

## RECEPTOR GNSS MULTIAN TENA PARA APLICACIONES AEROESPACIALES

Jorge Cogo, Ramón G. López La Valle, Gerardo L. Puga, Javier A. Smidt, Juan G. Díaz, Javier G. García, Pedro A. Roncagliolo y Carlos H. Muravchik.

Laboratorio de Electrónica Industrial Control e Instrumentación (LEICI), Dto. Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, UNLP. 48 y 116 2º Piso, La Plata. CC 91. [agustin@ing.unlp.edu.ar](mailto:agustin@ing.unlp.edu.ar)

**Palabras Claves:** GNSS, Receptor Multiantena, Radio Frecuencia, FPGA, Navegación.

### 1. Introducción

La determinación de la posición y velocidad del vehículo es una de las tareas críticas en las aplicaciones aeroespaciales como es el caso de aviones, satélites o cohetes. En los últimos años esta tarea se ha visto favorecida por el despliegue de los Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS). Estos sistemas, utilizando como base una constelación de satélites que envían señales a la superficie terrestre, permiten que un usuario que cuente con un receptor adecuado pueda obtener esta información, en tiempo real y en cualquier parte del mundo. De los GNSS existentes el sistema GPS de EEUU fue el primero operativo y es el de uso más difundido. El segundo, con varios años de historia y declarado operativo recientemente, es el sistema ruso GLONASS. Además, existen varios GNSS en desarrollo como el Galileo de Europa y el COMPASS de China, que todavía no están operativos.

La premisa básica para el cálculo de posición por GNSS es que las señales de varios satélites deben ser recibidas simultáneamente en la antena del receptor [1]. En las aplicaciones típicas, todas las señales recibidas provienen de la misma antena. Por tanto, esta única antena debe ser ubicada en una posición tal que permita contar con la mayor cantidad de satélites visibles. En estos casos la ubicación obvia es el techo del vehículo. Sin embargo, la situación puede ser muy distinta en aplicaciones donde la orientación del vehículo puede cambiar sustancialmente a lo largo de su trayectoria, como en el caso de ciertos cohetes con roldo, o en el caso de un satélite o un avión que en alguna maniobra se pone "de cabeza". En estos casos, lograr un diseño de antena que a pesar de la forma y materiales que componen al vehículo tenga un patrón de radiación omnidireccional puede resultar bastante difícil. Otra alternativa es usar varias antenas hemisféricas ubicadas en las caras principales del cuerpo y dotar al receptor de los medios para elegir qué antena es la adecuada para recibir la señal de cada satélite. Este trabajo describe el desarrollo de un receptor capaz de manejar cuatro antenas independientes, y de recibir las señales de los sistemas GPS y GLONASS. Su concepción, diseño y construcción han sido realizadas en la FI-UNLP y está previsto que los receptores GNSS de las próximas misiones de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CoNAE) utilicen esta tecnología.

El resto del trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se describe el hardware de radiofrecuencia (RF), conversión a frecuencia intermedia (FI) y conversión analógica-digital (AD) desarrollado y construido por el grupo de I+D+i en GNSS del LEICI. En la sección 3 se describen los aspectos más salientes de la plataforma de procesamiento digital desarrollada que realiza el resto de las tareas propias de un receptor multiantena. En la sección 4 se muestran los primeros resultados experimentales obtenidos con el receptor desarrollado y un arreglo de cuatro antenas giratorio, también construido en el lugar de trabajo. Por último se presentan las conclusiones de este trabajo en la sección 5.

### 2. Hardware de Radio Frecuencia y digitalización

El hardware desarrollado está constituido por un cabezal de radiofrecuencia que cuenta con cuatro entradas de antena. Este cabezal acondiciona en forma independiente las señales recibidas por las cuatro antenas, y las convierte a frecuencia intermedia a través de su mezcla con un tono de oscilador local. Las señales de frecuencia intermedia de GPS y GLONASS generadas por el cabezal son digitalizadas mediante una placa digitalizadora provista de cuatro conversores analógico a digital de dos canales. El tono de oscilador local necesario para realizar las cuatro conversiones a FI en el cabezal de RF, así como el reloj

de muestreo para la placa digitalizadora, son generados por una placa sintetizadora de frecuencias, a partir de una referencia común.

