



Arreglo plano de 32 elementos para comunicaciones satelitales en banda L 32 patches planar array for L-band satellite communications

Trejo-León Alejandro

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad
Zacatenco
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Correo: atrejol1201@alumno.ipn.mx/a08leon@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-1781-9819>

Martínez-Zúñiga Fabiola

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad
Zacatenco
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Correo: fmartinezzu@ipn.mx
<https://orcid.org/0000-0002-2588-7854>

Del Villar-Ramírez Rodrigo Sebastián

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad
Zacatenco
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Correo: rdevillarr@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-2533-1852>

Sosa-Pedroza Jorge Roberto

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad
Zacatenco
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Correo: jsosa@ipn.mx
<https://orcid.org/0000-0001-6668-9347>

Resumen

Se presenta en este trabajo el diseño de un arreglo de antenas de parche de geometría optimizada con un reflector plano. Los parches fueron caracterizados con un ancho de banda de 1 GHz y una impedancia de entrada de 50 Ω y la interconexión del arreglo se logra por medio de una red de microcinta. La red que alimenta los parches se modela para ser parte del arreglo plano. El arreglo ha sido diseñado con un ancho de banda de 200 MHz para transmisión y recepción del satélite Morelos III con 1.6265 GHz a 1.6455 GHz del enlace ascendente y de 1.525 GHz a 1.544 GHz para el enlace descendente.

Descriptores: Arreglo plano, antena de parche, banda L, morelos-iii, transceptor fijo satelital.

Abstract

We present in this paper an antenna array using patches with optimized geometry, having an individual a bandwidth greater than 1 GHz with an input impedance of 50 Ω , feeding each one by a novel feeding network modeled as part of the patches array. We propose this antenna array for a satellite communications application, specifically for the transmission and reception of the operating bands of the Mexican Morelos III satellite. The satellite has an uplink band ranging from 1.6265 GHz to 1.6455 GHz and a downlink band ranging from 1.525 GHz to 1.544 GHz, so a bandwidth of 200 MHz is required.

Keywords: Planar antenna, patch antenna, L band, Morelos-III, fixed satellite transceiver.

INTRODUCCIÓN

Se propone en este trabajo apoyar en la solución a uno de los grandes problemas que presenta México respecto a las telecomunicaciones. Se considera que alrededor de 12 millones de mexicanos (10 % de la población) no tiene la infraestructura para comunicarse con telefonía o internet. Una posibilidad para cubrir esa brecha la representa el Satélite Morelos III, diseñado y puesto en órbita para proveer servicios de comunicaciones para cobertura social y de seguridad. El satélite es totalmente funcional y con tecnología de última generación (IFT, 2021). Considerando su característica de cobertura social el satélite puede apoyar la demanda no satisfecha de las comunidades aisladas, debido a que puede servir cualquier punto sobre el territorio. La antena es uno de los elementos del sistema de comunicaciones, por lo que proponemos un arreglo plano de parches, que puede sustituir a los reflectores parabólicos usados actualmente, reduciendo el proceso de fabricación y por tanto el costo, que siempre debe tomarse en cuenta en comunicaciones rurales.

El satélite Morelos III tiene capacidad para brindar servicios de 7000 conexiones simultáneas de voz y datos, para apoyar a poco más de cien mil suscriptores de Seguridad Nacional y cobertura social. Bajo estas condiciones se puede crear una red nacional que apoyará la reducción de la brecha digital con infraestructura de telecomunicaciones en zonas de alta y muy alta marginación y al mismo tiempo dar solución a otros problemas que requieran uso de comunicaciones seguras.

El diseño de una antena, que es parte del sistema de comunicaciones, debe considerar tanto sus características eléctricas como radiación, impedancia, ancho de banda, pero también facilidad de construcción que se relaciona con el costo. Nuestra propuesta cumple con tales condiciones por lo que se propone como alternativa sobre las antenas comerciales, que usualmente son reflectores parabólicos, lo que significa mayor dificultad de construcción y mayor costo. Bajo estas condiciones se piensa que podrá ser un instrumento viable para la reducción de la brecha tecnológica de nuestro país, que tanto afecta en cuestión de educación, la salud y cultura a los sectores más desprotegidos de la población. Es el objetivo de este trabajo presentar el diseño, la construcción y la caracterización de un arreglo plano para la recepción y transmisión en las bandas de frecuencia del satélite Morelos III.

