina fracció de λ representa la longitud de la línia a aquesta freqüència?. Calculeu la permitivitat del dielèctric i la velocitat de propagació a partir de la dada anterior. A quina freqüència es trobarà el primer màxim?. Quina fracció de λ és la longitud de la línia en aquest cas?

2. En la situació de l'apartat anterior, l'amplitud de tensió de pic mesurada a l'entrada de la línia a f=1.7 MHz (mínim) és de 0.1V. Calculeu la resistència equivalent a l'entrada de la línia curtcircuitada utilitzant la fórmula del divisor de tensió. A partir d'aquest resultat, i comparant amb l'expressió teòrica del coeficient de reflexió d'una línia amb pèrdues curtcircuitada, calculeu la constant d'atenuació del cable α. Doneu també la seva atenuació en dB/m i dB/100m. Finalment, calculeu l'atenuació a aquesta freqüència amb la fórmula que facilita el fabricant (vegeu annex de la pràctica I) i compareu amb el que heu obtingut.

3. Ara el curtcircuit del punt B se substitueix per una resistència de 75Ω. Quines són les amplituds de tensió de pic màxima i mínima a l'entrada de la línia? A quines freqüències corresponen?. I si la resistència és de 33,3Ω?. Quina és la relació d'ona estacionària a l'entrada de la línia en cada cas[1]? Cóm es pot calcular la resistència de càrrega a partir de la mesura d'aquestes dues amplituds de tensió?.

4. Calculeu la freqüència a la qual la longitud del cable és de $3\lambda/16$. Calculeu la impedància d'entrada de la línia a aquesta freqüència per Z_x=0, $Z_x=\infty$ i Z_x=50Ω *tenint en compte que la línia te pèrdues*. Suposant que la tensió instantània del generador en circuit obert és $v_g(t)=V_g \sin(\omega t)$ amb V_g=1V, doneu l'expressió de la tensió instantània en funció del temps a l'entrada de la línia expressada com $v_m(t)=V_m\sin[\omega(t-\tau)]$ en els tres casos, tot indicant els valors numèrics de l'amplitud i del retard.

(Suggeriment: utilitzeu MATLAB per fer els càlculs de forma més fàcil)

[1]Nota: Estrictament parlant, la relació d'ona estacionària només es pot mesurar si es disposa d'una petita sonda capaç de mesurar la tensió al llarg de la línia de transmissió. Com que això no és possible en un cable coaxial comercial, alternativament es pot obtenir variant la freqüència i mesurant en un punt fix accessible, com per exemple l'entrada. Si la línia no te pèrdues, els dos procediments són equivalents. En cas contrari el segon mètode és aproximat i fins i tot el mateix concepte de relació d'ona estacionària s'ha de revisar: La relació entre els valors màxim mínim de tensió (a dues freqüències diferents) a l'entrada equival a la relació d'ona estacionària "a l'entrada de la línia".

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN. PRÁCTICA III
POLARIZACIÓN Y REFLEXIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

1.- OBJETIVOS

En esta práctica el alumno comprobará experimentalmente los efectos de polarización y reflexión de ondas electromagnéticas a modo de ejercicio práctico introductorio del tema de propagación de ondas electromagnéticas, que en general aún no se habrá desarrollado en clase de teoría. Por este motivo, la práctica es de hecho una revisión de conceptos que ya fueron estudiados ampliamente en la asignatura de Electromagnetismo (1B). En el apéndice A, al final del enunciado se proporciona información complementaria referente al tratamiento de la polarización de una onda plana electromagnética. La práctica se realizará a frecuencias de microondas.

2.- INTRODUCCIÓN

La polarización de una onda electromagnética es una indicación de la orientación del vector de campo en un punto fijo del espacio al transcurrir el tiempo. La polarización de una onda es la figura geométrica descrita, al transcurrir el tiempo, por el extremo del vector campo eléctrico en un punto fijo del espacio en el plano perpendicular a la dirección de propagación. La polarización de una antena en una dirección es la de la onda radiada por ella en esa dirección. Para ondas con variación temporal sinusoidal esa figura es en general una elipse, habiendo dos casos particulares de interés: si la figura trazada es un segmento, la onda se denomina linealmente polarizada y si es un círculo, circularmente polarizada. La potencia captada por una antena receptora depende, entre otros parámetros, de la polarización de la onda incidente. Se define el coeficiente de desacoplo de polarización C_p como la relación entre la potencia recibida por la antena cuando incide sobre ella una onda plana de polarización conocida y la que recibiría la misma antena al incidir sobre ella una onda plana con la misma dirección de propagación y densidad de potencia, pero cuyo estado de polarización sea tal que se maximice la potencia recibida (adaptación de polarización).

Se define el vector de polarización como un vector unitario que describe el estado polarización de la onda en un punto del espacio. Así para variaciones temporales de la forma $e^{j\omega t}$, propagación según el eje +z y adoptando el criterio habitual en ingeniería de observar la onda como se aleja, tenemos los siguientes ejemplos de vector de polarización:

lineal $$\hat{e} = \frac{a\hat{x} + b\hat{y}}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

circular a izquierdas $$\hat{e} = \frac{\hat{x} + j\hat{y}}{\sqrt{2}}$$

elíptica $$\hat{e} = \frac{a\hat{x} - be^{j\phi}\hat{y}}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

Se define **el coeficiente de desacoplo de polarización** c_p como la pérdida relativa de potencia que sufrirá la señal al ser detectada por una antena respecto al caso ideal en el cual c_p=1 (0 dB). Existen diferentes formas de calcular dicho coeficiente c_p. Una forma habitual es la de calcularlo como el cuadrado del módulo del producto escalar hermítico (ver Apéndice A) del vector de polarización $\hat{e}_t$ que define la polarización de la antena y el vector $\hat{e}_r$ de la onda recibida:

$$c_p = \left|\hat{e}_t \cdot \hat{e}_r^*\right|^2$$

$$C_p(\text{dB}) = 20\log\left|\hat{e}_t \cdot \hat{e}_r^*\right|$$

Así, por ejemplo, una antena polarizada circularmente a derechas, situada en el plano xy, con máximo de radiación en la dirección del eje z positivo, está caracterizada por un vector de polarización en esa dirección de radiación dado por

$$\hat{e}_t = \frac{\hat{x} - j\hat{y}}{\sqrt{2}}$$

Si sobre esta antena incide una onda plana polarizada circularmente a derechas (sentido de propagación según z decreciente), es decir con un vector de polarización

$$\hat{e}_r = \frac{\hat{x} + j\hat{y}}{\sqrt{2}}$$

se obtiene un coeficiente de desacoplo c_p=1 (C_p=0 dB)y se dice en este caso que existe adaptación de polarización. Por el contrario, si la onda recibida esta polarizada circularmente a izquierdas

$$\hat{e}_r = \frac{\hat{x} - j\hat{y}}{\sqrt{2}}$$

se tiene una desadaptación total, c_p = 0, resultante de la ortogonalidad de ambas polarizaciones. Finalmente, si incide un onda linealmente polarizada

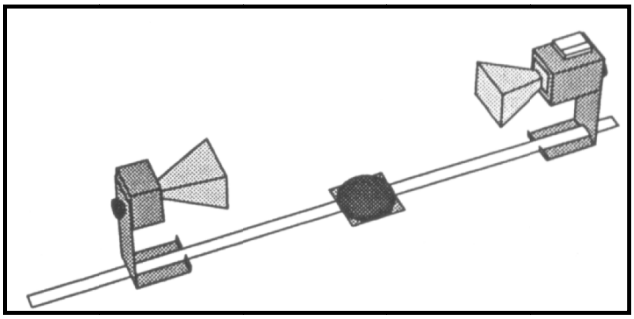
$$\hat{e}_r = \hat{x}$$

se obtiene un valor c_p=1/2 o una pérdida por desadaptación de polarización de C_p= -3dB.

