



# ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN EL RANGO DE MICROONDAS

**Angela Barajas (2200018) & Brayan Barajas (2170688)**

*Escuela de Física*

*Universidad Industrial de Santander*

*Bucaramanga, Colombia*

22 de agosto de 2022

## Resumen

En esta práctica experimental se realizó un montaje experimental para estudiar la distribución de campo eléctrico delante de una antena tipo bocina y también para el estudio de la polarización de microondas haciendo uso de un polarizador y de una sonda tipo E; esto con el fin de estudiar la variación del campo eléctrico en diferentes puntos del espacio, verificar la ley de Malus para microondas polarizadas y finalmente calcular el coeficiente de absorción para diferentes materiales. Para esto primero se estudió la teoría correspondiente a la emisión de ondas electromagnéticas junto con su polarización y sus distintos tipos para así pasar a la parte experimental y obtener los distintos datos necesarios a los cuales se les hizo el tratamiento y análisis correspondiente para dar respuesta a las preguntas propuestas. De esto se pudo concluir que la onda generada sí estaba polarizada linealmente, lo cual se pudo comprobar por medio de la ley de Malus; también se pudo estudiar el diagrama de radiación de la antena así como determinar el ángulo total de emisión.

Por otro lado, se llegó a la conclusión de que el voltaje es proporcional al inverso de la frecuencia, es decir, es proporcional a la amplitud de campo eléctrico. Y por último, se analizó la relación directamente proporcional entre el coeficiente de absorción con la densidad y el grosor de los materiales.

## 1. Introducción

Día a día el ser humano hace uso de distintas tecnologías de ultrasonido, infrarrojo y microondas, sin embargo, normalmente no se entiende del todo el funcionamiento de estas.

En este proyecto de investigación se busca estudiar cualitativamente el comportamiento de las

ondas electromagnéticas, específicamente en el rango de microondas con frecuencia 9.4 GHz y los conceptos teóricos asociados a estas como por ejemplo la potencia de emisión, la polarización y el fenómeno de absorción de las microondas con el fin de comprender la propagación y distribución en el medio cercano al emisor.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Ondas electromagnéticas

Una onda electromagnética es una perturbación periódica del campo eléctrico  $\vec{E}$  y del magnético  $\vec{B}$  que se propaga en el espacio a la velocidad constante de la luz. Se trata de ondas transversales en las que el campo eléctrico y el magnético, en fase, son perpendiculares entre sí y, a su vez, perpendiculares a la dirección de propagación.

Podemos clasificar y ordenar las ondas electromagnéticas de acuerdo a sus diferentes longitudes de onda y frecuencias; dicha clasificación se denomina "el espectro electromagnético". Tradicionalmente se suelen establecer 7 zonas que son, de menor a mayor frecuencia: las ondas de radio, las microondas, los infrarrojos, la luz visible, los ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma, pero en nuestro caso nos interesa estudiar las ondas en el rango de microondas.

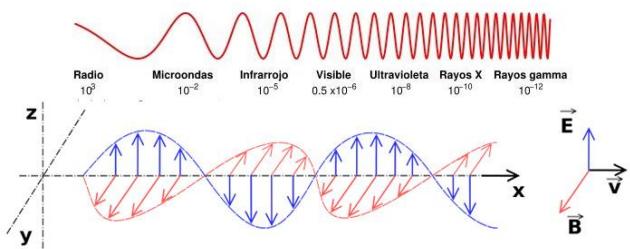


Figura 1: Composición de las ondas electromagnéticas y su distinta clasificación [1]

#### 2.1.1. Rango de Microondas

Estas ondas están en un rango de frecuencias de 300 MHz y 30 GHz y una longitud de onda en el rango de 10 mm a 1 m; estas se suelen producir mediante los movimientos de rotación y vibra-

ción de las moléculas. [2].

Las microondas pueden ser generadas de varias maneras, para fuentes de microondas de alta potencia son usados tubos de vacío y para fuentes de microondas de baja potencia se utilizan dispositivos de estado sólido, como por ejemplo, el transistor de efecto de campo, diodo túnel, diodo Gunn y diodo IMPATTs. En este caso nuestro interés de estudio es el diodo Gunn y los otros componentes que acompañan a este, como lo es la cavidad resonante, la antena tipo bocina piramidal y la sonda tipo E.

- **Diodo Gunn:** El diodo Gunn es dispositivo semiconductor con características de construcción que lo hacen el oscilador perfecto para generar ondas milimétricas en el rango de frecuencias de Giga Hertz. Este solo tiene región de tipo N, es decir, este posee átomos de impurezas que permiten la aparición de electrones sin huecos asociados a los mismos semiconductores.

