

_____ Guía de Trabajo

Propagación y Radiación Electromagnética

Guía de Trabajo
Propagación y Radiación Electromagnética
Código: ASUC00689

Primera edición digital
Huancayo, 2022

De esta edición

© Universidad Continental, Oficina de Gestión Curricular
Av. San Carlos 1795, Huancayo-Perú
Teléfono: (51 64) 481-430 anexo 7361
Correo electrónico: recursosucvirtual@continental.edu.pe
<http://www.continental.edu.pe/>

Cuidado de edición
Fondo Editorial

Diseño y diagramación
Fondo Editorial

Todos los derechos reservados.

La *Guía de Trabajo*, recurso educativo editado por la Oficina de Gestión Curricular, puede ser impresa para fines de estudio.

Índice

Presentación	4
Primera unidad: Propagación de ondas electromagnéticas planas uniformes sustentado en las leyes de Maxwell en forma compleja armónica en el tiempo	5
Laboratorio 1: Elementos electromagnéticos	6
Laboratorio 2: Electromagnetismo	13
Segunda unidad: Modos de propagación y guías de ondas de sección rectangular mediante la resolución de problemas sustentados en las leyes de Maxwell en forma compleja armónica en el espacio-tiempo	18
Laboratorio 3: Reflexión y refracción de ondas electromagnéticas	19
Laboratorio 4: Introducción a guías de onda y ondas estacionarias	25
Tercera unidad: Líneas de transmisión de dos conductores y fundamentos de comunicación vía satélite	32
Laboratorio 5: Energía electromagnética en movimiento	33
Laboratorio 6: Ganancia de antenas y líneas ranuradas	41
Cuarta unidad: Radiación y propagación de las ondas electromagnéticas relacionadas	47
Laboratorio 7: Patrones de radiación y polarización	48
Laboratorio 8: Antenas para microondas: patrón de radiación	57

La asignatura de especialidad es de naturaleza teórico-práctico y es importante porque permite al finalizar la asignatura, en un nivel intermedio desarrollar las Los alumnos adquieren un conocimiento de la teoría electromagnética basada en las ecuaciones de Maxwell y también una visión práctica y de aplicación. El presente manual pretende cubrir la visión práctica al presentar una serie de experimentos y ejercicios prácticos para que los alumnos puedan profundizar en su conocimiento del electromagnetismo aplicado.

Para ello, se han organizado los contenidos en cuatro unidades que corresponde a la temática prevista en el sílabo, este material comprende las guías de laboratorio a trabajar en la parte práctica de la asignatura.

El presente manual es importante dado que su lectura permitirá al estudiante llegar con información y conocimiento previo para el desarrollo de las actividades y entrega de productos académicos previstos en la evaluación de la asignatura.

Confío en la lectura desde un enfoque crítico y académico y quedo atento a sus comentarios y recomendaciones al presente material de estudio.

El autor

Primera unidad

Propagación de ondas electromagnéticas planas uniformes sustentado en las leyes de Maxwell en forma compleja armónica en el tiempo



Laboratorio 1: Elementos electromagnéticos

Sección: Apellidos y nombres:

Docente: Alberto Sergio Tejada Rojas Fecha: / / 2022 Duración:

Instrucciones: Lea y desarrolle lo solicitado.

I. Objetivo

- Determinar y comprender la relación existente entre las fuerzas magnéticas y las fuerzas gravitacionales.
- Identificar la relación entre fuerzas eléctricas y fuerzas magnéticas, así como las condiciones físicas necesarias para que estos interactúen.

II. Introducción

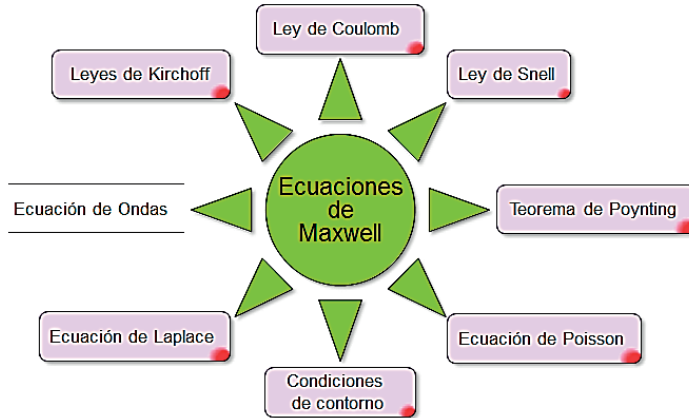
Teoría electromagnética

¿Qué describen las ecuaciones de Maxwell?

ECUACIONES DE MAXWELL

- Describen cómo varían los campos eléctricos E y magnéticos H en el espacio y en el tiempo.
 - El físico escocés James C. Maxwell (U. de Cambridge, 1865) no descubrió estas ecuaciones, sino que las juntó. Son, en realidad, 4 leyes sobre fenómenos eléctricos y magnéticos.
 - Predicen la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan en el espacio libre a la velocidad de la luz, predicción confirmada por Heinrich Hertz (Escuela Politécnica de Karlsruhe) quien las generó y detectó en 1887.
-

A partir de estas ecuaciones, se determinan numerosas leyes y teoremas de importancia en:



- Electrostática.
- Magnetostática.
- Electromagnetismo.
- Teoría de Circuitos
- Óptica.

El campo magnético

Los campos magnéticos generalmente son representados por líneas de flujo magnéticas.

En cualquier punto, la dirección del campo es la misma que la dirección del flujo y la fuerza del campo magnético es proporcional al espacio entre las líneas de flujo.

En los extremos del imán, donde las líneas de flujo están más juntas, el campo magnético es más fuerte. Dependiendo de las formas



y fuerzas magnéticas, diferentes tipos de magnetos producen diferentes patrones de líneas de flujo.

Cuando la portadora cargada se mueve a través de un campo magnético, siente una fuerza que es ortogonal a la partícula cargada y al campo. Ya que la fuerza es siempre perpendicular a la velocidad de la partícula cargada, la partícula en el campo se mueve siguiendo una ruta curva.

Con base en este principio se usan los campos magnéticos como aceleradores de partículas y espectrómetros de masa. La clasificación de materiales magnéticos (diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos, antiferromagnéticos superparamagnéticos) está basada en el comportamiento de los materiales al reaccionar al campo magnético.

III. Investigación previa

Investigar las características de los materiales diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos, antiferromagnéticos y superparamagnéticos, y algunas aplicaciones de ellos.

www.youtube.com/watch?v=kx20kG6m-JA

www.youtube.com/watch?v=ini1RDN7VzQ

IV. Material

- 2 imanes
- Tubos de plástico y de cobre.
- Brújula.

- Cronómetro.
- Bobina de alambre.
- Amperímetro

V. Desarrollo

1. Deslizar, como se muestra en la gráfico 1, el imán a lo largo de un tubo inclinado de plástico, tome el tiempo de su desplazamiento, coloque una brújula debajo del tubo inclinado y observe el efecto que produce el imán sobre las mismas al arrojar el imán con distintas polaridades. Repita el experimento utilizando un tubo de cobre y observe las diferencias.

Pregunta 1

¿En qué tubo se desliza más rápido?

Pregunta 2

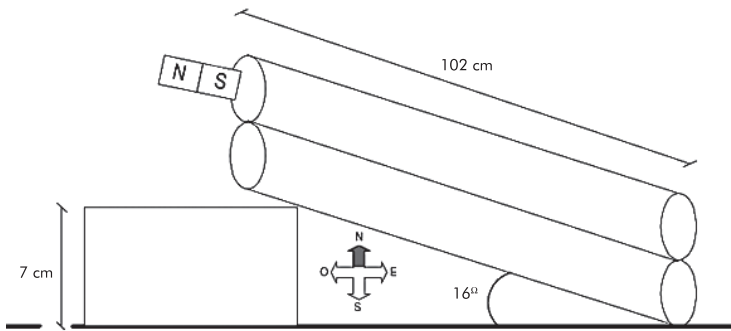
¿Qué efecto se produce en la brújula?

Pregunta 3

Calcule experimentalmente con el apoyo de un diagrama de cuerpo libre

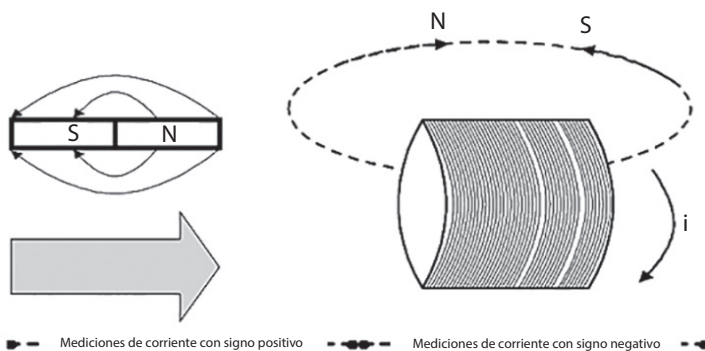
- i. Aceleración en ambos tubos.
- ii. Fuerza gravitacional que produce el movimiento en ambos tubos.
- iii. Fuerza magnética en el tubo de cobre.

Figura 1



2. Pase el imán con cierta polaridad en dirección perpendicular cableado, cruzando el centro de una bobina, hecha con alambre de cobre. Observe el efecto que se produce en la medición de la corriente. Posteriormente regrese el imán a su posición inicial cruzando nuevamente el centro de la bobina. Repita el experimento utilizando el imán en distinta polaridad. Haga varias repeticiones del experimento variando la velocidad de movimiento en el imán.

Figura 2



Pregunta 5

¿Cuál es el efecto producido en el amperímetro al acercar y alejar el imán?

