

# **Utilización de las Microondas para la Destrucción de los Circuitos de Ignición de Artefactos Explosivos Improvisados (AEI)**

## **Use of Microwaves for Destruction of Ignition Circuits of Improved Explosive Device (IED)**

Jairo Enrique Lalinde M.

Magister en Física y Matemáticas, Especialista en Holografía, Docente investigador, Facultad de Ingeniería Universidad de San Buenaventura Bogotá,  
Asesor en Termografía ADEMinsa Colombia S.A. [jlalinde@usbog.edu.co](mailto:jlalinde@usbog.edu.co), [jairolalinde@yahoo.com](mailto:jairolalinde@yahoo.com).

### **RESUMEN**

Uno de los desafíos más importantes para el gobierno Nacional, es el hallazgo o desactivación de las minas antipersonales. En la actualidad, existen gran variedad de estos artefactos entre los cuales están los de fabricación casera o comúnmente denominados por el ejército nacional como los AEI (Artefactos Explosivos Improvisados) o en inglés IED, (Improved Explosive Device). Muchos de estos dispositivos tienen circuitos de activación con componentes como resistores y bobinas. Cuando estos elementos son sometidos a radiación con microondas su temperatura se eleva hasta su destrucción. El generador de microondas utilizado en el proyecto, es un magnetron de frecuencia 2,45GHz y de 900W de potencia, tomado de un horno microondas convencional. Los circuitos fueron enterrados en una maqueta que simulaba las condiciones ambientales de un terreno natural. Como resultados se obtuvo la ignición de varios circuitos simples colocados entre 5cm y 10 cm de profundidad con exposiciones entre 30s y 60s.

### **SUMMARY**

One of the most important challenges for the national government is the finding or deactivation of anti-personnel mines. At present, there is a great variety of these artifacts among which are homemade or commonly referred to by the national army as the IED (Improved Explosive Device). Many of these devices have activation circuits with components such as resistors and coils. When these elements are subjected to microwave radiation, their temperature rises until they are destroyed. The microwave generator used in the project is a magnetron with a frequency of 2.45GHz and 900W of power, taken from a conventional microwave oven. The circuits were buried in a model that simulated the environmental conditions of a natural terrain. As a result, the ignition of several simple circuits placed between 5cm and 10cm deep with radiation exposures from 30s to 60s was obtained.

### **Palabras claves**

Artefactos explosivos artesanales, guías para microonda, calentamiento por microondas, detección de minas.

### **Keywords**

Craft explosive devices, microwave guides, microwave heating, mine detection

### **Introducción.**

Los artefactos explosivos improvisados (AEI), clasificados por el ejército nacional son de gran variedad debido a la diversidad de sus elementos básicos, como son los sistemas de ignición, mecanismos de cebado, explosivo, confinamiento, etc. El diseño del dispositivo explosivo está condicionado por la disponibilidad que el terrorista tiene de la tecnología de los diferentes componentes, el conocimiento, la imaginación y la capacidad de producción en la zona en la que se prepara o monta el AEI. Por lo tanto, la protección contra AEI ha de ser adaptable frente a los cambios de la amenaza.

Los AEI se han venidos desarrollando a través de los años, según lo muestran las estadísticas del ejército nacional en generaciones: de 2002 a 2004 en explosivos con elementos metálicos, segunda generación de 2004 a 2006 con el uso de temporizadores como dispositivos de activación, tercera generación de 2007 a 2009 aparecen los AEI con sistemas de activación en frecuencias de radio VHF y UHF, temporizados y sujetos a cargas explosivas de hasta 500 kg, cuarta generación de 2010 a la fecha con activación de frecuencia en celular de tecnologías 3.5 GSM y 3G temporizados y aumentaron el tiempo de activación a la frecuencia VHF y UHF. [1]

A la anterior evolución de los explosivos, las Fuerzas Militares han implementado diferentes estrategias entre las cuales se encuentran la conformación de Equipos de Explosivos y Demoliciones (EXDE), los grupos de Manejo de Artefactos Explosivos (MARTE). la adquisición de tecnología como los trajes de alta protección y robots de reconocimiento, la implementación de Equipos EXDE DELTA. (Equipo de explosiones y demoliciones), etc.

De acuerdo a estas referencias se observa el uso de dispositivos electrónicos simples para la activación de los AEI.