### 2.1 Cabezal de Radiofrecuencia

El cabezal de RF se encarga de recibir y acondicionar las señales de GPS y GLONASS provenientes de las cuatro antenas del receptor. Esta tarea se realiza individualmente para cada una de las antenas. Por lo tanto, internamente el cabezal de RF está constituido por cuatro cabezales idénticos que proveen el filtrado y la ganancia necesarios para seleccionar las bandas de interés y excitar correctamente a la etapa de digitalización posterior. El esquema propuesto para los cabezales internos, conocido como receptor heterodino [2], consiste en una etapa de RF con un amplificador de bajo ruido (LNA) y un filtro que selecciona las bandas de interés. Luego, las señales de RF se convierten a frecuencia intermedia en donde se separan las bandas de GPS y GLONASS, y se aporta el resto de la ganancia requerida. El oscilador local proveniente de la placa del sintetizador de frecuencias se divide en cuatro utilizando un cuadruplexor. De esta forma se deriva una señal de oscilador local para cada una de las cuatro entradas de antena.

En la Figura 1 se presenta un diagrama de bloques del cabezal de RF completo y una foto de la placa correspondiente que lo implementa. Dada la complejidad del diseño, la implementación se realizó en un circuito impreso de seis capas, y se utilizaron solamente componentes de montaje superficial. El tamaño del prototipo es de 16cm × 12cm. Luego de construido el cabezal, se realizaron numerosas mediciones a fin de corroborar su correcto funcionamiento y determinar sus parámetros más relevantes. Los amplificadores de bajo ruido poseen una ganancia de 19 dB y una figura de ruido de 1 dB. Este valor, que afecta sustancialmente el comportamiento de todo el receptor [2], es de los mejores que puede lograrse con la tecnología actual.

### 2.2 Sintetizador de frecuencias

Se encarga de generar el tono de oscilador local necesario para realizar la conversión de las señales de RF a FI en el cabezal de RF y provee el reloj de muestreo para la etapa de digitalización del receptor. Para lograr un buen desempeño del receptor es importante que la señal de OL sea estable en frecuencia y es necesario que tanto el tono de oscilador local como el reloj de muestreo estén derivados de una referencia común. Una forma de generar una señal de frecuencia elevada y precisa a partir de una referencia de frecuencia menor es mediante el uso de un lazo de enganche de fase (PLL) [2].

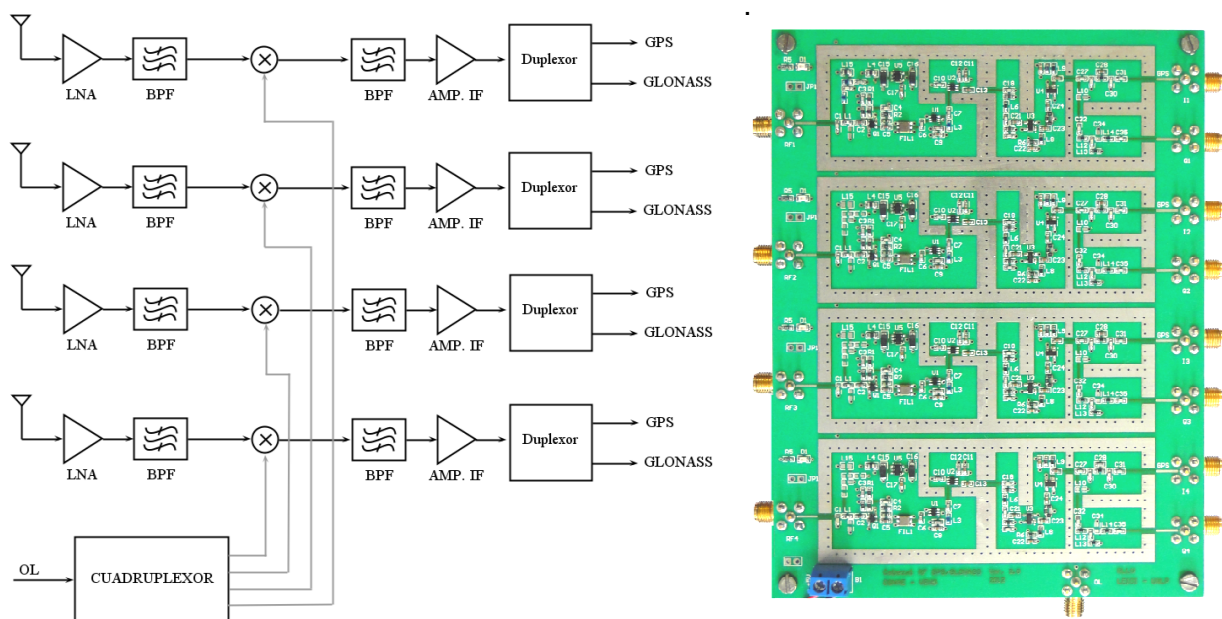


Figura 1: Cabezal de RF: Diagrama en bloques (izq.), y placa implementada (der).