Pregunta 6

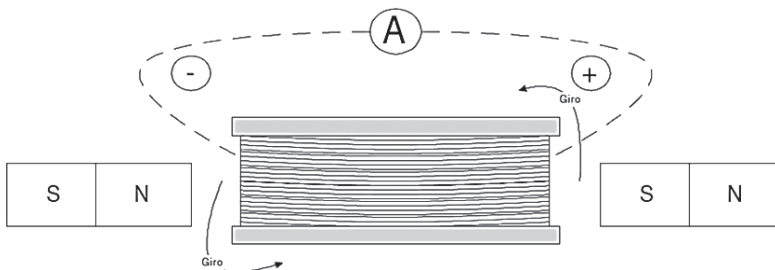
¿Qué diferencias se presentan al variar la polaridad del imán?
 ¿Y al variar la velocidad a la que se mueve el imán?

Pregunta 7

¿Qué sucede al cruzar el centro de la bobina y por qué?

3. Se tiene una bobina de diámetro pequeño y dos imanes de la misma intensidad. Haga circular corriente en la bobina colocándola entre los dos imanes, como se muestra en la gráfico 3.

Figura 3



Pregunta 8

¿Qué tipo de efecto se produce en la bobina?

Pregunta 9

¿Qué influencia tiene el colocar los imanes con distinta polaridad sobre la bobina?

VI. Conclusiones y recomendaciones

VII. Referencias

Cheng, David K. *Field & Wave Electromagnetics*, Addison Wesley, segunda edición, 1992.

Laboratorio 2: Electromagnetismo

Sección: Apellidos y nombres:

Docente: Alberto Sergio Tejada Rojas Fecha: / / 2022 Duración:

Instrucciones: Lea y desarrolle lo solicitado.

I. Objetivos

Identificar la relación entre fuerzas eléctricas y fuerzas magnéticas, así como las Condiciones físicas necesarias para que estas interactúen.

II. Introducción

APORTE AL CONOCIMIENTO – ECUACIONES DE MAXWELL

Aporte	Consecuencia
<p>1. De la hipótesis de la corriente de desplazamiento se desprende que un cambio en el campo E induce un campo H. Además, se sabe de los trabajos de Faraday que un cambio en el campo H induce un campo E. De esta manera, los fenómenos eléctricos y magnéticos adquieren una simetría perfecta.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Si en alguna región del espacio existe un campo E que varíe con el tiempo, tiene que existir simultáneamente el otro campo, el H. Los dos campos deben existir al mismo tiempo, es decir, debe existir el campo electromagnético. • En el caso estacionario, que no depende del tiempo, puede existir un campo sin que exista el otro. Por ejemplo, el campo H producido por un imán es constante en el tiempo y no lleva un campo E.
<p>2. Maxwell encontró que cada uno de los dos campos debe satisfacer una ecuación que resultó tener la misma forma matemática que la ecuación de onda, la que describe la propagación de ondas mecánicas como la que se propaga en un cable, en un estanque, en el sonido, etc. Esto significa que si en un instante el campo E tiene un valor determinado en un punto del espacio, en otro instante posterior, en otro punto del espacio, adquirirá el mismo valor. Lo mismo ocurre con el campo H.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Los campos E y H se propagan en el espacio, y como no pueden existir separadamente, el campo electromagnético es el que realmente se propaga, en forma de onda electromagnética, conocida como onda de radio. • Las ecuaciones predicen el valor de la velocidad con la que se propaga el campo electromagnético, que resulta ser igual a la velocidad de la luz. Este resultado se obtiene de una combinación de valores de cantidades de origen eléctrico y magnético. • Existen razones para concluir que la luz, ya fuera de una vela, del sol o del foco, es una onda electromagnética que se propaga de acuerdo con las leyes del electromagnetismo.

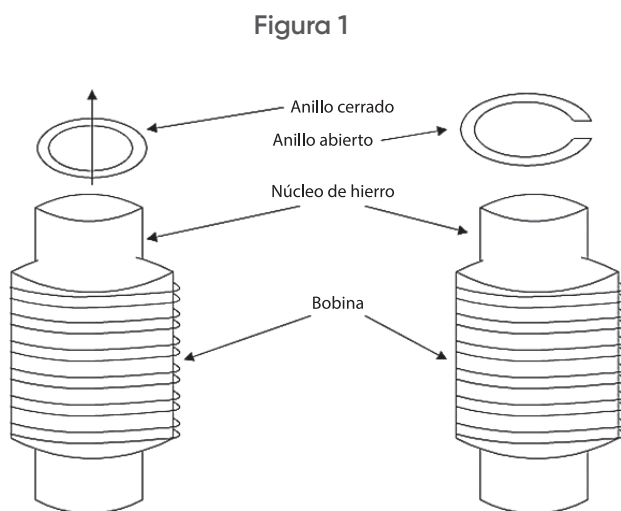
III. Material

- Bobina con núcleo de hierro dulce.
- Fuente AC.
- Anillos metálicos abiertos y cerrados.
- Resorte de cobre.
- Discos giratorios.

IV. Desarrollo

Experimento 1

Se cuenta con una bobina que se carga con corriente alterna y que posee un núcleo de hierro dulce. El núcleo sobresale de la bobina unos 15 centímetros, se coloca un anillo metálico cerrado alrededor del núcleo. Encienda la bobina y observe qué sucede. Ahora coloque un anillo metálico no cerrado y observe su comportamiento.



Pregunta 1

¿Qué fuerza está presente en el sistema de anillo cerrado cuando la bobina está apagada?

Pregunta 2

En el mismo sistema, ¿Qué ocurre primero, un campo magnético o un flujo de corriente eléctrica?

Pregunta 3

¿Qué efecto se produce en el sistema con anillo abierto y a qué se debe?

Experimento 2

Repita el experimento anterior pero ahora coloque una pequeña bobina con un foco conectado a sus dos puntas. Observe el comportamiento del foco.

Pregunta 4

¿Por qué cambia la intensidad luminosa del foco al acercarlo al enrollado de cobre en la bobina?

Figura 2

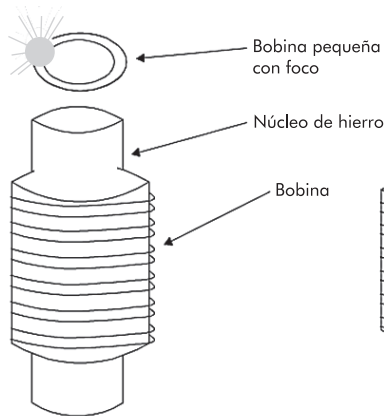
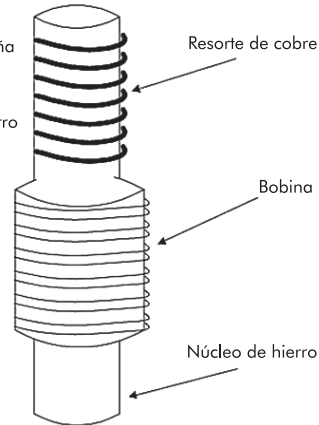


Figura 3



Experimento 3

Repita el experimento anterior pero ahora coloque un resorte de cobre alrededor del núcleo de hierro dulce de la bobina y presione el resorte. Observe su comportamiento y reporte los efectos producidos en el resorte.

Experimento 4

Coloque un disco metálico giratorio y observe el comportamiento de este al encender la bobina. Repita el experimento, pero ahora utilizando los 2 discos, de tal modo que una cara quede encima de la otra sobre el núcleo de hierro dulce.

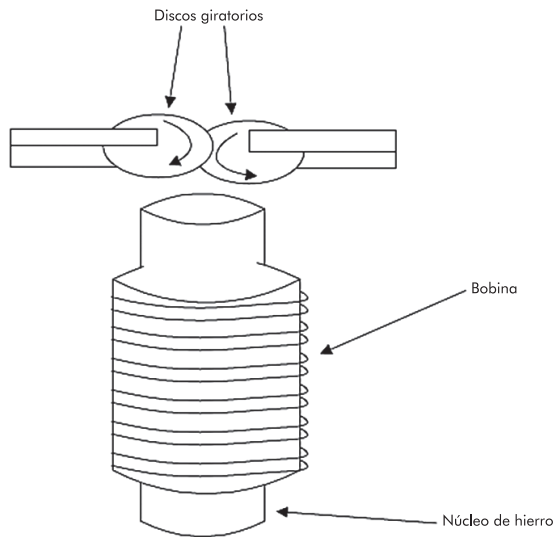
Pregunta 5

¿Qué sucede en ambos casos al encender la bobina y a que atribuye este efecto?

Pregunta 6

Dé un ejemplo práctico de circuito cerrado, abierto y semicerrado.

Figura 4



V. Conclusiones y recomendaciones

VI. Referencias

Cheng, David K. *Field & Wave Electromagnetics*, Addison Wesley, segunda edición, 1992.



Segunda unidad

Modos de propagación y guías de ondas de sección rectangular mediante la resolución de problemas sustentados en las leyes de Maxwell en forma compleja armónica en el espacio-tiempo



Laboratorio 3: Reflexión y refracción de ondas electromagnéticas

Sección: Apellidos y nombres:

Docente: Alberto Sergio Tejada Rojas Fecha: / / 2022 Duración:

Instrucciones: Lea y desarrolle lo solicitado.

I. Objetivos

- Identificar la relación entre fuerzas eléctricas y fuerzas magnéticas, así como las condiciones físicas necesarias para que estas interactúen.

II. Trabajo previo

- Investigar las fórmulas correspondientes a los coeficientes de reflexión G y de transmisión t y la relación entre ellos.
- Estudiar el fenómeno de onda estacionaria y el coeficiente SWR.
- Estudiar el fenómeno de la reflexión interna total.