El trabajo está organizado como sigue: La Sección II describe brevemente las características de radiación del Satélite Morelos III y se definen las características finales del arreglo de parches. La Sección III muestra el diseño de la antena de parche que es el núcleo básico del

arreglo; como se observa, el diseño aplica una técnica que se ha desarrollado para aumentar el ancho de banda de la antena. El diseño del arreglo plano se presenta en la Sección IV, donde parte de la definición de las características esperadas para llegar a la estructura final y sus dimensiones. La Sección V describe el diseño de la red de alimentación de los parches. Es necesario destacar que, partiendo del diseño teórico las componentes del arreglo, así como el arreglo mismo fueron modelados usando un software especializado que permitió comparar los resultados de estos con los experimentales finales. La Sección VI muestra el modelado del arreglo y algunas consideraciones que se tuvieron que tomar. En la Sección VII hablamos del proceso de construcción, Mientras que la Sección VIII realizamos una discusión sobre la comparación entre lo modelado y la caracterización. El trabajo termina con las conclusiones y las posibilidades de mejora en el proceso.

PROPUESTA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ARREGLO

Las características de radiación del Satélite Morelos III se muestran en la Figura 1. Se observa que el diagrama de radiación está formado por 122 haces con diversidad de frecuencia, como si fuera una cobertura de telefonía celular desde el espacio. Esta configuración es de última generación, ya que requiere una antena transmisora de muy alta ganancia, lo que se logra con un reflector parabólico en el satélite de 24 m de diámetro, como muestra el esquema de la Figura 2.

Los haces concentrados tienen una cobertura muy angosta por lo que la ganancia definida en cada uno es igualmente alta, facilitando el diseño del enlace de comunicaciones en tierra menos demandante. Los haces pueden ser combinados mediante comandos desde tierra para aumentar el área de cobertura y la tasa de transferencia.

Considerando las características de radiación del Satélite Morelos III se proponen los parámetros de diseño del arreglo plano mostrados en la Tabla 1.

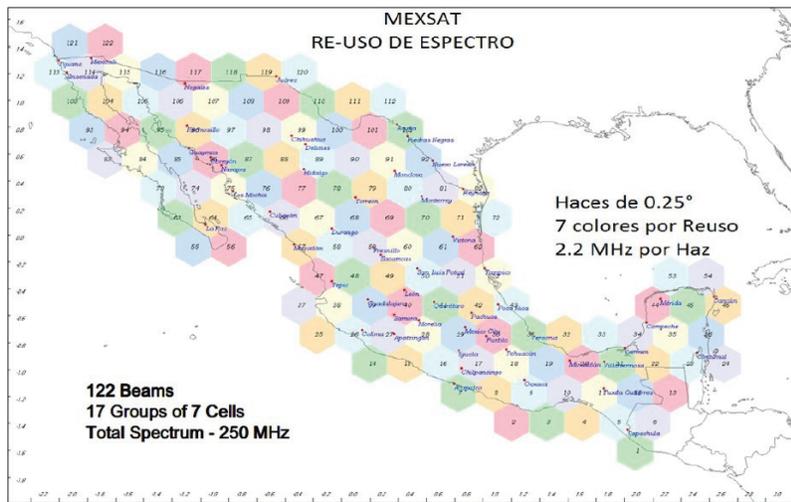


Figura 1. Detalle del re-uso del espectro (IFT, 2021)

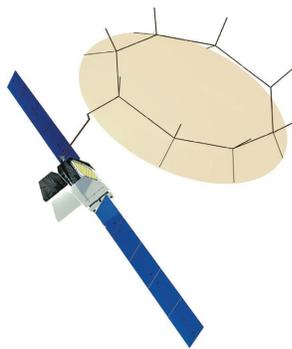


Figura 2. Satélite Morelos III (IFT, 2021)

Tabla 1. Requerimientos para el arreglo plano

Núm.	Requerimiento	Requisito
1	Frecuencia de operación	Banda L (1.6 GHz)
2	Ancho de banda	Mínimo 150 MHz
3	Pérdida de retorno	≤ -10 dB
4	Diagrama de radiación	Unidireccional
5	Impedancia de entrada	50 Ω
6	Ancho de haz horizontal	$\leq 16^\circ$
7	Ancho de haz vertical	$\leq 25^\circ$
8	Polarización	Lineal
9	Ganancia	≥ 18 dBi
10	Lóbulos laterales	≤ -14 dB

Se observa de la Tabla 1 que se ha dado mayor importancia al ancho de haz horizontal, porque la polarización de la antena del satélite permite relajar la radiación en el ángulo polar, con esta condición es posible reducir el costo de la construcción.

