

## DISEÑO DE ANTENA DE BOCINA CORRUGADA A 3 GHZ PARA USO EN CÁMARAS ANECOICAS.

Ing. Daryl Ortega González<sup>1</sup>, Ing. Lázaro Fonte Valdés<sup>2</sup>, Ing. Andrés Méndez-Monsanto Sosa<sup>3</sup>, MSc. Pedro Arzola Morris<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE), Ave 114 #11901 e/ 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba. ,  
<sup>2</sup>CUBATEL s.a, Prensa Latina y Adrade Km 1 ½ Marianao, La Habana, <sup>3</sup>BioCubaFarma, 100 y Avenida de la  
Independencia, <sup>4</sup>Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE), Ave 114 #11901 e/ 119 y 127, Marianao, Ciudad  
Habana, Cuba

[1dortegag@tele.cujae.edu.cu](mailto:dortegag@tele.cujae.edu.cu), [2fonte92@cubatel.cu](mailto:fonte92@cubatel.cu), [4arzola@tele.cujae.edu.cu](mailto:arzola@tele.cujae.edu.cu)

### RESUMEN

Tanto en cámaras anecoicas como en alimentadores de reflectores parabólicos las antenas de bocina juegan un rol esencial. Las primeras simulan un local libre de interferencias e independiente de las condiciones climatológicas, que permita la correcta medición de los principales parámetros de los dispositivos electromagnéticos. Estas están formadas por tres partes fundamentales: el revestimiento externo o jaula de Faraday, los materiales absorbentes en el interior de la cámara y las antenas de medición o antena patrón. El presente artículo, basado en el estudio de las antenas de bocinas corrugadas, propone el diseño de una bocina piramidal corrugada con ranuras de profundidad fija, en el entorno de desarrollo Mathcad14, para su uso en cámaras anecoicas. Se analiza el efecto de las corrugaciones en las paredes de la bocina, en especial en las corrientes de superficie, y se comparan algunos parámetros de estas con los de una lisa, resaltando sus principales ventajas en función de su uso en cámaras anecoicas. Finalmente se comprueban teóricamente algunas de sus características de radiación.

**PALABRAS CLAVE:** Antena de bocina corrugada, cámara anecoica, ranura, patrón de radiación.

### ABSTRACT

In both anechoic chambers and parabolic reflector feeders, horn antennas play an essential role. The former simulate a location free of interference and independent of weather conditions, allowing the correct measurement of the main parameters of electromagnetic devices. These are formed by three fundamental parts: the outer coating or Faraday cage, the absorbent materials inside the chamber and the measuring antennas or standard antenna. This paper, based on the study of corrugated horn antennas, proposes the design of a corrugated pyramidal horn with fixed depth slots in the Mathcat14 development environment for use in anechoic chambers. The effect of the corrugations on the walls of the horn, especially the surface currents, is analyzed, comparing some parameters of these with those of

a smooth one, highlighting its main advantages in function of its use in anechoic chambers. Finally some of its radiation characteristics are theoretically tested.

**KEYWORDS:** Corrugated horn antennas, anechoic chamber, slot, radiation pattern.

## INTRODUCCIÓN

Las antenas son los dispositivos más comúnmente usados para la radiación y recepción de ondas electromagnéticas. Estas no solo transmiten la energía recibida en forma de onda en la dirección radial[1], sino que tienen la capacidad de concentrarla en determinada dirección. A la representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena se le denomina patrón de radiación [2].

La medición del patrón de radiación de una antena es una tarea imprescindible para el conocimiento de los principales parámetros de la misma, lo cual no siempre resulta un procedimiento sencillo, ya que las interferencias pueden alejar el valor medido del real[3].

Para dar solución a los problemas que presentan los denominados campos abiertos ideales, el tiempo que dura la medición y las interferencias surgen las cámaras anecoicas[4]. Estas simulan con gran exactitud las condiciones de propagación en el espacio libre y minimizan los riesgos de medición[5], evitando las interferencias producidas por las reflexiones de las ondas transmitidas por una antena fuente y por cualquier otra fuente que emita radiaciones no deseadas al receptor; es por ello que Cuba avanza en este tema.

Una cámara anecoica es un recinto que absorbe la energía que incide sobre sus paredes y consta de dos partes fundamentales: la jaula de Faraday y los materiales absorbentes de ondas electromagnéticas[4] además de las antenas de medición. Los dos primeros desarrollan funciones complementarias para obtener en su interior, como resultado final, un entorno sin interferencias externas ni internas; así como la simulación de las propiedades del espacio libre: condiciones idóneas para desarrollar las mediciones antes mencionadas, asegurando un alto nivel de fiabilidad de las mismas[5].

Es por ello que se hace inevitable la creación de un método efectivo para la fabricación de antenas de medición. Se escoge el diseño de antenas de bocina, por ser muy conocidas, ser muy usadas, tener un diseño exacto, resultados previsibles, pueden ser caracterizadas de forma muy segura y además servir como estándar universal para la calibración y medición de ganancia [2].