III. Introducción

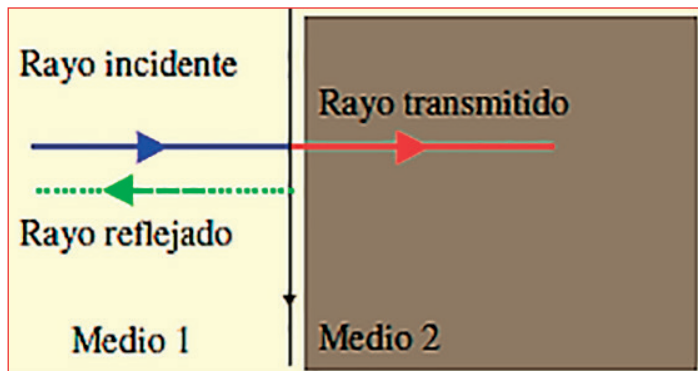
En el mundo real, la propagación de las ondas electromagnéticas se va a ver afectada por cambios de medios en los cuales se tendrán distintas características. Mientras una onda se propague por un medio homogéneo la onda viajará en línea recta sin tener “rebotes” pero en cuanto esta onda encuentre una frontera se verá afectada según los parámetros constitutivos de los medios. Los parámetros que afectan la propagación son:

Conductividad σ [S/m], impedancia intrínseca η [W], permeabilidad μ [H/m] y permitividad ϵ [F/m].

Si una onda viaja por un medio sin pérdidas ($\sigma = 0$) e incide en un medio conductor perfecto ($\sigma = \infty$) se presentará un caso de reflexión total.

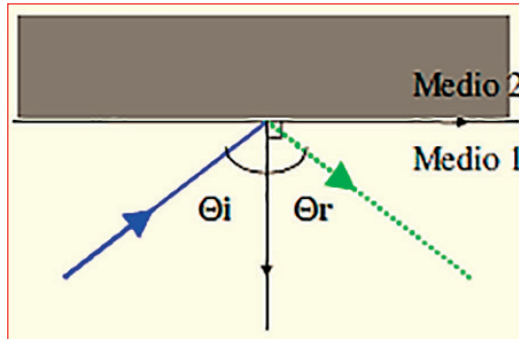
Si el medio en el que se incide no es un conductor sino un dieléctrico entonces se tendrá una reflexión parcial y una transmisión parcial como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Incidencia normal en una frontera de medios



Si la incidencia del rayo no es normal a la superficie se tendrá entonces una reflexión inclinada, pudiendo ser total si se trata de un conductor o si el ángulo de incidencia es de un cierto valor que queda dictado por las leyes de Snell. Este caso se muestra en la figura 2.

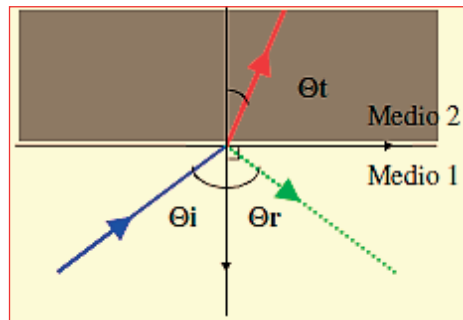
Figura 2. Reflexión en una frontera de medios.



Las leyes de Snell de reflexión y refracción están dictadas por las siguientes fórmulas:

Figura 3. Refracción en una frontera de medios

$\theta_i = \theta_r$
 $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$
 donde: n se conoce como índice de refracción y está dado por:
 $n_1 = c\sqrt{\mu_1 \epsilon_1}$
 $n_2 = c\sqrt{\mu_2 \epsilon_2}$
 θ_i ángulo de incidencia
 θ_r ángulo de reflexión
 θ_t ángulo de transmisión o refracción



Si no se trata de un conductor en el medio 2, y el ángulo de incidencia no presenta reflexión interna total entonces se tendrá una reflexión y una refracción hacia el segundo medio como se muestra en la figura 3.

IV. Material

- Recipiente de material transparente.
- Agua.
- Emisor láser.
- Transportador.
- Espejo.
- Glicerina.
- Tubos de vidrio de diferente diámetro.

V. Desarrollo

1. ¿Qué puede observar de los valores de Γ y τ si los valores de impedancias de los medios son:
 - a) $h_1 = h_2$
 - b) $h_1 < h_2$
 - c) $h_1 > h_2$?
2. Investigar el valor de σ para el aluminio y ϵ para los siguientes materiales: vidrio, glicerina, agua destilada y salada.
3. Vaciar agua dentro de un recipiente, disolver un poco de polvo de gis y colocar un espejo como se muestra en la figura 4.

Figura 4

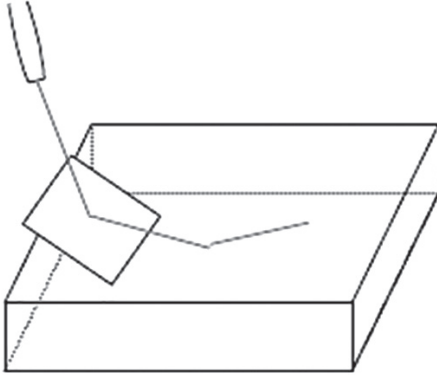
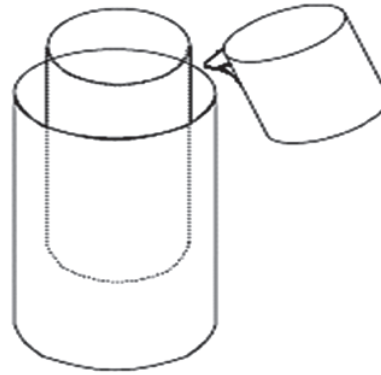


Figura 5



4. Hacer incidir un haz de luz láser en el espejo y observar los reflejos en el agua.
5. Medir los ángulos de incidencia y transmisión en la frontera aire-agua.

¿De acuerdo con los valores de n investigados, se cumple la ley de Snell?

6. Variar el ángulo de incidencia hasta que se produzca reflexión interna total en el agua.

Medir de nuevo los ángulos y verificar los valores con la ley de Snell.

7. Introducir un tubo de vidrio dentro de otro como se muestra en la figura 5.

Lentamente vaciar glicerina en el espacio que queda entre los dos tubos. Una vez que este espacio está lleno vaciar la glicerina en el tubo interior hasta la mitad del tubo.

¿Qué sucede?

¿Cómo explica este fenómeno?

VI. Conclusiones y recomendaciones

VII. Referencias

Kraus, A. *Antennas*, segunda edición, McGraw Hill.

Laboratorio 4: Introducción a guías de onda y ondas estacionarias

Sección: Apellidos y nombres:

Docente: Alberto Sergio Tejada Rojas Fecha: / / 2022 Duración:

Instrucciones: Lea y desarrolle lo solicitado.

I. Objetivo

- Conocer algunas de las características de las guías de ondas, así como algunos Elementos típicos en sistemas de comunicación con guías de onda.
- Realizar mediciones de flujo de energía.
- Observar los fenómenos de reflexión en una onda electromagnética estacionaria en un Sistema de guías de onda.

II. Trabajo previo

1. Investigar que son los modos TE y TH de propagación dentro de una guía de onda.
¿En qué se diferencian estos del modo TEM?
2. ¿Qué es la frecuencia de corte para una guía de onda?
3. Investigar los valores de VSWR de los siguientes equipos comerciales:
 - a) Antenas de microondas de rejilla.
 - b) Antenas de microondas de alto desempeño.

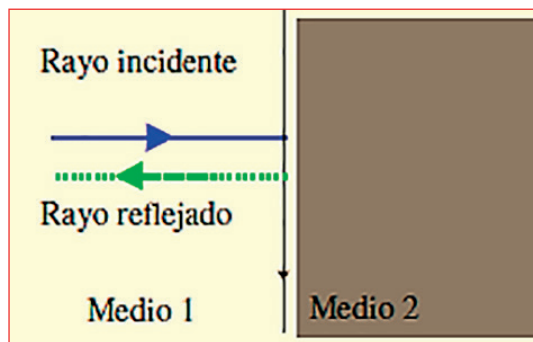
- c) Guías de onda elípticas.
- d) Radome de fibra de vidrio para antenas.

III. Introducción

Ondas estacionarias

Cuando una onda viajera se propaga a través de un cierto medio con sus parámetros constitutivos conductividad σ [S/m], impedancia intrínseca η [W], permeabilidad [H/m] y permitividad ϵ [F/m] y se encuentra con una frontera de otro medio con distintos parámetros se presenta un caso de reflexión. Al reflejarse la onda se va a sumar con la onda incidente original y se tendrá entonces una onda estacionaria en esa región del espacio.

Figura 1. Generación de ondas estacionarias



Este caso de reflexión de ondas o “rebote” se presenta en muchos casos y no solamente cuando se tiene una pared infinita sobre la que se incide de manera normal. Toda onda que se propaga en una región distinta al espacio libre sufrirá una cierta reflexión. La onda

que viaja en la atmósfera se encontrará con partículas en el aire que le causarán una cierta reflexión. Una onda que viaja a través de un medio guiado al llegar a la impedancia terminal, una antena, por ejemplo, se verá reflejada en mayor o menor medida.

