

## Propagación de la energía electromagnética

### Objetivo

- Conocer las características de los equipos de medición del laboratorio.
- Observar que la energía electromagnética radiada por una antena se propaga y atenúa en el espacio.
- Observar los fenómenos de reflexión y refracción de ondas electromagnéticas.
- Caracterizar algunos materiales encontrando (experimentalmente) su índice de refracción.

### Trabajo Previo

- 1) Investiga los conceptos de decibel (dB) y de dBm, y explica para qué se utilizan. Sugerencia: Visita y lee la página Web <http://www.eveliux.com/fundatel/decibel.html>
- 2) Escribe la "ley de Snell" para reflexión y refracción de ondas electromagnéticas, y explica su significado.

### Material y equipo

- 1) Agua y glicerina.
- 2) Analizador de espectros.
- 3) Antenas.
- 4) Apuntador laser.
- 5) Contenedores de cristal.
- 6) Generador de funciones.
- 7) Regla

### Introducción

#### Propagación de la energía electromagnética

La energía electromagnética existente en el espacio que conocemos se encuentra en constante cambio y movimiento. El movimiento natural de la energía es aprovechado en diversas aplicaciones de Ingeniería en Telecomunicaciones, que montan información en paquetes de energía y permiten que ella viaje llevando un mensaje con ella. Por esta razón es importante para los ingenieros en telecomunicaciones poder conocer y describir la manera como la energía electromagnética se comporta al estar en el espacio.

Para describir la forma como se mueve la energía se utiliza una función llamada Densidad de Flujo de Potencia ( $\vec{S}$ ), misma que asocia a cada punto del espacio un vector, cuya magnitud es igual al número de joules por unidad de superficie que pasan por el punto cada segundo, y cuyo sentido y dirección indican hacia donde se mueve la energía que pasa por él.

La regla de correspondencia de la función  $\vec{S}$  puede ser determinada de forma teórica, si se conocen las distribuciones de carga ( $\rho$ ) y corriente ( $\vec{J}$ ) que dan pie a la energía electromagnética en el espacio. Para hacer esto, primero se determinan los campos eléctricos ( $\vec{E}$ ) y magnético ( $\vec{H}$ ), y después se calcula  $\vec{S}$  con la relación:  $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ . En su forma más simple, la energía electromagnética viaja como una serie de paquetitos semiesféricos consecutivos, como se ilustra en la Figura 1. Algunas características de la energía en movimiento son: la dirección de propagación, amplitud, frecuencia y longitud de onda.

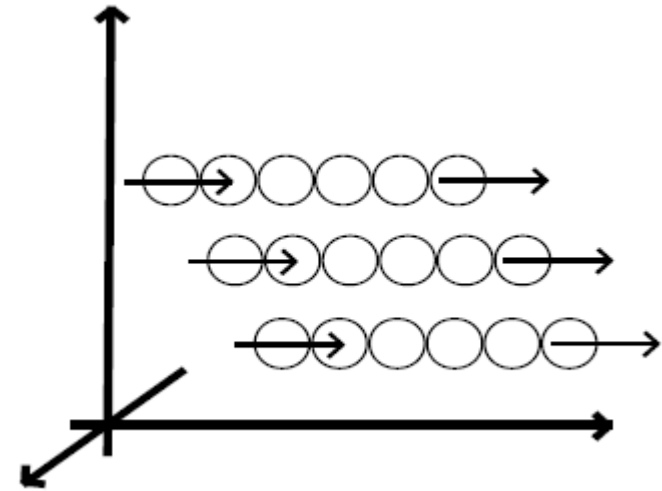


Figura 1: Ilustración de paquetes de energía en movimiento

#### Frecuencia, longitud de onda y velocidad

Si consideramos una serie de paquetes de energía pasando por un punto fijo del espacio, la frecuencia ( $f$ ) es un número asociado al flujo de energía, igual a la mitad del número de paquetes que pasan por el punto cada segundo. La longitud de onda, por el otro lado, es el doble de la longitud de los paquetes de energía.