DISEÑO DEL PARCHÉ BÁSICO

Esta Sección presenta el diseño del parche para que cumpla con las características de la Tabla 2. Se ha propuesto por economía que los parches se construyan sobre un sustrato de FR4 con permitividad relativa (ϵ_r) de 4.3 y cuyo revestimiento es una lámina de cobre de 1 onza ($T = 35 \mu m$), y un grosor (h) de 1.6 mm.

Tabla 2. Requerimientos para la antena de parche

Núm.	Requerimiento	Requisito
1	Frecuencia de operación	Banda L (1.6 GHz)
2	Ancho de banda	Mínimo 150 MHz
3	Pérdida de retorno	≤ -10 dB
4	Impedancia de entrada	50 Ω
5	Ganancia	≤ 2 dBi

El diseño parte de la teoría de antenas de parche (Balanis, 2012), definidas en tres etapas:

1) **Dimensiones del parche:** Las dimensiones del parche son su ancho (W_p) y su longitud (L_p). El ancho del parche se puede calcular usando la Ecuación (1).

$$W_p = \frac{C}{2f_0\sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}}} [mm] \quad (1)$$

Donde, c es la velocidad de la luz y f_0 es la frecuencia de operación. La longitud del parche está determinada por la Ecuación (2).

$$L_p = L_{eff} - 2\Delta L [mm] \quad (2)$$

Donde:

$$L_{eff} = \frac{C}{2f\sqrt{\epsilon_{reff}}} [mm] \quad (3)$$

La permitividad relativa efectiva (ϵ_{reff}) está definida por la Ecuación (4).

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1+12\left(\frac{h}{W_p}\right)}} \right] \quad (4)$$

Además, la extensión normalizada de la longitud (ΔL) de la ecuación 2, se define en la Ecuación (5).

$$\Delta L = 0.412h \frac{\left(\epsilon_{reff} + 0.3\right)\left(\frac{W_p}{h} + 0.264\right)}{\left(\epsilon_{reff} - 0.258\right)\left(\frac{W_p}{h} + 0.813\right)} [mm] \quad (5)$$

2) **Dimensiones de la línea de microcinta:** El ancho de la línea de microcinta (W_F) se puede calcular utilizando la Ecuación (6).

$$W_F = \frac{2h}{\pi} \left[A - 1 - \ln(2A - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(A - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] [mm] \quad (6)$$

Donde:

$$A = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

con $Z_0 = 50 \Omega$. Entonces se debe considerar la relación W_F/h . Para $W_F/h < 1$,

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1+12\frac{h}{W_F}}} + 0.004\left(1 - \frac{W_F}{h}\right)^2 \right] \quad (8)$$

Para $W_F/h > 1$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1+12\frac{h}{W_F}}} \right) \quad (9)$$

A continuación, la longitud de la línea de microcinta (L_F) utilizada para igualar la impedancia está determinada por la Ecuación (10).

$$L_F = \frac{\lambda_g}{4} [mm] \quad (10)$$

Donde:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{reff}}} [mm] \quad (11)$$

3) **Dimensión del plano de tierra:** El plano de tierra es un rectángulo que consta de longitud (L_G) y ancho (W_G). Esos parámetros se pueden obtener de la Ecuación (12) (Hallas, 2008).

$$\begin{pmatrix} W_G \\ L_G \end{pmatrix} = 6h \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} W_p \\ L_p + L_F \end{pmatrix} \quad (12)$$

Después de obtener todas las dimensiones, a partir de la investigación bibliográfica (Anusury *et al.*, 2019; Latrach & Islam, 2017; Aguirre & Yanyachi, 2017; Chemkha & Belkacem, 2020, Garduño *et al.*, 2016; Schaub & Kelly, 2004 y Alsaleh *et al.*, 2016) y pasar por un proceso de optimización mediante un software comercial, los resultados se muestran en la Tabla 3. Se procede al proceso de construcción y caracterización para comprobar que cumple con los requerimientos de diseño (Tabla 2).