Las antenas de bocinas lisas convencionales tienen un patrón de radiación asimétrico[6], el cual tiene un nivel de lóbulos secundarios en el plano E de aproximadamente -10dB respecto al máximo de radiación, a pesar de lo cual se pueden obtener bocinas con una eficiencia de radiación elevada [7]. Esta característica provoca que mucha energía llegue a las paredes de la cámara producto de los lóbulos laterales de la antena que influyen también en la ganancia de la misma[8], provocando reflexiones no deseadas que pueden afectar la medición.

Con el propósito de reducir los lóbulos laterales[9] y obtener simetría en el patrón de radiación ,en el sentido de una medición en el espacio libre[10], se presenta en este artículo el diseño de una antena de bocina corrugada. Por su importancia la guía de onda WR es tratada[11].

Los campos radiados por una antena varían según la distancia. En la región de campo cercano, la energía es predominantemente reactiva; mientras que para la región de campo lejano, la contribución de la energía reactiva es despreciable y se suele considerar que solo existe campo radiado. Para el estudio de los parámetros de una antena en cámara anecoica se analiza el comportamiento de esta en la región de campo lejano, el cual se alcanza para distancias  $R \gg 2D^2/\lambda$  [2], donde D es la mayor dimensión de la antena y  $\lambda$  la longitud de onda de la frecuencia de operación mayor. Un aspecto a tener en cuenta es que la antena a estudiar debe ser iluminada por un campo uniforme y que las dimensiones de la guía de onda deben proporcionar el rango de frecuencias deseado para el diseño de la bocina.

La unión entre el cable coaxial y la guía de onda rectangular debe tener un coeficiente de reflexión casi nulo para evitar reflexiones[12]. Sobre esta base el presente artículo tiene como objetivo principal el diseño de una antena de bocina corrugada a una frecuencia de 3GHz ( $\lambda = 10cm$ ) para su uso en cámaras anecoicas.

### DISEÑO DE BOCINA PIRAMIDAL LISA CON DIMENSIONES ÓPTIMAS

A partir del método de diseño usado por Lo&Lee.

**Tabla 1: Datos de la guía de onda WR-284**

Parámetro	Valor
<b>Ganancia(G)</b>	20 dB
<i>a</i> (dimensión corta de la guía de onda)	7.214 cm
<i>b</i> (dimensión larga de la guía de onda)	3.404 cm
<i>a/b</i>	2.1194
<b>Frecuencia de trabajo</b>	3 GHz
<b>Rango de frecuencias</b>	$2.350GHz \leq f \leq 4.175GHz$

El diseño parte de los siguientes valores físicos iniciales de la guía de onda WR-284 y de los parámetros deseados, los cuales se muestran en la tabla 1.

A partir del método de diseño propuesto por Lo&Lee, partiendo de que la eficiencia en conjunto de las antenas de bocina es alrededor del 50 % se plantea que la ganancia máxima es[2] :

$$G_0 = \frac{1}{2} \frac{4\pi}{\lambda^2} (a_1 b_1) = \frac{2\pi}{\lambda^2} \sqrt{3\lambda \rho_h} \sqrt{2\lambda \rho_e} \quad (1)$$

Donde  $\lambda = 10cm$  y  $a_1, b_1, \rho_h$  y  $\rho_e$  se muestran en la tabla 2. Para que las antenas piramidales sean físicamente realizables  $p_h = p_e$  , a partir de lo cual se llega a la igualdad

$$\left(\sqrt{2x} - \frac{b}{\lambda}\right)^2 (2x-1) = \left(\frac{G_0}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x}} - \frac{a}{\lambda}}\right)^2 \left(\frac{G_0^2}{6\pi^3} \frac{1}{x} - 1\right) \quad (2)$$

De donde

$$\frac{\rho_e}{\lambda} = x \quad (3)$$

$$\frac{\rho_h}{\lambda} = \frac{G_0^2}{8\pi^3} \left(\frac{1}{x}\right) \quad (4)$$

Combinando (3) y (4) se llega al valor de x:

$$x_1 = \frac{G_0}{2\pi\sqrt{2\pi}} \quad (5)$$

Dado un valor inicial  $x_1$ , a partir de un método iterativo se puede ver que el valor final de  $x_1$  satisface la igualdad dada por (2). Dicho método se implementa en el software Mathcad, el cual arroja que el valor de  $x_1$  que satisface la igualdad, luego de algunas iteraciones, es  $x_1=6.069$

Luego se calcula  $\rho_e$  y  $\rho_h$  a partir de (3)-(4) para luego determinar  $a_1$  y  $b_1$  (Fig. 1).

$$a_1 = \sqrt{3\lambda\rho_2} \quad (6)$$

$$b_1 = \sqrt{2\lambda\rho_1} \quad (7)$$

Por último se calculan  $p_e$  y  $p_h$  [2]

La tabla 2 resume los resultados obtenidos para el diseño. Estas son las dimensiones óptimas para una bocina piramidal que trabaja a 3GHz con 20dB de ganancia. Se pueden obtener diseños más pequeños lo cual disminuiría costos[13] pero afectaría otros parámetros de desempeño. La geometría de la bocina óptima en cada plano se muestra en las figura 1 y figura 2, siendo  $\theta_e = 33.36^\circ$  y  $\psi_e = 16.68^\circ$  el ángulo y semiángulo de apertura en el plano E respectivamente.

