

Diseño, fabricación y prueba de una antena de parche para GPS en aplicaciones automotrices

M. Tecpoyotl-Torres*, J. G. Vera-Dimas*, J. Varona**, J. Escobedo-Alatorre*,
S. V. Koshevaya* y J. Sánchez-Mondragon***

RESUMEN

Este trabajo se centra en el desarrollo de una antena de parche diseñada para Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), con la finalidad de emplearla como antena de reemplazo en aplicaciones automotrices. En las simulaciones y pruebas se pone énfasis en su ganancia. Las pruebas de transmisión-recepción se realizaron para verificar que la frecuencia de operación de la antena fabricada sea la adecuada. Las pruebas con un kit de GPS comercial fueron realizadas para comparar su desempeño como antena de reemplazo. Las pruebas de laboratorio muestran que se cumple con el mínimo requerido para cubrir ambas frecuencias, de recepción y de transmisión, mientras que las pruebas del prototipo, en el techo vehículo sin movimiento, mostraron ligeras variaciones en los datos de posición, comparados con los obtenidos con el kit con su antena original. Las pruebas de viaje mostraron la suficiente precisión en la determinación de la posición para su uso.

ABSTRACT

This work is focused on the development of a prototype patch antenna designed for use as a replacement antenna in automotive Global Positioning Systems (GPS). In simulations and testing of the prototype, the focus was on the antenna gain. Transmission-reception testing was done to verify the operation frequency. The prototype was tested with a commercial GPS kit to evaluate its performance as a replacement antenna. Laboratory testing showed that it complied with the minimum requirements for both reception and transmission frequencies, while testing on a stationary vehicle showed slight variations when compared to the position data obtained using the same kit with its original antenna. In non-stationary testing, position determinations made with the prototype were sufficiently precise for use.

Recibido: 14 de diciembre de 2010
Aceptado: 29 de marzo de 2011

INTRODUCCIÓN

Uno de los sistemas de comunicaciones móviles más importantes es el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que comenzó como un proyecto militar y ahora es usado comercialmente a gran escala. Entre los avances tecnológicos implementados por el sector automotriz, se encuentran los sistemas de navegación, que están compuestos por un GPS y una base pre-cargada de mapas y carreteras con el fin de localizar a los vehículos. Las principales ventajas de estos sistemas son la reducción en tiempo de viaje, de consumo de combustible y de emisión de gases contaminantes. Otra aplicación de la tecnología GPS es la Localización Automática de Vehículos (AVL), (Frenzel, 2003), como medio para determinar la posición geográfica del vehículo y transmitir esta información a un punto donde puede ser utilizado y explotado.

El diseño de antenas para GPS ha recibido especial atención. Las antenas de parche se consideran útiles en aplicaciones móviles, fijándolas en los techos de los automóviles. En los laboratorios japoneses de Toyota R&D, se ha desarrollado una antena para la instalación sobre el techo de los automóviles (Garg *et al.*, 2001), basada en un solo parche con alimentación dual para lograr polarización circular en las dos frecuencias del satélite. Dado que los techos son prácticamente horizontales, las antenas tienen una excelente vista de los satélites en todos los ángulos de elevación (Walthers *et al.*, 1999).

Palabras clave:

antena de parche; GPS; Rogers RT/duroid 5880; polarización circular.

Keywords:

patch antenna; GPS; Rogers RT/duroid 5880; circular polarization.

*Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), C. P. 62209, Av. Universidad No. 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Mor., Mexico. Correo electrónico: tecpoyotl@uaem.mx

**Universidad Panamericana Campus Bonaterrea. José Ma. Escrivá de Balaguer LB, Villas Bonaterrea, Aguascalientes, Aguascalientes, México.

***Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Luis Enrique Erro no. 1, Tonantzintla, Puebla, México.

Las antenas contribuyen en gran medida a la operación total de los sistemas de navegación, y pueden diseñarse de acuerdo a la estética y características del vehículo, con el fin de obtener prototipos totalmente personalizados, lo cual ha generado un amplio mercado de antenas de reemplazo. En el caso de la comercializar sistemas de navegación para vehículos que no cuentan con el dispositivo original, son ya varias las empresas que se dedican a esta actividad.

Las antenas, usadas comúnmente para polarización circular, que es la utilizada en los GPS (Godara, 2002), son parches basados en microtiras cuadradas truncadas en las esquinas (Wong, 2002) y parches circulares con uno o dos puntos de alimentación (Garg *et al.*, 2001).

En esta investigación, se realiza el diseño de una antena de parche circular. El interés se centra en conocer el rendimiento del sistema conformado por la antena y el chasis del automóvil. El software utilizado para simulaciones es FEKO (basado en métodos numéricos sofisticados para resolver problemas de ingeniería electromagnética complejos) de la compañía Electromagnetic Software & Systems (EMSS). La simulación de la antena considera tres casos: la antena sin radomo, antena con radomo acrílico y la antena en el chasis del vehículo. La antena circular está diseñada para 1.57 GHz, teniendo en cuenta un punto único de alimentación, sobre un sustrato de RT/Duroid 5880.

