

Estudio y diseño de un alimentador para una antena parabólica

Pablo Luciano Lannes^{†1}, *IEEE Member*, Walter Gustavo Fano^{†2}, *IEEE Senior Member*

[†]Laboratorio de Radiación Electromagnética, Departamento de Electrónica
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires
Av. Paseo Colon 850 - Ciudad Autónoma de Buenos Aires - República Argentina
¹pllannes@yahoo.com.ar ²gustavo.fano@ieee.org

Abstract—The purpose of this investigation was to study different parabolic reflector feeders, using theoretical models and computer simulations. The design of the feeder was made for $f = 2,4$ GHz from the dimensions of a parabolic reflector which was previously built by the author of this investigation, as part of his thesis. Its design took into account a compromise solution which is usually considered in the bibliography.

Although different types of antennas have been studied and used as feeders, only the cylindrical waveguide was considered in this investigation. The construction of the feeder was made from a brass cylinder.

As regards the experimental results, improvements have been obtained in the feeder features, specially in the back-scattering radiation and in the main lobe, in comparison with traditional feeders built with cylindrical waveguides.

Resumen—En este trabajo se han estudiado distintos tipos de alimentadores para antenas parabólicas empleando modelos teóricos y simulaciones computacionales. El diseño del alimentador fue realizado para $f = 2,4$ GHz a partir de las dimensiones del reflector parabólico construido anteriormente por el autor del presente trabajo, como parte de su tesis de grado. Dicho diseño tuvo en cuenta una solución de compromiso que es usualmente considerada en la bibliografía.

Si bien se han estudiado y utilizado como alimentador distintos tipos de antenas, en este trabajo sólo se consideró la guía de onda cilíndrica. La construcción del alimentador se realizó a partir de un cilindro de latón.

Respecto a los resultados experimentales, se han obtenido mejoras en las características del alimentador, particularmente en la radiación posterior (back-scattering) y en el lóbulo principal, en comparación con los alimentadores tradicionales fabricados con guías de onda cilíndricas.

I. INTRODUCCIÓN

Lo que comúnmente se conoce como antena parabólica está en realidad compuesto por dos elementos: la antena propiamente dicha, que cumple la función de iluminador o alimentador, y la superficie reflectora, que consiste en un paraboloide de revolución. En la figura 1 se observa un esquema de un reflector parabólico.

El principio de funcionamiento de un reflector parabólico se basa en la óptica geométrica: los rayos que emergen del punto focal O se coliman luego de reflejarse en la superficie metálica del paraboloide, y los rayos reflejados son paralelos al eje del reflector (eje z). Como consecuencia, un reflector parabólico permite convertir un frente de onda esférico en un frente de onda plano; esta característica le otorga a la antena parabólica un elevada ganancia, por lo que este tipo de antenas son aptas para aplicaciones tales como comunicaciones satelitales, radioastronomía, radares y enlaces de microondas terrestres.

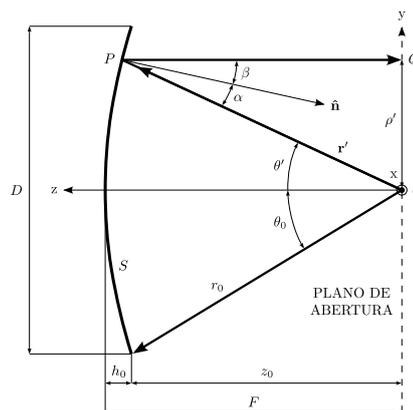


Figura 1. Esquema bidimensional de un reflector parabólico.

- F = Distancia focal.
- D = Diámetro.
- θ_0 = Ángulo de apertura.
- h_0 = Profundidad.
- F/D = Relación distancia focal-diámetro.

La longitud de todos los caminos que describen los rayos desde el punto focal O hasta el plano de apertura, luego de reflejarse en la superficie metálica del reflector, es la misma e igual a $2F$. Por lo tanto, el reflector parabólico alimentado con una fuente que tenga el centro de fase en el foco generará una fase uniforme a través del plano de apertura. Sin embargo, la distribución de amplitud en el plano de apertura no será uniforme.