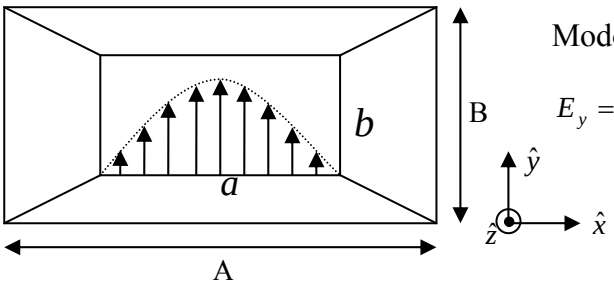
En la práctica se medirá el coeficiente de desacoplo de polarización entre una antena receptora linealmente polarizada y una onda también polarizada linealmente.

Adicionalmente, un efecto común en radiocomunicaciones es la interferencia producida por la recepción de una onda directa propagada entre el emisor y el receptor y una onda proveniente de una reflexión que en el caso más general se produce en el suelo. En función que la interferencia sea constructiva o destructiva la señal en el receptor tendrá fluctuaciones. En el laboratorio se realizara un montaje conocido como espejo de Lloyd que permitirá al alumno visualizar este efecto.

3.- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA



Las medidas se realizaran a frecuencias de microondas. Para ello se dispone de un oscilador de frecuencia nominal 10,525GHz. Como antenas transmisora y receptora se emplean bocinas piramidales. Estas bocinas se forman mediante la abertura progresiva de una guía rectangular. A la frecuencia de trabajo la guía rectangular soporta únicamente el modo TE_{10}. Es fácil comprender que en este caso el campo radiado esta linealmente polarizado. La bocina receptora está provista de un detector (diodo) que proporciona una tensión relacionada con el nivel de señal recibido. Esta tensión se medirá con el osciloscopio.



Modo TE_{10}

$$E_y = E_0 sen\frac{\pi x}{a}; H_x = -\frac{E_0}{\eta_{TE}} sen\frac{\pi x}{a}$$

Bocina piramidal

4.- PUESTA EN MARCHA

Identificar correctamente la bocina que actuará como emisora y la que lo hará como receptora. Colocarlas en sus soportes y comprobar que ambas se encuentran alineadas. Seguidamente enchufar la fuente de alimentación del oscilador y encender el receptor. Para obtener mayor precisión en las medidas, estas se realizaran con el osciloscopio. Conectar las bananas a la salida del receptor y al osciloscopio. Ajustar los mandos del osciloscopio para obtener una buena lectura. Finalmente comprobar que tanto el emisor como el receptor funcionan correctamente. **Respecto al osciloscopio:**

- Realizad un reset del osciloscopio si es necesario (tecla AUTO SET)
- Barrido sincronizado con la red (TRIGGER MENU TIPO flanco FUENTE red)
- Canal con acoplo en continua CH1 Acoplo [símbolo acoplo continua]
- TIME 1Ms/s Volts/Div 200 mV. No utilicéis la función de autoescalado
- Utilizad la función V_{avg} para las medidas
- Evitar la presencia de objetos entre las dos antenas (cables, bocadillos, manos,….)

5.- MEDIDA DE POLARIZACIÓN

En este primer apartado se medirá el coeficiente de polarización entre las antenas. El detector nos da una tensión proporcional al nivel de potencia recibida. Puede suponerse que ese nivel de tensión responde a la siguiente expresión

$$V_{medida} = k\left|P_{rec}\right|^n$$

en la cual el índice n modela la no-idealidad de la respuesta del diodo detector respecto de la respuesta cuadrática.

Al mismo tiempo, se conoce que la variación teórica de potencia en función del ángulo entre los ejes de polarización de las antenas emisora y receptora viene dado por

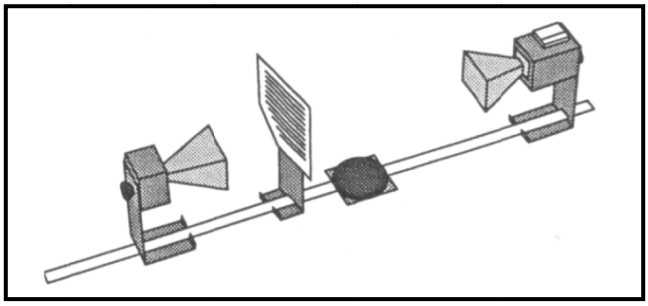
$$P_{rec} = P_{\max}\cos^2\theta$$

por lo tanto, puede determinarse que la relación entre la tensión medida en el osciloscopio y la relación de ángulos entre los ejes de polarización de las antenas es

$$V_{medida} = k\left[P_{\max}\cos^2\theta\right]^n = k'\left[\cos^2\theta\right]^n$$

5.1- Efectos de una rejilla metálica sobre ondas polarizadas linealmente.

En este apartado se estudiará de forma intuitiva la interacción de una onda polarizada linealmente y una rejilla metálica. A continuación se seguirán de forma ordenada las siguientes instrucciones.



1. Situad las dos bocinas a unos 50 cm. de distancia y orientadlas (según los dos ejes de giro), de forma que en el osciloscopio se obtenga un máximo de tensión.
2. Girad la bocina receptora 90º. ¿Qué nivel de tensión se recibe? ¿Cómo se encuentran situados los ejes de polarización de las bocinas?
3. En la situación del caso anterior (antenas giradas 90 º) introducid la rejilla orientada 45º con respecto la vertical. Razonad y justificad los resultados experimentales. Haced un esquema con la rejilla a 45º dibujando la descomposición de campos sobre la misma e indicad cual es la componente que se transmite y cual la reflejada.
4. Girad la bocina receptora hasta la posición ajustada en el punto 1. Girad la rejilla metálica de manera que quede primero en posición vertical y seguidamente en posición horizontal. ¿Qué orientación presenta el campo eléctrico radiado por la bocina emisora? ¿Es previsible el nivel de tensión medido en el osciloscopio para ambos casos?

Después de analizar y razonar todas las cuestiones anteriores, rellenad la hoja de respuestas.

5.2-Medida del diagrama de polarización.

A continuación se medirá el diagrama de polarización de las antenas. Se recomienda realizar estas medidas con cuidado ya que los resultados obtenidos permitirán calibrar el detector y serán utilizados en la próxima práctica.