El principio de funcionamiento de este diodo es el efecto Gunn, este consiste la transferencia de electrones debido a las bandas estructuradas con que está formado el semiconductor. Este posee una banda energía vacía, una banda de energía parcialmente llena y una banda completamente llena, cuando el material es dopado con material tipo N, existe un exceso de electrones en la banda llena del material por lo que transfiere electrones hacia la banda vacía; dicha transferencia se da cuando se proporciona una tensión umbral que circula a través del diodo lo que genera que se transfieran los electrones de ánodo a cátodo de forma intermitente en paquetes de electrones, lo cual da como origen la oscilación en el semiconductor. La frecuencia de esta oscilación está determinada por el tiempo de recorrido que le toma a los electrones en cruzar la longitud de las diferentes capas del material. [3]

- **Cavidad resonante:** El fundamento básico para un oscilador Gunn es un circuito RLC, el cual en este caso es modelado mediante el uso de una cavidad resonante. Para la realización de oscilador con diodo Gunn de frecuencia constante se requiere instalar el diodo dentro de una cavidad resonante, y las dimensiones de esta son las que determinan la frecuencia de resonancia del oscilador debido a que el diodo encerrado en la cavidad induce fluctuaciones que deben viajar en la cavidad y ser reflejadas, regresando hacia el diodo después de un tiempo  $t$ .

- **Antena tipo bocina** Las antenas son elementos radiadores o interceptores de energía electromagnética y, por radiación se refiere al proceso mediante el cual la energía generada en un circuito eléctrico es transferida a una antena y emitida por ésta en forma de ondas electromagnéticas hacia el espacio. Las antenas de bocina están constituidas por una guía de onda que se ensancha con forma de bocina; la cual puede ser de tipo piramidal, sectorial o cónica. La ganancia  $G$  de la antena de bocina depende de la relación entre la superficie de la apertura de la bocina, y la longitud de onda de trabajo se puede aumentar ensanchando la bocina misma, sin embargo, es importante tener en cuenta que la ganancia de las antenas de bocina de uso práctico está limitada a un máximo de alrededor de 20 dB.

Existe un tipo de radiador ideal que no existe en la práctica, pero cuyo concepto es de gran utilidad para analizar el comportamiento de antenas reales, este se denomina antena isotrópica la cual consiste un punto emisor de ondas electromagnéticas que radia uniformemente en todas direcciones, y como

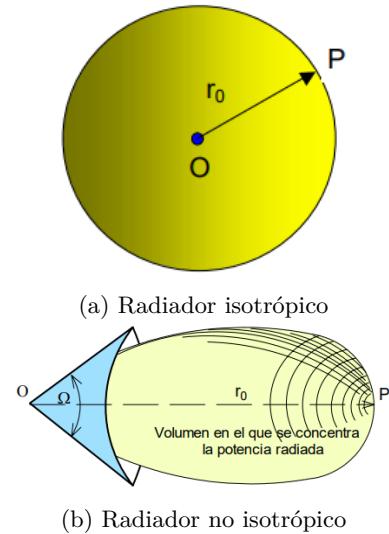


Figura 2: Tipos de radiadores [4]

consecuencia se tiene que la energía se distribuye uniformemente en forma esférica en el espacio (figura 2a), como el flujo de potencia es uniforme en todas direcciones se dice que la radiación es omnidireccional o no-direccional. Ahora, si en lugar de radiar la energía uniformemente a todo el espacio se logra concentrar toda la energía sólo en una cierta región, más específicamente en un ángulo sólido  $\omega$ , tal como se ve en la figura 2b. En este caso la distancia del radiador al punto  $P$  sigue siendo  $r_0$ . Es claro que en este caso la densidad de flujo de potencia en  $P$  será mayor que si la fuente fuera isotrópica. Esta densidad está dada por

$$S_1 = \frac{W_1}{4\pi r_0^2} \quad (1)$$

, donde  $W_1$  es la potencia radiada por la antena no isotrópica, pero la potencia de alimentación a esta antena es la misma que a la antena isotrópica, es decir,  $W_0$ , estas dos potencias se relacionan por medio de  $W_1 = DW_0$ , donde  $D$  es una constante adi-

dimensional designada como directividad, que expresa la capacidad de una antena para concentrar la energía electromagnética en una región del espacio y está dada por

$$D(\Theta, \phi) = \frac{r^2 |E(\Theta, \phi)|^2}{60W_0} \quad (2)$$

Por otra parte, tenemos que  $|E(\Theta, \phi)|$  es la magnitud de la intensidad del campo eléctrico a una distancia dada,  $r$ , y esta está dada por la siguiente expresión

$$|E(\Theta, \phi)| = \frac{\sqrt{60W_0 D(\Theta, \phi)}}{r} \quad (3)$$

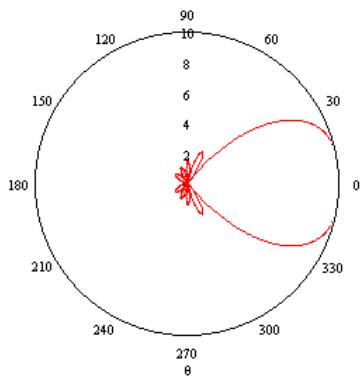


Figura 3: Corte bidimensional en coordenadas polares de diagrama 3D de radiación de una antena no isotrópica [5]