La ganancia de una antena está relacionada con su área efectiva máxima A_{em} [1] [2] [3] a través de la expresión:

$$G_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{em} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \varepsilon_{ap} A_p \quad (1)$$

donde A_p es el área del reflector proyectada sobre el plano de apertura y ε_{ap} indica la eficiencia de apertura. Para obtener la mayor ε_{ap} , un iluminador debe cumplir las siguientes condiciones [1] [2] [4]:

1. Generar la distribución de campos deseada sobre el reflector.
2. Generar un diagrama de radiación con la mayor simetría rotacional posible.
3. Hacer coincidir el centro de fase con el punto focal.
4. Disminuir la obstrucción parcial del haz emergente (efecto "sombra") minimizando las dimensiones.
5. Tener la menor polarización cruzada posible.

Un alimentador con un diagrama de radiación como el de la figura 2(a) es un alimentador ideal, ya que genera una

iluminación uniforme sobre la superficie del reflector y a la vez no permite que parte de la potencia radiada se vaya por fuera de los límites del reflector. Se obtiene así la máxima eficiencia de abertura por iluminación. Sin embargo, los diagramas de radiación obtenidos en la práctica son más similares a los de la figura 2(b).

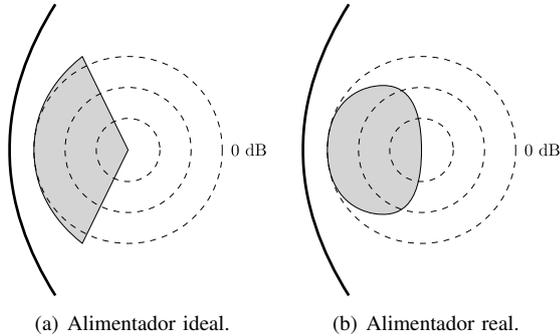


Figura 2. Diagramas de radiación de alimentadores.

Como puede observarse en la figura 3, no toda la radiación incide sobre la superficie del reflector; buena parte de ella se irradia por fuera de sus límites, provocando la aparición de lóbulos secundarios del conjunto alimentador-reflecter. A este tipo de pérdidas se las conoce como "Pérdidas por spillover". Al mismo tiempo, la potencia incidente en la superficie del reflector no genera una iluminación uniforme, disminuyendo aún más la eficiencia de iluminación. A este tipo de pérdidas se las conoce como "Pérdidas por iluminación no uniforme" [1] [2] [4].

La solución de compromiso que se toma usualmente en la bibliografía consiste en exigir que la diferencia entre las potencias incidentes en el borde y el vértice del reflector (EI) sea de -11 dB, lo que corresponde a una diferencia del 10%. Dicho parámetro surge de analizar la eficiencia global de iluminación del reflector en función del ángulo de apertura θ_0 [1] [2].

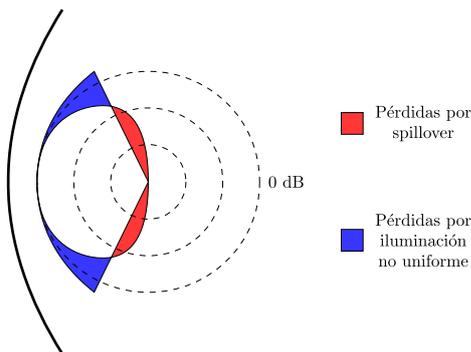


Figura 3. Pérdidas en la iluminación de un reflector parabólico.

Las dimensiones del reflector parabólico previamente construido eran:

- $F = 63,6$ cm.
- $D = 1,8$ m.
- $\theta_0 = 71,5^\circ$.
- $h_o = 31,8$ cm.
- $F/D = 0,353$.

A partir de estas dimensiones se determinó la distribución espacial de campos necesaria para obtener la iluminación deseada.

Se estudiaron 4 tipos de antenas como alimentador:

- Guía de onda rectangular.
- Guía de onda cilíndrica.
- Bocina piramidal.
- Bocina cónica.

Las antenas fueron excitadas con el modo dominante, que corresponden al TE_{10} para geometrías rectangulares y al TE_{11} para geometrías cilíndricas. Se estudiaron los diagramas de radiación de todas ellas. En este trabajo solamente se presentan los resultados correspondientes a la guía de onda cilíndrica porque si no el trabajo resultaría demasiado extenso.

II. FORMULACION TEORICA

Los diagramas de radiación de los distintos tipos de antenas estudiadas se determinan a partir de la expresión general de la directividad [1] [2] [3] [5] [6] [7].