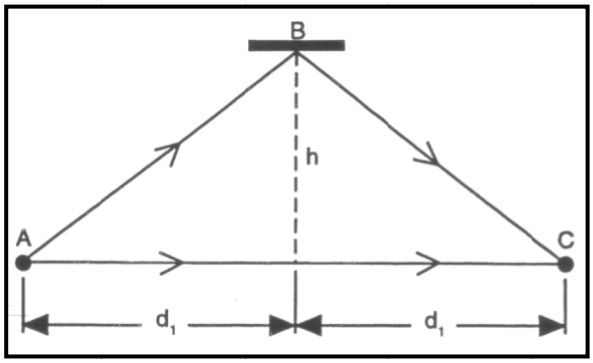
El procedimiento de medida será el siguiente:

1. Ajustad la antena emisora de forma que su goniómetro posterior marque cero grados.
2. Ajustad la antena receptora de tal manera que se obtenga un máximo de señal. Una vez conseguido, fijadla
3. Para calibrar el detector se deben determinar los parámetros k' y n. Ajustad la distancia entre antenas de forma que se obtenga alrededor de 1V en el osciloscopio. Con el mando de sensibilidad del receptor acabad de ajustar el valor máximo a 1V. De esta forma se está fijando k'=1 (si no es posible, utilizad k'=2 y dividid por k' todas las medidas).
4. Determinad el valor de n, sabiendo que para θ =45º el nivel de potencia recibido ha de estar 3dB por debajo del máximo y que por tanto $V_{medida}(45º) = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^{2n} = 0.5^n$. Despejando obtenemos que $n = \frac{\log[V_{medida}(45º)]}{\log 0.5}$.
5. Ahora, para cualquier ángulo θ de medida se tiene que la tensión calibrada dará directamente el coeficiente de desacoplo de polarización $C_p(\theta) = V_{cal}(\theta) = [V_{med}(\theta)]^{\frac{1}{n}}$.

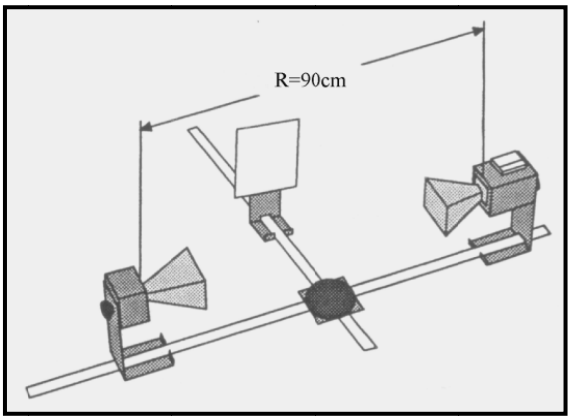
6. Completad la tabla para los valores calibrados que se obtendrían a partir de las medidas con la n hallada en el apartado 4. Dibujad las graficas teórica y calibrada a partir de las medidas de potencia recibida en la antena receptora para valores de θ comprendidos entre 0º y 90º. ¿Qué podemos decir del detector?
7. Dibujad finalmente el coeficiente de desacoplo de polarización medido (calibrado) y teórico en la grafica polar adjunta. Utilizad valores cada 5º y el cuadrante 0-90º. ¿Son los resultados obtenidos coherentes con la teoría?

6.- EL ESPEJO DE LLOYD

Mediante este experimento se estudiará como afecta en la recepción de un sistema de transmisión la aparición de señales interferentes que han seguido caminos distintos al principal. La siguiente figura muestra el montaje del experimento.



Una antena situada en el punto A emite una onda electromagnética que es detectada por la antena receptora situada en C. La señal detectada por el receptor es la suma de las ondas que se han propagado por dos caminos: el directo y el interferente (después de reflejarse en la placa metálica situada en B). Si la diferencia de caminos es un número impar de semilogitudes de onda la interferencia será constructiva y se medirá un máximo de señal. Por otro lado, si la diferencia de caminos es un número entero de longitudes de onda se medirá un mínimo de señal.



Realizad el montaje de la figura situando la placa reflectora en el ramal más cercano al borde de la mesa para facilitar su desplazamiento sin interferir en la medida. Es importante asegurarse de que el emisor y el receptor están equidistantes del centro y que la placa metálica esta paralela al eje de unión de las dos antenas.

A continuación id moviendo de posición la placa metálica partiendo de la posición más cercana a las antenas. Anotad en la tabla la distancia h al eje y el valor de la tensión medida V_{MIN}, para los primeros 4 mínimos de tensión hallados. ¿Por qué no se consigue un cero (V_{MIN}=0)? Enumerad y razonad los 5 motivos principales por los cuales los mínimos de tensión no son nulos absolutos.

Para la media de las distancias tenga en cuenta que la distancia desde el eje (tonillo central del círculo de color negro) hasta la marca de 56 cm de la regla graduada de color amarillo es de 7 cm.

PROBLEMAS PREVIOS A LA PRÁCTICA III

En ocasiones la teoría de RyP no ha avanzado lo suficiente al inicio de esta práctica. Sin embargo, el estudio previo puede realizarse a partir de los conceptos sobre polarización de ondas electromagnéticas que ya fueron estudiados ampliamente en la asignatura de Electromagnetismo (1B) y/o en el Seminario de Ondas Electromagnéticas (Consultar el Apéndice A al final del enunciado para información adicional)

a) Escriba la expresión fasorial de una onda plana uniforme polarizada circularmente a derechas que se propaga en el sentido decreciente del eje z. Suponga una variación temporal de la forma $e^{j\omega t}$ y que en la definición del sentido de giro se adopta el convenio habitual en ingeniería de observar la onda alejándose.

b) Para un campo polarizado elípticamente tenemos que $\vec{E} = (\hat{x} + j3\hat{y})e^{-jkz}$. Teniendo en cuenta que el campo instantáneo se obtiene como $\vec{\mathcal{E}}(t) = \mathrm{Re}\{\vec{E} \cdot e^{j\omega t}\}$, dibuje sobre el plano xy el vector campo $\vec{\mathcal{E}}(t)$ para t=0 y t=T/4 con T=2π/ω. Determine a partir de la figura si la señal esta polarizada a derechas o a izquierdas.

c) La polarización lineal de referencia o co-polar de un campo polarizado elípticamente es la de la componente $\hat{x}$ o $\hat{y}$ de mayor amplitud. ¿Cuál es la polarización de referencia del campo $\vec{E}$?

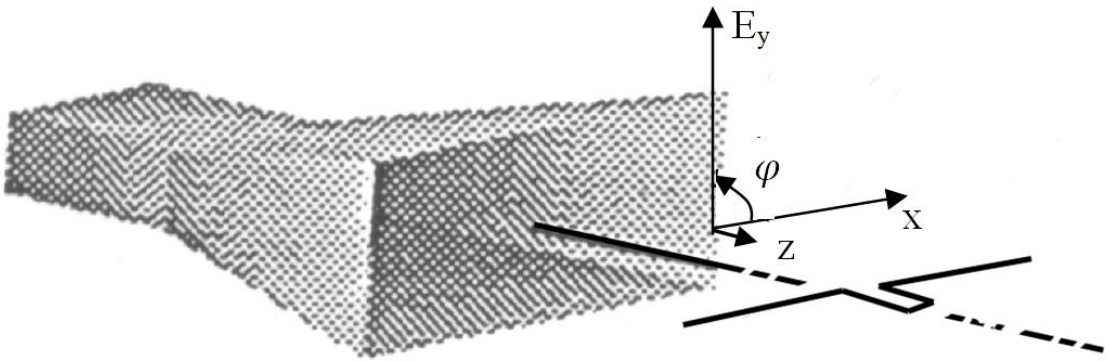
d) Calcule el vector unitario de $\vec{E}$

e) Calcule la pérdida de potencia de dB que sufrirá el campo $\vec{\mathcal{E}}(t)$ al ser recibido por una antena en polarización vertical $\hat{y}$ (coeficiente de polarización co-polar). ¿Y si se recibe por una antena con polarización horizontal (coeficiente de polarización cross-polar o de polarización cruzada)?

f) Descomponga el campo $\vec{E}$ como combinación lineal de dos campos de polarizacion circular ortogonales. ¿Cuál es la polarización circular de referencia o co-polar?