De igual forma, en la siguiente tabla de los AEI más utilizados en el territorio colombiano, se observa la utilización de circuitos simples para la activación de las minas, sus componentes básicos y los tipos de explosivos más utilizados tanto en aplicaciones militares como civiles y caseras.

**Tabla 1.** Tipos de minas antipersonales más utilizadas

Nombre	Contenido	Activación	Ubicación
Quiebra patas	Insumos químicos, abonos y fertilizantes. Anfo o R1 (explosivos caseros)	Por presión, por alivio de presión, por tensión, por alivio de tensión, por movimiento o por fotocelda. Generador de energía: pilas	Enterradas o escondidas en los matorrales, ubicadas en los árboles o en el agua.
Quiebra patas química	Está compuesta por émbolo, ácido sulfúrico, pólvora negra y explosivo. Se fabrica con envases plásticos de desodorante y tubos de PVC.	Por presión y reacción química. Generador de energía: pilas	Son ubicadas sobre o al lado de los caminos y en tronchas abandonadas.
Tumba postes	Compuesta por lámina galvanizada, brea, metralla y explosivo.	Por presión, alivio de presión, tensión, alivio de tensión, movimiento o por fotocelda. Generador de energía: pilas	Es utilizada para el sabotaje a torres de energía, oleoductos y torres de comunicación.
Cajón	Compuesta por lámina galvanizada, brea, metralla y explosivo.	Por presión, alivio de presión, tensión, alivio de tensión, movimiento o por fotocelda. Generador de energía: pilas	Este tipo de minas son colocadas o sembradas en los taludes de las carreteras, caminos o pasos peatonales.
	Compuesta por costal de fique, metralla y explosivo.	Por presión, alivio de presión, tensión, alivio de tensión, movimiento o por fotocelda. Generador de energía: pilas	Las minas tipo costal son utilizadas de dos maneras, lanzadas de partes altas o sembradas.

## Técnicas de detección de los AEI que existentes en el país

No existe una técnica que supere todos los obstáculos que se presentan en el campo de ubicación de los AIE. Todas las técnicas poseen ventajas y desventajas; sin embargo, todas deben cumplir con ciertas características comunes, entre las cuales están [2]:

- Detección en tiempo real.
- Ser portátil, fácil de operar y requerir la mínima cantidad de personal para su funcionamiento.
- Eliminar exposición riesgosa que pueda afectar la vida del personal que la opera.
- Disminuir interferencias por condiciones climáticas y topográficas.
- Permitir operación por tiempos prolongados.
- Identificar la sustancia explosiva o que por lo menos se identifique si es explosivo o no.

Además, las situaciones que se deben tener presente en el momento de comprobar una técnica de detección son:

- Vegetación demasiado densa

- Topografía montañosa
- Clima muy variable; en general se presenta alta humedad.
- Forma y tamaño de la mina antipersona y los AEI
- Localización: no existe una localización típica.
- Tipos de explosivos (usual el nitrato de amonio y combustibles ANFO).

En la actualidad se están mezclando diferentes técnicas, llamados métodos híbridos, que pueden superar los inconvenientes de unos métodos con la ayuda de otros. A continuación se describen algunas de las técnicas de detección utilizadas en el país.

#### *Detector de Metales*

Estos detectores funcionan mediante el principio de Inducción Electromagnética, fenómeno que consiste en generar campos eléctricos mediante campos magnéticos. Se hace fluir corriente en una bobina que genera un campo magnético a sus alrededores en forma de pulsos con frecuencias entre 1000Hz y 50000Hz. [3]

#### *Radar de penetración terrestre (GPR)*

Es una técnica que utiliza la radiación electromagnética en la banda de microondas del espectro de radiación (10 a 1000 MHz) mediante una o varias antenas a las cuales se les suministra corriente alterna para emitir ondas de radio que penetran en la tierra. El GPR detecta objetos a profundidades hasta de 1.5 m. [4].

#### *Tomografía de Impedancia Eléctrica.*

Es una técnica que proporciona una imagen de la distribución de la conductividad eléctrica del suelo mediante un conjunto de electrodos estimulados eléctricamente (1 mA a una frecuencia de 1kHz). Un objeto enterrado en las proximidades de la superficie causa una discontinuidad en la distribución de la conductividad eléctrica del suelo, que permite distinguir el tamaño, forma y profundidad (hasta de 20 cm) a la cual se encuentra el objeto. [5].