**Tabla 2: Dimensiones óptimas de la bocina piramidal a 3 GHz con 20 dB de ganancia**

Sigla	Medida	Dimensión
$a_1$	Apertura Plano E	44.641 cm
$b_1$	Apertura Plano H	34.84 cm
$p_e$	Longitud Axial de la antena	52.46 cm
$\rho_e$	Longitud Radial Plano E	60.69 cm
$\rho_h$	Longitud Radial Plano H	66.43 cm

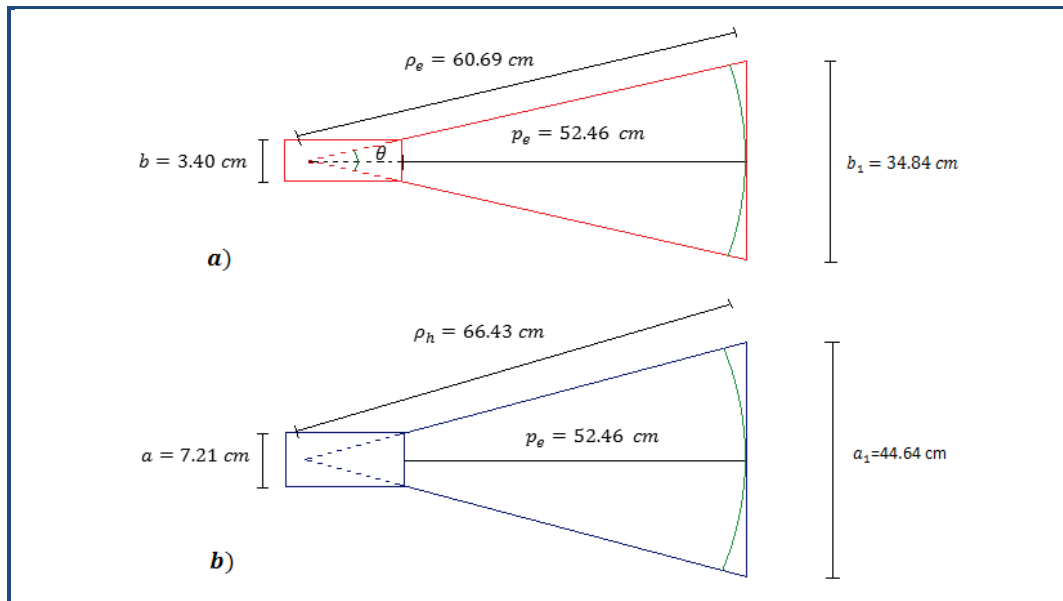


Figura 1: Vista lateral y superior de la antena diseñada. a) Plano E, b) Plano H

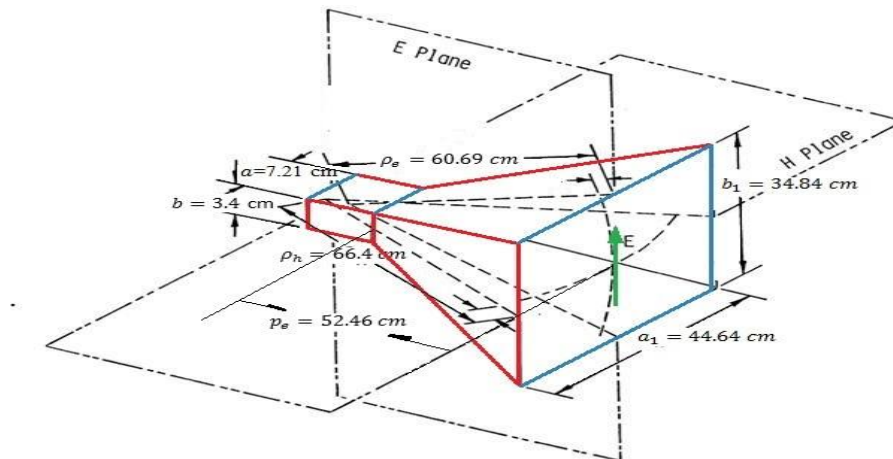


Figura 2: Dimensionamiento de la antena de bocina plana

### DIAGRAMA DE RADIACIÓN

Las componentes tangenciales de los campos E y H en la abertura de la antena de bocina están dados aproximadamente por [14]:

$$E'_y(x', y') = E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) e^{-j \left[ k \frac{(x'^2 + y'^2)}{2} \right]} \quad (8)$$

$$H'_x(x', y') = -\frac{E_0}{\eta} \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) e^{-j \left[ k \frac{(x'^2 + y'^2)}{2} \right]} \quad (9)$$

Donde  $(x', y')$  representa un punto del espacio fuera de la abertura y  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

Los gráficos de la distribución de los campos en la abertura en coordenadas cartesianas se obtienen con la ayuda del software Mathcad14 y se muestran en las figura 3 y figura 4. Se tomó una impedancia del espacio libre ( $\eta$ ) de 377 ohm y una amplitud de campo constante de  $E_0=15$ .