2) En la situación de la figura una antena receptora de tipo dipolo con polarización lineal orientada en la dirección x puede ser rotada un ángulo φ respecto a un eje perpendicular al suyo. Halle el coeficiente C_p en función del ángulo φ de rotación para los dos supuestos siguientes:

a) La antena transmisora emite una onda circularmente polarizada a derechas.
b) La antena transmisora emite una onda polarizada linealmente según x.



APÉNDICE A: Producto escalar hermítico y vector unitario de polarización

Sean dos vectores en el plano XY dados por $\vec{s} = a\hat{x} + b\hat{y}$ y $\vec{t} = c\hat{x} + d\hat{y}$, en los cuales las constantes a, b, c y d son números complejos en general. El producto escalar hermítico de estos dos vectores se simboliza normalmente con la expresión $\vec{s} \cdot \vec{t}$ o también con la expresión $\langle \vec{s}, \vec{t} \rangle$ y se define como

$$\vec{s} \cdot \vec{t} = \begin{pmatrix} a & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix}^* = a \cdot c^* + b \cdot d^*$$

En la cual el operador ()* expresa el con jugado del número complejo. Las propiedades más interesantes del producto escalar hermítico de dos vectores son las siguientes:

- Norma (módulo) del vector: $\vec{s} \cdot \vec{s} = a \cdot a^* + b \cdot b^* = |a|^2 + |b|^2 = \|\vec{s}\|^2$

- Vector unitario es aquel cuyo módulo o norma es la unidad. El vector unitario $\hat{s}$, cuya norma cumple $\|\hat{s}\| = 1$ y que expresa la dirección común de todos los vectores colineales al vector $\vec{s} = a\hat{x} + b\hat{y}$ viene dado por:

$$\hat{s} = \frac{\vec{s}}{\|\vec{s}\|} = \frac{a\hat{x} + b\hat{y}}{\sqrt{|a|^2 + |b|^2}}$$

- El producto escalar hermítico de dos vectores colineales unitarios es la unidad.
  - Ejemplo: $\hat{x} \cdot \hat{x} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}^* = 1$

- El producto escalar hermítico de dos vectores ortogonales unitarios es nulo
  - Ejemplo: $\vec{x} \cdot \vec{y} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}^* = 0$

Sea una onda plana genérica que se propaga en la dirección de las z crecientes:

$$\vec{E} = \left(E_{0x}\hat{x} + E_{0y}\hat{y}\right)e^{-jkz}$$

Genéricamente, las constantes E_{0x} y E_{0y} son complejas y para facilitar el estudio de la polarización del vector $\vec{E}$, éste suele escribirse como

$$\vec{E} = E_{0x}(\hat{x} + p\hat{y})e^{-jkz}$$

donde el número complejo ***p*** se ha definido como:

$$p = \frac{E_{0y}}{E_{0x}}$$

En este caso, el vector unitario de polarización viene dado por cualquiera de las siguientes expresiones

$$\hat{e} = \frac{E_{0x}\hat{x} + E_{0y}\hat{y}}{\sqrt{|E_{0x}|^2 + \left|E_{0y}\right|^2}} = \frac{\hat{x} + p\hat{y}}{\sqrt{1 + |p|^2}}$$

PRÁCTICA IV
RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN

MEDIDA DE ANTENAS

1.-OBJETIVOS

En esta práctica el alumno determinará el diagrama de radiación en los planos E y H, así como, la directividad de dos antenas: una bocina y una boca de guía.

2.-SISTEMA DE MEDIDA

5. El sistema de medida en esta práctica es el mismo que el de la práctica relativa a la polarización. Es importante resaltar que, igual que en la práctica anterior el receptor suministra una tensión proporcional al nivel de potencia recibida:

$$\boldsymbol{V_{med}} = \boldsymbol{k}\left|\boldsymbol{P_{rec}}\right|^{\boldsymbol{n}}$$

3-MEDIDA DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LAS ANTENAS

En este apartado se medirán los diagramas de radiación en los planos E y H de la bocina y la boca de guía. Para realizar las medidas de los diagramas, deben situarse las antenas transmisora y receptora tal como indica la configuración de la figura de la página siguiente. La antena que se mueve (transmisora), siempre apunta a la antena fija (receptora) en la dirección de su máximo de radiación $\theta'=0$ y $\phi'=0$. La potencia recibida en la antena fija será:

$$\boldsymbol{P_{rec}} = \boldsymbol{P_{rad}}\left(\frac{\lambda}{4\pi \boldsymbol{R}}\right)^2 \boldsymbol{D_T}\,\boldsymbol{D_R}(\theta,\phi)$$

considerando la relación entre directividad y diagrama de radiación:

$$\boldsymbol{D_R}(\theta,\phi) = \boldsymbol{D_R}\,\boldsymbol{t_R}(\theta,\phi)$$

la potencia en el receptor se puede expresar como:

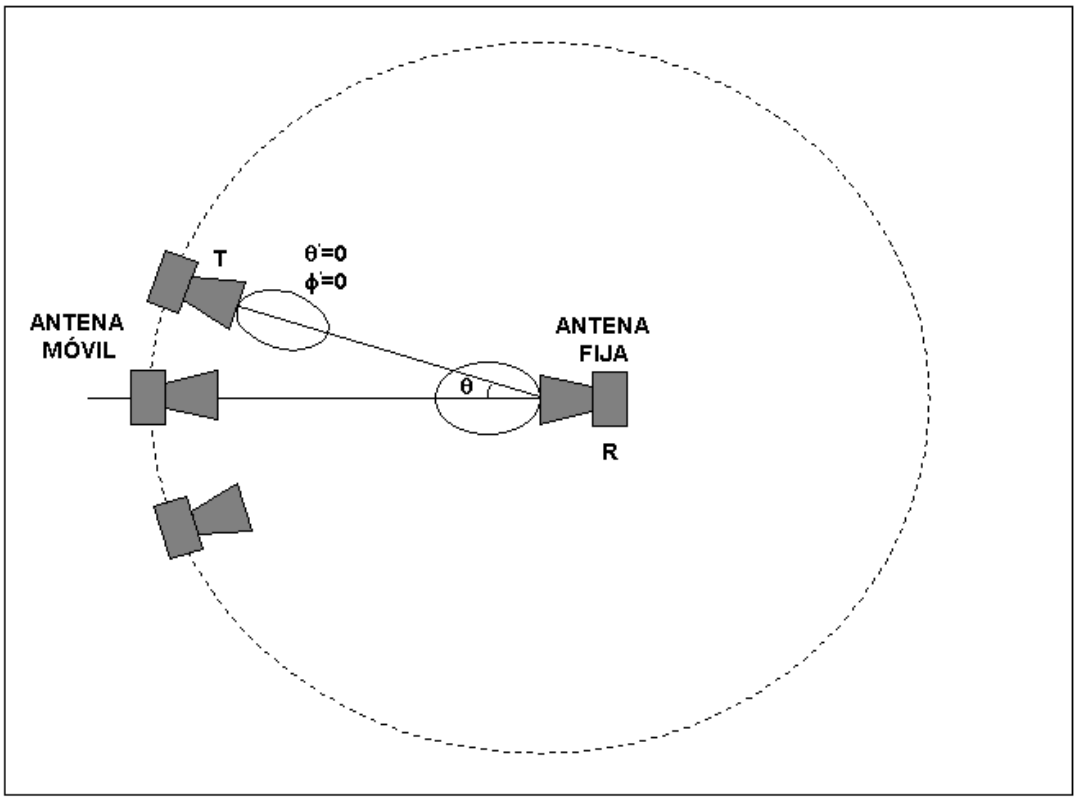
$$P_{rec} = K\, t_R(\theta, \phi)$$

donde *K* es

$$K = P_{rad}\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 D_T D_R$$

Por lo tanto, la relación entre la tensión medida en el osciloscopio y el diagrama de radiación es

$$V_{med} = k\left|K\, t_R(\theta, \phi)\right|^n = k'\left|t_R(\theta, \phi)\right|^n$$



El procedimiento de medida será el siguiente:

1. Situad las dos bocinas piramidales tal como indica la figura anterior.
2. Utilizando el mismo procedimiento que en la práctica anterior, evaluar el parámetro n del receptor.
3. Orientar la antena transmisora y receptora para poder medir el plano H.
4. Mover la antena transmisora hasta encontrar un máximo de señal. Una vez encontrado, ajustar el valor máximo a 1 V en el osciloscopio.
5. Proceder a completar la tabla de la hoja de respuestas moviendo la antena transmisora.

6. Dibujad el diagrama de radiación en el plano H. Podemos suponer que el diagrama de radiación es simétrico

7. Medida del diagrama en el plano E: Repetid los puntos del 3 al 6 para el plano E

8. Cambiad la bocina de la antena receptora por la boca de guía.
9. Medida de los diagramas en los planos E y H: Repetid los puntos del 3 al 6 para los dos planos.

4.-CÁLCULO DE LA DIRECTIVIDAD DE LAS ANTENAS

Para antenas directivas, con un único lóbulo principal y lóbulos secundarios de valores reducidos, se puede estimar la directividad a partir de los anchos de haz a –3 dB ($\Delta\theta_E$, $\Delta\theta_H$) en los dos planos principales E y H (antenas polarizadas linealmente) :

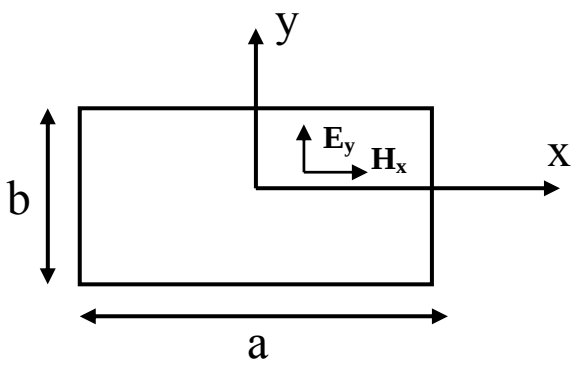
$$D = \frac{4\pi}{\Delta\theta_E \Delta\theta_H}$$

Determinad la directividad de la bocina y la boca de guía.

D_{bocina}=	dB
D_{boca}=	dB

PROBLEMAS PREVIOS A LA PRÁCTICA IV

Una apertura rectangular, sobre un plano de masa infinito (ranura radiante), de dimensiones a= 8.5 cm y b= 6.5 cm, está iluminada uniformemente por una onda polarizada linealmente $\boldsymbol{E}_y = \boldsymbol{E}_0\,\hat{y}$ a la frecuencia f=10.5 GHz como muestra la siguiente figura.



La dirección de máxima radiación es la del eje z y la del campo eléctrico en esa dirección coincide con la de la apertura.

1. Especificar qué planos (x,y,z) forman los planos E y H.
2. El módulo de campo eléctrico en el plano E ($\phi=\pi/2$), es:

$$\left|E_\theta\right| = \frac{abE_0}{\lambda r}\left|\frac{sen\left(\frac{kb}{2}sen\theta\right)}{\frac{kb}{2}sen\theta}\right|; \quad \left|E_\phi\right| = 0 \qquad \text{Con} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

2.1 Calculad los ángulos θ en que se anula el diagrama de radiación en el plano E.

2.2 Dibujad el diagrama de radiación, para $z \geq 0$, en el plano E.

2.3 Calculad la relación lóbulo principal a secundario (dB). El valor de θ, correspondiente al máximo del primer lóbulo secundario, se puede estimar como el valor medio de los dos primeros nulos.

2.4 Calculad el ancho de haz a –3B.

3. El módulo de campo eléctrico en el plano H ($\phi=0$) es:

$$\left|E_\phi\right| = \frac{abE_0}{\lambda r}\left|\cos\theta\frac{sen\left(\frac{ka}{2}sen\theta\right)}{\frac{ka}{2}sen\theta}\right|; \qquad \left|E_\phi\right| = 0 \qquad \text{Con} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

3.1 Calculad los ángulos θ en que se anula el diagrama de radiación en el plano H.

3.2 Dibujad el diagrama de radiación, para $z \geq 0$, en el plano H.

3.3 Calculad la relación lóbulo principal a secundario (dB).

Calculad el ancho de haz a –3B.