En el diseño realizado se utilizan dos PLLs programables, uno para generar el tono de oscilador local, y otro para generar el reloj de muestreo, a partir de un oscilador a cristal con horno (OCXO) para obtener mayor estabilidad. En la Figura 2 se presenta un diagrama de bloques del sintetizador de frecuencias completo y una foto de la placa construida. La implementación se realizó en un circuito impreso de cuatro capas, y el tamaño de la placa es 16cm x 12cm. Con el objetivo de caracterizar el sintetizador y verificar su funcionamiento se realizaron diferentes pruebas y se midieron la frecuencia y nivel de oscilador local generado, comprobándose que eran adecuados y que no había presencia de tonos espurios.

### 2.3 Placa de digitalización

Se encarga de realizar la conversión al dominio digital de las señales de frecuencia intermedia de GPS y GLONASS provistas por el cabezal de radiofrecuencia. Posee cuatro conversores AD de dos canales, de esta manera se logra digitalizar las ocho señales de frecuencia intermedia generadas por el cabezal de RF. Las muestras obtenidas son directamente volcadas a un dispositivo lógico programable (CPLD), lo cual da la posibilidad de realizar un pre-procesamiento de las señales. El control automático de ganancia (AGC) se implementa también en esta placa. Por tal motivo cada una de las entradas analógicas está conectada a un VGA controlado en forma digital a través de la CPLD. Debido a que los conversores AD utilizados tienen entradas diferenciales, las señales de FI provenientes del cabezal de RF se convierten a modo diferencial mediante los VGA, ya que estos poseen salida diferencial. Luego, las señales ingresan a los conversores AD donde son digitalizadas con una resolución de 8 bits y a una tasa de muestreo de hasta 40MSPs. En la Figura 3 se presenta un diagrama de bloques de la etapa de digitalización completa y una foto de la placa correspondiente ya construida. Se realizaron distintas pruebas y mediciones con el objetivo de verificar el adecuado funcionamiento de la placa. Además, se verificó la ausencia de acoplamientos apreciables entre los distintos canales de de la placa y se verificó la sincronización entre las señales de muestreo de los conversores AD.

### 3. Plataforma de procesamiento digital en FPGA

Esta plataforma fue desarrollada utilizando la placa de entrenamiento DE2 para FPGAs de Altera®, cuyos componentes principales son la FPGA Cyclone® II EPC35F672C, 512 Kb de memoria SRAM, y 8 Mb de memoria SDRAM, además de varias interfaces [3]. El sistema implementado mediante lenguaje de descripción de hardware (VHDL) cuenta con un microprocesador embebido y diversos periféricos, siendo el más importante el sistema de correlación de diseño propio que se describe a continuación. Este sistema es controlado a través del procesador por del software de tiempo real que se encarga de la búsqueda, sincronización, demodulación y toma de mediciones de las señales de los satélites de posicionamiento en vista.

