



**Universidad de Chile**  
**Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas**  
**Departamento de Ingeniería Eléctrica**



## **Laboratorio 2**

Autores : Patricio Arzola.  
Álvaro Palma  
Profesores : Aldo Bombardiere.  
Gerardo Gómez.  
Curso : EL729 Microondas.  
Fecha : 23 de junio de 2005.

# 1 OBJETIVOS

- Dibujar diagrama de bloques del equipamiento, explicar funciones de cada parte de éste.
- Calcular longitud de onda en la guía v/s longitud de onda de espacio libre en c/u de las frecuencias.
- Calcular frecuencia de corte del modo dominante.
- Calcular frecuencia de corte del modo subdominante.
- Aplicando un factor de seguridad del 15%, especificar la banda de operación de esa guía en particular.
- Calcular impedancia de la guía a las frecuencias de operación sabiendo que  $a = 2.1\text{cms}$ .

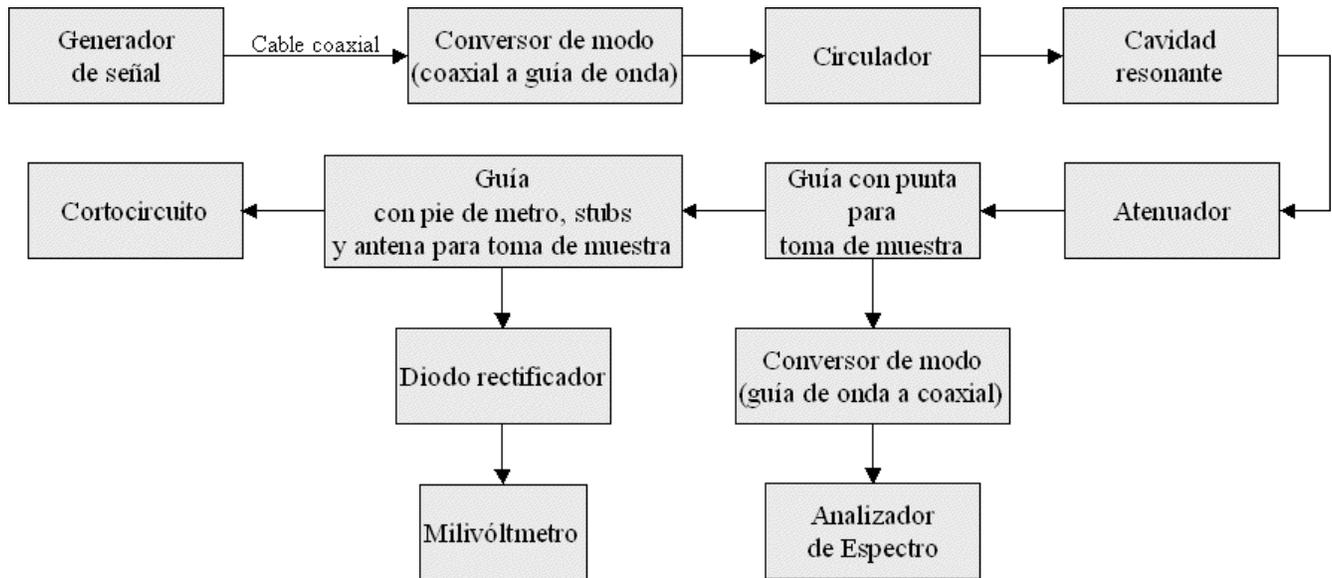
## 2 RESULTADOS

### 2.1 Diagrama de bloques del montaje.

Una imagen del sistema montado es el siguiente:



En éste, las diferentes partes que lo componen son las representadas en el siguiente diagrama de bloques:



La función de cada una de las partes de este circuito es la siguiente:

1. *Generador de señal.*

Instrumento que entrega una señal de microondas en la banda X, esto es, desde aprox. 7.2GHz hasta 10GHz.