Tabla 3. Dimensiones resultantes de la antena de parche

Parámetros	Símbolos	Dimensiones
Ancho del parche	W_p	56 mm
Longitud del parche	L_p	46 mm
Ancho del alimentador	W_f	3 mm
Largo del alimentador	L_f	44 mm
Ancho del plano a tierra	W_G	120 mm
Largo del plano a tierra	L_G	42 mm
Ancho del sustrato	W_s	120 mm
Largo del sustrato	L_s	120 mm

La Figura 3 muestra el resultado del proceso de construcción de la antena de parche donde podemos ver la vista frontal y la vista trasera y, en este caso, ya podemos ver el conector y su forma de unión con la línea de alimentación.

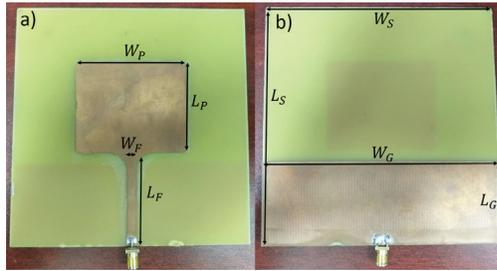


Figura 3. Parche construido, a) vista frontal y b) vista trasera

DISEÑO DEL ARREGLO

Esta sección presenta el diseño del arreglo, para que cumpla con las características de la Tabla 1. El arreglo está formado por $n \times m$ parches, que son los descritos en la sección anterior.

Aunque el diseño de los parches se hizo sobre un sustrato con metalizado de dos caras, por economía se usará para el arreglo un sustrato de una sola cara metalizada y se completará el diseño de los parches mediante tiras de cobre como se mostrará en la sección de construcción.

El primer paso del diseño del arreglo consiste en la definición del número de elementos que lo conformarán, como se propuso relajar el ancho de haz polar, se calculará el número de elementos requeridos tanto para el eje x como para el eje y , usando la Ecuación 13 (Lin *et al.*, 2021).

$$HPBW = \frac{\lambda}{(N-1)d} \quad (13)$$

Donde, AH indica el ancho de haz en función del número de elementos N , λ es la longitud de onda en espacio libre a la frecuencia de operación y d es el espacio entre los elementos radiantes, definida en longitudes de onda del sustrato. Con una frecuencia central de trabajo de 1.585 GHz la longitud de onda en el vacío (λ_0) es 18.92 cm, mientras que en el sustrato es lo que se muestra en la ecuación 14.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}} = 10.49 \text{ cm} \quad (14)$$

Para una radiación en el plano normal al arreglo se propone una separación entre parches un poco mayor a media longitud de onda ($\lambda_g / 2$), debido a que el parche tiene un ancho de media longitud de onda, por lo que proponemos una separación (d) de 10.4 cm para la distancia de los elementos en el eje x , medida desde la mitad del ancho del alimentador de un parche a la mitad del ancho del alimentador del contiguo. Para la distancia sobre el eje y proponemos la misma distancia, medida desde el elemento inferior al superior.

Para aplicar la ecuación 13, el primer paso es convertir los 16° propuestos para el ancho de haz del eje x en radianes, como indica la ecuación 15.

$$AH(\text{rad}) = \frac{16^\circ \pi}{180^\circ} = \frac{4}{45} \pi \quad (15)$$

Usando la ecuación 13 se obtiene el número de elementos necesario, como se muestra en la Ecuación 16.

$$N = \frac{\lambda_0}{AH(\text{rad})(d)} + 1 = \frac{18.92}{\left(\frac{4}{45} \pi\right)(10.4)} + 1 \quad (16)$$

Sustituyendo los valores propuestos se tiene que $N = 7.45$ y se selecciona el valor entero inmediato superior, entonces $N = 8$.

Para el eje y se sigue el mismo procedimiento; el ángulo de apertura propuesto de acuerdo con la Tabla 1 es 25° entonces:

$$AH(\text{rad}) = \frac{25^\circ \pi}{180^\circ} = \frac{5}{36} \pi \quad (17)$$

Usando la ecuación 13 se obtiene el número de elementos necesario, como se muestra en la Ecuación 18.

$$N = \frac{18.92}{\left(\frac{5}{36} \pi\right)(10.4)} + 1 = 4.16 \quad (18)$$

Sustituyendo los valores propuestos se tiene que $N = 4.16$ y se selecciona el valor entero inmediato inferior, entonces $N = 4$.

RED DE ALIMENTACIÓN

Una de las características necesarias en el diseño es la disminución de los lóbulos secundarios, por lo que se propone usar una red de alimentación (Lin *et al.*, 2021) que utilice una función peso Kaiser-Bessel (Gross, 2005) por lo que se definen valores peso para cuatro elementos con una geometría par, es decir, la simetría permite definir la magnitud de las corrientes de alimentación simétricamente respecto del centro del arreglo, como se observa en la Tabla 4. Asimismo, la Figura 4 muestra el esquema de la red que se plantea diseñar.