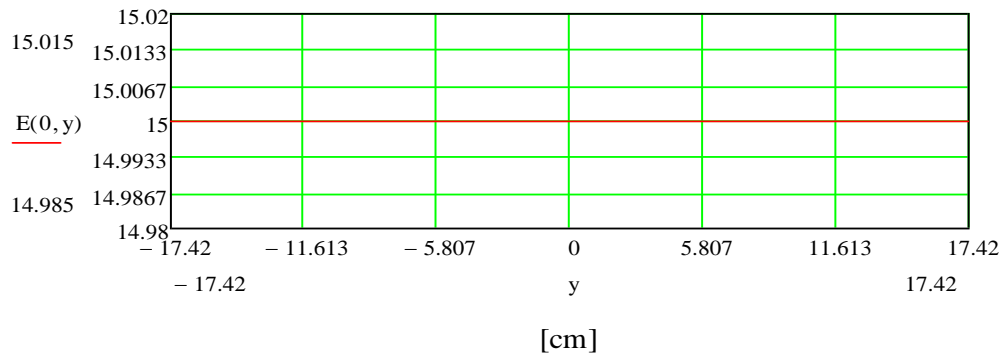


Figura 3: Distribución de Campo Eléctrico en el plano E.

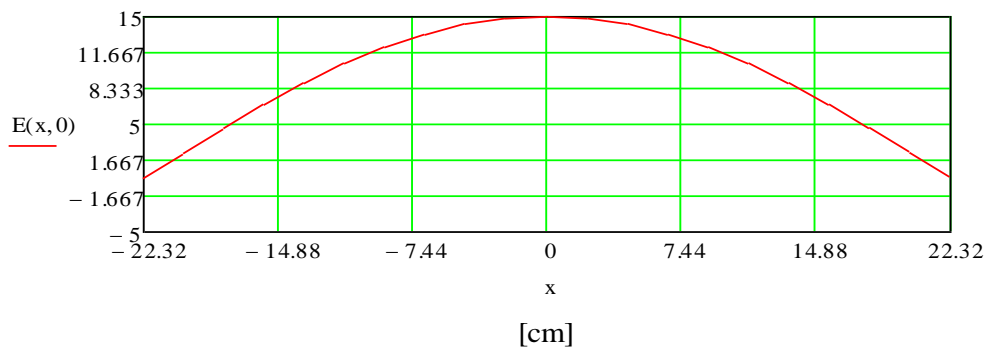


Figura 4: Distribución de Campo Eléctrico en el plano H

En la figura 3 y figura 4 se aprecia cómo el campo eléctrico posee una distribución cosenoidal en el plano H; mientras que en el plano E se comporta de manera uniforme, alcanzando su valor máximo en el centro de la bocina. La distribución uniforme en el plano E es la que provoca que se desborde mayor cantidad de energía en los bordes de la abertura y que crezcan considerablemente los lóbulos secundarios en este plano. Sería conveniente que el campo en el plano E tuviera una distribución

también cosenoidal en aras de aumentar la directividad y disminuir los lóbulos laterales y traseros como se verá posteriormente.

### DIAGRAMA DE RADIACIÓN NORMALIZADO EN DECIBELES

Partiendo de que las antenas de bocina son en gran medida directivas, en la figura 6 se puede observar el diagrama de radiación normalizado en decibeles para ambos planos. Es necesario destacar que para el plano H, los lóbulos laterales se encuentran entre los -14 y -17dB (aproximadamente -15dB) por debajo del máximo nivel de radiación; mientras que para el plano E, estos están entre los -4 y -6dB (aproximadamente -5dB) por debajo del nivel máximo. Esta diferencia de -10dB, provoca que en el plano E se irradie aproximadamente 10 veces la potencia que se irradia en el plano H en los lóbulos secundarios. Gran parte de la energía radiada en los lóbulos secundarios incide directamente sobre las paredes de la cámara anecoica, provocando reflexiones indeseadas que afectan el resultado de la medición.

En la figura 5 se ve la diferencia entre ambos diagramas de radiación, esta vez en veces. El diagrama de radiación en decibeles (dB) con respecto al ángulo  $\theta$  (radianes) se obtiene aplicando métodos analíticos, que brindan una buena aproximación. A partir de [2] llevando de coordenadas cartesianas a esféricas se obtiene:

$$N_{\theta} = -\frac{E_0}{\eta} \cos \theta (\text{sen } \phi) I_1 I_2 \quad (10)$$

$$N_{\phi} = -\frac{E_0}{\eta} \cos \phi I_1 I_2 \quad (11)$$

$$L_{\theta} = E_0 \cos \theta (\cos \phi) I_1 I_2 \quad (12)$$

$$L_{\phi} = -E_0 \text{sen } \phi I_1 I_2 \quad (13)$$

En donde

$$I_1 = \int_{-a_1/2}^{+a_1/2} \cos\left(\frac{\pi}{a} x'\right) e^{-jk[x'^2/(2\rho_1) - x' \text{sen } \theta \cos \phi]} dx' \quad (14)$$

$$I_2 = \int_{-b_1/2}^{+b_1/2} e^{-jk[y^2/(2\rho_1) - y'\text{sen}\theta\text{sen}\phi]} dy' \quad (15)$$