Guías de onda

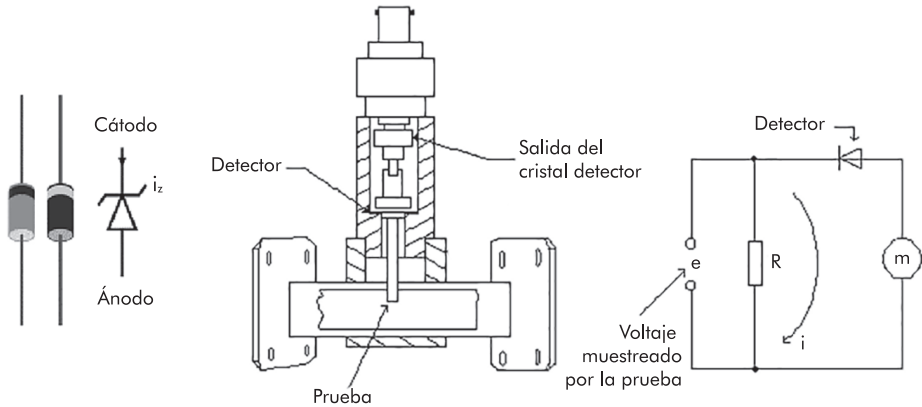
Las guías de onda son conductos cerrados que permiten el movimiento de la energía electromagnética en una sola dirección. Las guías de onda se construyen con una sola placa de material conductor que envuelve parcialmente a una tira de material dieléctrico.

Normalmente, la energía puede viajar libremente en el material dieléctrico, pero está confinada en él, porque el material conductor no la deja salir.

Diodo detector

Existe un tipo especial de dispositivos semiconductores, llamados diodos PIN, que pueden ser utilizados para detectar flujo de potencia (energía en movimiento). La manera para hacerlo, es implementando un circuito como el que se muestra en la siguiente figura 2. La resistencia del diodo, varía de acuerdo a la cantidad de potencia suministrada al arreglo; y por lo tanto el voltaje (o la corriente) medido: m , también lo hace.

Figura 2. Diodo detector



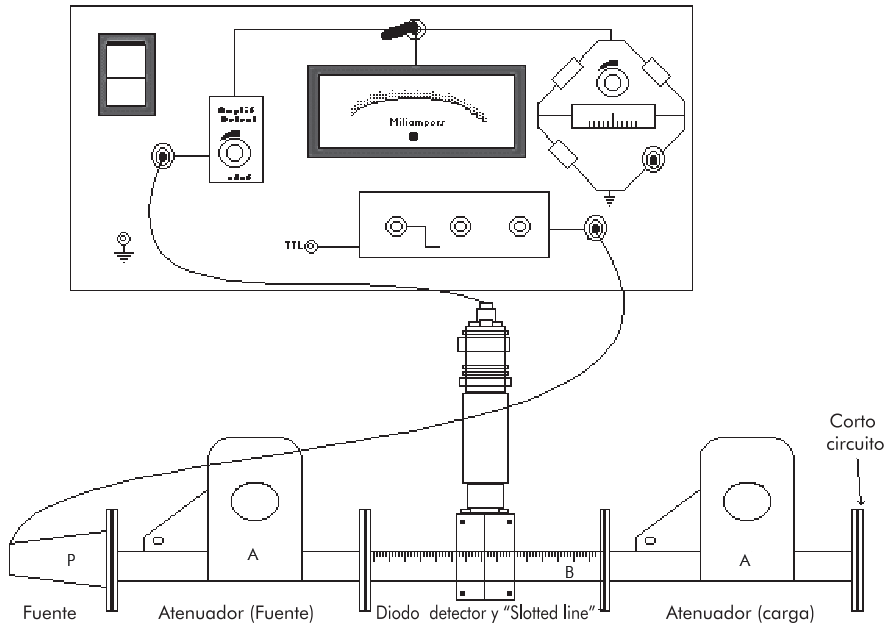
En el caso del equipo de microondas que se tiene en el laboratorio, la corriente que fluye por el diodo, es igual a:

$$i = Ke^2$$

Donde i es la corriente que pasa por el diodo, y e es el voltaje inducido por la prueba. K es una constante que caracteriza al arreglo sensor. Cuando la prueba penetra con mucha profundidad, puede perturbar el flujo de la energía y causar errores en la medición.

Para hacer una medición con una prueba y un diodo sensor, se puede hacer una conexión como la que se muestra en la figura 3.

Figura 3. Mediciones de potencia



Quando se quiere medir la salida del detector

En el aparato de control, se debe en primer lugar poner todos los reguladores en el mínimo; posteriormente se enciende. El *switch* que se encuentra en la parte inferior, se coloca hacia donde dice *internal keying*, y en el *switch* que indica la lectura de la potencia (Meter Reads) se pone donde indica "detector output".

Colocar el control de sensibilidad del amplificador en su nivel máximo, dejando los atenuadores en máxima atenuación, luego disminuir poco a poco la atenuación, con el fin de no afectar los componentes. Es importante en qué posición se coloquen los Atenuadores (Si se usan) para la intensidad de la lectura.

IV. Material

- Kit de microondas Microwave Trainer.
- Analizador de espectros.

V. Desarrollo

1. Observe e identifique las partes del equipo de microondas Microwave Trainer. Realice una breve investigación sobre 5 de los dispositivos del "kit".
2. Realice las conexiones mostradas en la figura 3 para poder medir la potencia registrada en la línea ranurada.
3. Llene una tabla con los valores de corriente registrados y las distancias de la línea ranurada. Una vez que se identifiquen los máximos y mínimos en la guía de onda se puede deducir la frecuencia de operación.
4. Para verificar que la frecuencia obtenida sea la correcta, conecte el analizador de espectros HP, utilice una antena como dispositivo de entrada para el analizador y obtenga la frecuencia recibida por la antena. ¿Fueron los mismos valores? Si no, explique.
5. Modifique los valores de los atenuadores de carga y fuente, realice varias combinaciones y mida los valores de máximos y mínimos, ¿qué observa? Llene varias columnas de la tabla del inciso 3) para poder dar más peso a sus argumentos.
6. Las ondas estacionarias pueden encontrarse en otros fenómenos además de los electromagnéticos como las ondas mecánicas, acústicas, acuáticas. Diseñe un sistema mediante el cual se pueda ver el fenómeno de ondas estacionarias. El sistema se presentará con el reporte escrito de la práctica.

VI. Conclusiones y recomendaciones

VII. Referencias

Kraus, A. *Antennas*, segunda edición, McGraw Hill.

Microwave Trainer MWT 530 Instruction Manual, Feedback Instruments Ltd., Londres.



Tercera unidad

Líneas de transmisión de dos conductores y fundamentos de comunicación vía satélite



Laboratorio 5: Energía electromagnética en movimiento

Sección: Apellidos y nombres:

Docente: Alberto Sergio Tejada Rojas Fecha: / / 2022 Duración:

Instrucciones: Lea y desarrolle lo solicitado.

I. Objetivos

- Describir la forma como viaja la energía electromagnética.
- Observar algunas características de su movimiento.
- Estudiar el espectro radioelétrico.

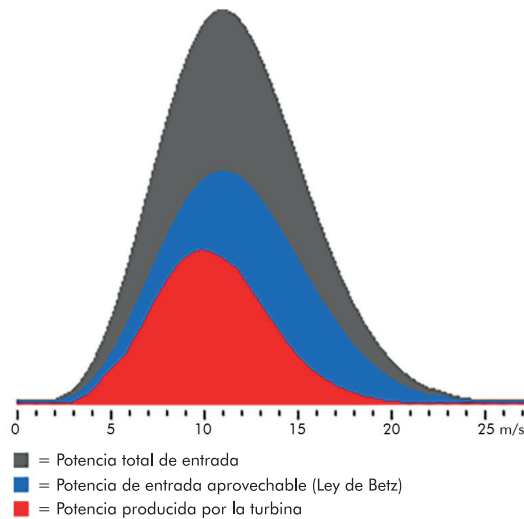
II. Trabajo previo

Función de densidad de potencia

Potencia del viento

De la página sobre la energía en el viento sabemos que el potencial de energía por segundo (la potencia) varía proporcionalmente al cubo de la velocidad del viento (la tercera potencia), y proporcionalmente a la densidad del aire (su peso por unidad de volumen) Ahora podemos combinar todo lo que hemos aprendido hasta el momento: si multiplicamos la potencia de cada velocidad del viento con la probabilidad de cada velocidad del viento de la gráfico de Weibull, habremos calculado la distribución de energía eólica a diferentes velocidades del viento = la densidad de potencia.

Observe que la curva de Weibull anterior cambia de forma, debido a que las altas velocidades del viento tienen la mayor parte de la potencia del viento.



Es importante para el ingeniero en telecomunicaciones, poder entender cómo se mueve la energía electromagnética, y qué características tiene su movimiento.

Uno de los mecanismos de comunicación más populares, consiste en montar información en paquetes de energía que puedan viajar entre los lugares que se desea comunicar.

Para poder describir el movimiento de la energía electromagnética en el espacio se utiliza una función llamada densidad de potencia (\bar{S}), la cual asigna a cada punto del espacio, un vector cuya magnitud es igual al número de Joule por unidad de superficie que pasan por el punto cada segundo; y cuyo sentido indica la dirección en la que se mueve dicha energía.

Ahora bien, el problema principal aparece cuando se tiene que determinar la regla de correspondencia de la función \bar{S} .

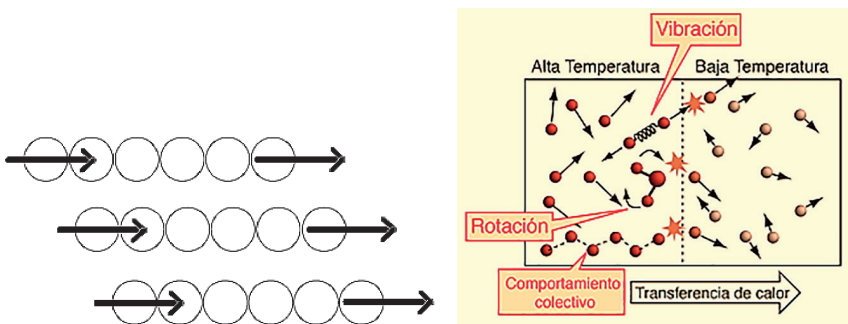
Una forma de hacerlo, es usando métodos teóricos para determinar a las funciones \bar{E} y \bar{H} , y después calcular \bar{S} como:

$$\bar{S} = \bar{E} \times \bar{H}$$

Sin embargo, en esta sección de laboratorio, trataremos de determinar a la función \bar{S} , usando métodos experimentales.