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2)$$

Con el fin de iluminar el reflector de tal forma que la diferencia entre las potencias incidentes en el borde y el vértice del reflector sea de -11 dB, se realiza el siguiente balance de potencias:

$$P_{IV} = P_T G_0 \left(\frac{\lambda}{4\pi F} \right)^2 \quad P_{IB} = P_T G_{\theta_0} \left(\frac{\lambda}{4\pi B} \right)^2 \quad (3)$$

- P_{IV} = Potencia incidente en el vértice del reflector.
- P_{IB} = Potencia incidente en el borde del reflector.
- P_T = Potencia transmitida.
- F = Distancia focal.
- B = Distancia entre el foco y el borde del reflector.
- G_0 = Ganancia del alimentador en la dirección de propagación principal.
- G_{θ_0} = Ganancia del alimentador en el ángulo de apertura.

Expresando las potencias incidente en dB, se obtiene:

$$EI = P_{IB} - P_{IV} = G_{\theta_0} - G_0 - 20 \log \frac{F}{B} \simeq -11 \text{ dB} \quad (4)$$

La ganancia normalizada en el ángulo de apertura necesaria para cumplir con los parámetros de iluminación resulta:

$$G_{fn}(\theta_0) = -11 \text{ dB} + 20 \log \left(2 \frac{F}{D} \sin \theta_0 \right) = -7,5 \text{ dB} \quad (5)$$

Para cada antena estudiada se muestran en un mismo gráfico polar los diagramas de radiación normalizados, realizando un barrido de las dimensiones de la antena, para los planos E ($\phi = 90^\circ$), H ($\phi = 0^\circ$) y θ_0 ($\theta = 71,5^\circ$).

III. SELECCIÓN Y DISEÑO DEL ALIMENTADOR

En primer lugar se presentan los resultados de la guía de onda cilíndrica clásica y luego de la guía de onda cilíndrica modificada.

III-A. Guía de onda cilíndrica

En la figura 4 se observa la geometría y las dimensiones de la guía de onda cilíndrica, y en las figuras 5 y 6 se representan gráficamente los diagramas de radiación de la guía de onda cilíndrica con diferentes dimensiones, que pueden observarse en la tabla I.

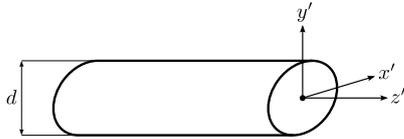


Figura 4. Dimensiones de la guía de onda cilíndrica.

Trazo	d (mm)	$G_{fn}(\theta_0)$ (dB)		G_0 (dBi)
		Plano E	Plano H	
—	86,0	-8,51	-6,53	7,15
—	108,0	-12,00	-8,40	8,39
—	130,0	-17,49	-10,87	9,74
—	152,0	-29,10	-14,10	11,06

Tabla I

GANANCIA NORMALIZADA EN EL ÁNGULO θ_0 Y GANANCIA MÁXIMA DE LA GUÍA DE ONDA CILÍNDRICA.

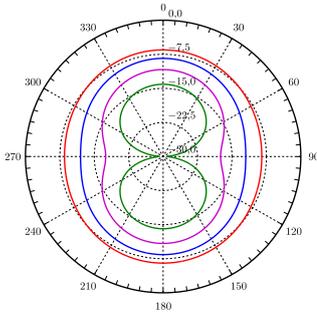


Figura 5. Diagramas de radiación en el ángulo θ_0 de la guía de onda cilíndrica.

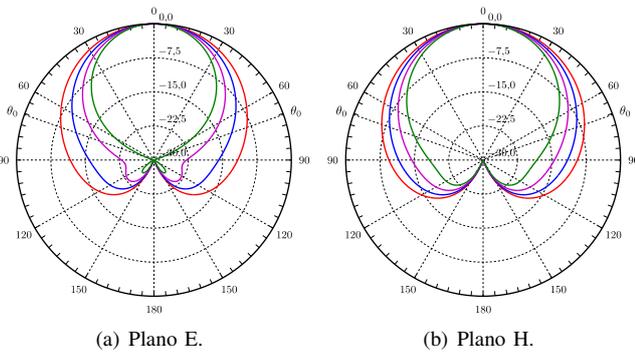


Figura 6. Diagramas de radiación en los planos E y H de la guía de onda cilíndrica.

Un factor muy importante que la óptica geométrica no considera es la difracción producida en los bordes de los alimentadores; este fenómeno podrá alterar la distribución espacial de campos.