Para que finalmente se obtengan las ecuaciones de campo en coordenadas esféricas para el plano E y el plano H como:

$$E_\theta = -j \frac{ke^{jkr}}{4\pi r} [L_\phi + \eta N_\theta] \quad (16)$$

$$E_\phi = +j \frac{ke^{-jkr}}{4\pi r} [L_\theta + \eta N_\phi] \quad (17)$$

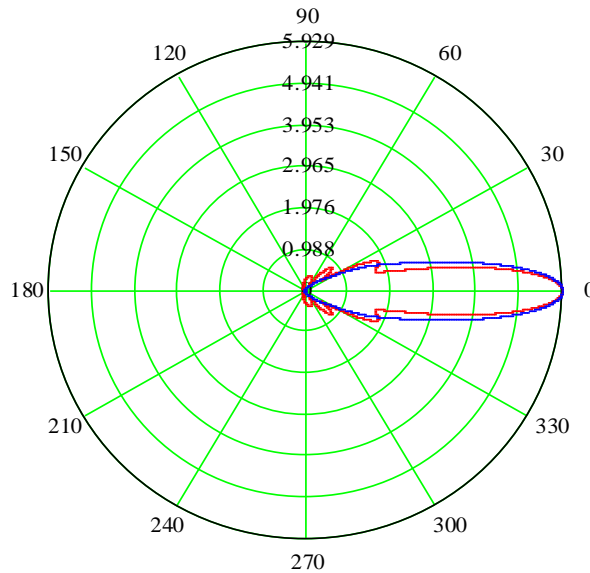


Figura 5: Diagrama de radiación en su valor absoluto. Rojo: Plano E, Azul: Plano H



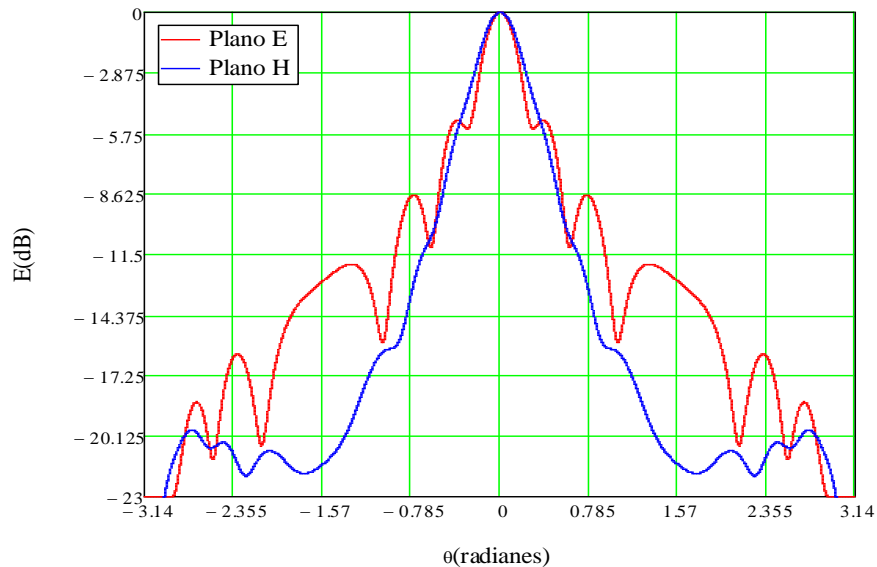


Figura 6: Patrón de radiación normalizado en dB

### DISEÑO DE CORRUGACIONES CON PROFUNDIDADES CONSTANTES

La estructura del patrón de radiación de la antena en los lóbulos traseros está fuertemente influenciada por las difracciones desde los bordes de la abertura y las paredes de la misma[2], esta difracción no solo causa radiación indeseable en los lóbulos traseros, sino también en el lóbulo principal y los laterales, de manera que resta simetría al patrón de radiación y disminuye ganancia y directividad.

A través de mediciones se demuestra que las corrugaciones logran transformar el campo uniforme en el plano E en una distribución cosenoidal, dándole así a la bocina un patrón de radiación prácticamente simétrico y con niveles de lóbulos secundarios en ambos planos de -15dB, eliminando además las difracciones espurias en el borde de la abertura. Las corrugaciones se harán en el plano E puesto que las difracciones espurias en el plano H son mínimas para bocinas cuadradas[2]. Con la inclusión de corrugaciones, además, se mejorará la eficiencia de la antena[15].

Debido a que la antena tiene un semiángulo de apertura estrecho ( $16,68^{\circ}$ ), las corrugaciones deben ser perpendiculares al radio axial de la misma y el número total de corrugaciones se calcula a partir de (22). Estudios realizados demuestran que para una longitud de onda de 8 cm en el espacio libre las corrientes superficiales de la antena de bocina decaen en una superficie corrugada con respecto a una lisa para valores de  $d$  como los mostrados en la Tabla 3, esto es debido a que la energía se atenúa al propagarse por las corrugaciones[2].