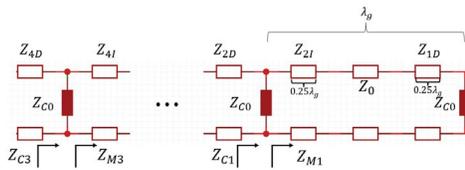


Figura 4. Diagrama de la red de alimentación

El primer paso es convertir los valores de corriente de la Tabla 4 a valores de potencia normalizada con la ayuda de la Ecuación 19.

Tabla 4. Requerimientos para el arreglo plano

I_1	I_2	I_3	I_4
0.5	0.8	0.8	0.5

$$P_n = I_n^2; n = 1, 2, \dots, n \tag{19}$$

Donde P_n es la potencia normalizada de la antena del elemento n . La Tabla 5 muestra los valores de potencia normalizado, resultado de la Ecuación 19.

Tabla 5. Requerimientos para el arreglo plano

P_1	P_2	P_3	P_4
0.25	0.64	0.64	0.25

El siguiente paso es obtener la relación de distribución de la potencia de los 2 divisores de potencia con la ayu-

Tabla 6. Valores de los transformadores a un cuarto de longitud de onda

Identificación	Valor de impedancia	Ancho de la microcinta	Longitud de onda de la impedancia	Longitud de la microcinta
Z_{1D}	50 Ω	3.08 mm	$\lambda_g / 4$	25.99 mm
Z_{2D}	42.39 Ω	4.02 mm	$\lambda_g / 4$	25.66 mm
Z_{1I}	80 Ω	1.22 mm	$\lambda_g / 4$	26.99 mm

da de la ecuación 20, ordenada para obtener el valor de Z_{Mn} .

$$Z_{Mn} = \frac{Z_{C_0} (P_{n+1})}{\sum_{n=1}^m P_n}; n = 1, 2, \dots, m \tag{20}$$

Donde, $Z_{C_0} = 50 \Omega$ es el valor de la línea de alimentación del parche y n solo va hasta 2 porque es una configuración par de la red de alimentación. Para los valores de impedancia tenemos, $Z_{M1} = 128 \Omega$ y $Z_{M2} = 35.95 \Omega$.

Ahora, obtendremos los valores de la impedancia en paralelo (Z_{Cn}) de las dos ramas de los 2 divisores de potencia con la ayuda de la ecuación 21. Para este caso n solo es 1 y $Z_{C1} = 35.95 \Omega$.

$$Z_{Cn} = \frac{Z_{C_0} Z_{Mn}}{Z_{C_0} + Z_{Mn}}; n = 1, 2, \dots, m - 1 \tag{21}$$

Sigue obtener los valores de $Z_{1D} = 50 \Omega$, $Z_{2D} = 42.39 \Omega$, y $Z_{1I} = 80 \Omega$ a partir de $Z_0 = 50 \Omega$, Z_{C1} , Z_{M1} y Z_{M2} . Se obtienen de la ecuación 22 y ecuación 23.

$$Z_{nD} = \sqrt{Z_0 Z_{C(n-1)}}; n = 1, 2, \dots, m \tag{22}$$

$$Z_{nI} = \sqrt{Z_0 Z_{M(n-1)}}; n = 2, 3, \dots, m \tag{23}$$

Necesitamos convertir los valores de impedancia de los transformadores en valores de ancho (W) y largo (L) de microcintas. El valor del ancho de la microcinta está dado por la impedancia y el largo de la microcinta está dado por la longitud de onda, para este caso los transformadores son de un cuarto de longitud de onda dentro del material (λ_g). En la Tabla 6 se tiene una relación de los valores de impedancia con los valores de ancho en la microcinta y una relación de la longitud de onda y la longitud de la microcinta.

Con los valores de la Tabla 6 se construye el modelado de la red de alimentación de 1×2 elementos como se muestra en la Figura 5a. La Figura 5b muestra lo que sería la red de alimentación de 1×4 elementos y solo es un espejo de la red de alimentación de 1×2 elementos.