La frecuencia y la longitud de onda nos permiten conocer la velocidad a la que se mueve la energía en un medio. Esta velocidad está dada por la relación:  $v = f\lambda$ . En el caso del vacío y el aire, la velocidad de propagación de la energía es  $c = 3 \times 10^8$  [m/s] por lo que podemos decir que  $\lambda$  y  $\omega$  están relacionados por:  $\lambda = c/f$ .

Como ejemplos podemos considerar la señal radiada por una estación de FM, cuya frecuencia está entre 88 y 108 MHz ( $\lambda \sim 30$  m) o la luz radiada por un apuntador laser que tiene una frecuencia de  $\sim 10^{14}$  Hz ( $\lambda \sim 1$   $\mu$ m). Todo el espacio en que vivimos está lleno de energía en movimiento; misma que se mueve en todas direcciones, y con prácticamente todas las frecuencias y longitudes de onda que podamos imaginar. El movimiento de paquetes con una frecuencia no afecta al movimiento de paquetes de otras frecuencias tal como se puede ver en la Figura 2.

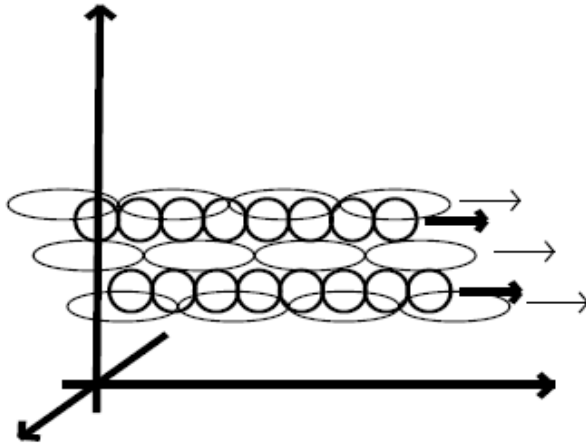


Figura 2: Ilustración de series de paquetes de energía con diferentes frecuencias

**Caracterización del espacio**

Como se menciona antes, la velocidad con que se mueve la energía depende del material en que se propaga. Para caracterizar la interacción de la energía y el material, y poder así definir como se propaga la energía en él, se utilizan dos variables características del medio: la permitividad ( $\epsilon$ ) y la permeabilidad ( $\mu$ ). Estas variables son números reales que satisfacen la ecuación:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

En el caso del vacío y el aire, los valores de permitividad y permeabilidad son:

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  y  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ . Por conveniencia, la permitividad y permeabilidad de otros materiales frecuentemente se expresa en términos de  $\epsilon_0$  y  $\mu_0$ , con la permitividad relativa ( $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ) y la permeabilidad relativa ( $\mu = \mu_r \mu_0$ ).

Cuando la frecuencia del flujo de energía esta dentro del rango de frecuencias visible ( $\sim 10^{14}$  Hz) en lugar de caracterizar a los materiales con  $\mu$  y  $\epsilon$ , la literatura de ingeniería frecuentemente utiliza el *índice de refracción*:

$$\eta = c\sqrt{\mu\epsilon}$$

**Equipos de medición<sup>1</sup>**

En el laboratorio se usará los siguientes equipos: medidor de potencia, generador de señales y medidor de potencia. A continuación se describe brevemente el uso de éstos equipos:

<sup>1</sup> Todos los datos de los equipos se obtuvieron de los manuales correspondientes.

**Medidor de potencia**

El medidor de potencia HP 437B mide potencias en el rango de  $-70$  a  $+44$  dBm sobre un rango de frecuencias que va de los 100 kHz a los 50 GHz. Mediante el uso del sensor HP 8480. En la figura 2 se puede ver el medidor.