Cabe mencionar que los radomos de antena también han recibido una atención especial, no sólo en el material utilizado, sino también en la forma, siendo necesario su uso para proteger a la antena de los efectos del medio ambiente, tales como la corrosión, así como para protegerla de daños accidentales o intencionales. En Vera y colaboradores (2009), se presenta un análisis del efecto del material usado para la elaboración del radomo sobre la transmisión y recepción de señales. En este trabajo, se analiza a la antena con un empaque hecho de acrílico transparente.

Las mediciones experimentales del desempeño de la antena se llevan a cabo en laboratorio, así como en un vehículo sin y con movimiento.

El contenido de este documento está organizado como sigue. En la sección Métodos, se mencionan los principios del diseño de la antena circular, así como las simulaciones considerando a la antena individual, la antena con radomo y la antena en el chasis completo. En la sección de Resultados se presentan los resultados de las pruebas realizadas. En la sección Discusión, se muestra una comparación entre los resultados de las simulaciones y experimentales obtenidos. Por último, en la sección Conclusiones se dan algunas observaciones finales.

MÉTODOS

Diseño de la antena

Se eligió a una geometría circular, ya que tales antenas muestran un funcionamiento similar, considerando polarización circular, al de aquellas basadas en geometrías rectangulares, pero con un tamaño ligeramente menor. Por su simplicidad, para la realización del prototipo para GPS, se utiliza una aproximación muy simple y similar a la ecuación usada para los resonadores de anillo. Como ecuación de diseño, del parche radiador, se utiliza la ecuación (1) (Tecpoyotl *et al.*, 2009):

$$r = \frac{\lambda_g}{\pi} \quad (1)$$

donde $\lambda_g = c/(f_0 \sqrt{\epsilon_r})$, r es el radio del parche, λ_g la longitud de onda del grupo, ϵ_r la permitividad relativa y c la velocidad de la luz en el vacío y f_0 , la frecuencia de operación.

Para GPS se considera f_0 igual a 1.57 GHz. Los rangos de frecuencia de GPS son de 1 646.5 a 1 660.5 MHz para transmisión, y de 1 545.0 MHz a 1 559.0 MHz para recepción. No se consideran ángulos de elevación específicos, ya que se planeó ubicar a la antena en el techo del automóvil. Dado que usamos como sustrato a RT/duroid 5880, se tiene un grosor $h = 0.00317$ m y $\epsilon_r = 2.2$.

La longitud de los lados del cuadrado que conforman al plano de tierra, está dada por la siguiente ecuación (Garg *et al.*, 2001):

$$L_g = 6h + r \quad (2)$$

Por lo que, el radio de la antena de parche circular será de 4.19 cm y cada lado del sustrato cuadrado será de 10.28 cm. (figura 1).

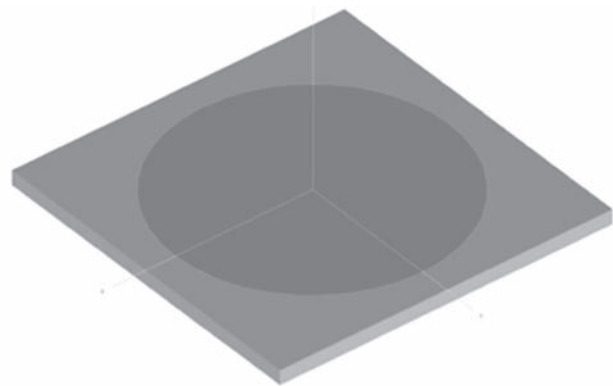


Figura 1. Antena de parche circular.

Simulación de la antena

La ganancia de la antena circular se muestra en la figura 2a, observándose un valor máximo de 4.2 dB. Dado que la antena requiere de ser protegida para evitar el deterioro de la misma, por los efectos del medio ambiente es necesario proporcionarle un radomo adecuado, el cual además, debe permitir la fácil manipulación de la antena por el usuario y tener un efecto mínimo en el patrón de radiación de la antena. Como primera aproximación, se eligió un diseño de un radomo simple y de bajo costo, dado que el material en que se realiza es acrílico, con un espesor de 0.0047 m, de alta disponibilidad en el mercado. Otro material que pudiera emplearse para la fabricación del radomo es Acrylonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS), mismo que es ampliamente usado para carcasas de equipo electrónico y computadoras, pero hasta cierto punto fuera de nuestro alcance.