#### *Dispersión de rayos X*

Esta técnica consiste en la emisión de rayos X que penetran la superficie de la tierra; una gran parte se dispersan al colisionar con un objeto. La dispersión de los rayos emerge por encima del suelo y luego se intercepta con un detector, el cual transmite los datos a un software que proporciona una imagen del objeto (similar a un negativo fotográfico). Tiene un alcance hasta de 10 cm de profundidad. Se estima que el tiempo necesario para reproducir una imagen es de 1 min por m<sup>2</sup>. [6].

#### *Métodos Infrarrojos*

Esta técnica utiliza la emisión infrarroja y proporciona una distribución térmica de la dispersión de la luz solar emitida por la tierra luego de absorber gran parte de los rayos solares. La distribución térmica se altera por la presencia de objetos en el subsuelo o superficie de la tierra. Las minas antipersona emiten radiación térmica más intensa (más calientes) que la superficie de la tierra cuando sus cubiertas son metálicas (buen conductor térmico), y viceversa cuando sus cubiertas son plásticas (aislantes térmicos).

#### *Sistemas Acústicos-Sísmicos*

Esta técnica consiste en la emisión de ondas sonoras a baja frecuencia (menos de 1000Hz) que penetran en los poros de la tierra. Las ondas sonoras chocan con los objetos bajo tierra y pueden generar el efecto de resonancia que hace que el objeto emita ondas amplificadas y puedan ser detectadas por un sensor sísmico como el vibrómetro de Láser doppler (LDV) o el geófono [7].

#### *Animales*

Los animales pueden detectar sustancias químicas liberadas en la atmósfera. Al enterrar una mina esta libera hasta un 5% de vapores del explosivo. Se utilizan perros (los más utilizados son el labrador, pastor alemán y el terrier), ratas y está en investigación las abejas. [8].

Otras técnicas.

- Espectroscopia de Movilidad Iónica (IMS)
- Espectrometría de Masas
- Espectroscopia de Emisión de Plasma Producidos por Láser
- Alteración de la Fluorescencia Emitida por Membranas Poliméricas (olfato canino FIDO)
- Cromatografía de gases.
- Ondas Acústicas Superficiales.
- Tecnologías de imagen en Terahercios.

Estas últimas técnicas utilizan diferentes fenómenos físicos que exigen un conocimiento profundo de los mismos y los dispositivos usados, que son de últimas tecnologías, presentan, por ahora, costos muy elevados.

En la tabla 4, se muestran algunas de las ventajas y desventajas de las tecnologías mencionadas. Estas ventajas y desventajas pueden encontrarse en una misma tecnología.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de las tecnologías más utilizadas en el territorio colombiano

<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Detectores metálicos. Inducción electromagnética.	Mecanismo sencillo y bajo costo	No detecta plásticos. Interferencia con cables subterráneos
Radar de penetración GPR	Alta profundidad, no solo detecta metal sino también plásticos	Falsos positivos. Muy cerca de las minas.
Animales (Perros, ratas, abejas) Exposición a vapores de explosivos	Olfato a gran distancia	Influencia del clima. Decretos Sociedad protectora de animales
Botas blindadas	Cualquier tipo de terreno	El sobrepeso para el soldado
Drones con olfato electrónico (FIDO)	Rapidez en el escaneo.	Influencia del clima y la vegetación
Robots de Indumil	Protección para el operario	Para trochas muy irregulares
Termita (polvo gris)	Quema los componentes de la mina	Peligro para el operario muy cerca de la mina
Tubo disruptor (agua a presión)	Separa los componentes de la mina	Peligro para el operario muy cerca de la mina
Gradiómetro de gravedad	Alta sensibilidad	Falsos positivos
Vehículos de artillería	Rapidez y seguridad	Para trochas muy irregulares
La IMS (Espectroscopia de Movilidad Iónica)	Alta sensibilidad y resultados en tiempo real	El carácter radiactivo del material utilizado para la ionización. Costos elevados
Microondas	Destrucción de los circuitos de ignición en forma instantánea. Bajo costo	La fuente de energía no portátil.