Para determinar la precisión con la que el modelo matemático predice la distribución de los campos radiados por la guía de onda cilíndrica, se realizaron simulaciones con el software FEKO [8] para poder comparar los resultados obtenidos mediante la simulación con el método numérico basado en la óptica geométrica, como puede observarse en las figuras 7 y 8 y en la tabla II.

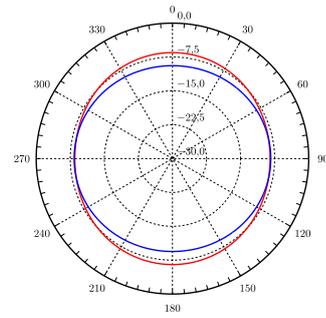


Figura 7. Diagramas de radiación en el ángulo θ_0 de la guía de onda cilíndrica con extremo abierto (modelo teórico y simulación).

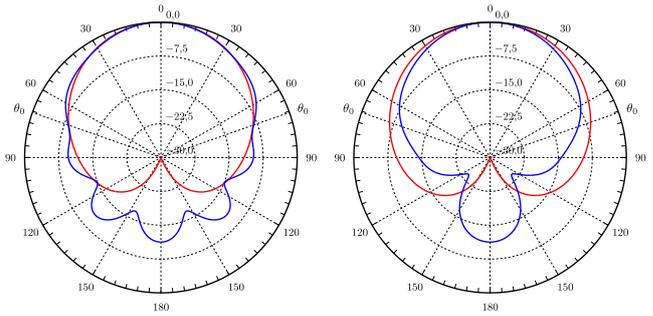


Figura 8. Planos E y H de los diagramas de radiación de la guía de onda cilíndrica con extremo abierto (modelo teórico y simulación).

Método	Trazo	d (mm)	$G_{fn}(\theta_0)$ (dB)		G_0 (dBi)
			Plano E	Plano H	
Modelo teórico	—	86,0	-8,51	-6,53	7,15
Simulación	—	86,0	-8,36	-9,43	7,59

Tabla II

GANANCIA NORMALIZADA EN EL ÁNGULO θ_0 Y GANANCIA MÁXIMA DE LA GUÍA DE ONDA CILÍNDRICA CON EXTREMO ABIERTO.

Si bien el redimensionamiento de la guía de onda cilíndrica permite un mejor ajuste a los parámetros de iluminación deseados, debido a la difracción producida en el borde de la abertura se genera un lóbulo de radiación posterior, como puede observarse en la figura 8.

III-B. Guía de onda cilíndrica modificada

Con el fin de atenuar el lóbulo posterior, se estudia un alimentador que consiste en una guía de onda cilíndrica con extremo abierto y que posee una estructura anular cerca de la abertura, la cual se comporta como un choque.

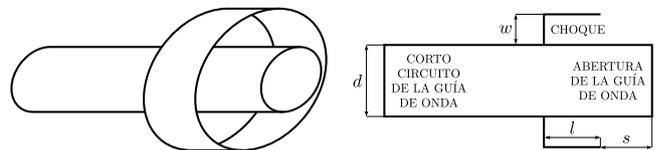


Figura 9. Guía de onda cilíndrica con choque anular.

- d = Diámetro de la guía de onda cilíndrica.
- w = Ancho del choque.
- l = Longitud del choque.
- s = Separación entre el choque y la abertura de la antena.

El choque presenta una reactancia a la onda de superficie que dependerá básicamente de su longitud. Asumiendo que el ancho del choque es mucho menor que la longitud de

onda en el vacío (generalmente se considera $w < \lambda_0/10$), la reactancia del choque puede expresarse aproximadamente como [9]:

$$X = \eta_0 \tan\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \quad (6)$$

Si se toma que la longitud del choque $l = \lambda_0/4$, la expresión de la reactancia del choque se reduce a:

$$X = \eta_0 \tan\left(\frac{2\pi \lambda_0}{\lambda_0 \cdot 4}\right) = \eta_0 \tan\left(\frac{\pi}{2}\right) \rightarrow \infty \quad (7)$$

Si la reactancia que presenta el choque a la onda de superficie es infinita, es de esperarse una disminución de la amplitud del lóbulo posterior, por lo tanto, se adopta $l = \lambda_0/4$. La separación óptima entre el choque y la abertura de la antena es empírica, ya que no puede determinarse mediante un modelo matemático; lo mismo sucede con el ancho del choque.