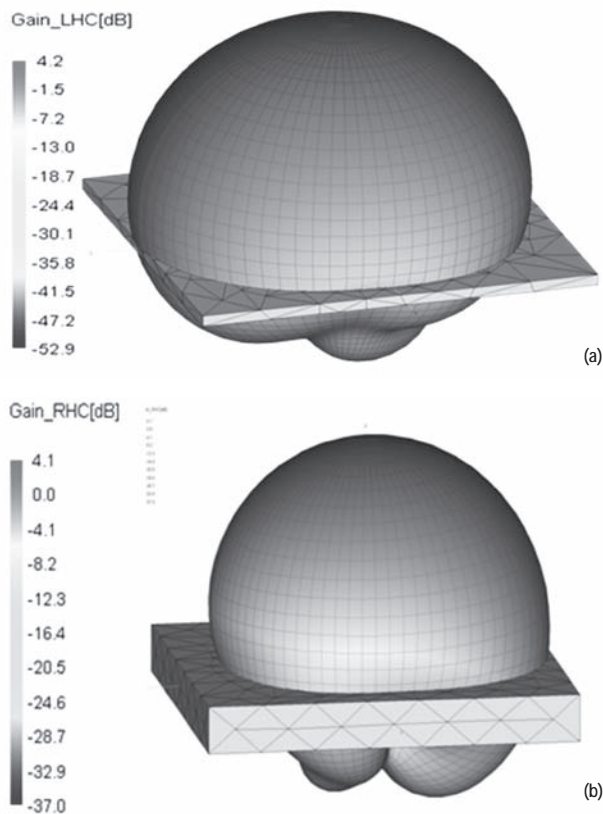


Figura 2. (a) Ganancia de la antena de parche circular (b) con radomo de acrílico.

Como puede observarse en la figura 2, el efecto del radomo en el patrón de radiación es menor, ya que se aprecia una disminución en el valor de la ganancia de 0.1 dB.

En la figura 3, se presentan la vista superior y longitudinal del radomo cuadrado que envuelve a la antena circular.

Por otro lado, la geometría del vehículo es importante en la realización de modelos de inmunidad automotriz ante la presencia de ondas electromagnéticas emitidas por antenas cercanas (Ruddle *et al.*, 2004), en nuestro caso, considerar la geometría completa del sistema también es importante, ya que el plano de tierra no se limita solamente el techo del auto, sino que la totalidad del chasis influye en el desempeño de la antena. Las simulaciones considerando el chasis del vehículo se realizaron con un modelo simplificado del mismo, sin ningún detalle al interior.

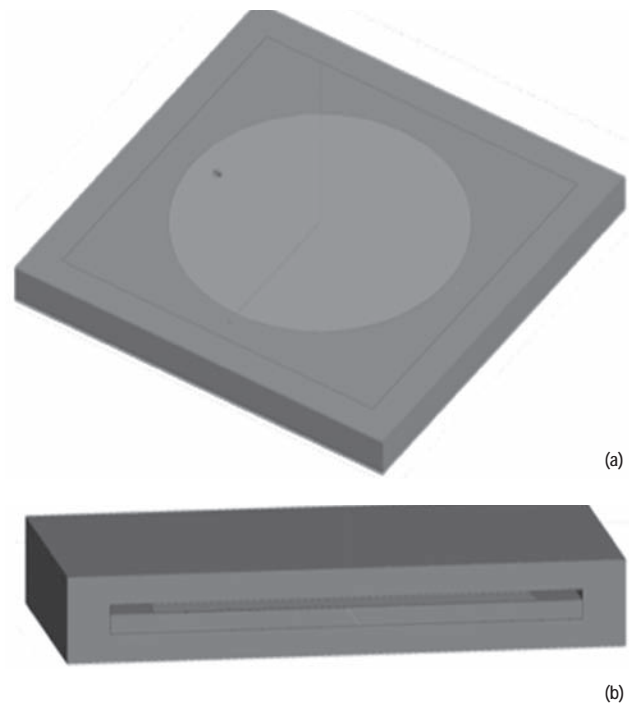


Figura 3. Vista (a) superior y (b) transversal del radomo que contiene a la antena de parche circular.

Para la realización de la simulación sobre el techo del chasis, se diseñó un vehículo con dimensiones similares a un vehículo compacto real (figura 4, las unidades están dadas en mm), mediante un software de dibujo 3D que permitiera exportar archivos con extensión *.x_t (archivos de parasólidos), mismos que pueden importarse desde CADFEKO (la interfase gráfica de usuario de FEKO, utilizada para realizar la definición interactiva de la geometría y su mallado). Se utilizó Autodesk Inventor para llevar a cabo el diseño en la figura 4, el cual consiste solamente de láminas de metal.