Figura 3. Medidor de potencia HP 437B

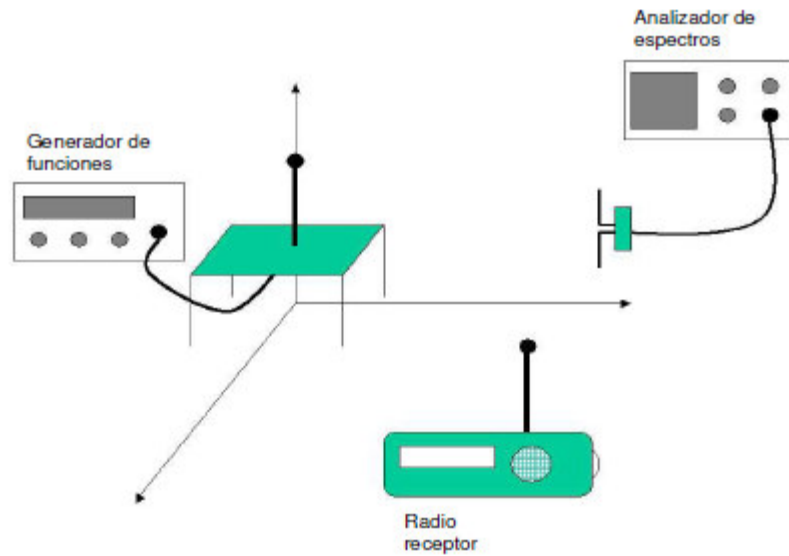
Antes de realizar cualquier medición es necesario que el equipo este a temperatura ambiente; una vez que se logra este punto es necesario calibrar el equipo. De manera general el equipo se calibra siguiendo los siguientes pasos:

1. Conectar el sensor de potencia en la terminal "POWER REF"
2. Apretar el botón ZERO (espere a que la rutina finalice)
3. Apretar los botones CAL (SHIFT + ZERO)
4. Ingresar el facto de calibración correspondiente
5. Apretar el botón ENTER (espere a que la rutina finalice)

Para conocer la forma en cómo usar el generador de funciones y el analizador de espectros es necesario referirse al manual de usuario, el cual proporcionará el profesor.

**Desarrollo**

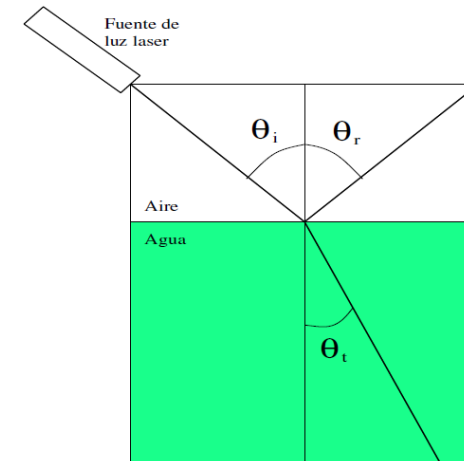
Con el generador de funciones alimente una antena, tal como se muestra en la siguiente figura, con la frecuencia de una estación de radio e incremente la potencia alimentada a la antena hasta que interfiera a la estación. **Pregunta 1.**



Sistema para interferir con una estación de radio.

Utilizando el generador de funciones, el analizador de espectros y una antena de prueba, observe y mida la potencia recibida conforme varía la distancia entre la antena receptora y la antena transmisora. **Pregunta 2, Pregunta 3**

Llena un recipiente de cristal con agua. Usando la configuración mostrada en la siguiente figura coloque el apuntador laser en el borde del recipiente y muévelo hasta que obtenga tres haces. **Pregunta 4, Pregunta 5**



Experimento para medir ángulos de incidencia, reflexión y transmisión

Repita el experimento anterior pero ahora use glicerina. **Pregunta 6**

### Cuestionario

1. Explica porqué se puede interferir una señal de radio; estime magnitud debe ser la señal transmitida (en watts) para que interfiera la recepción en el radio.
2. Explique cómo varía la potencia recibida en función de la distancia.
3. Grafique la potencia recibida (en watts) vs la distancia entre las antenas (en metros).
4. Determina los ángulos de incidencia, reflexión y transmisión de la interfaz aire-agua.
5. Calcula los siguientes valores: Permitividad relativa del agua e Índice de refracción del agua
6. Calcula los siguientes valores: Permitividad relativa del agua e Índice de refracción de la glicerina.
7. Investiga en una tabla los valores teóricos de los índices de refracción y permitividades relativas del agua y la glicerina. Compara los resultados obtenidos experimentalmente y explica las diferencias entre ellos.