- **Sonda tipo E:** Una sonda de oscilloscopio es un dispositivo utilizado para conectar una fuente de señal, a menudo un punto de prueba en un circuito, a un oscilloscopio; una conexión física que establece la conexión eléctrica, en este caso esta se emplea para detectar el campo eléctrico que sale de la antena y lo transforma en voltaje que se lee por medio del oscilloscopio. Esto se hace por medio de un tipo de transductor denominado capacitor el cual convierte el voltaje

en campo eléctrico y viceversa. Esto es posible ya que este puede almacenar energía en forma de campo eléctrico, lo cual es el resultado de una separación de la carga eléctrica. La carga almacenada se representa por  $q$  que es directamente proporcional a la tensión convertida después de haber almacenado el campo eléctrico y esta a su vez es inversamente proporcional a una constante que indica la capacidad de almacenar energía en forma de campo eléctrico y depende del material dieléctrico. [6]

$$V = \frac{q}{C} \quad (4)$$

## 2.2. Polarización de ondas electromagnéticas

Una onda electromagnética como la luz consiste en un campo eléctrico oscilante acoplado y un campo magnético siempre perpendicular; por convención, la polarización de las ondas electromagnéticas se refiere a la dirección del campo eléctrico, más específicamente se define como la figura geométrica descrita en el tiempo, trazada por la punta del vector del campo eléctrico  $\vec{E}$ . Hay tres tipos de polarización, en la polarización lineal los campos oscilan en una sola dirección y por otra parte en la polarización circular o elíptica los campos giran a una velocidad constante en un plano a medida que la onda viaja.

Como caso general tomemos en cuenta una onda plana uniforme que se propaga según la dirección positiva  $Z$ , su campo eléctrico se puede definir de la siguiente forma

$$\begin{aligned} \hat{\vec{E}}(z, t) &= \hat{\vec{E}}_0 e^{j(\omega t - kz)} = \left( \hat{\vec{E}}_{0x} \vec{u}_x + \hat{\vec{E}}_{0y} \vec{u}_y \right) e^{j(\omega t - kz)} \\ &= \left( \hat{\vec{E}}_{0x} e^{-j(kz)} \vec{u}_x + \hat{\vec{E}}_{0y} e^{-j(kz)} \vec{u}_y \right) e^{j(\omega t)} \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2.1. Polarización lineal [7]

Se dice que una onda está linealmente polarizada si las componentes  $x$  y  $y$  del campo eléctrico están en fase ( $\delta = 0$ ) o en oposición de fase ( $\delta = \pi$ ); ya que para todo plano  $z = \text{cte}$  (en particular  $z = 0$ ) el extremo del campo eléctrico describe una recta en el plano  $x-y$ . Por lo tanto, si  $z = 0$  y ( $\delta = 0$ ) o ( $\delta = \pi$ ) el campo eléctrico se escribe como

$$\hat{\vec{E}}(0, t) = [E_{0x} \vec{u}_x \pm E_{0y} \vec{u}_y] \cos(\omega t) \quad (6)$$

, el módulo de la ecuación 6 está definido por  $E(0, t) = [E_{0x}^2 + E_{0y}^2]^{1/2} \cos(\omega t)$  y la inclinación del vector con respecto a  $x$  es  $\Theta_0 = \tan^{-1}\left(\frac{E_{0y}}{E_{0x}}\right)$  o  $\Theta_\pi = \tan^{-1}\left(\frac{-E_{0y}}{E_{0x}}\right)$

### 2.3. Ley de Malus [7]

Un polarizador ideal produce una luz polarizada linealmente a partir de una luz sin polarizar y la intensidad de la onda electromagnética emergente será la mitad de la incidente. Ahora, si se colocan dos polarizadores ideales de modo que sus direcciones de transmisión formen un ángulo recto, eliminarían toda la luz incidente, sin embargo, a ángulos distintos de  $90^\circ$ , la intensidad transmitida está dada por la ley de Malus. Teniendo en cuenta que la amplitud de la componente paralela es  $E_0 \cos \phi$ , y que la intensidad de la onda es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico, se obtiene la ley de Malus [7]

$$I = I_m \cos^2 \phi \quad (7)$$

, donde  $I_m$  representa la máxima intensidad de la onda transmitida ( $\phi = 0$ ), es decir, la intensidad de la onda antes del analizador e  $I$  es la intensidad transmitida cuando el ángulo es  $\phi$ .