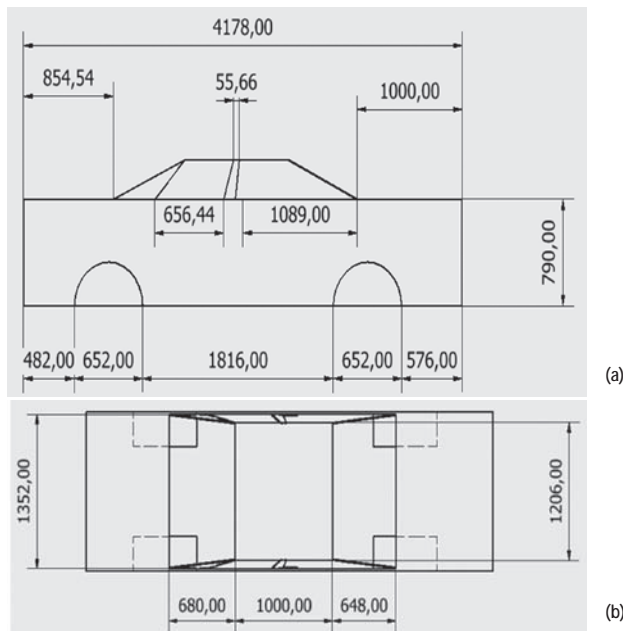


Figura 4. Vista lateral (a) y superior (b) del chasis del vehículo en Autodesk Inventor.

El diseño en Autodesk inventor y la vista del mismo al importarlo en la interfase gráfica de usuario de FEKO, utilizada para realizar la definición interactiva de la geometría y su mallado (CADFEKO), con la antena ubicada en la parte central de la parte posterior del techo del chasis, se muestran en la figura 5.

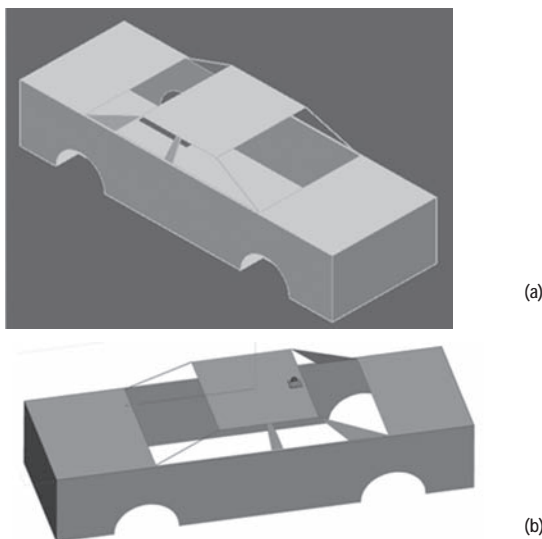


Figura 5. (a) Diseño del vehículo en Autodesk Inventor y (b) Vehículo con antena sobre el techo en CADFEKO.

El patrón de radiación de la antena de parche circular sobre el techo se muestra en la figura 6. Como puede apreciarse, la ganancia se incrementa, alcanzando un valor de 5.2 dB.

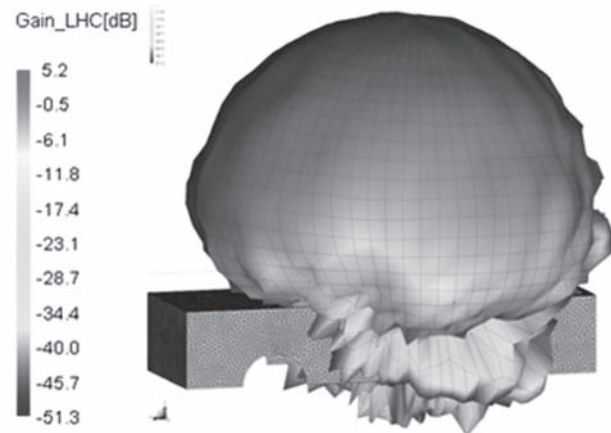


Figura 6. Patrón de radiación de ganancia de la antena circular sobre el techo del automóvil.

Una vez conocido el desempeño de la antena, se utilizó para su fabricación, una placa de circuito impreso o PCB (del inglés Printed Circuit Board) de doble cara, Rogers RT/duroid 5880, un conector hembra tipo BNC (del inglés Bayonet Neill-Concelman) (figura 7a) para la realización de las pruebas con el equipo de laboratorio, ya que los cables de conexión utilizados como entrada/salida del analizador de redes y el generador de señales, cuentan con conectores macho tipo BNC. Además, se utilizó un conector hembra tipo MCX (micro coaxial), (figura 7b) para acoplar a la antena fabricada al kit de desarrollo de GPS, para realizar las pruebas experimentales y conocer su desempeño al utilizarla como antena de reemplazo, comparándola con la antena original del kit.