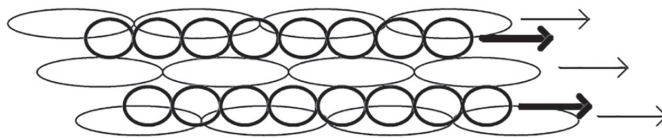
Además de poder describir la forma como viaja la energía electromagnética, es importante que los ingenieros en telecomunicaciones puedan reconocer algunas características que tiene su movimiento. Algunas características importantes de la energía en movimiento son: la dirección de propagación, la amplitud, frecuencia, longitud de onda y polarización del campo eléctrico asociado.

Para poder entender el significado de frecuencia, es necesario imaginar la forma como viaja la energía. Sin entrar a mucho detalle se podría decir que la energía viaja en paquetes semiesféricos consecutivos (ver figura), que se mueven en alguna dirección en particular:



Series de paquetes de energía

Los paquetes de energía pueden tener diferentes tamaños y las series de paquetes, se pueden mover a diferentes velocidades. También se puede dar el caso de que muchas series de paquetes (con diferentes tamaños y velocidades) se muevan simultáneamente en una misma región del espacio:



Cuando este es el caso, el movimiento de los paquetes de energía de algún tipo, no afecta en ninguna forma, al movimiento de los paquetes de otros tipos.

Si consideramos que la energía viaja tal como se acaba de describir, entonces se podría pensar que la cantidad de energía que pasa por algún punto cualquiera del espacio, está cambiando con el tiempo; y si solamente hubiera un tipo de paquetes de energía, entonces el cambio en la cantidad de energía que pasa por un punto, sería periódico; es decir, cada determinado número de segundos se repetiría la cantidad de energía que pasa por un punto determinado del espacio. A la tasa de repetición periódica en el tiempo se le llama frecuencia. Asimismo, se llama longitud de onda, al doble de la longitud (medida en alguna unidad de distancia) de cada uno de los paquetes de energía.

La frecuencia (f) y la longitud de onda (λ), son dos parámetros muy importantes del movimiento de la energía electromagnética; y frecuentemente son usadas muy en el medio de las telecomunicaciones, para caracterizar el movimiento de las señales electromagnéticas.

La relación entre estas dos variables depende de la velocidad de propagación de los paquetes, en el vacío a esta velocidad se le llama "c" y la relación es:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f}$$

Espectro Radioeléctrico

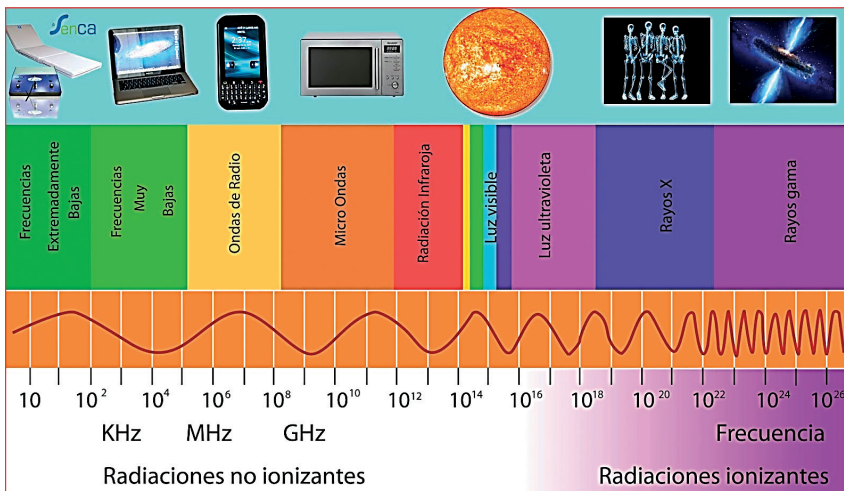
En el espacio pueden viajar simultáneamente diferentes series de paquetes de energía, cada una de ellas con sus valores particulares de frecuencia y longitud de onda.

Cuando se desea transmitir información en forma de señales electromagnéticas, frecuentemente se montan los mensajes en grupos de series de paquetes. De modo que una determinada cantidad de información, está montada en un cierto número de series de paquetes (con frecuencias bien definidas). Debido a que una serie de paquetes con una frecuencia definida, no interfiere con las series de otras frecuencias; se puede enviar a través de una misma región del espacio, una gran cantidad de mensajes, siempre y cuando estos mensajes no utilicen simultáneamente series de paquetes de igual frecuencia.

Las frecuencias se han clasificado y organizado en bandas según su utilización.

La siguiente tabla muestra una clasificación de las bandas de frecuencia útiles:

10^{18}	Rayos X
10^{16}	Ultravioleta
10^{14}	Luz visible Infrarrojo térmico e Infrarrojo
THz	Ondas Milimétricas
EHF	Banda Ka
SHF	Com. por Satélite, Bandas C, X, Ku y K
GHz	UHF Horno de microondas, TV, Banda L y Banda S VHF Radio FM (88 a 108 MHz) y Canales de Televisión
MHz	HF Radio de onda corta, Banda civil MF Radio AM, (535 a 1605 kHz)
kHz	LF (30 a 300 kHz) VLF (3 a 30 kHz) ULF (0.3 a 3 kHz) SLF (30 a 300 Hz) ELF (3 a 30 Hz)
Hz	



Investigue las bandas de frecuencia utilizadas para:

- Transmisión de Radio
- Transmisión de Televisión
- Transmisión a Satélites

¿Cuál es la frecuencia de transmisión del canal trece de televisión?

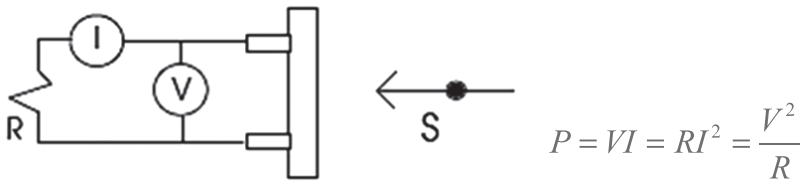
¿Cuál es la frecuencia de transmisión de su estación favorita de radio?

III. Desarrollo

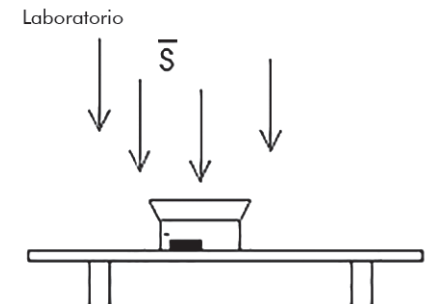
1. Utilice papel aluminio y un radio receptor para identificar la dirección en que viaja la energía radiada por su estación de radio favorita. Verifique sus resultados determinando las localizaciones del ITAM y de la radiodifusora en un mapa.

Nota: Procure que no haya grandes obstáculos alrededor de la zona donde haga el Experimento.

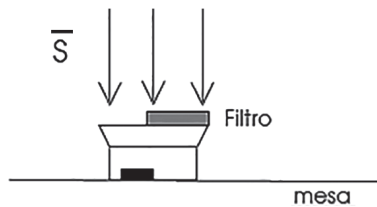
2. Con la ayuda de una celda fotovoltaica según el arreglo de la figura, determine la DENSIDAD DE POTENCIA luminosa, que llega a un punto del espacio en particular, y las direcciones de donde llega dicha energía. La energía total, es igual a:



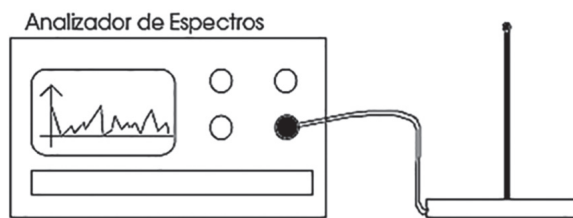
3. Con ayuda de las celdas fotovoltaicas y de la caja de cartón que se proporciona, determine la función densidad de flujo de potencia que describe al movimiento de energía que viaja del techo hacia la superficie de la mesa del laboratorio.



4. Repita el experimento anterior, pero ahora cubriendo parcialmente la superficie en estudio.



5. Utilice el analizador de espectros, para observar la frecuencia y la intensidad de la energía en movimiento que llega a la antena lineal que se proporciona.



IV. Conclusiones y recomendaciones

V. Referencias

KRAUS, A. *Antennas*, segunda edición, McGraw Hill.

Microwave Trainer MWT 530 Instruction Manual, Feedback Instruments LTD, London, UK.

Laboratorio 6: Ganancia de antenas y líneas ranuradas

Sección: Apellidos y nombres:

Docente: Alberto Sergio Tejada Rojas Fecha: / / 2022 Duración:

Instrucciones: Lea y desarrolle lo solicitado.

I. Objetivos

- Determinar la ganancia isotrópica de las antenas en estudio.
- Comparar la directividad y la ganancia de una antena y estimar su eficiencia eléctrica.

II. Trabajo previo

1. Defina que se entiende por ganancia isotrópica.
2. Desarrolle la fórmula de propagación de Friis.
3. Explique que es la eficiencia óhmica de una antena.
4. Defina que se entiende por onda estacionaria y por VSWR.
5. ¿Qué características (de onda estacionaria) presentan las siguientes cargas: Cortó circuito, circuito abierto, carga resistiva y carga con impedancia característica?

III. Material y equipo

- Dipolos de $\lambda/2$.
- Analizador de espectros de RF.