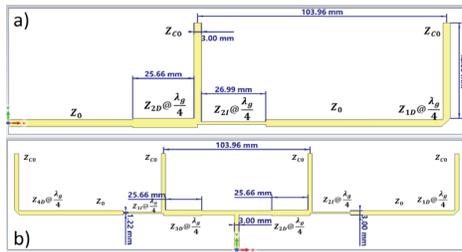


Figura 5. Esquema de la red, a) Red de 1 × 2 elementos y b) Red de 1 × 4 elementos

La Figura 6a muestra el esquema de la red de alimentación de 4 × 4 elementos y podemos ver algunas dimensiones como la separación o como la del ancho de las líneas de microcinta. En la Figura 6b vemos el parámetro $S_{1,1}$ desde 1.5 GHz a 1.7 GHz, teniendo un marcador en 1.6 GHz con un valor de -18.7 dB.

La red de alimentación alimenta los parches mostrados en la sección III para realizar un análisis de los resultados y un proceso de optimización, si es requerido.

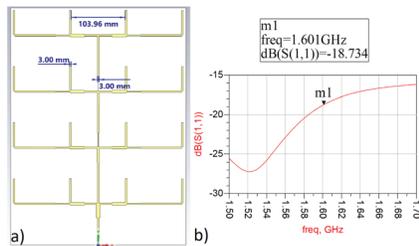


Figura 6. Red de alimentación, a) Esquema de la red de alimentación de 4 × 4 elementos y b) Parámetros $S_{1,1}$ de la red de alimentación

MODELADO DEL ARREGLO DE 32 ELEMENTOS

En la Figura 7 se muestra el arreglo plano resultante, incluida la red de alimentación, vemos la vista frontal y trasera del arreglo superior de 4 × 8 elementos. El arreglo está conformado por 32 elementos (ver Figura 7a), resultado de la unión de dos arreglos de 16 elementos (4 × 4 elementos). La parte posterior del arreglo (ver Figura 7b) contiene los planos de tierra de todos y cada parche, con un conductor continuo de lado a lado del sustrato, la longitud de cada tira que forman el plano a tierra es de 42 mm y están conectados con una línea de transmisión que une ambos lados de los arreglos de 4 × 4 elementos para dar lugar al arreglo de 4 × 8 elementos.

Como cada arreglo tiene una impedancia de entrada de 50 Ω debemos usar acopladores de impedancias y para ello utilizaremos la ecuación 24.

$$Z_T = \sqrt{Z_0 Z_L} \quad (24)$$

Donde, $Z_0 = 50 \Omega$ debido a que es el valor de la impedancia de entrada y $Z_L = 25 \Omega$ resultado de la unión de las líneas de alimentación de 50 Ω de cada arreglo de 4 × 4 elementos. Utilizando estos valores tenemos que la impedancia del transformador de un cuarto de longitud de onda es de 35.35 Ω.

Para el resultado de la impedancia del transformador tendremos un valor de ancho de la microcinta (W) de 5.28 mm y un largo (L) de 25.32 mm. La microcinta se puede observar en la Figura 7a y es la línea de microcinta siguiente a la línea de microcinta de entrada, el punto de alimentación es el punto en color rojo que se encuentra en la parte inferior del arreglo. La microcinta de entrada tiene un valor de 50 Ω con un ancho de 3 mm y un largo de 26 mm.

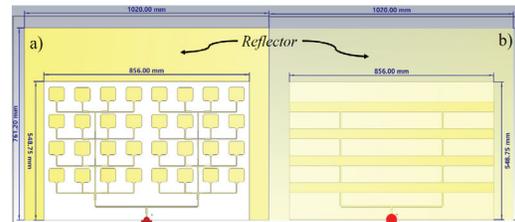


Figura 7. Esquema de la red de 4 × 8, a) Vista frontal y b) Vista trasera

Para completar el diseño colocamos un reflector del tipo panel de aluminio de 3 mm de espesor a una distancia entre el arreglo y el reflector de $\lambda_g / 8$, esto es porque el parche optimizado presenta diagramas de radiación bidireccionales y por la aplicación que se le dará al arreglo requerimos diagramas direccionales. La distancia entre el arreglo y el reflector se elige para el menor efecto sobre la impedancia del arreglo, siendo también la que da el mejor valor de relación Frente-Espalda (para el caso de 1.544 GHz se tiene una relación de 33.6 dB). El reflector tiene dimensiones mayores a la placa del arreglo para una mejor respuesta y se encuentra separado un octavo de longitud de onda a la frecuencia central de 1.6 GHz, esa es una separación de aproximadamente 24 mm. La Figura 8 muestra el resultado final del diagrama de radiación en 3D donde se aprecia que la radiación se concentra perpendicularmente al plano del arreglo.