#### Costos

Los costos de estas tecnologías son relativos, ya que algunas son solo para ubicar los artefactos, otras solo para destruirlos una vez sean ubicados y en la mayoría de los casos, se utilizan métodos híbridos. A continuación se tiene algunos costos referentes a algunos dispositivos.

- Un sensor para IMS tiene un costo entre US\$30.000 a US\$50.000.
- Un dron va desde los US\$1.000 hasta US\$25000.
- Una cámara con tecnología hiperespectral tiene un valor aproximado de US\$ 400.000.
- El dispositivo con microondas propuesto en el proyecto, sin contar con el dron que lo transportara y triplicando su potencia, puede tener un costo entre US\$200 y US\$600.

## Las microondas

Las microondas son radiaciones electromagnéticas incluidas en la banda de frecuencias que se extiende desde 300 MHz a los 300 GHz. [9]

Las microondas, a diferencia de las ondas cortas, son más fáciles de direccionar, es decir, pueden focalizarse en radiaciones de alta potencia. En su interacción con la materia, su energía puede ser reflejada, como ocurre cuando inciden sobre superficies metálicas, puede ser transmitida con poca pérdida de energía en medios transmisores, como el vidrio, o absorbida por la materia irradiada, lo que origina un aumento de temperatura en ésta. Las microondas son radiación no ionizante, es decir, no se modifica la estructura electrónica del material, por lo tanto su interacción es sólo de origen térmico.

El origen del calentamiento aparece de la interacción del campo eléctrico de las microondas con las moléculas o partículas del material, haciéndolas oscilar a su frecuencia, provocando fricciones que generan calor en el interior del mismo. El nivel de penetración de las ondas electromagnéticas es inversamente proporcional a la frecuencia, por esto las microondas tiene mayor penetrabilidad que las ondas infrarrojas IR. Cuando la energía de la onda es de baja frecuencia, puede rodear más fácil un obstáculo mientras que si es de alta frecuencia reacciona más con los materiales que tiene a su paso.

Para llevar a cabo las pruebas experimentales se presentan varios requisitos en la construcción de los emisores de microondas, los cuales deben tener una direccionalidad específica y una reducción de las pérdidas energéticas por la interacción con el medio circundante.

### Generación de las microondas

La radiación de microondas se genera en un dispositivo electrónico, denominado magnetrón. Figura 1 [10]. Básicamente consiste en un cilindro metálico, en el que hay dispuestas de forma radial una serie de cavidades resonantes, que se comunican con una cavidad central mayor, en cuyo eje existe un filamento metálico. El cilindro se comporta como ánodo y el filamento central como cátodo. El filamento, que está conectado al polo negativo de una fuente de corriente continua, eleva su temperatura hasta la incandescencia y empieza a emitir electrones. El cilindro se conecta al polo positivo y atraerá a los electrones. Todo este conjunto se encuentra en medio de los polos de un electroimán de alta potencia; que por su acción hace que los electrones, en lugar de ir en línea recta hacia el cilindro, al ser atraídos hacia las cavidades, realicen trayectorias circulares. Estos electrones que están en movimiento circular, producen radiaciones electromagnéticas (en este caso microondas) de una frecuencia que depende del tamaño de las cavidades. Mediante un cable coaxial, se transmite la energía a un director o radiador, constituido por una antena en el interior de un reflector [11].

El generador de microondas utilizado en el proyecto es un magnetrón de frecuencia 2,45GHz, de 900W de potencia, tomado de un horno microondas convencional, Figura 2.

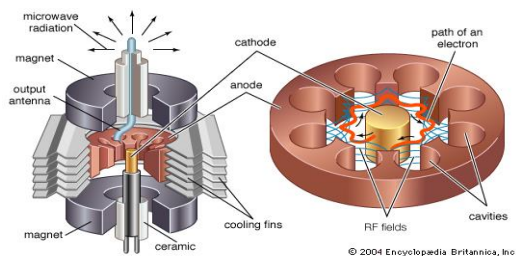


Figura 1. Partes de un magnetrón



Figura 2. Magnetron utilizado en el experimento

## Guías de onda

Las microondas emitidas por el generador o más exactamente por la antena, deben ser orientadas según la necesidad, es por ello que se utilizan las llamadas guías de onda para poder obtener la mayor eficiencia de las ondas emitidas.