- Antena Uda-Yagi.
- Generador de señales de RF
- Equipo de microondas.
- Medidor de Potencia de RF.
- Equipo de microstrip.
- Línea ranurada

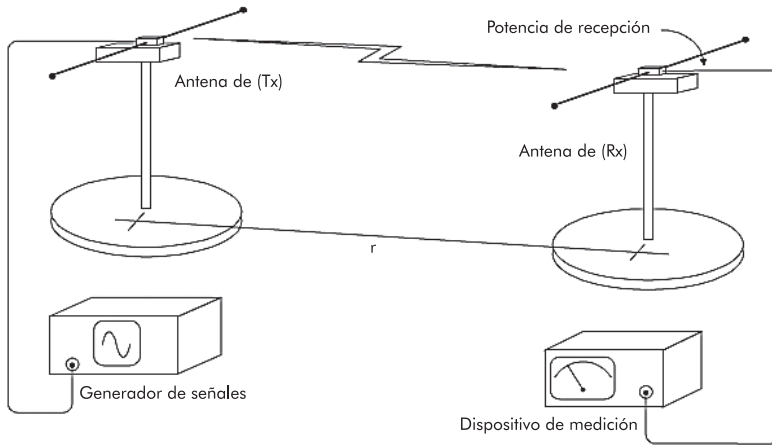
IV. Desarrollo

Ganancia isotrópica

Existen varios métodos para realizar las mediciones de ganancia que utilizan el principio de propagación de Friis; en esta práctica se usará un método de los más comunes.

Este método se utiliza para determinar la ganancia de un par antenas de características desconocidas, siempre y cuando estas sean idénticas. Otros métodos requieren de una antena de ganancia conocida como referencia para poder determinar la ganancia de una antena desconocida.

Para obtener la ganancia de una antena por la fórmula de propagación de Friis es necesario considerar la distancia entre las antenas y medir la potencia de transmisión (la que se entrega directamente a la antena transmisora) y la potencia de recepción (la que se obtiene inmediatamente a la salida de la antena receptora). Por lo tanto, se requiere medir la potencia recibida en la antena receptora directamente de su salida sin elementos intermedios (atenuadores e, amplificadores, etc.).



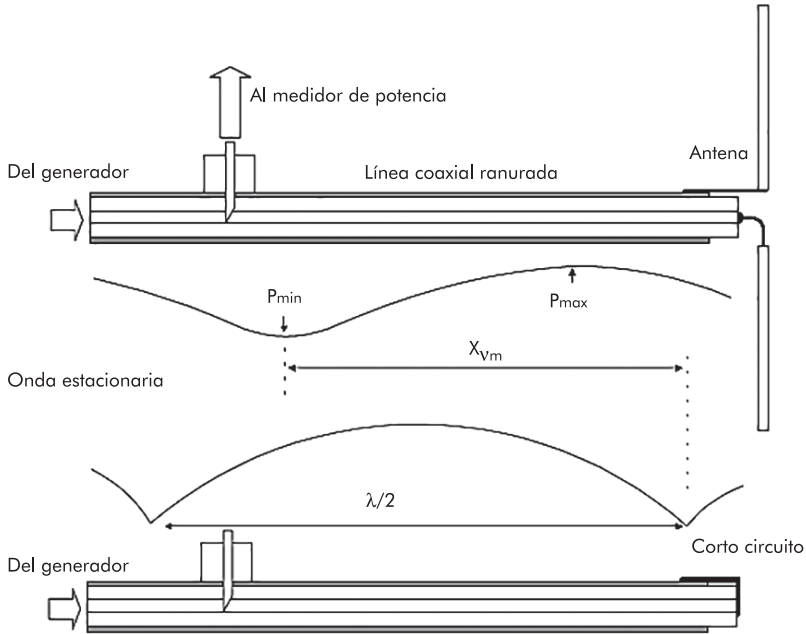
Una vez hecha la medición de la potencia de recepción se medirá la potencia de transmisión directamente a la entrada de la antena transmisora. Es muy importante que esta última medición se efectúe sin modificar los parámetros del generador que se utilizaron para la medición de la potencia de recepción.



Línea ranurada

Para estimar la impedancia de entrada de una antena se requiere conocer la VSWR y la distancia X_{vm} entre el primer mínimo de la onda estacionaria y la antena. La medición de la onda estacionaria

se realizará por medio de una línea ranurada o línea de Lecher, un medidor de potencia de RF.



Recuerde que la distancia entre los mínimos representa media longitud de onda.

Nota: Es importante tomar en cuenta que la velocidad de propagación de una onda para una línea de transmisión no es la misma que para el espacio libre ($c = 3 \times 10^8$); esta velocidad se ve afectada por un factor llamado Factor de Velocidad (VF), el cual depende del tipo de línea de transmisión usada. Por lo tanto, para calcular la longitud de onda real (espacio libre) es necesario dividir la longitud de onda medida entre el factor de velocidad (VF) que corresponda al tipo de cable usado como línea ranurada.

Una vez obtenidas la VSWR y la distancia X_{vm} , se puede calcular la impedancia de la antena por medio de la carta Smith o por medio del coeficiente de reflexión Γ .

Cálculos

La ganancia para antenas idénticas se calcula por medio de la siguiente fórmula que a la vez se obtiene de la fórmula de Friis para enlaces:

$$G = \frac{4\pi r}{\lambda} \sqrt{\frac{P_r}{P_t}}$$

En el caso en que las antenas no sean iguales, la ganancia calculada con la fórmula de Friis representa la siguiente relación:

$$G = \sqrt{G_r G_t} \text{ Donde}$$

G_r = ganancia de recepción.

G_t = ganancia de transmisión.

Por lo tanto, una vez que se ha determinado la ganancia del dipolo, este se puede usar como referencia para las otras antenas.

La apertura máxima efectiva A_{em} se define como:

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{\Omega_A}$$

Sin embargo, por las pérdidas de acoplamiento (pérdidas óhmicas) la apertura efectiva A_e se afecta proporcionalmente con un factor de pérdida k :

$$A_e = kA_{em}$$

Donde el factor de pérdida k es el mismo que relaciona la ganancia con la directividad de la antena.

O sea:

$$G = kD$$

$$k = G / D$$

V. Conclusiones y recomendaciones

VI. Referencias

Kraus, A. *Antennas*, segunda edición, McGraw Hill.

Cuarta unidad

Radiación y propagación de las ondas electromagnéticas relacionadas



Laboratorio 7: Patrones de radiación y polarización

Sección: Apellidos y nombres:

Docente: Alberto Sergio Tejada Rojas Fecha: / / 2022 Duración:

Instrucciones: Lea y desarrolle lo solicitado.

I. Objetivos

- Determinar por medición directa el patrón de radiación de varios tipos de antenas.
- Estimar las principales características directivas; ángulo sólido, directividad y apertura de las antenas a estudiar.
- Observar el efecto de diferentes polarizaciones en distintas propagaciones electromagnéticas.
- Realizar una comparación cuantitativa entre las distintas antenas mediante los parámetros calculados.

II. Trabajo previo

1. Defina que es el patrón de radiación de una antena.
2. Explique qué son las regiones de Fresnel y de Fraunhofer.
3. Explique qué se entiende por directividad.
4. Explique el concepto de apertura de una antena.

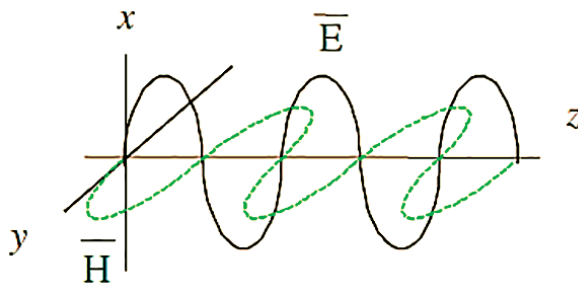
III. Introducción

Polarización de ondas planas

La polarización de una onda plana uniforme describe su comportamiento variante con el tiempo del vector de la intensidad del campo eléctrico en un punto dado el espacio.

El campo eléctrico \hat{E} se puede propagar en cualquier dirección en el espacio, pero si por alguna razón se restringe su acción a una sola dirección paralela al eje x tal que $\hat{E} = \hat{a}_x E_x$, el campo se encuentra en una polarización lineal en dirección de x como se muestra en la figura 1. No es necesario especificar la dirección del campo magnético ya que va asociada al eléctrico según las ecuaciones de Maxwell. Si los ejes se hacen coincidir con los planos de tierra, se tienen polarizaciones verticales y horizontales dependiendo de la dirección de acción del campo eléctrico.

Figura 1



Ejemplos de estas dos polarizaciones son radio AM en polarización vertical, y televisión en polarización horizontal como se muestra en la figura 2. En algunos casos la dirección de \hat{E} en un punto puede variar con el tiempo. Esto se puede lograr a través de una suma de

campos o geometrías especiales de las antenas. En estos casos se pueden tener campos con polarización circular o elíptica.