4. Calculad la directividad de la apertura en dB

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN. PRÁCTICA V
MEDIDAS EN BANDA X CON GUÍA DE ONDAS RANURADA

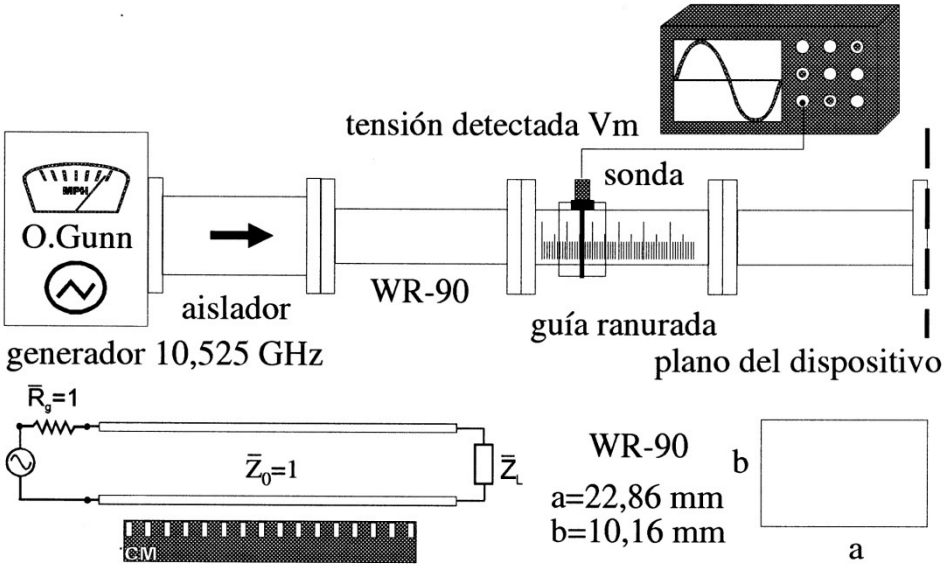
OBJETIVOS

En esta práctica el alumno se familiarizará con diferentes dispositivos realizados en guía de ondas rectangular de banda X (8,2 GHz a 12,4 GHz). Comprobará como, a pesar de no propagar modos TEM, en muchos aspectos las guías de onda pueden tratarse forma análoga a las líneas de transmisión. Así, la medida de ondas estacionarias permite la caracterización de cargas realizadas en guía de ondas tales como bocinas, ranuras, diafragmas, etc. La utilización de diafragmas como elementos circuitales permitirá comprobar cómo la adaptación de dichas cargas puede efectuarse de forma análoga a como se realizan las adaptaciones en estructuras que propagan modos TEM (líneas de transmisión).

INTRODUCCIÓN

En guías de onda formadas por tubos conductores huecos, tales como la guía de ondas rectangular, no pueden propagarse modos TEM. Por este motivo los conceptos circuitales de tensión, corriente e impedancia característica no son válidos tal y como se usan en las líneas de transmisión. Sin embargo, dado que los campos electromagnéticos en las guías siguen respondiendo a ecuaciones de propagación, conceptos más generales como el de señal transmitida y señal reflejada continúan siendo válidos. Se puede hablar, por ejemplo, de un coeficiente de reflexión ρ definido como el cociente entre los fasores de campo eléctrico máximo en el centro de la guía para las ondas transmitida E_0^+ y reflejada E_0^-. A partir de éste podremos definir también una impedancia normalizada que vendrá dada por $\bar{Z} = \frac{1+\rho}{1-\rho}$.

Desde un punto de vista matemático, sin entrar en el significado físico de una impedancia definida de este modo, serán validos los conceptos y procedimientos ya conocidos de caracterización y adaptación de impedancias, cuya finalidad es la de conseguir que los campos reflejados sean nulos ($E_0^- = 0$), maximizando la transferencia de potencia a la carga.



Volts/Div: 10 **mV** TRIGGER Menu→ Tipo: **Flanco (edge)** Fuente: **RED** Mode:**Auto**

CH1: **Invert=ON** Measure**: Vavg o Vrms** **OJO:** No usar el autoescalado (AUTOSET)

DESCRIPCIÓN DE SISTEMA DE MEDIDA

En la figura adjunta se observa el diagrama de bloques del montaje de laboratorio, así como su circuito equivalente. El montaje consta de:

- Un generador de señal de banda X de frecuencia nominal 10,525 GHz (aunque puede haber derivado ligeramente debido al envejecimiento de los componentes).
- Un aislador que se utiliza para proteger al generador garantizando que éste esté siempre adaptado (protección contra cargas reactivas), independientemente del nivel de onda estacionaria existente en la guía de ondas.
- Una guía ranurada para efectuar medidas de onda estacionaria (ROE) en el interior de la guía. Se halla intercalada entre dos tramos de guía de ondas rectangular WR90, para alejarla de los extremos y garantizar que cualquier modo superior que se haya generado en las discontinuidades se halle convenientemente atenuado y no afecten a las medidas de ROE.
- El plano de carga (o de dispositivo) es el lugar en el que se conectarán las diferentes cargas (bocina, cortocircuito, boca de guía,...) y por tanto establece la coordenada z_L en la cual su ubica la carga $\overline{Z}_L$.
- Un cortocircuito (placa conductora) que se utiliza como una carga de referencia conocida: $\overline{Z}_L = 0, \rho_L = -1$. También se usa para marcar sobre la guía ranurada las coordenadas z_L que se hallan a una distancia entera de semilongitudes de onda de la carga (plano del dispositivo): $z_L = n\frac{\lambda_g}{2}$.
- Diversas cargas que se deberán caracterizar: bocina, boca de guía, brida,...

MEDIDAS CON GÚIA RANURADA

La guía ranurada consta de una sonda montada sobre una estructura que se desliza a lo largo de la regla graduada, permitiendo conocer su posición. La sonda es un monopolo que penetra ligeramente en el interior de la guía (débilmente acoplada) con la finalidad de obtener una medida del campo eléctrico del modo TE10, perturbándolo mínimamente. La sonda lleva la señal a un detector cuadrático que proporciona una tensión continua proporcional a la potencia captada:

$$V_m = cte \cdot P_{sonda} = cte' \left| E_0^+ + E_0^- \right|^2$$

De este modo, la ROE existente en la guía se podrá determinar midiendo la tensión detectada en los puntos de la guía en que esta es máxima $(V_{\max})$ y mínima $(V_{\min})$:

$$ROE = \frac{E_{0\max}}{E_{0\min}} = \frac{\left|E_0^+\right| + \left|E_0^-\right|}{\left|E_0^+\right| - \left|E_0^-\right|} = \sqrt{\frac{V_{\max}}{V_{\min}}}$$

Nótese que en este caso la ROE se ha definido a partir de la amplitud de campo eléctrico del modo TE10 de las ondas incidente y reflejada.

MEDIDAS DE ROE

La primera parte de la práctica consistirá en medir la adaptación (pérdidas de retorno o "return loss") de diversos sistemas radiantes: bocina piramidal, boca de guía con brida y boca de guía. Para ello conecte de forma secuencial las tres cargas y mida la tensión detectada máxima y mínima y rellene la hoja de respuestas con los datos de ROE, coeficiente de reflexión $|\rho|$, pérdidas de retorno (Return Loss), y fracción (%) de potencia radiada P_{rad} respecto de la potencia asociada a la onda positiva o incidente en la carga P_{inc}.

Para tener medidas precisas, busque el máximo y mínimo en la parte central de la guía ranurada. Utilice los pulgares para desplazar la sonda empujando por la parte inferior de la guía ranurada y cuidando de no obstruir la ranura de la parte superior. Utilizar la función de medida V_{AVG} para visualizar el mínimo de tensión de forma numérica.

MEDIDA Y ADAPTACIÓN DE IMPEDANCIAS

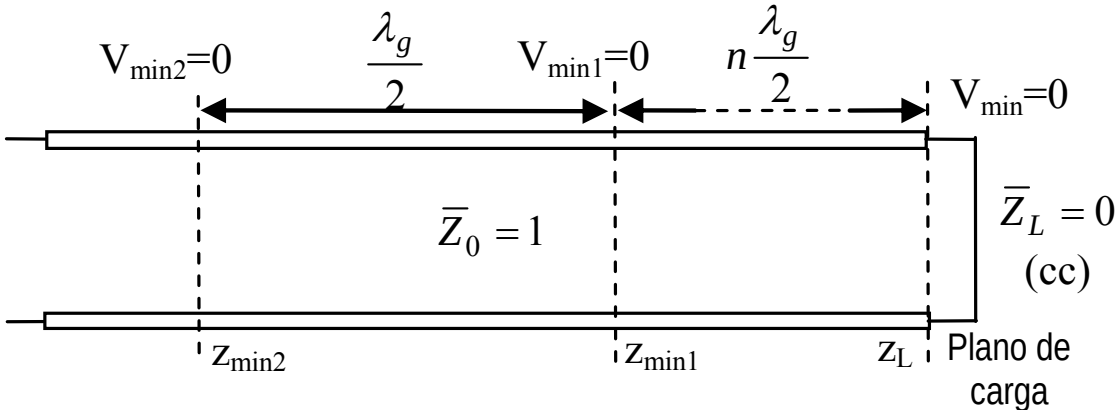
En este apartado se va a medir la impedancia normalizada de la boca de guía, como paso previo a su adaptación. En primer lugar se va a proceder a calibrar (caracterizar) el sistema de medida.