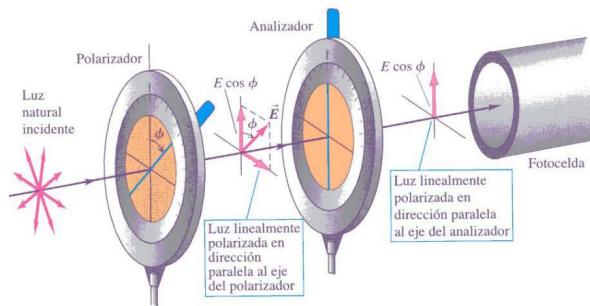


Figura 4: Representación de la ley de Malus [7]

### 2.4. Polarización por reflexión: Ley de Brewster [7]

Cuando se tiene luz natural que incide sobre una superficie reflectora que separa dos materiales ópticos transparentes, se tiene que para la mayoría de los ángulos de incidencia la componente del campo eléctrico paralela a la superficie reflectora se refleja con más intensidad que la componente paralela al plano de incidencia; sin embargo, existe un ángulo de incidencia, llamado ángulo de polarización  $\theta_p$  para el cual la componente del campo eléctrico situada en el plano de incidencia sólo se refracta, mientras que la componente del campo normal al plano de incidencia se refleja y se refracta. La luz reflejada, en el primer caso se dice que está parcialmente polarizada y en el segundo caso está polarizada linealmente de manera total, ambas en el plano perpendicular al de incidencia. Esto es muy relevante ya que para dicho ángulo de incidencia, el rayo reflejado y el rayo transmitido forman un ángulo de  $90^\circ$  tal como se ve en 5 y en esta relación es que se basa la ley de Brewster [8]

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_r &= \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_p \quad \text{y} \quad \hat{\theta}_p + \hat{\theta}_t = \frac{\pi}{2} \\ \rightarrow n_1 \sin \hat{\theta}_p &= n_2 \sin \hat{\theta}_t = n_2 \cos \hat{\theta}_p \quad (8) \\ \rightarrow \tan \hat{\theta}_p &= \frac{n_2}{n_1} \end{aligned}$$

Este concepto es de mucha utilidad en la fabricación de gafas de sol y también en los LCD, que son pantallas de cristal líquido que se usan para la construcción de pantallas de visualización.

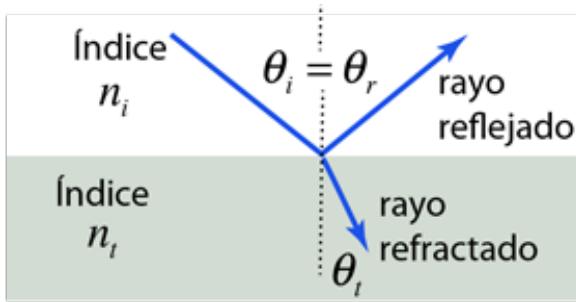


Figura 5: Polarización por reflexión [8]

## 2.5. Absorción de ondas electromagnéticas [9]

Cuando una onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas que componen la atmósfera. La absorción de onda por la atmósfera es análoga a una pérdida de potencia  $I^2R$ . Una vez absorbida, la energía se pierde y se transforma en otro tipo de energía, lo cual causa una atenuación en las intensidades de voltaje y campo magnético, así como una reducción correspondiente de densidad de potencia. Esto mismo sucede cuando la onda electromagnética es absorbida por cierto tipo de materiales.

Este fenómeno se puede explicar por medio de ley de Beer-Lamber, la cual explica que hay una relación exponencial entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de la sustancia, así como también entre la transmisión y la longitud del cuerpo que la luz atraviesa. De acuerdo a esto, si conocemos la distancia que la luz atraviesa por el cuerpo ( $l$ ) y el coeficiente de

absorción o la absorbancia molar de la sustancia ( $\alpha$ ), la concentración de la sustancia puede ser deducida a partir de la cantidad de luz transmitida. Esta relación de absorción de luz con las propiedades del material atravesado se puede expresar de distintas formas, por ejemplo 9 y 10.

$$A = \alpha lc \quad (9)$$

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-\alpha lc} \quad (10)$$

, donde  $A$  es la absorbencia,  $c$  es la concentración de sustancia absorbente en el medio,  $I_0$  es la intensidad de la luz incidente y finalmente  $I_1$  es la intensidad de la luz una vez ha atravesado el medio.