Una guía de ondas es una estructura tubular capaz de conducir energía electromagnética. Las paredes de la guía encierran las ondas dentro de ella por el efecto de reflexión y el medio en el que se propagan puede ser un dieléctrico, siendo el más utilizado el aire por sus bajas pérdidas de energía.

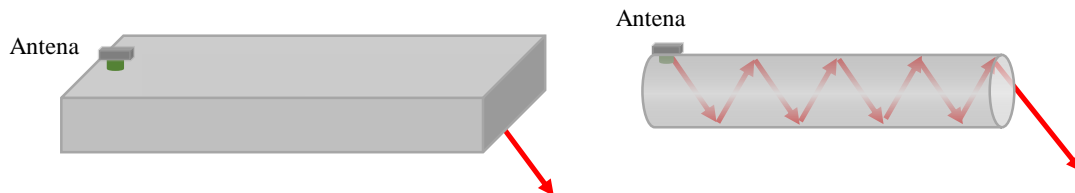


Fig. 3. Guías de onda rectangular y circular

Existen varios tipos de guías de onda y las más utilizadas son las de formas rectangulares y las circulares, dependiendo de su aplicación. Figura 3. Las guías de onda de forma rectangular son las más usadas en el mercado y especialmente en el campo de la conducción de señales; mientras que las guías circulares son utilizadas en transmisión de comunicaciones [12].

La energía electromagnética se propaga a través del medio como ondas electromagnéticas transversales (*TEM*) con un campo magnético, un campo eléctrico y una dirección de propagación que son perpendiculares entre sí. Las ondas electromagnéticas viajan a través de las guías por medio de diversas configuraciones de las ondas electromagnéticas transversales, a las que llamamos “modos” de propagación a lo largo de la guía y se describen como  $TM_{mn}$  o  $TE_{mn}$ . En los modos *TM* el campo magnético es transversal mientras que en los modos *TE* el campo *E* es transversal. En el último caso, la onda viaja en diagonal a lo largo de la guía reflejándose de pared a pared, haciendo que el campo *E* permanezca trasversal a la dirección de propagación. Los subíndices “*m*” y “*n*”, que son números enteros, se refieren al número de medios ciclos de variación del campo a lo largo de la guía. En el caso de guías circulares “*m*” indica el número de ciclos completos de variación del campo alrededor de la circunferencia y “*n*” el número de medios ciclos de variación a lo largo del diámetro. [13]

Para las guías de onda circulares, el modo dominante o principal es el  $TE_{11}$ , el siguiente modo es el  $TM_{01}$ , el tercer es el  $TE_{21}$  y así sucesivamente. La figura 4 muestra el modo dominante y el siguiente modo consecutivo. [14]. Los modos de orden alto recorren mayor distancia dentro de la guía y por eso es deseable tener modos de orden inferior. En una propagación multimodo, un pulso de energía llega al extremo lejano de la guía en diferentes tiempos, uno para cada modo. Así que el pulso se ensancha en el tiempo y este es el efecto de la dispersión [9]. Para disminuir este efecto se prefiere utilizar una propagación monomodal.

Se puede decir que un modo es una onda que se mueve como si fuera un rayo que choca con las paredes de la guía con diferente ángulo. Los modos de propagación dependen de la longitud de onda, de la polarización y de las dimensiones de la guía.

Tanto para las guías rectangulares como para las circulares, existen condiciones para la propagación de los modos. Estas condiciones se deducen de la solución de las ecuaciones de Maxwell y las condiciones de frontera en la guía [15].

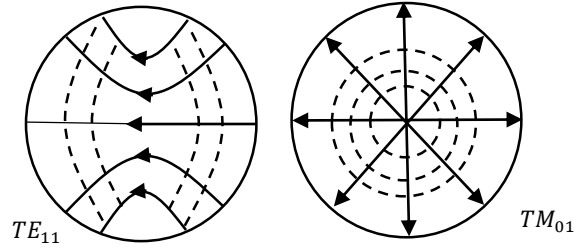


Figura 4. Dos primeros modos de una guía de onda circular.  
 ----Líneas de fuerza del campo E. - - - Líneas de fuerza del campo M

En una guía circular, la condición de frontera para que se propague el modo dominante  $TE_{11}$  es [16]:

$$f_c = \frac{c}{1.706D} \quad \text{ó} \quad \lambda_c = 1.706D \quad (1)$$

Donde:  $f_c$  es la frecuencia de corte, “c” la velocidad de la luz en el vacío,  $\lambda_c$ - longitud de onda de corte, “D” el diámetro de la guía.