Respecto al diámetro de la guía de onda cilíndrica, se adquirió un cilindro de latón de diámetro externo 82,6 mm y espesor 3 mm, que es el máximo valor que se puede obtener comercialmente; el valor obtenido por el torneado resultó $d = 79,2$ mm. Las dimensiones de w y s se han obtenido mediante simulación numérica.

Resumen de las dimensiones finales:

- $d = 79,2$ mm
- $w = 11,0$ mm
- $l = 31,2$ mm
- $s = 31,2$ mm

En las figura 10 se observan los diagramas de radiación obtenidos de la simulación de las guías de onda cilíndricas sin el choque y con el agregado del choque para poder ver las mejoras obtenidas.

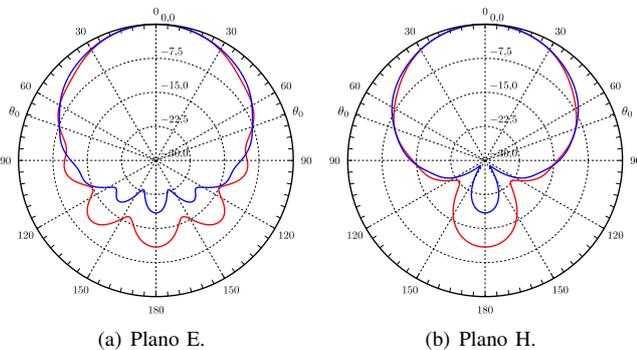


Figura 10. Planos E y H de los diagramas de radiación simulados de la guía de onda cilíndrica con y sin el choque.

Trazo	Guía de onda	$G_{fn}(\theta_0)$ (dB)		G_0 (dBi)	Diferencia lóbulos principal y posterior (dB)
		Plano E	Plano H		
—	Cilíndrica sin choque	-7,64	-9,09	7,54	-10,91
—	Cilíndrica con choque	-7,66	-9,02	7,57	-18,44

Tabla III

COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES ENTRE LA GUÍA DE ONDA CILÍNDRICA CON Y SIN EL CHOQUE.

Puede observarse en la tabla III que al agregarse el choque, la amplitud del lóbulo posterior disminuye aproximadamente 7,5 dB, lo que constituye una clara mejora. Basándose en los resultados obtenidos, se concluye que la guía de onda

cilíndrica con choque anular es la antena que mejor se adapta a los parámetros de iluminación deseados, por lo que es el alimentador escogido para su implementación.

III-C. Dimensionamiento y excitación del alimentador

En la figura 11 puede verse un corte longitudinal del alimentador que es excitado mediante una línea de transmisión coaxial para la propagación del modo dominante con polarización vertical. En el interior de la guía de onda se encuentra un conductor de sección circular que funciona como excitador del alimentador.

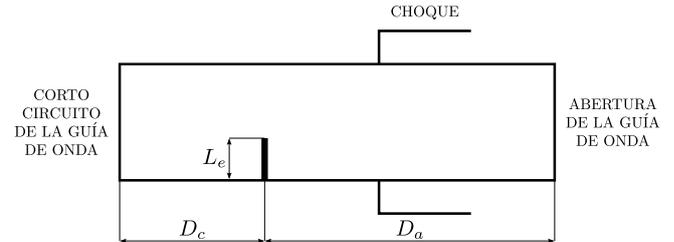


Figura 11. Corte longitudinal del alimentador.

- L_e = Longitud del excitador.
- D_c = Distancia entre el excitador y el cortocircuito de la guía de onda.
- D_a = Distancia entre el excitador y la abertura de la guía de onda.

Según la bibliografía consultada [10] [11], las dimensiones sugeridas de estos parámetros son:

$$L_e = \lambda_0/4 \quad D_c = \lambda_g/4 \quad D_a \geq \lambda_g/2$$

Con el fin de que los campos radiados en sentido al cortocircuito de la guía, luego de reflejarse en éste, generen una interferencia constructiva con los campos radiados en sentido a la abertura, se toma inicialmente que $D_c = \lambda_g/4$. Sin embargo, hay un aspecto que no se ha analizado hasta entonces: la impedancia que presenta el alimentador, que depende tanto de la longitud del excitador como de la distancia entre éste y el cortocircuito de la guía.