Las dimensiones para el diseño de las corrugaciones constantes (figura 7) se obtienen a través de las relaciones:

$$\frac{\lambda}{4} \leq d \leq \frac{\lambda}{2} \quad (18)$$

$$w \leq \frac{\lambda}{10} \quad (19)$$

$$t \leq \frac{\lambda}{10} \quad (20)$$

$$p = w + t \quad (21)$$

$$N_c = \frac{P_e}{p} \quad (22)$$

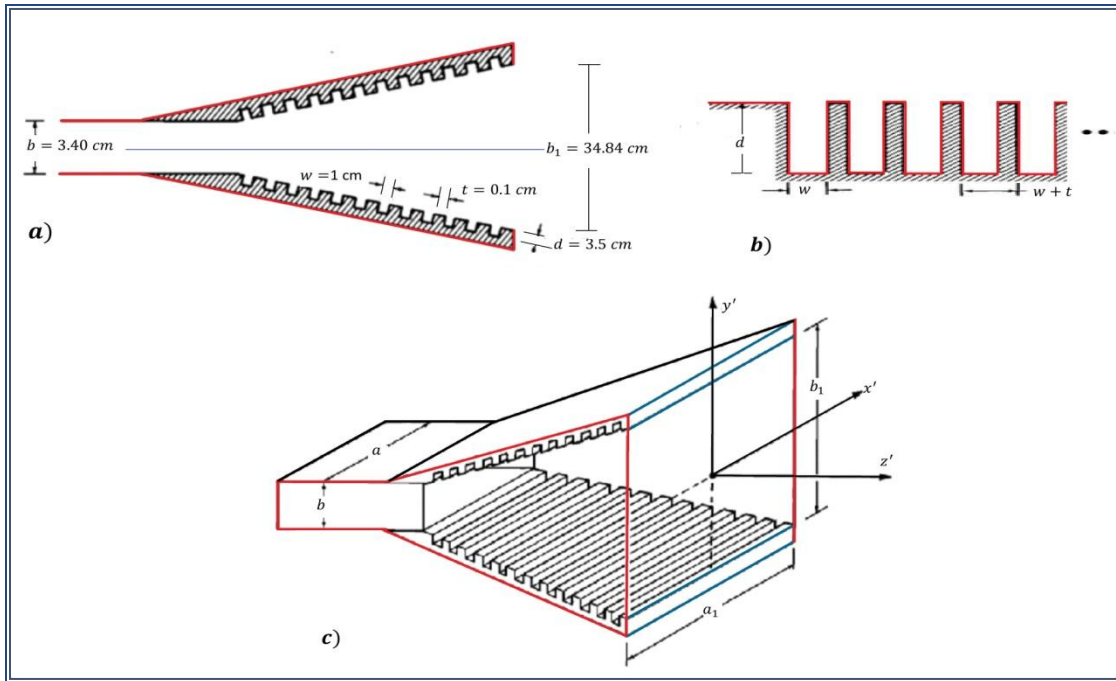


Figura 7: Geometría de las corrugaciones

En el número de corrugaciones se toma solo la parte entera. Los resultados arrojados por Mathcad se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Dimensiones de las corrugaciones

Sigla	Medida	Dimensión
$d$	Profundidad de la corrugación	2.5cm-5cm
$w$	Ancho de la ranura	1 cm
$t$	Ancho del diente de corrugación	0.1 cm
$N_c$	Número de corrugaciones	47

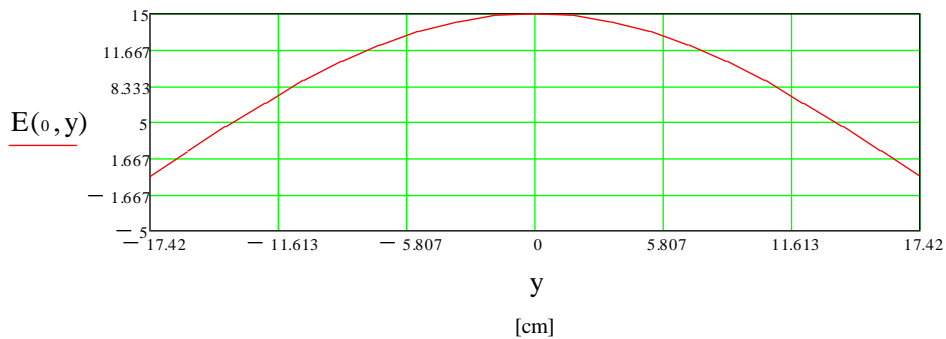
## DIAGRAMA DE RADIACIÓN

Las componentes tangenciales de los campos E y H en la abertura de la antena de bocina corrugada están dados aproximadamente por :