## 3. Metodología

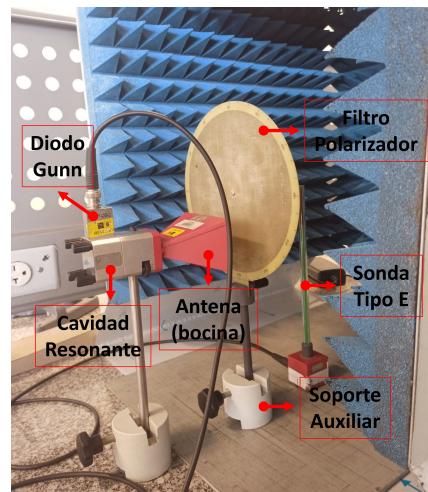


Figura 6: Montaje experimental donde se observan los componentes importantes para generar la onda en microondas

En esta práctica se realizó el montaje experimental observado en la figura 6, en donde se observa la sonda tipo de E usada detectar el campo

eléctrico, el circuito de alimentación del diodo Gunn empleado como oscilador y un elemento importante que no se observa en la imagen es el voltímetro, el cual se emplea para medir la salida de la sonda. Esta práctica se divide en tres fases metodológicas en donde se buscarán recolectar los datos necesarios.

### 3.1. Fase uno

En esta fase se deben tomar los datos necesarios para responder las siguientes preguntas:

- ¿La onda emitida está polarizada?  
Aquí se sugiere hacer uso de la sonda tipo E teniendo en cuenta que la sonda solo puede medir la componente del campo eléctrico paralelo a su eje y también el filtro polarizador teniendo presente que debido a que este tiene una serie de alambres paralelos y equidistantes, solamente la componente del campo perpendicular a los alambres puede transmitirse. Haciendo uso de estos hay que idear una manera para determinar si la onda está polarizada lineal, circular o elípticamente o si de por sí no está polarizada.
- ¿Qué tan amplio angularmente es el diagrama de emisión?
- ¿La amplitud del campo decrece con la distancia al emisor?

Para estas dos últimas preguntas la metodología es similar ya que para la primera hay que mantener la coordenada  $x$  constante mientras se varía la coordenada en  $y$ , mientras que para la segunda pregunta hay que cambiar de posición la sonda moviéndola solamente en  $x$  y conservando la coordenada  $y$  en 0. Para ambos casos hay que registrar en una tabla los datos de lectura del voltímetro para cada posición.

### 3.2. Fase dos

Para el montaje de esta fase hay que ubicar la salida de la cavidad resonante en ( $X = 0, Y = 0$ ) y la sonda en las coordenadas ( $X = 20cm, Y = 0cm$ ). En medio de estos dos elementos hay que ubicar el soporte con el polarizador y hay que tomar los datos de la lectura de la sonda cuando se varía angularmente el polarizador en un rango de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . Hay que repetir este proceso para verificar los datos.

### 3.3. Fase tres

Finalmente, se quiere estudiar el fenómeno de absorción en distintos materiales ya que cuando una onda incide sobre un material homogéneo, la amplitud del campo disminuye dependiendo del espesor del material y las propiedades del material. Para esto se debe ubicar la cavidad resonante y la sonda en las mismas coordenadas de la fase anterior, pero en este caso en medio de estos dos hay que ubicar láminas de distintos materiales de modo que para cada uno de estos hay que medir la lectura de la sonda antes de ubicar la lámina y después repitiendo el proceso varias veces.

## 4. Tratamiento y análisis de datos

### 4.1. Comprobación de la polarización de la onda emitida

Para la comprobación del estado de polarización de la onda emitida, se hizo uso del polarizador; con este, se pudo observar que a determinados ángulos ( $90^\circ$  y  $270^\circ$ ) del polarizador se obtenía el valor de voltaje máximo, mientras que en los ángulos perpendiculares a estos, el voltaje se hacía mínimo, muy cercano a 0. Esto ya nos daba una idea de que la onda podría estar

polarizada linealmente. Sin embargo, estas observaciones podrían no parecer suficientes para afirmar el estado de polarización, es por esto que se registraron los valores de voltaje variando el ángulo del polarizador en la tabla 4, con el objetivo de corroborar si se cumplía la ley de Malus, es decir, la ecuación 7.

A continuación, en la figura 7, se presenta la gráfica de Voltaje [V] vs ángulo [rad].