La frecuencia de corte es la frecuencia más baja para que un modo se pueda propagar dentro de la guía. Las frecuencias por debajo de la frecuencia de corte no serán propagadas por la guía de onda. En la tabla 3 se tiene las condiciones para calcular las frecuencias de corte para los tres primeros modos de propagación en una guía circular.

Tabla 3. Frecuencias de corte en función del diámetro

Modo	Frecuencia de corte
$TE_{11}$	$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,71D}$
$TM_{01}$	$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,31D}$
$TE_{21}$	$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,03D}$

Dentro de una guía de onda existe una longitud de onda de operación “ $\lambda_g$ ” que es la longitud de onda que se propaga realmente en el medio (longitud de onda estacionaria) que hay dentro de la guía. Ver figura 6. Y su ecuación es:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (2)$$

Donde:

$\lambda$ - longitud de onda en el vacío.

$\lambda_c$ - longitud de onda de corte.

$\epsilon_r$ - constante dieléctrica relativa del medio (aire=1).

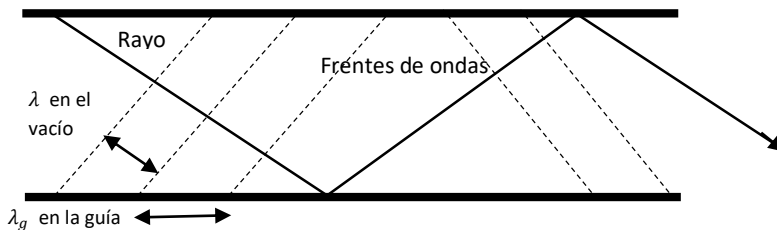


Figura 6. Diferencia entre “ $\lambda_g$ ” y “ $\lambda$ ”.

## Diseño del prototipo.

Por las razones anteriormente mencionadas se eligió construir una guía de onda circular. Para el diseño de la guía de onda se debe elegir inicialmente un diámetro "D", tal que la frecuencia de operación deseada se encuentre entre la frecuencia de corte del modo dominante  $TE_{11}$  y la del modo siguiente  $TM_{01}$ . La frecuencia de operación es la del magnetrón  $f = 2,45Gz$

### Diámetro

Se calcula primero la longitud de onda en el vacío con la frecuencia del magnetrón utilizado:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 m/s}{2,45 \cdot 10^9 Hz} = 12,245 cm$$

Ahora, para determinar la longitud de onda en la guía se debe calcular la longitud de onda de corte, para lo cual se eligió inicialmente un diámetro  $D=9,2cm$  de acuerdo a las recomendaciones de *Satellite experimenter's handbook de Martin Davidoff*. Con el valor de este diámetro se comprueba si la frecuencia del magnetrón está dentro del rango de las frecuencias de corte del modo fundamental en la guía.

Con la ecuación (1) se obtiene:  $\lambda_c = 1,706 \cdot (9,2cm) = 15,695cm$

Por lo tanto  $\lambda_g = \frac{12,245cm}{\sqrt{1 - \left(\frac{12,245}{15,695}\right)^2}} = 19,575cm$

De acuerdo a la tabla 3, las frecuencias de corte entre los modos  $TE_{11}$  y  $TM_{01}$  son:

$$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3 \cdot 10^8 m/s}{1,706(0,157m)} = 1,91Ghz$$

$$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3 \cdot 10^8 m/s}{1,31(0,092m)} = 2,49Ghz$$

Aquí se observa que la frecuencia del magnetrón seleccionado está dentro del rango de las frecuencias de corte para que solo se propague el modo  $TE_{11}$ , con el diámetro elegido.

### Longitud

La longitud de la guía se escogió de tal forma que solo se propagara una longitud de onda estacionaria  $\lambda_g$  a lo largo de la misma. La antena del magnetrón se coloca a  $\lambda_g/4$  para que en la pared cerrada de la guía se obtenga un mínimo de la onda, figura 7.