Figura 2

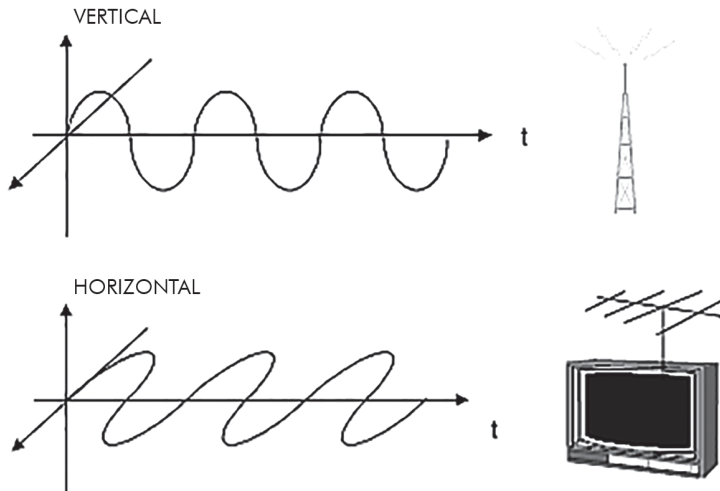


Figura 3



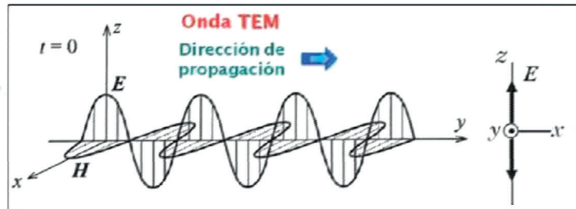
Polarización lineal

En tecnología de antenas, polarización se refiere a la orientación de los campos E y H con respecto a la Tierra.



Si E es perpendicular a la Tierra, la onda está polarizada de modo vertical. Una antena vertical produce polarización vertical.

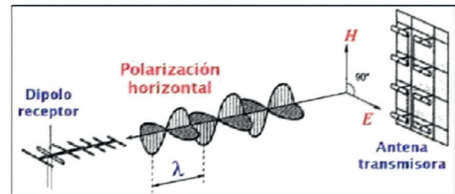
Si la dirección no varía, la polarización es lineal.



Si E es paralelo a la Tierra, la onda está polarizada de modo horizontal. Una antena horizontal produce polarización horizontal.

Ejemplo

Onda radiada por una antena transmisora de TV con polarización vertical y horizontal:



Patrones de radiación

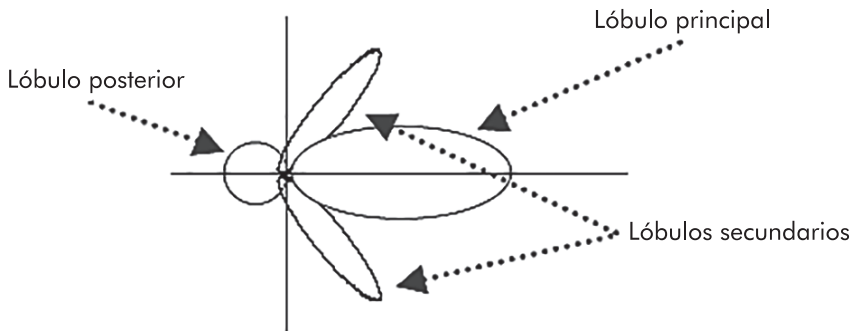
El patrón de radiación muestra la intensidad del campo electromagnético en términos de su posición en el espacio, ya sea en coordenadas cartesianas (x, y, z) o esféricas (más común).

(r, θ, ϕ). En muchos casos la representación del patrón de radiación se muestra en dos dimensiones en forma lineal o en coordenadas polares como se muestra en la figura 4.

El patrón de radiación que no irradia hacia todas direcciones con la misma intensidad cuenta con varios lóbulos; el lóbulo principal (haz principal) hacia donde se concentra la energía, secundarios o menores y ceros (nulos) entre los lóbulos donde hay radiación nula o mínima. Por lo general el patrón interesa en el campo lejano (Fraunhofer) y se expresa en coordenadas esféricas o por cortes si la figura es de revolución.



Figura 4



Del patrón se desprenden varias características importantes de una antena:

- Directividad.
- Apertura efectiva.
- Ganancia.
- Ancho del haz.
- Área del haz.
- Área del lóbulo principal.
- Eficiencia del haz.

IV. Material y equipo

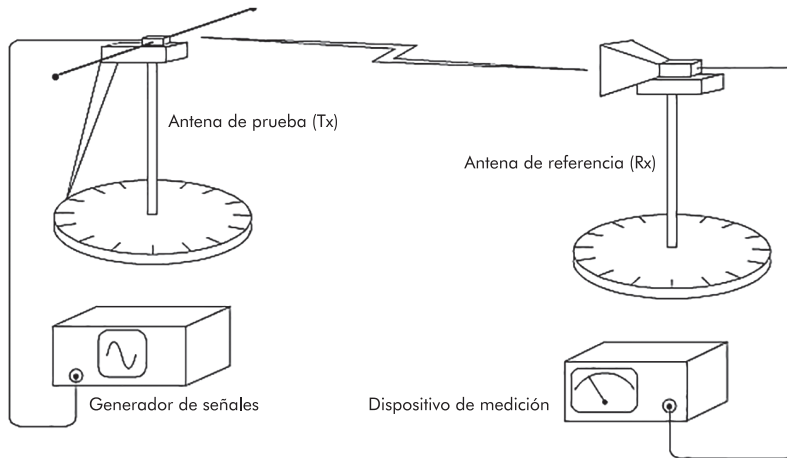
- | | |
|-------------------------|---------------------------------|
| • Dipolo de $\lambda/2$ | • Equipo de microstrip |
| • Antena Uda-Yagi | • Analizador de espectros de RF |
| • Antena de corneta | • Generador de señales de RF |

- Antena vertical
- Filtro polarizadores
- Equipo de microondas
- Medidor de Potencia de RF

V. Desarrollo

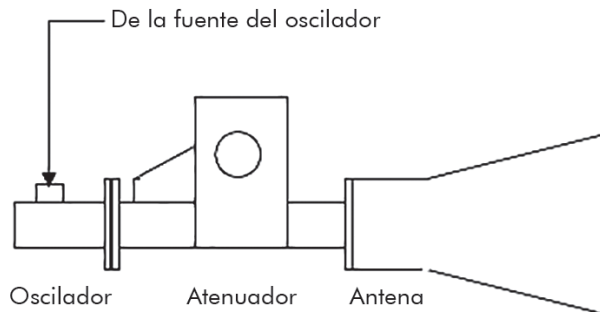
1. Experimentar con la luz emitida por las lámparas. Verificar sus condiciones de polarización utilizando un filtro polarizador. Utilizar dos filtros para poder encontrar condiciones de ortogonalidad y bloquear el paso de la luz.
2. Para cada una de las antenas a estudiar calcule la distancia de separación entre las antenas para realizar las mediciones en la zona de Fraunhofer; recuerde que esta separación depende de las medidas físicas de la antena y de la frecuencia de la señal.
3. Coloque las antenas en los soportes y ajuste la potencia de alimentación de tal manera que con las antenas alineadas axialmente se obtenga una lectura máxima sin saturar el dispositivo medidor, tome esta alineación como referencia (i.e. 0°). Utilice la antena a determinar como elemento emisor y una antena de referencia como elemento receptor. Alimente con el generador de RF una señal de frecuencia adecuada a las dimensiones de cada antena y mida en el receptor con el analizador de espectros o con el medidor de potencia de RF.

Figura 5. Disposición de las antenas para obtener los patrones de radiación



- Utilice la sección transmisora para variar horizontalmente el ángulo de radiación de la señal y tome lecturas de la potencia recibida cada 10° . Como la lectura en el dispositivo medidor es proporcional a la potencia recibida se puede obtener el patrón de radiación normalizado al dividir todas las lecturas entre la lectura máxima. Gire las antenas 90° alrededor de su eje axial y realice el procedimiento anterior para obtener el patrón en el plano vertical.

Figura 6. Conexiones para la antena de corneta en el emisor



5. Las antenas de corneta trabajan a una frecuencia mayor al límite del generador de RF, por lo que se utilizará el oscilador del equipo de microondas como generador. Realice las conexiones indicadas en la figura 6 para el emisor.
6. Mida la apertura física (A_f) de todas las antenas empleadas para posteriormente poder calcular la eficiencia de apertura.

Cálculos

El límite entre la región de Fresnel y la región de Fraunhofer se calcula mediante la siguiente ecuación aproximada.

$$R = \frac{2L^2}{\lambda} \quad (m)$$

donde:

R = Distancia en metros a partir de la antena en la cual termina la región de Fresnel.

L = Máxima dimensión de la antena en metros.

λ = Longitud de onda de la señal en metros.

Para todas las antenas estime el ángulo sólido por medio de la siguiente aproximación:

$$\Omega_A \approx \theta_{PM} \phi_{PM}$$

donde:

Ω_A = ángulo sólido en estereoradianes

θ_{PM} = ancho del haz de media potencia en el plano vertical

ϕ_{PM} = ancho del haz de media potencia en el plano horizontal

Si el haz (lóbulo) principal no es suficientemente grande como para despreciar los efectos de los lóbulos no principales, obtenga también los ángulos sólidos de estos últimos y súmelos al del haz principal.

Calcule la directividad como:

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

En particular para un dipolo corto de longitud $\leq \lambda/10$, se sabe que la directividad es $D = 3/2$ y para un dipolo de $\lambda/2$, $D = 1.64$.

Laboratorio 8: Antenas para microondas: patrón de radiación

Sección: Apellidos y nombres:

Docente: Alberto Sergio Tejada Rojas Fecha: / / 2022 Duración:

Instrucciones: Lea y desarrolle lo solicitado.

I. Objetivos

- Verificar la geometría de las antenas de reflector paraboloide.
- Encontrar el apuntamiento óptimo de las antenas en un enlace en línea de vista.
- Observar las características de alta directividad de una antena de microondas.

II. Trabajo previo

1. Mencione cuales son las características principales de las antenas de reflector parabólico.
2. ¿Por qué es tan importante contar con una antena altamente directiva en un enlace de microondas en línea de vista?
3. ¿Qué se entiende por lóbulos laterales y por qué es deseable que sean mínimos?

III. Aspectos de estudio

- Observar la propiedad de fase constante del reflector.