Calibración del sistema de medida

El sistema de medida se caracteriza mediante la medida de una carga conocida situada en el plano de carga (de dispositivo). La carga más sencilla es un cortocircuito (placa conductora) que se utiliza como una carga de referencia conocida: $\overline{Z}_L = 0,\ \rho_L = -1$. También se usa para marcar sobre la guía ranurada las coordenadas z_L que se hallan a una distancia entera de semilongitudes de onda de la carga (plano del dispositivo): $z_L = n\frac{\lambda_g}{2}$. Adicionalmente, la distancia entre dos mínimos consecutivos permite medir la longitud de onda en la guía λ_g.

Monte la placa conductora en el plano de dispositivo y compruebe que los tornillos están apretados para garantizar la continuidad eléctrica entre la brida de la guía y la placa. Realice las siguientes medidas y cálculos y anótelos en la hoja de respuestas

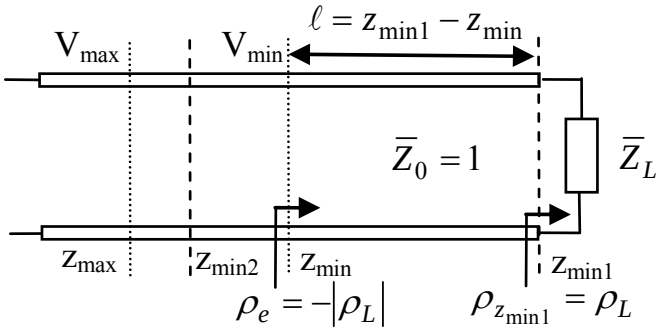
- **Medida de la longitud de onda y la frecuencia de trabajo:** Busque dos mínimos consecutivos de campo eléctrico en la parte central de la guía ranurada y anote la posición $z_{\min 1}$ y $z_{\min 2}$ de los mismos, con $z_{\min 1}$ el mínimo más cercano al plano de carga. Intente precisar las medidas a 0.25 mm. Nótese que, según el convenio habitual, las distancias en la regla graduada son negativas. A partir de la separación entre mínimos $\Delta z_{\min} = z_{\min 1} - z_{\min 2}$ calcule la longitud de onda en la guía λ_g [mm] y la frecuencia de trabajo [GHz].

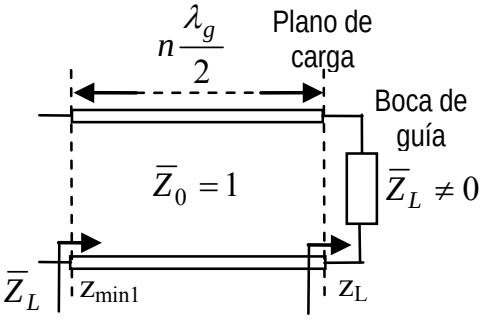


Dado que la carga también representa un mínimo de tensión,(cortocircuito), los puntos $z_{\min 1}$ **y** $z_{\min 2}$ se hallan a una distancia $n\frac{\lambda_g}{2}$ del plano de carga.

- **Medida de la carga incógnita $\overline{Z}_L$:** Desconecte la placa conductora y conecte la boca de guía. Al cambiar el cortociruito por la carga $\overline{Z}_L$ (boca de guía) los mínimos y máximos de la onda estacionaria en la guía habrán cambiado de posición y valor. $\overline{Z}_L$

- Mida el valor de tensión máxima y mínima detectadas y calcule nuevamente la ROE y el coeficiente de reflexión producido por la boca de guía.
- Busque la posición $z_{\min}$ un mínimo de tensión que este situado entre los puntos $z_{\min 1}$ y $z_{\min 2}$ del apartado anterior. Nótese que la impedancia en los puntos $z_{\min 1}$ y $z_{\min 2}$ del apartado anterior es $\overline{Z}_L$ por hallarse a una distancia $n\frac{\lambda_g}{2}$ del plano de carga. Si se elige el punto $z_{\min 1}$ situado a la derecha de $z_{\min}$, el más cercano a la carga, tenemos el siguiente circuito a partir del cual puede calcularse el coeficiente de reflexión en la carga.





El coeficiente de reflexión en la carga y la propia impedancia de carga normalizada se obtendrán como:

$$\rho_L = -|\rho_L| e^{j2\beta\ell} \qquad \text{y} \qquad \overline{Z}_L = \frac{1+\rho_L}{1-\rho_L}$$

- **Adaptación de la carga incógnita $\overline{Z}_L$:** Para realizar la adaptación de una impedancia compleja, en general, se precisan dos elementos adaptadores ya que se ha de variar el valor tanto de su parte real como de su parte imaginaria. Sin embargo, en el estudio previo se ha visto que en el caso de que la parte real de la impedancia (o admitancia) normalizada sea cercana a la unidad la adaptación mejora en gran medida si se cancela la parte reactiva de la misma. Para mejorar la adaptación de la boca de guía se va a utilizar un diafragma inductivo como el de la figura adjunta. Como el circuito equivalente del diafragma inductivo es una admitancia reactiva (susceptacia) en paralelo, lo primero que debemos hacer es calcular el valor de la admitancia normalizada de la boca de guía a partir de su impedancia $\overline{Z}_L$ medida en el apartado anterior