2. *Convertor de modo (coaxial a guía de onda).*

Elemento que permite traspasar la onda que viaja en una línea de transmisión de 2 conductores (cable coaxial), en modo TEM, a una guía de onda de 1 conductor, en modo TE o TM.

3. *Circulador.*

Elemento que permite la propagación de la onda en un solo sentido, atenuando las reflexiones y con esto, desacoplando la fuente de dichas reflexiones, generando un nivel de protección frente a desadaptaciones en la guía.

4. *Cavidad resonante.*

Simulador de carga configurable a una cierta frecuencia de resonancia mediante modificación de una cavidad interna.

5. *Atenuador.*

Elemento conformado por un filo de carbono que permite limitar la potencia de la onda incidente que será traspasada al resto del sistema, cuando ésta es paralela a dicho elemento. En este caso, es utilizado para prevenir la inyección de niveles de potencia que podrían eventualmente quemar el analizador de espectro (que por norma debe recibir menos de 1Watts de potencia de entrada).

6. *Guía con punta para toma de muestra.*



Elemento que permite extraer una muestra de la señal presente en la guía de onda a través del elemento que se aprecia en su parte superior. El fabricante asegura que por norma, dicha onda extraída tendrá una potencia 20dB menor a la de la onda que continua su propagación normal en la guía, y que además, dicho elemento no generará reflexiones en la guía (es decir, actúa como una carga adaptada).

### 7. *Guía con pie de metro, stubs y antena para toma de muestra.*

Trozo de guía de contiene una antena que permite obtener una muestra de la onda que se está propagando a través de esta guía, además de un par de cortocircuitos regulables o “stubs” que permiten modificar la impedancia de carga vista por esta guía, y con ello, investigar los diferentes escenarios de propagación de ondas en la guía frente a diferentes tipos de cargas. Cuenta además con un pie de metro que permite medir la distancia entre distintos valores de voltaje de la onda, con el fin de estimar la longitud de ésta.

### 8. *Cortocircuito.*

Trozo de metal que permite crear la situación de propagación de un onda en una guía cuya impedancia de carga es nula.

### 9. *Convertor de modo (guía de onda a coaxial).*

Elemento de función inversa al convertor de modo coaxial a guía de onda, permite transferir la onda que se propaga en la guía, en modo TE o TM, a modo TEM propagado a través de una línea de transmisión de 2 conductores, en este caso, un cable coaxial.

### 10. *Analizador de espectro.*

Instrumento que permite apreciar en detalle el espectro de potencia de la onda presente en el sistema con respecto a la frecuencia.

### 11. *Diodo rectificador.*

Semiconductor que permite transformar los valores de voltaje, originalmente en el rango  $[-V_{\max} \dots +V_{\max}]$  al rango  $[0 \dots +V_{\max}]$ , y con ello, alimentar al milivóltmetro de corriente continua.

### 12. *Milivóltmetro.*

Instrumento que permite medir el valor RMS del voltaje de la onda propagada a través de la guía de onda, gracias a la rectificación hacia corriente “pseudo-continua” realizada por el diodo de la etapa previa.

## 2.2 Longitud de onda en la guía v/s longitud de onda de espacio libre.

La longitud de un onda en espacio libre viene dada por la relación

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

donde:

$\lambda$  = Longitud de la onda.

$$c = \text{Velocidad de la luz en el vacío } c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 299792458 \left[ \frac{\text{mts}}{\text{s}} \right]$$

$$f = \text{Frecuencia de oscilación de la onda en el tiempo.}$$

Las mediciones realizadas sobre la guía de onda entregaron los siguientes resultados:

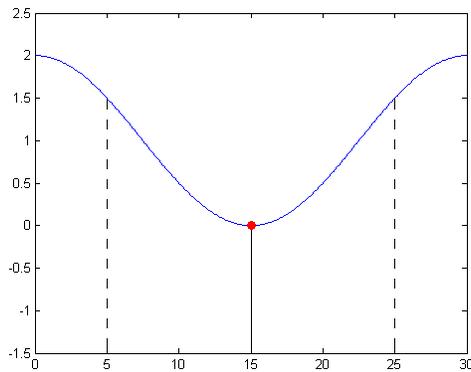
<b>Medición directa de mínimo</b>		
<b>Frecuencia (GHz)</b>	<b>Máximo 1</b>	<b>Máximo 2</b>
9.602	11.5	13.25
10.003 (medición 1)	9.97	11.95
10.003 (medición 2)	13.91	15.95

<b>Medición indirecta de mínimo (midiendo 2 valores y promediando)</b>			
<b>Frecuencia [GHz]</b>	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Promedio</b>
10.003 (medición 3)	9.61	10.34	9.975
10.003 (medición 4)	9.53	10.43	9.98
10.003 (medición 5)	9.68	10.35	10.015
10.003 (medición 6)	11.69	12.24	11.965
10.003 (medición 7)	13.57	14.35	13.96

La teoría de líneas de transmisión y guías de onda señala que, en una situación de impedancia de carga nula (es decir, un cortocircuito a la salida) la posición de 2 máximos o mínimos sucesivos equivale a la mitad de la longitud de la onda que se propaga en dicha guía o línea. Es por este motivo que a partir de estas mediciones podemos estimar la longitud de onda para esas frecuencias de operación.

<b>Frecuencia [GHz]</b>	<b>Longitud de onda en la guía [cms]</b>	<b>Longitud de onda en espacio libre [cms]</b>
9.602	3.5	3.122
10.003 (Medición 1)	3.96	2.997
10.003 (Medición 2)	4.08	2.997
10.003 (Medición 6 v/s medición 5)	3.9	2.997
10.003 (Medición 7 v/s medición 6)	3.99	2.997

El método directo consiste en medir la posición del mínimo o máximo valor marcado por el milivóltmetro, mientras que el método indirecto consiste en la medición de la posición de 2 valores cualquiera de voltaje, pero iguales entre sí. Asumiendo que la onda tiene forma sinusoidal en el espacio (y es por tanto, simétrica), es posible determinar que la posición del máximo (o mínimo) necesariamente será el punto medio entre estos dos puntos de igual valor. Por ejemplo, en la figura, en lugar de medir la posición donde el voltaje es nulo (posición 15), se miden las posiciones donde el voltaje es 1.5 (posiciones 5 y 25) y se estima la posición del voltaje mínimo como el promedio de esas dos mediciones (lo que lleva a idéntico resultado que en la medición directa, posición 15).



Este método suele ser más preciso que el método directo, pues en éste último, cualquier pequeña variación en el mínimo llevará a un error, mientras que el método directo minimiza dicho error a la mitad.

De las mediciones realizadas se puede comprobar empíricamente que la longitud de onda aumenta en la guía *c/r* a idéntica frecuencia en espacio libre.

### 2.3 Frecuencia de corte del modo dominante.

Se define como frecuencia de corte del modo dominante la mínima frecuencia a la cual la guía propagará una onda electromagnética, esto es, la mínima frecuencia a la cual el coeficiente de propagación en la guía:

$$\beta = \sqrt{k_0^2 - k_c^2}$$

se vuelve real, con lo cual, la solución de onda propuesta para la guía, de la forma  $K \cdot e^{j\beta z}$  es efectivamente compleja, lo que representa una solución ondulatoria válida. En efecto, si dicho factor es complejo (es decir, si  $k_c^2 > k^2$ ), la solución  $K \cdot e^{j\beta z}$  será real y de la forma  $K \cdot e^{-\beta z}$  (dado que  $\beta$  en esa situación será un complejo, y puede reescribirse como  $j\beta'$ , con  $\beta' = \sqrt{k_c^2 - k^2}$ ), lo que representa, en lugar de una solución de onda propagatoria, una atenuación, y por tanto, toda onda introducida en la guía que cumpla  $k_c^2 > k^2$  no será transmitida, sino que será rápidamente atenuada. Por tanto, se define la frecuencia de corte aquélla en que:

$$k_0^2 = k_c^2$$

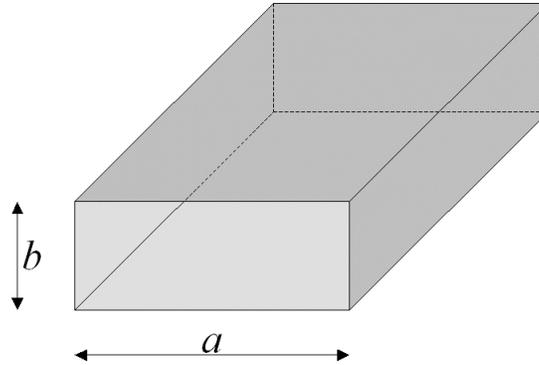
donde  $k_0$  es la constante de propagación en espacio libre a dicha frecuencia,  $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \equiv \frac{\omega}{c}$ .

En el caso de una guía de onda rectangular como la utilizada en esta experiencia, la constante de propagación de la onda es puramente dependiente de las dimensiones de la guía, y queda determinada por<sup>1</sup>:

<sup>1</sup> Para mayores detalles, consultar bibliografía.

$$k_c = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2}$$

donde  $a$  y  $b$  son las dimensiones transversales de la guía de onda:



Además, dada la forma de la solución de onda que se obtiene para esta guía, la mínima frecuencia a la cual ocurrirá propagación (o *frecuencia de corte*) corresponde a la asociada al modo  $TE_{10}$  (esto es,  $e_z = 0$ , la solución de campo eléctrico es puramente transversal, y además,  $n = 1, m = 0$ ). Analíticamente, y tomando en consideración las dimensiones de la guía ( $a \approx 2.1[\text{cms}]^2$ ), se tiene que:

$$\beta_{corte} \geq 0 \Rightarrow k_0 = k_c \Rightarrow \frac{2\pi \cdot f_{corte}}{c} = \frac{\pi}{a} \Rightarrow f_{corte} = \frac{c}{2a} [\text{Hz}] = \frac{29979245800 \left[ \frac{\text{cms}}{\text{s}} \right]}{4.2[\text{cms}]} = 7.13791567[\text{GHz}]$$

Por otra parte, mediante el uso del analizador de espectro se mide experimentalmente que la frecuencia de corte de la guía es de 7.22864GHz. La diferencia entre ambos valores se deba probablemente a la inexactitud en la medición de  $a$ . Haciendo el cálculo reverso (obtención de  $a$  a partir del conocimiento de la frecuencia de corte del modo 10) se llega a que  $a = 2.074[\text{cms}]$ .

## 2.4 Frecuencia de corte del modo subdominante.

Se conoce como modo subdominante al modo que se propaga a la segunda frecuencia más baja, lo cual, de acuerdo a la teoría de guías de onda. La frecuencia de corte del modo  $nm$  vendrá dada por (tanto en propagación  $TE$  como  $TM$ ):

$$fc_{nm} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2}$$

Cabe hacer notar que en el caso de la onda  $TM$  no hay propagación en el modo  $10$ , pues la solución de campo para la componente axial de  $\vec{E}$ ,  $e_z$  en dicho caso es de la forma:

<sup>2</sup> No se contaba con instrumento para medir con precisión dimensiones de la guía., por eso, se estima esa medida en ese valor.

$$e_z = A_{nm} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_{nm}z}$$

la cual será invariablemente nula para  $n = 0$  ó  $m = 0$ .