- Determinar los anchos del haz de potencia media tanto en el plano horizontal como en el vertical.
- Determinar el aislamiento entre el lóbulo principal y los primeros lóbulos laterales.
- Calcular la directividad de la antena.

IV. Material y equipo

Sistema de microondas (Skyplex 23C/2M).

- Antenas de reflector parabólico de 2'.
- Terminales de RF (ODU).
- Módulos de interfase (IDU).

Medidor de potencia de RF.

Descripción del equipo

El sistema Skyplex 23C/2M es un equipo comercial de comunicaciones digitales vía microondas que incluye un par de antenas de plato parabólico de 0.61 m (2') de diámetro, un par de terminales de radio frecuencia (ODU) y un par de módulos de interfaz (IDU).

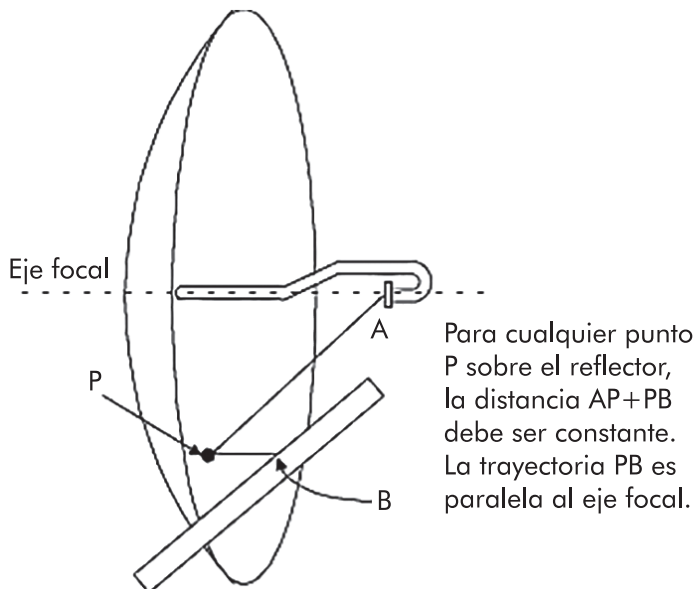
Este sistema proporciona un enlace *full duplex* a 2.048 Mbps (E1) en la banda de 23GHz con una banda de guarda de 1.232GHz entre Tx y Rx.

V. Desarrollo

Propiedad de fase constante

Para comprobar la geometría paraboloide de las antenas es necesario verificar su propiedad de fase constante. Coloque una regla sobre los bordes de la antena de tal manera que esta permanezca perpendicular al eje focal (paralela a la directriz de la parábola). Posteriormente determine la distancia entre el alimentador (foco) y alguno de los bordes de la antena donde descansa la regla, marque la distancia sobre un hilo no elástico para que este sirva como medida de referencia. Fije uno de los extremos del hilo al alimentador y compruebe que la distancia desde el alimentador a cualquier punto sobre la superficie del reflector más la distancia de dicho punto hacia la regla, en dirección paralela al eje focal, se mantiene constante sin importar el ángulo de incidencia sobre la superficie del plato.

Figura 1

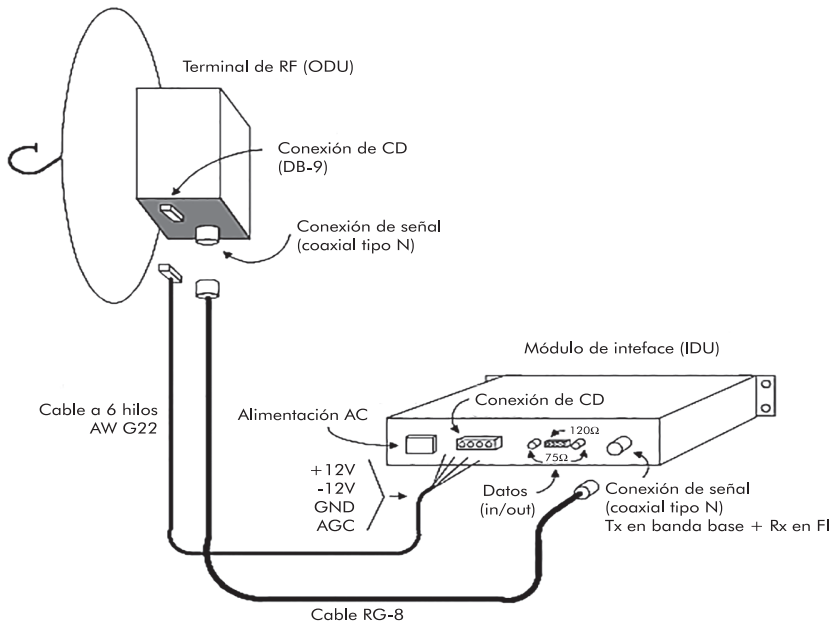


Apuntamiento de las antenas

La conexión entre los equipos IDU y ODU consta de un cable de señal y uno de alimentación, el primero es un cable coaxial RG-9 con conectores tipo N por el cual viajan simultáneamente la señal de transmisión en banda base y la señal de recepción en frecuencia intermedia; y el segundo es un cable de 6 hilos que lleva del IDU al ODU los voltajes de alimentación (+12V y -12V), el nivel de referencia (0V) y el voltaje del AGC.

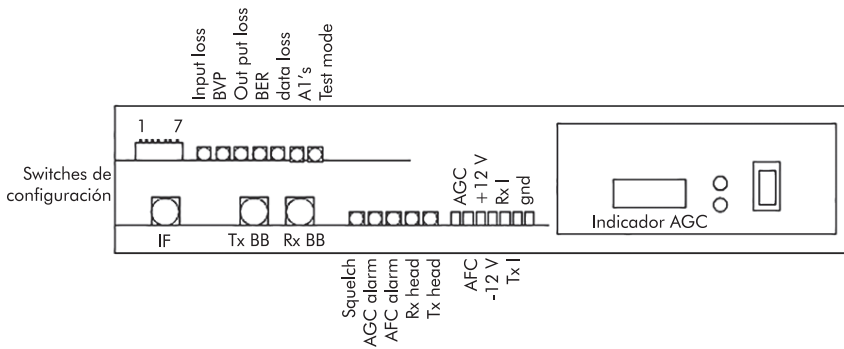
Para determinar el óptimo apuntamiento de las antenas se medirá la potencia recibida y se moverá la antena receptora hasta llegar a un valor máximo.

Figura 2



El módulo de interfaz cuenta también con una serie de indicadores y puntos de medición que nos permiten conocer el estado de operación, estos indicadores se encuentran dentro del módulo y se puede tener acceso removiendo la parte frontal del módulo.

Figura 3



Realice la conexión entre el IDU y el ODU, encienda los equipos y espere a que los equipos se enlacen; esto se verifica cuando los indicadores de alarma del módulo de interfaz (leds rojos) se apagan y sólo queda encendido el indicador de *input loss*, el cual nos informa que no hay señal de datos presente.

La orientación de la antena se ajusta por medio de dos tornillos de precisión que se encuentran ubicados en la parte posterior del plato, uno de ellos se usa para ajustar el ángulo de azimut (plano horizontal) y el otro para el ángulo de elevación (plano vertical).

Antes de empezar el apuntamiento, estos dos tornillos son colocados a la mitad de su trayecto para permitir ajustes en ambos sentidos. Inicialmente se apuntan las antenas en azimut de manera aproximada por medio de una apreciación visual, para esto es necesario

rotar la unidad (antena + terminal RF) alrededor del poste en el que se encuentra instalada.

La orientación deberá hacerse primero en azimut (plano horizontal) y después en elevación

(Plano vertical), utilizando los tornillos de ajuste respectivos. Una vez que se logre el apuntamiento óptimo se marca esta posición como dirección de referencia.

Ancho del haz y aislamiento entre lóbulos

Conecte el medidor de potencia a la salida de IF ubicada en la terminal de RF, el medidor de potencia permitirá obtener una medida más precisa de la potencia recibida. Registre la lectura del nivel máximo de potencia recibida en la dirección de referencia, varíe lentamente el ángulo de azimut en sentido positivo hasta encontrar la lectura que corresponda a la mitad del valor máximo y registre el ángulo obtenido (θ'_{HP}); continúe variando el ángulo de azimut hasta encontrar el primer mínimo local y registre el ángulo obtenido (θ'_{FN}); por último encuentre el la dirección del siguiente máximo local (primer lóbulo lateral) y registre tanto el ángulo (θ'_{PL}) como el nivel de potencia recibida (P_{PL}).

Regrese a la dirección de máxima intensidad y realice la operación anterior en sentido opuesto hasta encontrar los ángulos respectivos (θ''_{HP}) (θ''_{FN}). La suma de los dos ángulos θ'_{HP} y θ''_{HP} corresponde al ancho de haz de potencia media θ_{HP} . Tenga en cuenta que este tipo de antenas presentan un ancho de haz extremadamente estrecho y por lo tanto es muy importante variar el ángulo lentamente con el fin de evitar una lectura errónea.

Para el ancho del haz en el plano vertical (ϕ_{HP}) realice el procedimiento anterior sobre el ángulo de elevación.

Una vez determinado el ancho del haz vuelva a orientar la antena hacia la dirección de referencia y verifique el nivel de potencia obtenido (máximo).

Cálculos

Para calcular los parámetros de directividad y de apertura de las antenas consulte la práctica *Introducción a guías de onda y ondas estacionarias laboratorio 4*. Para determinar los ángulos es importante tener una relación entre los grados correspondientes al número de vueltas de los tornillos. Es conveniente obtener este dato antes de empezar a hacer las mediciones.

VI. Conclusiones y recomendaciones

VII. Referencias

Kraus, A. *Antennas*, segunda edición, McGraw Hill.