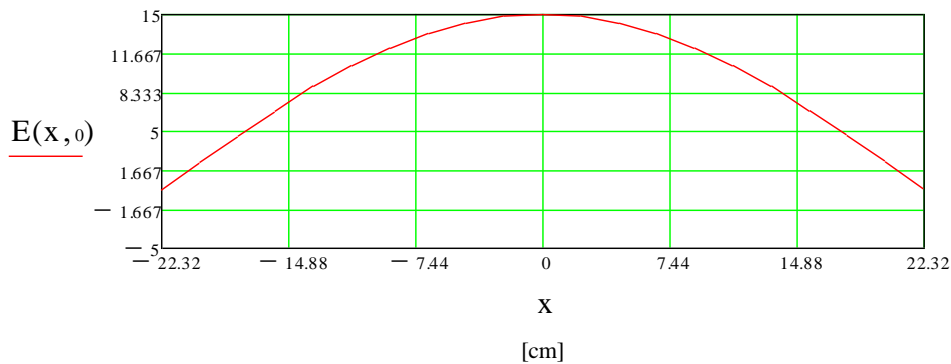
$$E'_y(x', y') = E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) \cos\left(\frac{\pi}{b_1} y'\right) e^{-j \left[ \frac{k(x'^2 + y'^2)}{\rho_2 + \rho_1} \right]} \quad (23)$$

$$H'_x(x', y') = -\frac{E_0}{\eta} \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) \cos\left(\frac{\pi}{b_1} y'\right) e^{-j \left[ \frac{k(x'^2 + y'^2)}{\rho_2 + \rho_1} \right]} \quad (24)$$

Los gráficos de la distribución de campo se muestran en las figuras 8 y 9.



**Figura 8: Distribución del Campo Eléctrico en el Plano E**



**Figura 9: Distribución del Campo Eléctrico en el Plano H**

A partir de la figura 8 se aprecia cómo la distribución de campo uniforme existente en el plano E para antenas de bocina lisas se ha convertido, gracias a las corrugaciones, en una distribución cosenoidal al igual que en el plano H. Esta nueva característica, hace que la energía se anule en las paredes de la bocina, como se había previsto anteriormente, disminuyendo así la energía que se desborda y por tanto el nivel de los lóbulos secundarios. Además, brinda simetría tanto en el patrón de radiación en ambos planos como en las dimensiones de la abertura. El hecho de tener una abertura cuadrada, conlleva a que el centro de fase tanto del plano E como del plano H coincidan en un mismo punto que solo dependerá de la frecuencia de trabajo.

### DIAGRAMA DE RADIACIÓN NORMALIZADO EN DECIBELES

Los resultados de la simulación de la antena de bocina corrugada revelan que, debido a la simetría alcanzada por el uso de corrugaciones en las paredes del campo E, el nivel de lóbulos secundarios en dicho plano decae unos -10dB.

La figura 10 ilustra cómo al igual que en el plano H (figura 11), los niveles de lóbulos laterales en el plano E se encuentran entre los -14 dB y -17 dB por debajo del nivel de máxima radiación, poniéndose de manifiesto cómo los gráficos para ambos planos casi coinciden garantizando así mayor simetría en el patrón de radiación y una disminución de la radiación no deseada.

El hecho de no obtener niveles de lóbulos secundarios inferiores a los mostrados en la figura 10 no está directamente relacionado con las corrugaciones sino con el error de fase en la abertura con respecto al centro. La onda es esférica y no plana en el borde de la abertura, por lo que hay una diferencia de recorrido que crece a lo largo del radio de curvatura. La solución a este problema es aumentar el radio axial alargando la bocina con lo que la onda en el borde de la abertura se aproxima más a una onda plana.

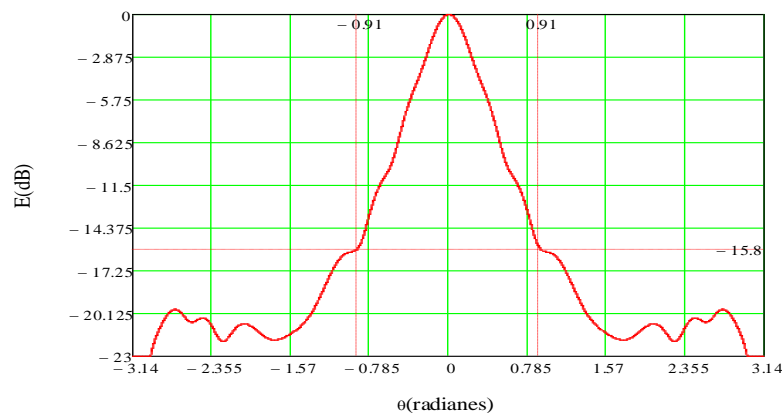


Figura 10: Patrón de radiación normalizado en dB para bocina corrugada plano E

De esta manera se alcanzan los objetivos propuestos ya que se logra un diseño con corrugaciones constantes en el que los niveles de lóbulos secundarios en ambos planos son iguales al del plano H, que es lo que se persigue con la superficie corrugada, evitando los campos radiados en las paredes de la cámara.

Las corrugaciones logran un efecto parecido al que tiene una superficie conductora en un campo eléctrico tangencial a esta, aunque solo para la componente normal del campo. En la superficie

corrugada el campo eléctrico se va atenuando siguiendo una ley cosenoidal de forma tal que adquiere una distribución en forma de coseno en el plano E gracias a las condiciones de contorno (geometría) de las corrugaciones.