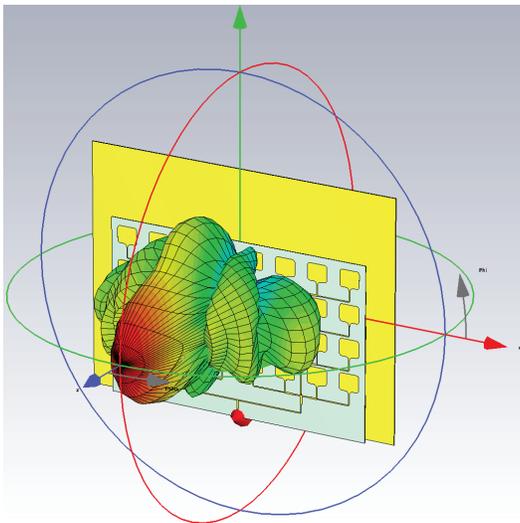


Figura 8. Diagrama 3D de radiación de campo lejado del modelado

CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ARREGLO PLANO DE 32 ELEMENTOS

La Figura 9 muestra el arreglo plano de 32 elementos construido sobre un sustrato de FR-4, por economía se usará para el arreglo un sustrato de una sola cara metalizada, mientras que para el plano a tierra se requirió una lámina de cobre de 0.3 mm de grosor. Se adhirió con un pegamento especial a la lámina de FR-4 cuidando que se mantuvieran las mismas dimensiones que en el modelado, ya que sin una guía de impresión esta tarea se vuelve un poco más complicada. Para el reflector se ocupó un panel de aluminio de aluminio, la distancia entre el arreglo plano y el reflector es de 24 mm.

La caracterización fue realizada en el Laboratorio Nacional en Telecomunicaciones y Antenas (LaNTA) y el equipamiento para este fin fue una cámara anecoica electromagnética, un analizador de redes vectoriales y la sonda WR-650.



Figura 9. Arreglo plano de 32 elementos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 10 muestra la comparación de lo modelado con los resultados de la caracterización del parámetro $S_{1,1}$, en donde vemos que para el modelado tenemos valores de coeficiente de reflexión que se encuentran por debajo de los -10 dB para los 200 MHz de ancho de banda mientras que los resultados de la caracterización están levemente por debajo de esos -10 dB requeridos y solo tiene 150 MHz de ancho de banda (suficientes para las frecuencias requeridas), solo un 25 % menos que lo esperado.

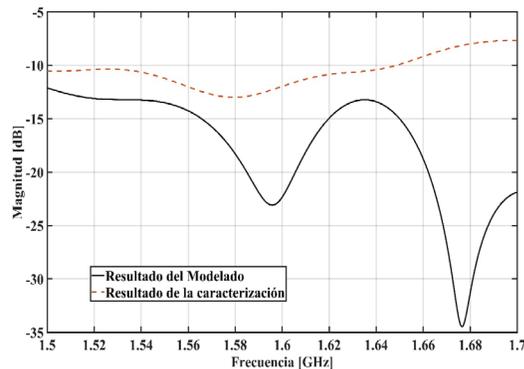


Figura 10. Parámetro $S_{1,1}$ comparación

La Figura 11 muestra los diagramas de radiación normalizados en ganancia comparando lo medido (línea roja) y el modelado (línea azul), en ellos vemos las cuatro frecuencias de operación del satélite Morelos III, el inciso a es para las frecuencias del enlace descendente (enlace de bajada) y el inciso b son las frecuencias que corresponde al enlace ascendente (enlace de subida) del satélite. Vemos que debido al reflector de aluminio el arreglo tiene un diagrama direccional. Utilizando uno de los mejores casos de frecuencia del arreglo (1.544 GHz) haremos una breve comparación. El coeficiente de reflexión se encuentra en -10.6 dB mientras que el modelado se encuentra en -13.3 dB; la ganancia es de 16.8 dBi para el construido, mientras que para el modelado aumenta casi el doble, es decir, 19.5 dBi; el ancho de haz del arreglo construido es de 10.3° mientras que en el modelado es de 11.1° ; por último, la relación frente-espalda es mayor para el modelado y es de 34.2 dB mientras que para el modelado es de 33.6 dB.