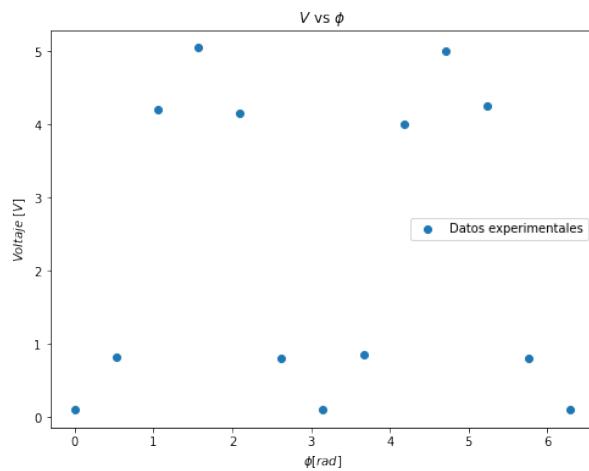


Figura 7: Voltaje vs Ángulo para comprobación de ley de Malus.

En primera instancia, parece tener el mismo comportamiento que la ecuación 7; pero para comprobarlo de mejor forma se hizo un ajuste a la curva a partir de la ecuación antes mencionada, pero realizando un pequeño ajuste al considerar que el ángulo registrado no necesariamente es el ángulo entre la polarización de la onda y la del polarizador, con lo cual queda así:

$$V = V_0 \cos^2(\phi + \delta)$$

Donde  $\delta$  es un desfase de ángulos.

El ajuste se realizó por medio de mínimos cuadrados utilizando la función `curve_fit()` de la librería *Scipy* de Python, con una tolerancia de  $1e - 8$ . Al hacer esto, se obtiene la ecuación

$V = 5,18116 \cos^2(\phi + 89,8^\circ)$ . Este desfase lo que indica es que el punto de referencia para el ángulo en el polarizador está corrido  $90^\circ$  respecto a la polarización de la onda.

Con un coeficiente  $R^2 = 0,975$ , se comprueba que se ajusta a los datos experimentales, por lo que se comprueba la ley de Malus, que a su vez permite afirmar que la onda ya estaba polarizada linealmente. Justamente esto último, es la razón por la cual sólo se hace uso de un polarizador, debido a que la onda ya está polarizada previamente por lo que no hay necesidad de un segundo.

La comparación entre los datos experimentales y el ajuste realizado se puede observar en la figura 8.

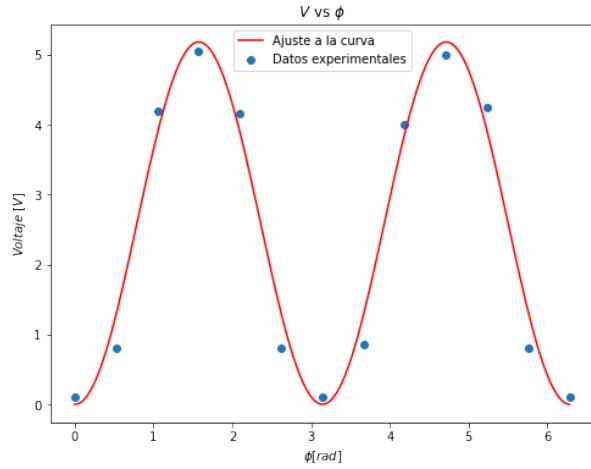


Figura 8: Voltaje vs Ángulo y ajuste para comprobación de ley de Malus.

También resulta importante mencionar que, colocando el receptor en la misma posición (17,0), con polarizador se obtiene un valor máximo de voltaje menor a si se hiciera sin polarizador; esto debido a que se trata de un polarizador no ideal, con lo cual presenta absorción de la intensidad de la onda.

## 4.2. Diagrama de radiación (Corte Transversal)

Para el análisis de la antena (sin polarizador) y el comportamiento de la onda emitida, se realizó el diagrama de radiación, pasando de coordenadas cartesianas a polares y graficando la intensidad (en voltaje) en determinado punto por medio de una escala de colores, así como del tamaño del círculo. Los datos utilizados se encuentran en la tabla 2.

Para coordenadas polares, primero se transforma de  $(x, y)$  a  $(r, \theta)$ , de la siguiente forma:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \theta = \arctan \frac{y}{x}$$

Los resultados se muestran a continuación en la figura 9.