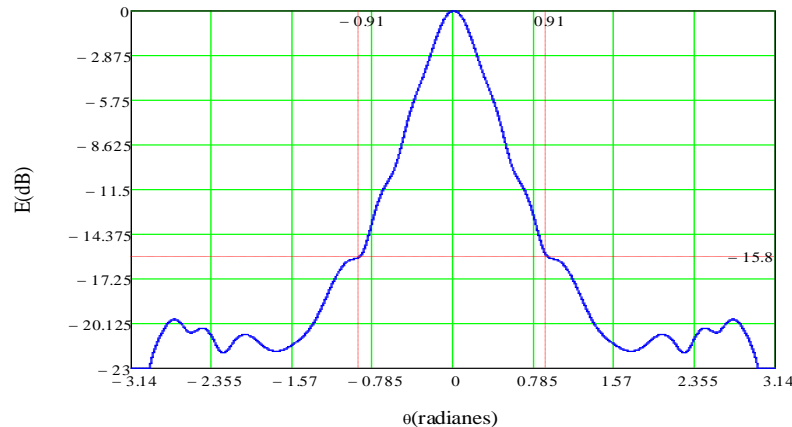


Figura 11: Patrón de radiación normalizado en dB para bocina corrugada plano H

## CONCLUSIONES

Se diseñó una antena de bocina lisa y una corrugada con ranuras de dimensiones fijas para su uso en cámaras anecoicas. Se analizó el efecto de las corrugaciones en las paredes de la bocina y se demostró que estas antenas, presentan un patrón de radiación simétrico, mucho más conveniente para el uso en cámaras anecoicas que el brindado por antenas lisas. Los lóbulos laterales en el plano E decaen en una bocina corrugada con respecto a una lisa entre -14 y -17 dB.

## REFERENCIAS

- [1] T. A. Milligan, *Modern Antenna Desing* 2nd ed.: John Wiley and Sons, 2005.
- [2] C. A. Balanis, *Modern Antenna Handbook*: John Wiley And Sons, 2008.
- [3] L. H. Hemming, *Electromagnetic Anechoic Chambers. A Fundamental Design and Specification Guide*: Wiley-Interscience, 2002.
- [4] P. Arzola Morris and C. Asencio Morales, "Diseño de Cámara Anecoica Rectangular para Radiofrecuencia," *Telem@tica*, 2013.
- [5] X. Liu, J. Liu, F. Zhao, X. Ai, and G. Wang, "An Equivalent Simulation Method for Pulse Radar Measurement in Anechoic Chamber," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 14, pp. 1081-1085, 2017.
- [6] X. Wan, L. Zhang, S. L. Jia, J. Y. Yin, and T. J. Cui, "Horn Antenna with Reconfigurable Beam-Refraction and Polarization Based on Anisotropic Huygens Metasurface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, pp. 4427-4434, 2017.

- [7] J. Mateo, A. M. Torres, A. Belenguer, and A. L. Borja, "Highly Efficient and Well-Matched Empty Substrate Integrated Waveguide H-plane Horn Antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagations Letters*, vol. 15, pp. 1510-1513, 2016.
- [8] B. Jazi, B. Davoudi-Rahaghi, M. R. Khajehmirzaei, and A. R. Niknam, "Energy Distribution Along the Focal Axis of a Metallic Cylindrical Parabolic Reflector Covered With a Plasma Layer," *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, vol. 42, pp. 286-292, 2014.
- [9] H. Alexander, P. Markus, and A. Simon, "Design of Wide-Band Corrugated Feed Horn for Reflector Antenna in Radar Applications," presented at the German Microwave Conference(GeMiC), Bochum, Germany, 2016.
- [10] P. G. Bolli, Gian Guido ; Lucci, Leonardo ; Nesto, Renzi, "A Hybrid Perturbative Technique to Characterize the Coupling Between a Corrugated Horn anda Reflector Dish," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, 2006.
- [11] D. Gu, X. Lu, and R. Ginley, "Efficient Rectangular Waveguide-to-Stripline Transition in D-Band " *IEEE Microwave and Wlireless Components Letters*, vol. 27, pp. 688-690, 2017.
- [12] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd ed.: John Wiley and Sons, 2005.
- [13] E. A. Rojas-Nastrucci, J. T. Nussbaum, N. B. Crane, and T. M. Weller, "Ka-Band Characterization of Binder Jetting for 3-D Printing of Metallic Rectangular Waveguide Circuits and Antennas," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, pp. 3099-3108, 2017.
- [14] J. L. D. Volakis, David B., "Implementation of the Pyramidal-Horn Antenna Radiation-Pattern Equations Using Mathcad," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 41, 1999.
- [15] T. Tajima, H.-J. Song, K. Ajito, M. Yaita, and N. Kukutsu, "300-GHz Step-Profiled Corrugated Horn Antennas Integrated in LTCC," *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, vol. 62, pp. 5437-5444, 2014.