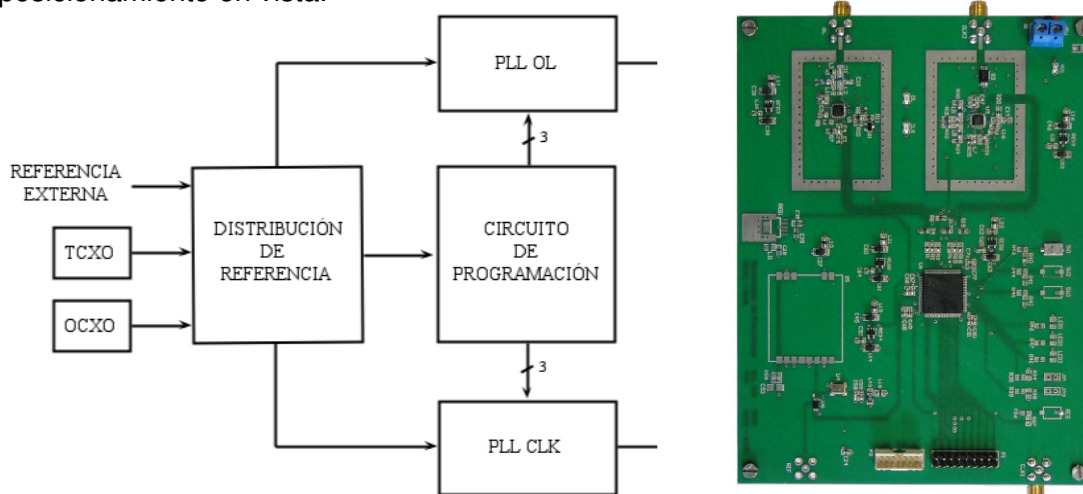


Figura 2: Síntesis de frecuencias: Diagrama en bloques (izq.), y placa implementada (der).

A diferencia de los receptores GNSS habituales el software tiene que decidir también qué antena es la adecuada para la recepción de cada satélite en vista. Esto es posible ya que el sistema de correlación tiene como entrada las señales de todas las antenas en simultáneo. Finalmente, con las mediciones obtenidas, los algoritmos de estimación implementados permiten calcular la posición del receptor con GPS y con GLONASS.

### 3.1 Sistema de Correlación

El sistema de correlación cuenta con 12 canales de seguimiento que pueden operar con señales de GPS o GLONASS de forma independiente y recibir datos de cualquiera de las antenas. Además poseen un canal extra que permite realizar 20 correlaciones simultáneas sobre la misma señal a fin de acelerar el proceso de adquisición. La Figura 4 muestra la arquitectura interna del sistema de correlación. El mismo también cuenta con dos temporizadores independientes que controlan el tiempo de integración para los canales de seguimiento y para el canal de adquisición rápida. Todo el sistema cuenta con dos fuentes de interrupción: una para el canal de adquisición y otra para los canales de seguimiento. Los temporizadores que controlan dichas interrupciones son los mismos que controlan el tiempo de integración. Los canales de seguimiento trabajan con las cuatro antenas simultáneamente mientras que el canal de adquisición posee un selector de antena configurable por software que le permite operar con una única antena a la vez. Cada canal puede operar tanto con señales de GPS o GLONASS según se seleccione por software.

### 3.2 Software de tiempo real y algoritmos de estimación

El software desarrollado está dividido en un conjunto de subsistemas que cumplen distintas funciones necesarias para el receptor. Este conjunto de subsistemas se mantienen comunicados mediante los servicios provistos por el sistema operativo utilizado, o mediante estructuras específicas generadas en el propio programa. El subsistema de “Seguimiento y Adquisición” son N tareas idénticas pero independientes entre sí, donde N es la cantidad total de canales de correlación activos entre todos los cabezales de RF. Cada tarea se encuentra asignada a un único canal de los correladores. Estas tareas realizan la mayor parte del trabajo del receptor: la búsqueda de satélites, seguimiento de la señal, la sincronización con los bits de datos en la misma, medición de potencia de señal, detección de enganche, etc. El subsistema de “Control de Receptor” es una tarea encargada de la ejecución de los comandos entrantes y la generación de las respuestas adecuadas en caso de que las haya. Gestiona el estado de los diversos comandos que estén en ejecución en un momento dado y se encarga de su evolución hasta completar cada uno de ellos.