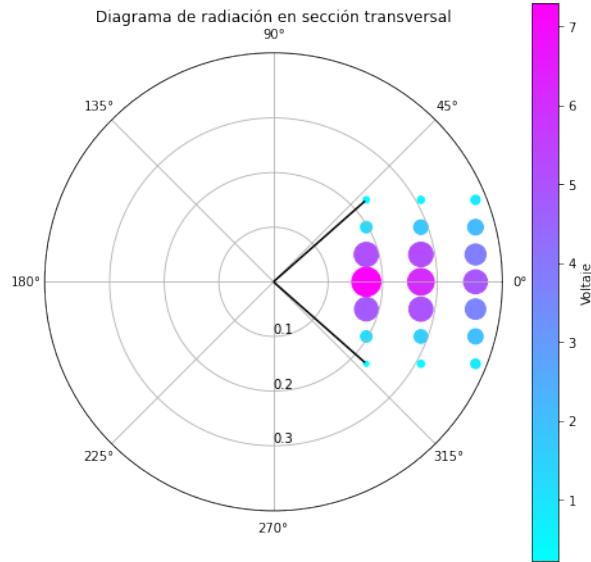


Figura 9: Sección transversal de diagrama de radiación en coordenadas polares.

Además, se obtuvo el ángulo total de emisión, considerando los puntos extremos en  $y$  donde se obtuvo una lectura mínima apreciable, que en este caso para  $x = 0,17[\text{cm}]$ , fue en  $y = \pm 0,15$ .

Haciendo  $\theta = \arctan y/x$ , se obtiene que el ángulo total de emisión es  $\theta_{total} = 2\theta$ , es decir,  $\theta_{total} = 82,85^\circ$ .

## 4.3. Relación del voltaje con la distancia

Para determinar la relación del voltaje con la distancia, se registraron los datos de la tabla 3. Se normalizaron los datos de voltaje, como se puede ver en dicha tabla, esto con el objetivo de ver de forma sencilla si es proporcional a  $\frac{1}{r}$  o a  $\frac{1}{r^2}$ . Además de esto se realizaron ajustes de la forma  $V_{norm} = c/r$  y  $V_{norm} = c/r^2$  por medio del método de mínimos cuadrados para determinar cuál se ajustaba mejor a los datos registrados; esto se puede ver en la figura 10

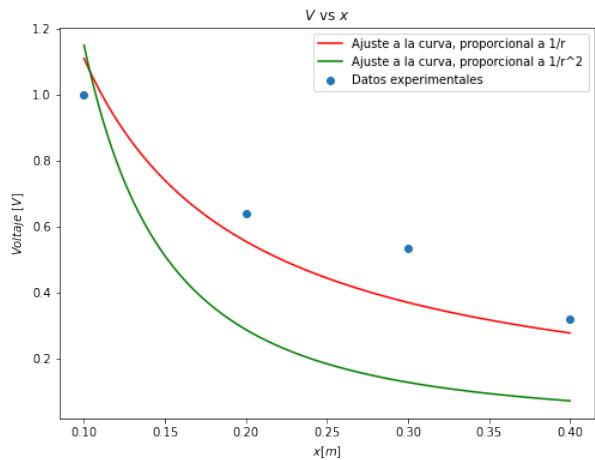


Figura 10: Ajuste para determinar relación entre voltaje y distancia.

Se puede ver que la que mejor se ajusta es la proporcional al inverso de  $r$ ; esto también es apreciable al calcular el valor de  $R^2$ , que es mucho mayor para este ajuste ( $R^2 = 0,8$ ), lo cual indica que el voltaje está asociado a la amplitud del campo eléctrico. Sin embargo, el ajuste que se obtuvo no fue muy bueno, lo cual podría deberse a que en este no se consideraron otras va-

riables que podrían tener importancia aparte de la distancia.

#### 4.4. Coeficiente de absorción

Para determinar el coeficiente de absorción de distintos materiales, se obtuvo los datos registrados en la tabla 5. A partir de estos es posible calcularlo usando la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{V_0 - V}{V_0} * 100$$

En donde  $V_0$  es el voltaje registrado sin ningún material,  $V$  es el voltaje respectivo para determinado material y  $\alpha$  es el coeficiente de absorción. Los resultados se presentan a continuación en la tabla 1.

Material	Coef. Absorción
Sin Material	-
Espuma seca	0
Espuma negra	-5.263157895
Lámina pasta blanca	11.84210526
PVC compacto	13.15789474
Lámina acrílico	18.42105263
Dos espumas secas	19.73684211
Espuma mojada	53.94736842
Espuma mojada y seca	59.21052632
Dos espumas mojadas	72.36842105
Lámina aluminio	96.71052632
2 láminas aluminio	96.84210526

Cuadro 1: Datos correspondientes a la fase 3

Se puede observar que existe una relación entre las densidades de los materiales, así como el grosor de los mismos e incluso las propiedades de interacción electromagnética tales como la permitividad o permeabilidad podrían influir. A mayor densidad y/o grosor, se incrementa el coeficiente de absorción; además, materiales como el aluminio tienen un coeficiente de absorción casi total.