Empleando el software de simulación FEKO, se utilizó una herramienta llamada optimizador que dimensiona L_e y D_c en función de obtener la mínima ROE posible. Tomando que el diámetro del excitador es de 1 mm, se compara la ROE para los alimentadores simulados con dimensiones teóricas y optimizadas; se compara también la ganancia en la dirección principal de propagación G_0 para determinar si la variación de D_c afecta la ganancia del alimentador.

Dimensiones	L_e (mm)	D_c (mm)	D_a (mm)	ROE	G_0 (dBi)
Teóricas	31,2	81,8	163,7	1,32	7,41
Optimizadas	29,2	42,3	163,7	1,05	7,41

Tabla IV

ROE Y G_0 OBTENIDAS PARA EL ALIMENTADOR SIMULADO CON DIMENSIONES TEÓRICAS Y OPTIMIZADAS.

A partir de los resultados observados en la tabla IV, se toman las dimensiones surgidas de la optimización como punto de partida en la implementación del alimentador.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

IV-A. Medición de la impedancia y de la ROE

Por las características eléctricas y su disponibilidad, se empleó latón para la implementación del alimentador. Con el fin de minimizar la ROE, se construyó el alimentador con un cortocircuito variable de la guía de onda, que consiste en un círculo de latón que se va desplazando por el interior de la guía; de esta forma se logra variar la distancia entre el cortocircuito y el excitador, y así se puede minimizar la ROE del alimentador y observar la variación en el VNA del banco de medición de la figura 12. También se ajustó la longitud del excitador para minimizar la ROE. En la tabla V se comparan las dimensiones del alimentador y del excitador obtenidas por simulación y medición.

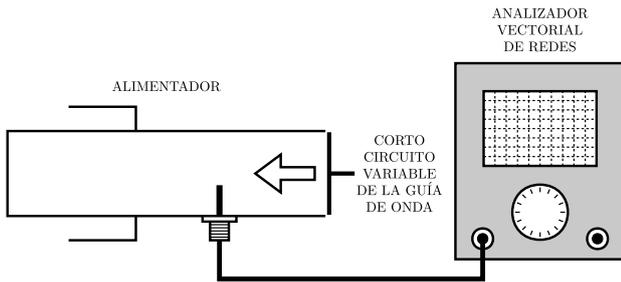


Figura 12. Banco de medición de la ROE y de la impedancia del alimentador.

Dimensiones	L_e (mm)	D_c (mm)	Longitud del alimentador (mm)
Simulación	29,2	42,3	206,0
Medición	29,1	46,3	210,0

Tabla V

COMPARACIÓN ENTRE LAS DIMENSIONES DEL ALIMENTADOR Y DEL EXCITADOR DETERMINADAS POR SIMULACIÓN Y MEDICIÓN.

Se muestran a continuación los gráficos de la impedancia y de la ROE medidas, en las figuras 13, 14 y 15, para las dimensiones óptimas determinadas experimentalmente, y se comparan con las simulaciones a fin de contrastar los resultados. En la tabla VI se compara la impedancia y la ROE del alimentador obtenidas por simulación y medición.

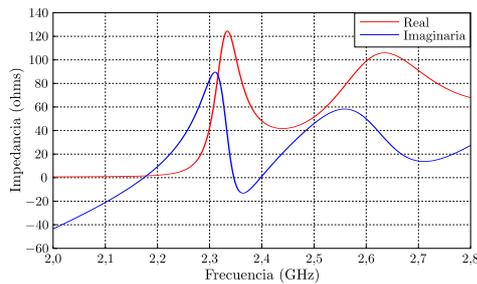


Figura 13. Simulación de la impedancia del alimentador.

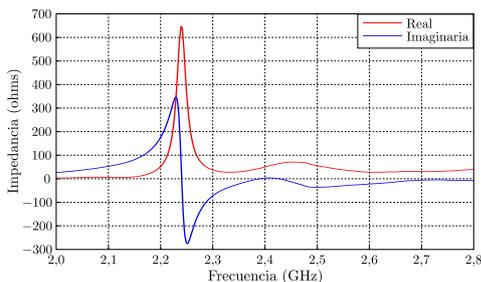


Figura 14. Medición de la impedancia del alimentador.

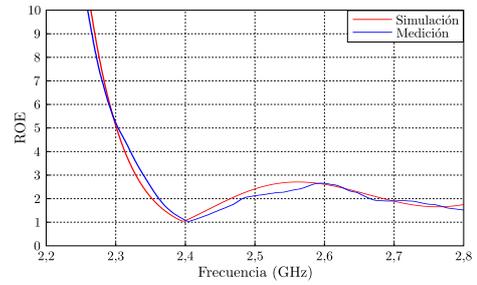


Figura 15. Simulación y medición de la ROE del alimentador.