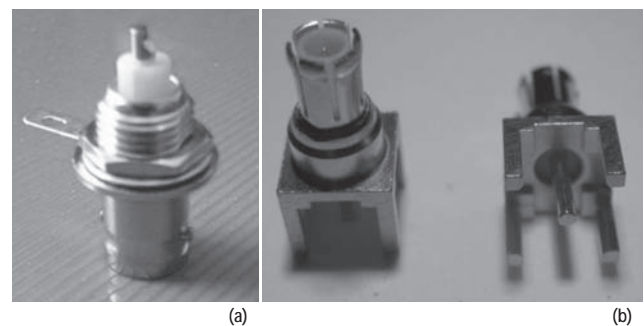


Figura 7. Conector (a) hembra tipo BNC para chasis y (b) hembra tipo MCX para chasis.

Para la realización de los prototipos se utilizó la máquina PROTOMAT S-42. Una vez grabado el plano de tierra y el parche radiador, lo siguiente es ensamblar la antena a los elementos faltantes. La perforación, cuyo ancho depende del grosor del alambre que se utilice, es necesaria para establecer el punto de alimentación de la antena. Finalmente, se procede a soldar el conector BNC (o MCX, para las pruebas con el kit de GPS) con la antena grabada (figura 8).

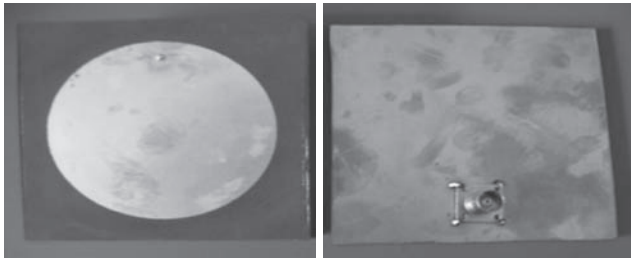


Figura 8. Vista frontal y posterior de una de las antenas de parche prototipo.

RESULTADOS

Para comprobar el funcionamiento adecuado de los prototipos se procedió a realizar tres tipos de pruebas:

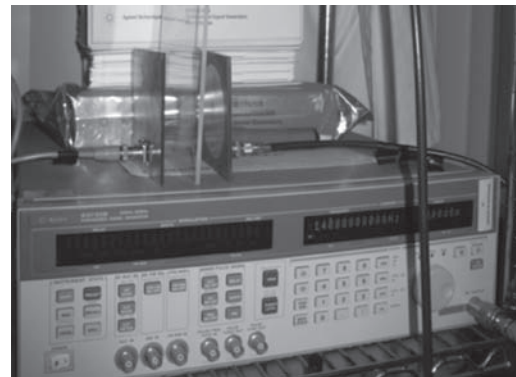
- A. Prueba de emisión-transmisión a la frecuencia de GPS.
- B. Prueba del prototipo como antena de reemplazo de un kit un GPS en un sitio fijo.
- C. Prueba del prototipo como antena de reemplazo de un kit un GPS en movimiento.

La prueba de emisión-transmisión permite observar que los prototipos operan adecuadamente a la frecuencia de operación de los equipos GPS, mientras que la prueba con el de un kit un GPS, es usada para comparar el desempeño de los prototipos realizados en comparación con una antena comercial.

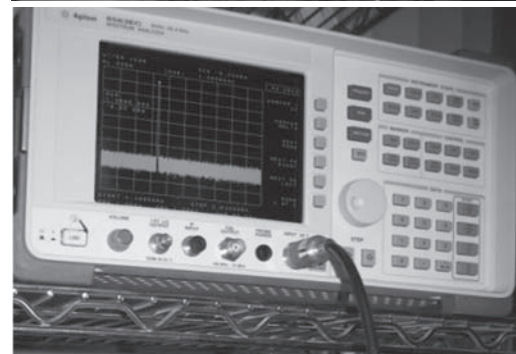
A. Prueba emisión-recepción

Para realizar las pruebas de emisión-transmisión de señal se utilizó un generador de señales sintetizadas y un analizador de espectros (AGILENT 83732B y 8563EC, respectivamente), con los prototipos acoplados por medio de un cable coaxial.

Con el quipo de laboratorio se realizó un barrido de frecuencia desde 1.3 GHz hasta 1.8 GHz, para observar el comportamiento de la antena a diversas frecuencias con una potencia constante generada por el transmisor. La ubicación de las antenas fue una frente a la otra con una separación de siete centímetros (figura 9).



(a)



(b)

Figura 9. Ubicación de los prototipos de la antena de parche para la prueba de frecuencia de operación con el generador de señales (a) y con el Analizador de espectros (b).

En la figura 10, se muestran los valores obtenidos en el analizador de espectros al realizar el barrido de frecuencia, mediante el generador de señales. Se observa que los valores máximos obtenidos se encuentran entre 1.5 GHz y 1.65 GHz, con lo que se verifica que la antena es adecuada para su utilización en equipos de GPS, tanto en el rango de transmisión como de recepción.