De estos datos, es posible concluir que la segunda frecuencia de corte más baja corresponde al modo 11 En el caso de la guía en cuestión, y suponiendo la dimensión de  $b$  aproximadamente  $0.9[\text{cms}]^3$ , dicha frecuencia será, teóricamente de  $13.066947791[\text{GHz}]$

## 2.5 Banda de operación de la guía.

Se define como banda de operación de la guía a aquélla que comprende las frecuencias limitadas inferiormente por la frecuencia de corte del modo dominante, y superiormente por la frecuencia de corte del modo subdominante, y en la cual, por tanto, sólo se propagará una onda, correspondiente al modo dominante.

Con el fin de otorgar un margen de seguridad, dicha banda es considerada agregando un 15% de holgura a ambas frecuencias límites. Con esto, la banda queda definida por:

$$f \in [1.15 \times f_{md} \dots 0.85 \times f_{msd}]$$

$f_{md}$  = Frecuencia de corte del modo dominante.

$f_{msd}$  = Frecuencia de corte del modo subdominante.

En el presente caso, dados los valores obtenidos para esas frecuencias dadas las dimensiones de la guía y los modos que en ella se propagan, y tomando en consideración los rangos de seguridad deseados, esta banda debe ser acotada por las frecuencias:

$$f \in [8.21 \dots 11.36][\text{GHz}]$$

La guía de onda utilizada presenta como rangos de operación  $f \in [8 \dots 12][\text{GHz}]$ . Ello puede explicarse en que el rango de seguridad considerado por el fabricante es de 10% en lugar del 15% considerado en este caso.

## 2.6 Impedancia de la guía a las frecuencias de operación.

De acuerdo a la teoría, la impedancia de una guía de onda en el modo  $TE_{nm}$ , que es el modo en estudio en el presente caso (en particular el modo  $TE_{10}$  por ser el modo que se propaga a menor frecuencia en la guía, y por tanto, el más comúnmente usado) viene dada por la expresión:

$$Z_{TE_{nm}} = \frac{k_0}{\beta_{nm}} Z_0$$

<sup>3</sup> No se contaba con instrumento para medir con precisión dimensiones de la guía., por eso, se estima esa medida en ese valor.

donde

$k_0$  = Constante de propagación en espacio libre.

$\beta_{nm}$  = Constante de propagación en la guía en modo  $nm$ .

$Z_0$  = Impedancia de espacio libre  $Z_0 = 120\pi = 377[\Omega]$ .

En el caso en estudio, interesa conocer el modo  $TE_{10}$ . A las frecuencia de operación estudiados, los valores de la impedancia para este modo son:

<b>Frecuencia [GHz]</b>	$k_{c10}$ <b>de la guía</b> $\left[\frac{1}{cms}\right]$	$\beta_{10} = \sqrt{k_0^2 - k_{c10}^2}$ $\left[\frac{1}{cms}\right]$	<b>Impedancia de la guía <math>[\Omega]</math></b>
9.602	1.495	1.346	418.733
10.003	1.495	1.468	383.934

Estas medidas son consistentes con la realidad, pues mientras más cercana es el valor de la frecuencia a la frecuencia de corte, el valor de la impedancia de la guía aumenta, llegando teóricamente a un valor infinito para la frecuencia de corte, lo que puede ser interpretado como una imposibilidad de la guía de transmitir ondas a dicha frecuencia o a frecuencias inferiores a ella.

### 3 CONCLUSIONES

La experiencia realizada permitió conocer in situ el comportamiento de una guía de onda, interpretar los datos provistos para ella por el fabricante, ver el funcionamiento y operación básica de un analizador de espectro así como interpretar la información entregada por este instrumento. Además, permitió comprobar lo apropiado de los modelos existentes con respecto al fenómeno de propagación de ondas electromagnéticas en guías de ondas, mediante la comparación de resultados experimentales con valores teóricamente esperados, lo que se aproximaron bastante como para afirmar que dichas teorías son adecuadas para describir dicho fenómeno.

## 4 BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Collins, **“Foundations for Microwave Engineering”**, *Chapter 3, “Transmission Lines and Waveguides”*, McGraw-Hill International Editions, Electrical Engineering Series, Second Edition, pp. 71-219, 1992.