	Impedancia (ohms)		ROE
	Parte real	Parte imaginaria	
Simulación	47,72	0,75	1,05
Medición	47,07	0,16	1,06

Tabla VI

COMPARACIÓN ENTRE LA SIMULACIÓN Y LA MEDICIÓN DE LA IMPEDANCIA Y DE LA ROE DEL ALIMENTADOR.

En la figura 16 se puede observar el alimentador luego de finalizada su construcción.



Figura 16. Alimentador con el cortocircuito de la guía soldado.

IV-B. Medición del diagrama de radiación del alimentador

Para medir el diagrama de radiación del alimentador, se implementó el banco de medición de la figura 17.

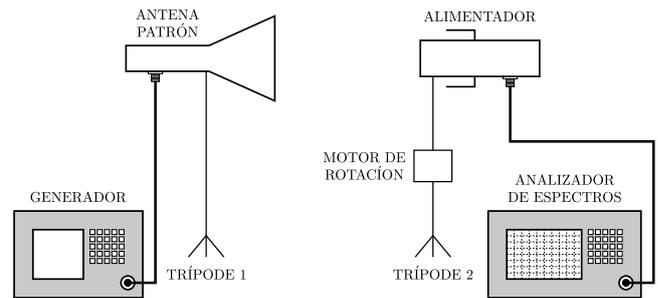


Figura 17. Banco de medición del diagrama de radiación.

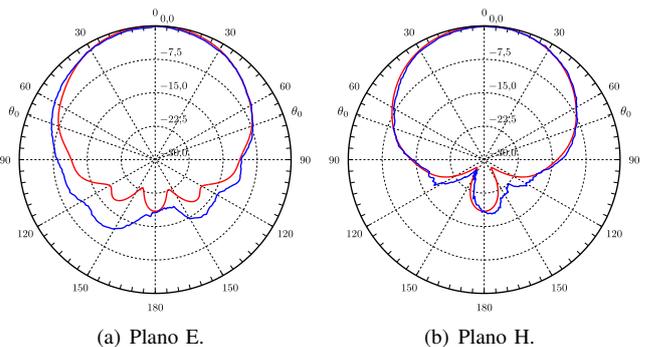


Figura 18. Diagrama de radiación del alimentador (simulación y medición).

En la figura 18 pueden observarse las mediciones de los planos E y H del diagrama de radiación, superpuestos a los diagramas de radiación simulados con el fin de poder contrastar mediciones con simulaciones. En la tabla VII se compara la simulación y la medición de los resultados.

	Trazo	Ancho de haz principal (grados)		$G_{fn}(\theta_0)$ (dB)		Relación frente espalda (dB)
		Plano E	Plano H	Plano E	Plano H	
Simulación		82,90	81,02	-7,35	-8,75	18,44
Medición		82,37	85,22	-7,33	-8,91	17,71

Tabla VII

COMPARACIÓN ENTRE LA SIMULACIÓN Y LA MEDICIÓN DEL ANCHO DE HAZ PRINCIPAL, LA GANANCIA NORMALIZADA EN EL ÁNGULO θ_0 Y LA RELACIÓN FRENTE-ESPALDA.

IV-C. Simulaciones de diagramas de radiación del conjunto alimentador - reflector parabólico

En la figura 19 pueden observarse las simulaciones de los planos E y H del diagrama de radiación del conjunto formado por el alimentador diseñado y el reflector parabólico.

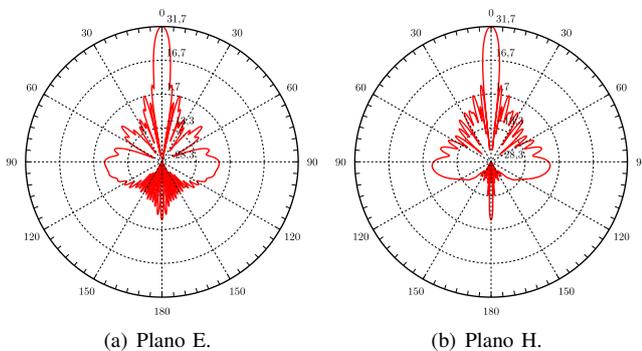


Figura 19. Simulación de los planos E y H del diagrama de radiación del alimentador con el reflector parabólico.