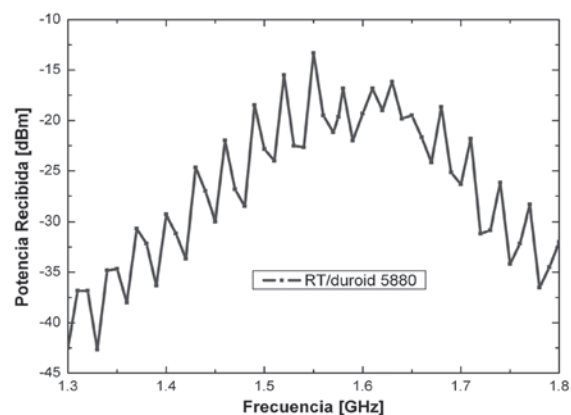


Figura 10. Potencia recibida con el prototipo de la antena de parche circular.

El comportamiento oscilatorio mostrado en la figura 10 puede atribuirse a la utilización de convertidores de conexión en los equipos. Cabe señalar que, la prueba de transmisión-recepción se lleva a cabo bajo polarización lineal. Los patrones de radiación de la antena obtenidos de la simulación considerando este tipo de polarización, mostraron muy pocas variaciones comparadas con la simulación bajo polarización circular, pero con valores mayores para cada uno de los casos analizados (sin radomo 7.1 dB, con radomo 6.9 dB, sobre el chasis 7.6 dB).

B. Prueba con un kit de GPS en un sitio fijo

Para las pruebas del prototipo de la antena de parche circular como antena de reemplazo se utilizó un kit de desarrollo de GPS (figura 11). Además, se compararon las mediciones realizadas con la lectura de un GPS Garmin eTrex Vista.



Figura 11. Kit de desarrollo de GPS.

El kit se compone básicamente de: tarjeta de desarrollo GPS (ER-102-J, SiRF Star-II), cable de interfase serial (RS-232) y un PS/2 de paso, para una fuente de poder, antena de GPS con cable y CD-ROM con el software NMEAgente data (software que despliega la ubicación) e instrucciones de instalación y especificaciones.

El programa NMEAgent nos muestra diversas ventanas para la visualización de los datos obtenidos por medio de la tarjeta de desarrollo; entre los más destacados tenemos: la posición de los satélites, la información de los satélites y la información de la posición.

Al reemplazar la antena del kit por la antena prototipo, y hacer operar al kit, se analiza el comportamiento de la antena prototipo bajo polarización circular. En la figura 12, se muestra la posición de los satélites de acuerdo a la posición elegida. En la ventana de posición de satélites se observan dos círculos concéntricos; el externo indica el horizonte y el interno, un ángulo de 45°, considerando como origen la ubicación del GPS. La situación ideal para una mayor precisión, sería tener los satélites entorno al círculo central.

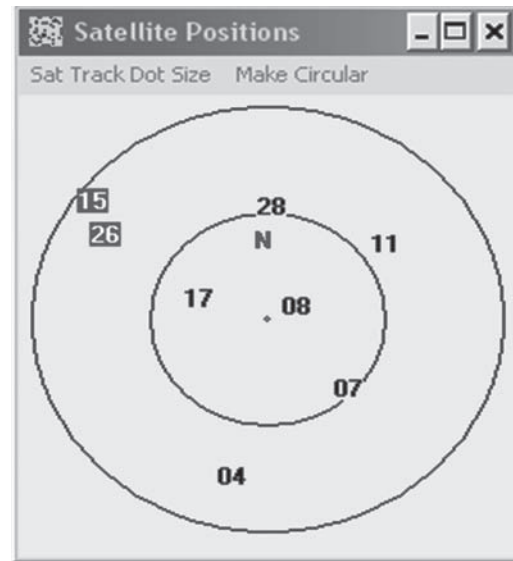


Figura 12. Posición de los satélites (con la antena prototipo).

La ventana de información de los satélites se muestra en la figura 13, en la cual puede observarse a los satélites que se encuentran en el rango de vista (la barra de intensidad de la señal y el número de satélite se muestran en gris claro) y los satélites con los cuales se tiene conexión (la barra de intensidad se observa en gris oscuro).

Al mismo tiempo, se pueden observar en esta ventana los valores de: disolución vertical de precisión (V.D.O.P. por sus siglas en inglés), disolución horizontal de precisión (H.D.O.P.) y disolución de posición de precisión (P.D.O.P.), los cuales permiten verificar la calidad de la medición mostrada por el GPS.