## 5. Conclusiones

En este proyecto de investigación fue posible estudiar el comportamiento de las ondas electromagnéticas, en particular de ondas polarizadas producidas por una antena no isotrópica, de la cual se analizó su diagrama de radiación y ángulo total de emisión. Además, se determinó la relación entre el voltaje con la amplitud del campo eléctrico, o del voltaje con el inverso de la distancia; sin embargo, en este inciso hizo falta determinar otras posibles variables que influyan en el voltaje obtenido.

Además, se determinó la polarización de la onda emitida haciendo uso de un polarizador y la ley de Malus, la cual también fue posible corroborar debido a que la onda emitida tenía polarización lineal.

Por último, se analizó el coeficiente de absorción y su relación con distintos materiales, variando propiedades como la densidad y el grosor de estos, concluyendo que para estas dos propiedades existe una relación directamente proporcional.

## Referencias

- [1] Wikipedia. Radiación electromagnética, 2022. [Internet; descargado 21-agosto-2022].
- [2] José L. Fernandez. La luz como onda electromagnética.  
Tomado de <https://www.fisicalab.com/apartado/luz-yondasem#conceptoondasem>.
- [3] Robert Van Zyl, Willem Perold, and Reinhardt Botha. The gunndiode: Fundamentals and fabrication. IEEE, 1998.
- [4] Constantino Pérez Vega. *Sistemas de Telecomunicación*, chapter 10. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 2007.
- [5] upv.es. Diagramas de radiación.  
Tomado de [http://www.upv.es/antenas/Tema\\_1/diagramas\\_de\\_radiacion.htm](http://www.upv.es/antenas/Tema_1/diagramas_de_radiacion.htm).
- [6] Mecatrónica LATAM. Capacitor, 2021.  
Tomado de <https://www.mecatronicslatam.com/es/tutoriales/electronica/componentes-electronicos/capacitor/>.
- [7] mars.web.uah.es. Polarización.  
Tomado de <https://mars.web.uah.es/FFII/Polarizacion.pdf>.
- [8] hyperphysics. Polarización por reflexión.  
Tomado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/polref.html>.
- [9] quimica.es. Ley de beerlambert.  
Tomado de [https://www.quimica.es/enciclopedia/Ley\\_de\\_Beer-Lambert.html](https://www.quimica.es/enciclopedia/Ley_de_Beer-Lambert.html).

## 6. Anexos

Los datos recolectados así como su respectivo tratamiento se encuentran en el siguiente link: [Github Lab 4](#).

$x$	$y$	$V$
17	-15	0.23
17	-10	1.13
17	-5	4.8
17	0	7.3
17	5	5.1
17	10	1.15
17	15	0.35
27	-15	0.45
27	-10	1.6
27	-5	5
27	0	6.1
27	5	5.2
27	10	1.8
27	15	0.45
37	-15	0.8
37	-10	2
37	-5	3.6
37	0	4.9
37	5	3.8
37	10	2.1
37	15	0.75

Cuadro 2: Datos correspondientes a la pregunta 2 de la fase 1

$y$	$x$	$V$	$V_{norm}$
0	0.1	10.3	1
0	0.2	6.6	0.6407767
0	0.3	5.5	0.53398058
0	0.4	3.3	0.32038835

Cuadro 3: Datos correspondientes a la pregunta 3 de la fase 1

<b>Angulo</b>	<b>Angulo_rad</b>	<b>V_prom</b>
0	0	0.1
30	0.52359878	0.81
60	1.04719755	4.2
90	1.57079633	5.05
120	2.0943951	4.15
150	2.61799388	0.8
180	3.14159265	0.1
210	3.66519143	0.85
240	4.1887902	4
270	4.71238898	5
300	5.23598776	4.25
330	5.75958653	0.8
360	6.28318531	0.1

Cuadro 4: Datos correspondientes a la fase 2

<b>Material</b>	<b>Grosor material</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Coef. Absorción</b>
Sin Material	-	7.6	-
Espuma seca	1.8 cm	7.6	0
Espuma densa negra	1 cm	8	-5.263157895
Lámina pasta blanca	4 mm	6.7	11.84210526
PVC compacto	2 cm	6.6	13.15789474
Lámina acrílico	3 mm	6.2	18.42105263
Dos espumas secas	3.6 cm	6.1	19.73684211
Espuma mojada	1.8 cm	3.5	53.94736842
Una espuma mojada y una seca	3.6 cm	3.1	59.21052632
Dos espumas mojadas	3.6 cm	2.1	72.36842105
Lámina aluminio	1 mm	0.25	96.71052632
2 láminas aluminio	2 mm	0.24	96.84210526

Cuadro 5: Datos correspondientes a la fase 3