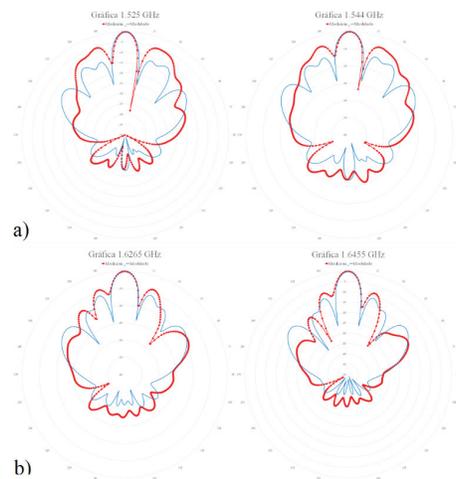


Figura 11. Diagramas de radiación

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El arreglo plano de 32 elementos fue construido sobre el sustrato de FR-4 con un solo lado metalizado de cobre, en donde se grabaron los parches y la red de alimentación. Mientras que el plano a tierra fue construido con láminas de cobre de 0.3 mm de grosor, adheridas con un pegamento de secado rápido y las tiras de cobre que unen las láminas se soldaron con estaño. El arreglo trabaja en la banda L con un ancho de banda de 200 MHz, el coeficiente de reflexión se mantiene por debajo de los -10 dB. Es alimentada por una red externa con una impedancia de entrada de 50Ω . Su diagrama de radiación en la frecuencia de 1.544 GHz es unidireccional, con una ganancia de 16.3 dBi menor en comparación del arreglo modelado, pero aceptable por los inconvenientes del proceso de construcción. Tiene un ancho de haz menor que el arreglo modelado. No se cumple con el requerimiento de la relación de los lóbulos laterales, que se esperaba fuera mayor a 14 dB y solo conseguimos 8 dB, aun así, decimos que es un arreglo adecuado y que cumple con la mayoría de los requisitos solicitados.

REFERENCIAS

Aguirre, D., & Yanyachi, P. R. (2017). Design of a parabolic patch antenna in band L, with double layer and air substrate, for weather satellite reception. Sixth Internacional Conference on Future Generation Communication Technologies, 1-5.

Alsaleh, A. A., Islam, M. R., Nordin, M. A., & Al-Askari, S. (2016). Design and optimization of dual band microstrip patch antenna using SlotsPair. International Conference on Computer and Communication Engineering, 439-442.

Anusury, K., Dollapalli, S., Survi, H., Kothari, A., & Peshwe, P. (2019). Microstrip patch antenna for 2.4GHz using slotted ground plane. *Communication and Networking Technologies*, 1-6.

Balanis, C. (2012). *Advanced engineering electromagnetics*. 2nd Ed., Wiley.

Chemkha, H., & Belkacem, A. (2020). Design of new inset fed rectangular microstrip patch antenna with improved fundamental parameters. IEEE International Conference on Design Test of Integrated MicroNano-Systems, 1-4.

Garduño-Nolasco, E., Sosa-Pedroza, J., & Jardón-Aguilar, H. (2016). A printed volcano smoke antenna for personal communication systems. *Microwave and optical technology letters*, 58(11), 2592-2595. <https://doi.org/10.1002/mop.30102>

Gross, F. (2005). *Smart Antennas for Wireless Communications: With MATLAB*. McGraw-Hill Education.

Hallas, J. (2008). *Basic Antennas: Understanding practical antennas and design*. ARRL.

IFT. (12 de Febrero de 2021). Mapa de satélites geoestacionarios con huella en México. Recuperado de <http://mapasatelital.ift.org.mx>

Latrach, M., & Islam, S. (2017). Latrach, M., & Islam, S. (2017). Small broadband patch antenna design for L-band applications. *Union of Radio Science (URSI GASS)* 1-3. <https://doi.org/10.23919/URSIGASS.2017.8105242>.

Lin, K., Fang, S., & Liu, H. (2021). Low-sidelobe marine radar microstrip array antenna based on hybrid algorithm and metamaterial. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 32(11). <http://dx.doi.org/10.1002/mmce.22916>

Schaub, K., & Kelly, J. (2004). *Production testing of RF and system-on-a-chip devices for wireless communications*. Boston: Artech House Inc.

Cómo citar:

Trejo-León, A., Martínez-Zúñiga, F., Del Villar-Ramírez, R. S., & Sosa-Pedroza, J. R. (2023). Arreglo plano de 32 elementos para comunicaciones satelitales en banda L. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 24 (04), 1-9. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2023.24.4.025>