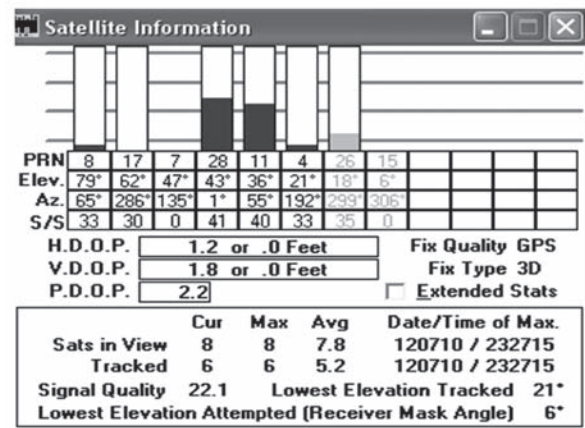


Figura 13. Información de los satélites (con el prototipo).

Por último, se presenta la ventana de la información de posición (figura 14), la cual muestra los datos de latitud, longitud y altitud a la cual se encuentra; además de la fecha y la hora UTC (Tiempo Universal Coordinado).

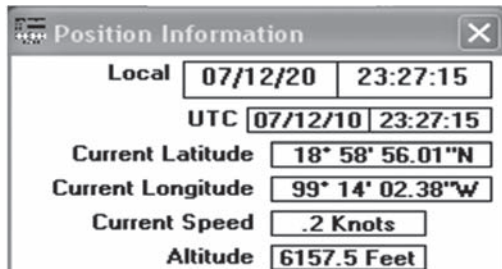


Figura 14. Información de posición (con el prototipo).

Se tomaron 3 mediciones con el kit para obtener un valor promedio en tres puntos establecidos en el estacionamiento de CIICap (tabla 1, figura 15). Las pequeñas variaciones observadas entre cada una de las mediciones pueden atribuirse principalmente a la calidad de la señal recibida por cada uno de los satélites con los que existe conexión.

Tabla 1. Mediciones obtenidas en tres puntos del estacionamiento de CIICap

GPS GARMIN			
Medición	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (m)
Ubicación 1	18°58'55.6"	99°14'1.4"	1884.00
Ubicación 2	18°58'54.05"	99°14'0.48"	1874.50
Ubicación 3	18°58'53.85"	99°14'1.6"	1878.25
KIT GPS CON ANTENA ORIGINAL			
Medición	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (m)
Ubicación 1	18°58'54.52"	99°14'0.39"	2071.00
Ubicación 2	18°58'54.13"	99°14'0.54"	1870.60
Ubicación 3	18°58'53.95"	99°14'1.7"	1868.83
KIT GPS CON ANTENA DE REEMPLAZO			
Medición	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (m)
Ubicación 1	18°58'55.55"	99°14'1.46"	1870.40
Ubicación 2	18°58'54.21"	99°14'0.51"	1875.23
Ubicación 3	18°58'53.87"	99°14'1.63"	1862.57



Figura 15. Ubicaciones de los sitios de medición en el estacionamiento de CIICap.

C. Prueba con un kit de GPS en movimiento

La antena se montó en el techo de un automóvil Cavalier Modelo 95. Los promedios de las mediciones realizadas en CIICap y sobre el circuito de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) (figura 16), se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Mediciones de posición en ciicap y sobre el circuito de la UAEM.

Mediciones en movimiento con el Kit y la antena de reemplazo		
Lugares de medición	Latitud (N)	Longitud(W)
1	18°58'53.87"	99°14'1.63"
2	18°58'55.76"	99°14'1.2"
3	18°58'52.48"	99°13'59.69"
4	18°58'50.52"	99°14'2.35"
5	18°58'50.25"	99°14'5.45"
6	18°58'44.05"	99°14'9.68"
7	18°58'48.64"	99°14'14.87"
8	18°58'53.03"	99°14'21.27"
9	18°58'55.65"	99°14'25.59"
10	18°58'59.95"	99°14'19.08"
11	18°58'59.16"	99°14'12.13"
12	18°58'57.51"	99°14'5.12"

El punto 3 de la figura 15 es equivalente a punto 1 de la tabla 2 y de la figura 16.

Como puede apreciarse en la figura 16, generada utilizando Google Maps, los puntos de medición, excepto el estacionamiento, se encuentran siempre sobre el circuito, sin invadir edificios, ni camellones, lo cual indica que se tienen mediciones útiles.



Figura 16. Ubicaciones donde se realizaron las mediciones (flechas). Los globos indican los puntos en los que Google Maps dispone de fotografías.

DISCUSIÓN

La simulación se llevó a cabo tanto en polarización lineal como circular, ya que para la realización de las pruebas de laboratorio no se dispone de los elementos necesarios para implementar la polarización circular.

Como puede apreciarse de las mediciones realizadas en el estacionamiento, la posición muestra una mayor aproximación entre el GPS Garmin y el kit de GPS con la antena de reemplazo, mostrando diferencias de fracciones de segundo, tanto en latitud como en longitud, mientras que con la antena original se tienen en algunos casos diferencias de segundos. Las diferencias en altitud se atribuyen al funcionamiento propio del kit.