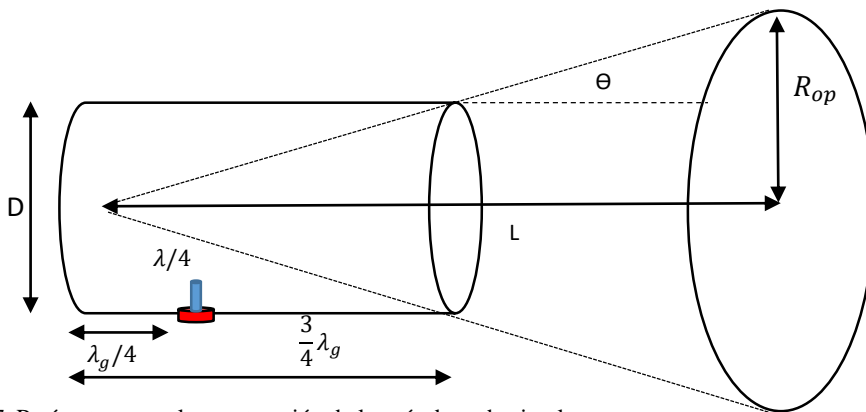


Fig. 7. Parámetros para la construcción de la guía de onda circular.



### Bocina

La bocina es estructura responsable de la formación del diagrama de distribución de los campos eléctricos y magnéticos en el frente de onda. La bocina realiza varias funciones: aumenta la apertura de la antena, aumenta su directividad (ganancia) y realiza la adaptación o acoplamiento de impedancia de propagación de las ondas entre la guía de onda y el espacio libre, generando un frente de onda casi esférico [17] y [18].

La apertura se calculó de acuerdo a la directividad de las bocinas cónicas [19], cuyo radio  $R_{op}$  se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_{op} \approx \sqrt{3\lambda L} \quad (3)$$

Donde L es la longitud entre la apertura y el vértice del cono, de la bocina, figura 7.

Las dimensiones de la antena quedaron finalmente como lo muestra la figura 8.

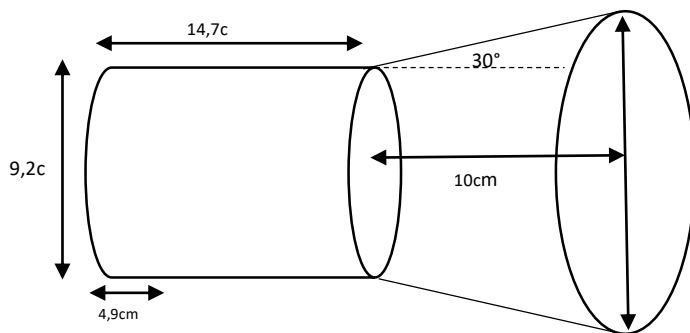


Fig. 8. Parámetros finales de la guía de onda circular.

### Maqueta

La maqueta se diseñó con parámetros de profundidad y área facilitados por conferencia de seguridad del Ejército Nacional.

### Imágenes experimentales

En la figura 9, se observan: a. la maqueta que simula el terreno donde se entierran los dispositivos; b. La antena sobre la zona donde hay un tubo de pvc enterrado con un circuito en su interior; c. Circuito quemado después de irradiarlo durante 30s; d. antena de microondas: magnetrón, guía de onda circular con bocina cónica y ventilador para refrigeración.



Fig. 9. a. Maqueta del terreno. b. antena en terreno. c. Circuito incinerado. d. Prototipo antena

## CONCLUSIONES

1. Para la destrucción de circuitos simples de ignición de artefactos AEI se puede utilizar la radiación por microondas.
2. Se logra la construcción de un dispositivo sencillo para direccionar la emisión de las microondas producidas por un magnetrón.
3. Se logra la destrucción de circuitos simples enterrados a través de radiación con microondas, a una profundidad de 5cm y con exposiciones de tiempo de 30s a 60s.
4. Las dificultades en el uso del dispositivo en campo son: a. La alimentación del magnetrón debe realizarse a través de un transformador de alta potencia y b. Para el aumento de la distancia de exposición de radiación se deben ampliar los parámetros de potencia y directividad de la fuente de microondas y de la guía de onda.
5. El costo por artefacto, triplicando su potencia, no supera los US\$600; sin contar con el dispositivo que lo pueda transportar.