La directividad máxima y la eficiencia de abertura determinados a partir de la simulación son:

- Directividad D_0 : 31,68 dBi.
- Eficiencia de abertura: 71,93 %.

En la tabla VIII se muestra el ancho de haz principal y el ángulo y la amplitud normalizada del primer lóbulo secundario, según la simulación, en los planos E y H.

	Ancho de haz principal (grados)	Ángulo 1. ^{er} lóbulo secundario (grados)	Amplitud normalizada 1. ^{er} lóbulo secundario (dB)
Plano E	4,68	7,17	-25,77
Plano H	4,68	7,45	-25,87

Tabla VIII

VALORES OBTENIDOS POR SIMULACIÓN DEL ANCHO DE HAZ PRINCIPAL Y DEL ÁNGULO Y LA AMPLITUD DEL PRIMER LÓBULO SECUNDARIO.

Si bien una eficiencia de abertura superior al 70 % es un muy buen resultado, en la práctica existen otros factores que inciden en la eficiencia además de la iluminación del reflector, como las irregularidades en la geometría del reflector y los desplazamientos axiales y radiales del alimentador respecto al foco.

V. CONCLUSIONES

- Se estudiaron los diagramas de radiación de las distintas antenas variando sus dimensiones para analizar cual es la que mejor responde a los parámetros de

iluminación requeridos. Como resultado del estudio, se obtuvo que la antena que mejor cumple con los requisitos establecidos es la guía de onda cilíndrica. A diferencia de las bocinas, posee el centro de fase en el centro de la abertura, por lo que luego de reflejarse en la superficie metálica del reflector, la fase de las ondas electromagnéticas sobre el plano de abertura es constante. Además, debido a la geometría circular, genera una distribución espacial de campos con mayor simetría rotacional que la guía de onda rectangular.

- Sobre la base de la guía de onda cilíndrica elegida, se agregó a la misma un choque, que consiste en una estructura anular ubicada en las proximidades de la abertura, que presenta una reactancia idealmente infinita a las ondas de superficie. Con el agregado del choque, se logró atenuar la radiación posterior (back-scattering) en 7,5 dB; además, se logra una mejor simetría rotacional del lóbulo principal respecto del caso sin choque.
- La construcción del alimentador se realizó a partir de un cilindro de latón que se mecanizó para llegar a las dimensiones que fueron calculadas teóricamente y mediante simulación numérica.
- La adaptación del alimentador se realizó ajustando la distancia entre el excitador y el cortocircuito de la guía de onda. El método experimental empleado en este trabajo permitió obtener una ROE excelente (1,06), coincidiendo completamente con la simulación (1,05).

REFERENCIAS

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 3rd ed. New Jersey, USA: Wiley-Interscience, 2005.
- [2] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed. New Jersey, USA: Wiley, 2013.
- [3] J. D. Kraus and R. Marhefka, *Antennas for all applications*, 3rd ed. New York, USA: Mc Graw Gill, 2002.
- [4] P. Wade. (2003) The w1ghz microwave antenna book online. [Online]. Available: <http://www.qsl.net/n1bwt/contents.htm>
- [5] S. Silver, *Microwave Antenna Theory and Design*. New York, USA: Mc Graw Gill, 1949.
- [6] R. E. Collin, *Antennas and Radiowave Propagation*. New York, USA: Mc Graw Gill, 1985.
- [7] S. J. Orfanidis. (2008) Electromagnetic waves and antennas. [Online]. Available: <http://www.ece.rutgers.edu/orfanidi/ewa/>
- [8] Software, "Feko 6.3," <https://www.feko.info/>, 2013.
- [9] R. S. Elliott, "On the theory of corrugated plane surfaces," in *IRE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 2, Abril 1954, pp. 71–81.
- [10] ARRL, *The ARRL Antenna Book*, 21st ed. Connecticut, USA: The ARRL Inc, 2007.
- [11] R. Johnson, *Antenna Engineering Handbook*, 3rd ed. New York, USA: Mc Graw Hill, 1993.
- [12] C. A. Balanis, *Advanced Engineering electromagnetics*. New Jersey, USA: Wiley, 1989.
- [13] W. G. F. Valentino Trainotti and L. A. Dorado, *Ingeniería electromagnética, Tomo II*. Buenos Aires, Argentina: Nueva Librería, 2005.