En las pruebas de viaje, la antena de reemplazo mostró también resultados satisfactorios al no invadir puntos fuera del circuito universitario. Cabe mencionar que, las características del vehículo en que se realizaron las pruebas muestran diferencias con respecto al modelo utilizado en la simulación, ya que el material del chasis no es un conductor perfecto además de contar con un recubrimiento de pintura roja, además, no cuenta con lados rectos, mostrando una suave transición entre planos. Por otro lado, las dimensiones también distan ligeramente de las utilizadas en el modelo, sin embargo, dado que el efecto es básicamente sobre el plano de tierra equivalente, el desempeño de la antena se mantiene de acuerdo a lo esperado.

CONCLUSIONES

El desempeño del prototipo en la prueba de transmisión-recepción mostró un ancho de banda suficiente para operar en la frecuencia de GPS. También se comprobó que el pico máximo (1.57542 GHz) se encuentra muy cercano a la frecuencia de diseño. Las ligeras variaciones de la frecuencia central de operación de la antena prototipo se atribuyen al proceso de fabricación.

Las variaciones en las características de reflexión de la antena, así como la distorsión del patrón de radiación a nivel simulación, fueron mínimas ante la presencia del radomo de acrílico. Además, pudo

apreciarse que el chasis del vehículo contribuye notablemente en la ganancia total de la antena.

Con los valores promedio de las pruebas experimentales con el GPS en un sitio fijo, se puede concluir que el prototipo cuenta con una respuesta adecuada para su utilización como antena de reemplazo, aún cuando la antena original cuenta con un amplificador de bajo ruido.

Además, en las pruebas de viaje realizadas en el automóvil con la antena de reemplazo, se obtuvieron también resultados satisfactorios al no mostrarse ninguna invasión fuera del circuito en los puntos de muestreo al ubicarlos en Google Maps.

Entre las mejoras que pueden realizarse a este trabajo se tiene que: el tamaño de la antena prototipo puede reducirse mediante el empleo de otros materiales o bien utilizando geometrías alternativas, el radomo también puede mejorar su apariencia, al utilizar acrílico líquido o ABS en su fabricación. El modelo del automóvil utilizado en la simulación también puede adecuarse, además, para su diseño pueden utilizarse otros softwares especializados, incluso puede utilizarse al mismo FEKO. El conocimiento de los materiales del chasis y sus parámetros eléctricos mejoraría la precisión de los resultados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a EM Software & Systems (USA) Inc., por la licencia de FEKO, así como a Rogers Co., por la donación del material empleado como sustrato de la antena de reemplazo.

J. G. Vera-Dimas expresa su más sincero agradecimiento a CONACYT por la beca para estudiar el posgrado con la referencia 270210/219230.

REFERENCIAS

- Frenzel L. E., (2003). *Sistemas Electrónicos de Comunicación*. México: Alfaomega.
- Godara Lal Chand (Editor). (2002). *Handbook of antennas and wireless communications*. University of New South Wales, Canberra, Australia: CRC Press.
- Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder Bahl and Apisak Ittipiboon. (2001). *Microstrip Antenna Design Handbook*. Norwood, MA. USA: Edit. Artech House.

- Ruddle, A.R., Ferrieres, X., Parmantier, J.P., and Ward, D.D., (2004). Experimental validation of time-domain electromagnetic models for field coupling into the interior of a vehicle from a nearby broadband antenna. *Science Measurement and Technology, IEEE Proceedings* (p. 430 – 433). Vol. 151 Issue: 6.
- Tecpoyotl-Torres M., Vera-Dimas J. G., Vargas-Bernal R., Torres-Cisneros M., Zamudio-Lara A. and Grimalsky V., (2009). Pentagonal Microstrip Antenna Equivalent to a Circular Microstrip Antenna for GPS Operation Frequency. *Memorias del 7º Congreso Internacional de Cómputo en Optimización y Software, CICOS 09*. (p. 200-208). Morelos, México: UAEM-AGECOMP.
- Vera-Dimas J. G. y Tecpoyotl-Torres M., (2009). Kit educativo para la comprensión de la propagación de ondas electromagnéticas. *Memoria Técnica ROC&C 2009 (Vigésima Reunión de Otoño de Comunicaciones, Computación, Electrónica y Exposición Industrial)* (p. 245-249). Acapulco, México: IEEE Sección Centro Occidente.
- Walthers, Dwight D. (McHenry, IL). (1999). Compact patch antenna. Patent. Available on line at <http://www.freepatentsonline.com/5912648.pdf>. Consultado Marzo de 2011.
- Wong K. 2002. *Compact and Broadband Microstrip Antennas*. New York: Wiley Inter-Science.