## BIBLIOGRAFIA

1. Artefactos explosivos. [www.ejercito.mil.co/el\\_centro\\_nacional\\_artefactos\\_explosivos\\_minas\\_cenam\\_capacita\\_comites\\_explosivos\\_bating/conozcanos/historia\\_artefactos\\_explosivos\\_384951](http://www.ejercito.mil.co/el_centro_nacional_artefactos_explosivos_minas_cenam_capacita_comites_explosivos_bating/conozcanos/historia_artefactos_explosivos_384951).
2. Yady Andrés Pino Jaramillo. Detreminacion de técnicas de detección de explosivos optimas para el departamento de Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía Medellín 2009.
3. Dieter Guelle, Andy Smith. "Metal Detector Handbook for Humanitarian Demining" 2003. Chapter 4.3.7 Pag 86.
4. "Handbook on the Management of Ordnance and Explosives at Closed, Transferring, and Transferred Ranges and Other Sites" February 2002. Chapter 4, Pag 4-25.
5. "Handbook on the Management of Ordnance and Explosives at Closed, Transferring, and Transferred Ranges and Other Sites" February 2002. Chapter 4, Pag 4-25.
6. "Handbook on the Management of Ordnance and Explosives at Closed, Transferring, and Transferred Ranges and Other Sites" February 2002. Chapter 4, Pag 4-25.
7. Daniel A. Pernia Márquez "Introducción a la Medición de Vibraciones" Vibrómetro Doppler Láser (LDV), Pag 11
8. Jacqueline MacDonald "Alternatives for Landmine Detection" Innovative Mine Detection System Chapter 2, pag 32-36.
9. Microwave Fundamentals. <https://www.nap.edu/read/2266/chapter/4>
10. Magnetron. [https://www.researchgate.net/publication/293332642\\_ENERGY\\_HARVESTING\\_FROM\\_SPACE\\_BASED\\_SOLAR\\_POWER\\_SATELLITE?\\_sg=GRMM0pKayqCtseyU1hfj8qv8QM4z-8Mrij\\_-T2QkC0-NaJ9q0sy8C8MBoW0So3emzsSaw8NkWg](https://www.researchgate.net/publication/293332642_ENERGY_HARVESTING_FROM_SPACE_BASED_SOLAR_POWER_SATELLITE?_sg=GRMM0pKayqCtseyU1hfj8qv8QM4z-8Mrij_-T2QkC0-NaJ9q0sy8C8MBoW0So3emzsSaw8NkWg)
11. Funcionamiento del magnetron. <https://www.youtube.com/watch?v=Wt-UBMlIyaVE>.
12. Albert Miquel Sanchez Delgado. Universitat Oberta de Catalunya. [http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/69445/1/Circuitos%20de%20microondas\\_M%C3%B3dulo%206\\_%20Gu%C3%ADas%20de%20ondas.pdf](http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/69445/1/Circuitos%20de%20microondas_M%C3%B3dulo%206_%20Gu%C3%ADas%20de%20ondas.pdf)
13. Guías de ondas. [https://luz.izt.uam.mx/wiki/index.php/Radiacion:Guías\\_de\\_onda](https://luz.izt.uam.mx/wiki/index.php/Radiacion:Guías_de_onda)
14. Alejandro Paz Cayetano. Instituto Politecnico Nacional.Mexico Nov 2011
15. Fabian David Solano, Diseño y simulación de guía de onda para el calentamiento de materiales con microondas. universidad industrial de Santander. Bucaramanga abril 2008.
16. Principios de las Guías de Ondas. <http://www.monografias.com/trabajos108/principios-guias-ondas/principios-guias-ondas2.shtml>
17. Bocinas. [https://es.wikipedia.org/wiki/Antena\\_de\\_bocina](https://es.wikipedia.org/wiki/Antena_de_bocina)
18. Antenas y bocinas. [http://www.upv.es/antenas/Documentos\\_PDF/Notas\\_clase/Bocinas.pdf](http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Bocinas.pdf)
19. María del Pilar de las Heras Gómez. Diseño de antenas sobre guía de onda ranurada con control de alimentación mediante tornillos de sintonía laterales. Universidad Autonoma de Madrid escuela Politecnica Superior. Julio 2015.