$$\overline{Y}_L = \frac{1}{\overline{Z}_L} \overline{G}_L + j\overline{B}_L$$

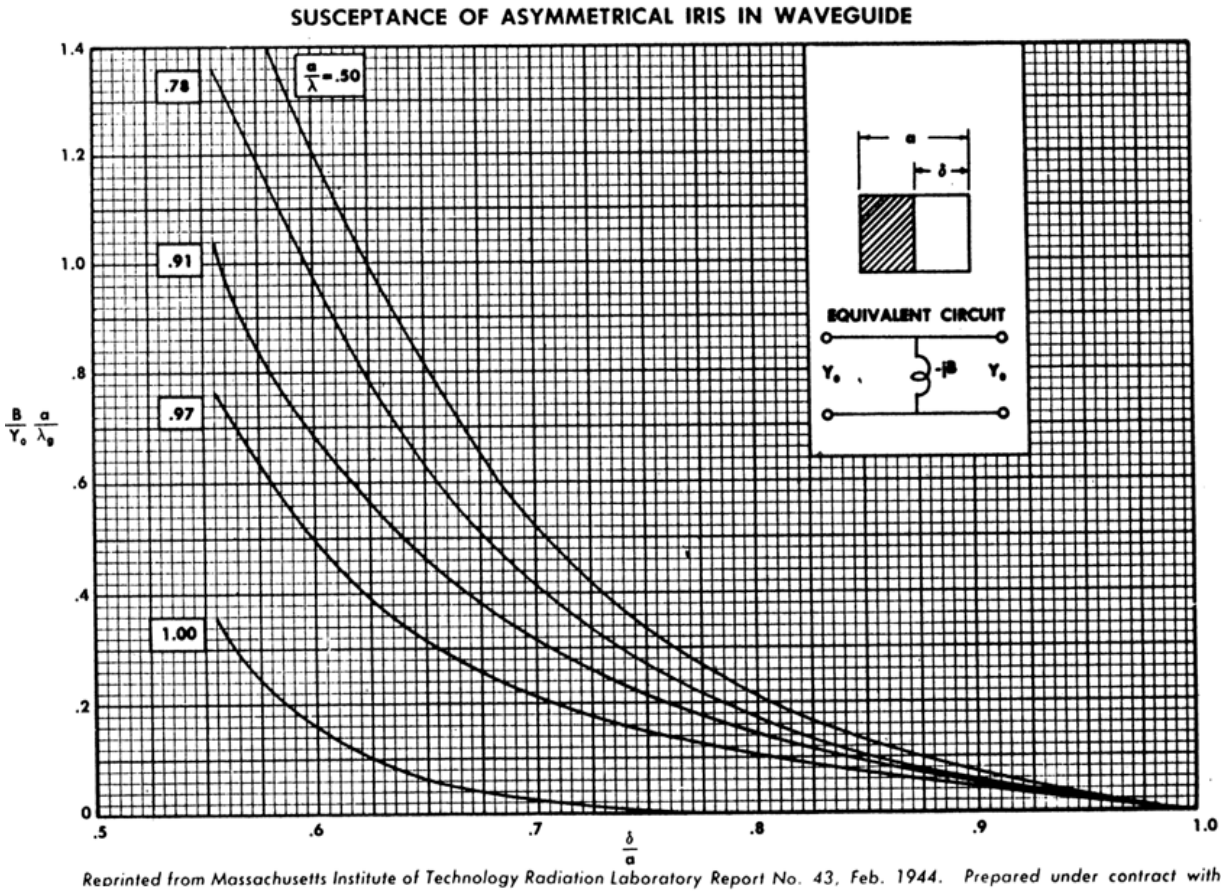
En este caso, como la parte real de la admitancia es cercana a la unidad $\overline{G}_L \cong 1$ y la parte imaginaria es capacitiva (positiva), se utilizará un diafragma inductivo para cancelar dicha parte reactiva forzando $\overline{B} = -\overline{B}_L$. Una vez conocido el valor $\overline{B}$ del diafragma, proceda de la siguiente forma para

su diseño:

- Elija la curva apropiada en la figura adjunta a partir de la frecuencia de trabajo y el parámetro a/λ. (Probablemente deberá interpolar entre las dos curvas más próximas).
- Calcule el valor del parámetro $|\overline{B}|\cdot a/\lambda_g$. Su intersección con la curva seleccionada nos dara el valor del parámetro δ/a de diseño del diafragma.

Estas operaciones han sido realizadas con anterioridad por los profesores de laboratorio, obteniendo un valor para la luz del diafragma de $\delta \cong 17\,mm$, que es el valor del diafragma disponibles en la caja de utensilios.

- Conecte el diafragma suministrado entre la boca de guía y la guía de ondas y mida la adaptación del conjunto. ¿Cuál es la mejora de adaptación, en dB, con respecto de la boca de guía sin diafragma? Anote los resultados en la hoja de respuestas
-



ESTUDIO PREVIO PRÁCTICA V. GUÍA DE ONDAS

Estos ejercicios permitirán al alumno familiarizarse con los problemas que se plantearán durante la realización de la práctica. Para algunas cuestiones puede encontrarse ayuda en el propio enunciado de la práctica. Así mismo, la metodología utilizada para resolver los problemas es muy similar, sino idéntica, a los procedimientos necesarios para la reaización de la práctica.

1. En una guía de ondas rectangular de banda X (a=22,86 mm y b=10,16 mm) se mide una intensidad máxima eficaz de campo eléctrico de $E_{0\max} = 3 \cdot 10^3 V/m$ y un mínimo de $E_{0\min} = 2{,}3 \cdot 10^3 V/m$. La separación entre dos mínimos consecutivos es de 18,22 mm.

a. Obtenga la expresión que da la frecuencia de trabajo en función de la longitud de onda del modo. Calcule la frecuencia de trabajo **en GHz**.

b. Calcule la adaptación que presenta la carga que se halla conectada a la guía expresada **en dB** (Pérdidas de retorno o "Return Loss") y la fracción de potencia incidente en la carga que se entrega a la misma, **en porcentaje,** y la potencia absoluta, **en dBm**.

2. En una guía de ondas de dimensiones a=6 cm y b=2,5 cm se mide una ROE=2,5. La separación entre dos mínimos consecutivos de campo eléctrico es de $\Delta\ell = 4$ cm. Al substituir la carga por un cortocircuito el mínimo de campo eléctrico se acerca $\ell = 3$ cm al extremo cortocircuitado.

a. Demuestre que el coeficiente de reflexión en el plano de carga viene dado por

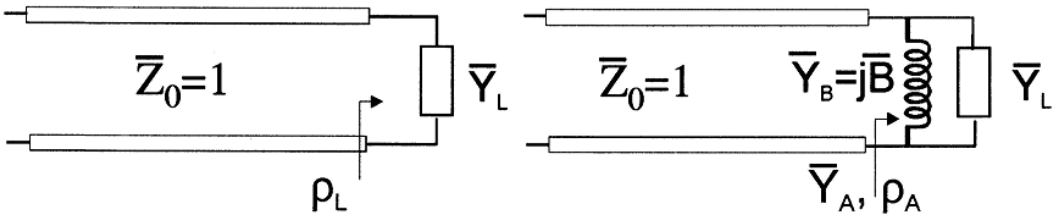
$$\rho_L = -|\rho_L| e^{2j\beta\ell} \quad \text{con} \quad |\rho_L| = \frac{ROE-1}{ROE+1} \quad \text{y} \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$$

b. Determine el valor de la admitancia de carga normalizada $\bar{Y}_L$.

3. Se conecta una bocina a una guía de ondas rectangular de dimensiones a=22,86 mm y b=10,16 mm. A la frecuencia de trabajo de 9 GHz la bocina presenta una admitancia normalizada de valor $\bar{Y}_L = 0{,}8 + j0{,}8$.

a. Calcule la adaptación (Return Loss) de la bocina, en dB.

b. Para mejorar la adaptación de la bocina a la frecuencia de trabajo se conecta en paralelo un diafragma inductivo que cancela la parte reactiva de la admitancia de carga. ¿Cuál sería en este caso la adaptación (Return Loss) del conjunto ($\bar{Y}_A$),y la mejora respecto del caso anterior (dB)?



c. Si el diafragma utilizado es similar al de la práctica, calcule el valor aproximado de la luz δ del diafragma, en cm. AYUDA: A partir del valor calculado de $\bar{B} \cdot a/\lambda_g$ obtenga el valor δ/a interpolando, de forma aproximada, entre las curvas a/λ más próximas al valor a/λ calculado.