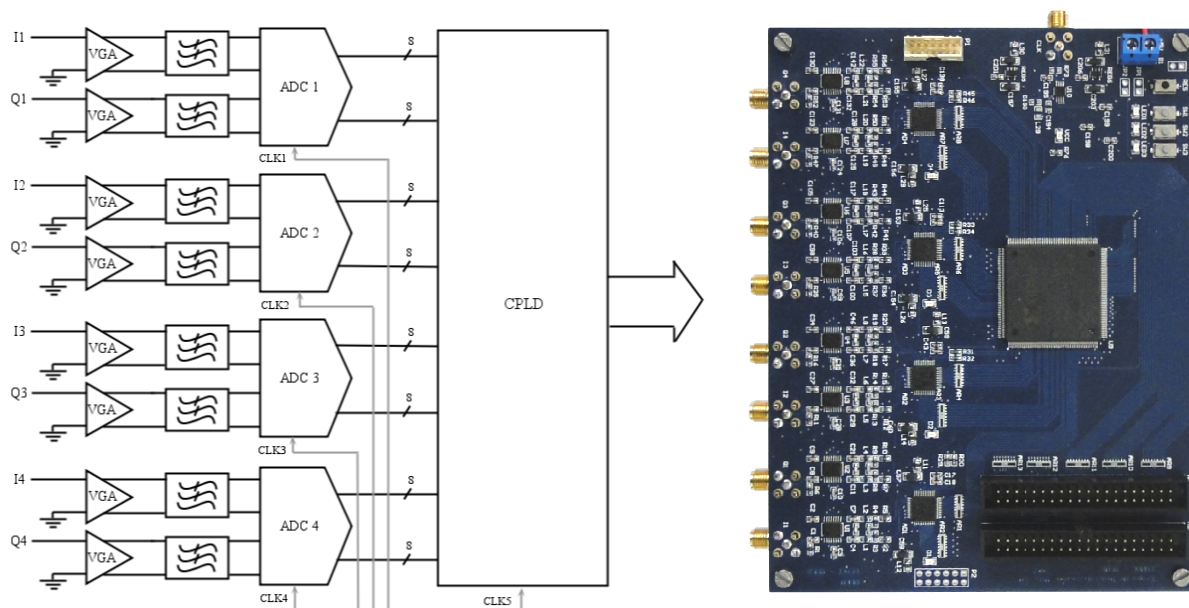


Figura 3: Placa de digitalización: Diagrama en bloques (izq.), y placa implementada (der).



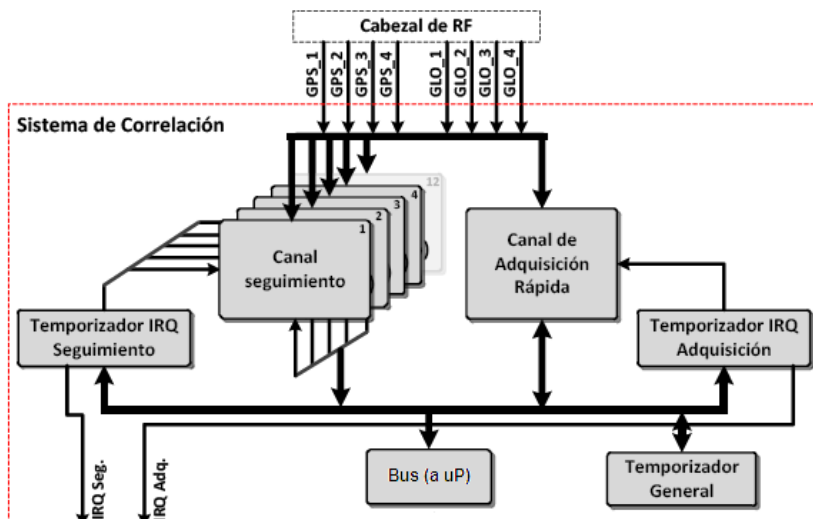


Figura 4: Diagrama en bloques del sistema de correlación implementado en FPGA.

El subsistema “Constelación” realiza la actualización periódica de la lista de visibilidad necesaria para acelerar los procesos de adquisición de señal. Consiste principalmente de una tarea de ejecución periódica de baja prioridad. El subsistema de “Navegación” es la tarea encargada de recolectar las mediciones generadas por cada uno de los canales del receptor, procesarlas y generar una estimación de la posición del receptor, ya sea con el sistema GPS o con el sistema GLONASS. Finalmente, el subsistema de “Comunicaciones” son las tareas encargadas de gestionar la cola de mensajes de salida y colocarlos en salida serie del receptor. También se encarga de la recepción de mensajes y comandos entrantes, de su decodificación y verificación. Una vez verificados, estos comandos son elevados al subsistema “Control del Receptor” para su ejecución.

#### 4. Primeros resultados experimentales

El prototipo desarrollado, completamente integrado, y el arreglo de cuatro antenas construido para validar su funcionamiento, se muestran en la Figura 5. El receptor se conectó a las antenas en la terraza del edificio de electrotecnia y luego de adquiridos varios satélites de GPS y de GLONASS se giró manualmente el arreglo de antenas, a fin de cambiar la visibilidad de satélites de cada antena. Se comprobó que el receptor mantuvo la sincronización con los distintos satélites de posicionamiento en vista durante estos cambios de orientación del arreglo y que pudo seguir calculando su posición sin interrupciones durante los mismos, con ambos sistemas, y con errores dentro de los valores esperados.



Figura 5: Receptor GNSS multiantena prototipo (izq) y arreglo de cuatro antenas (der).

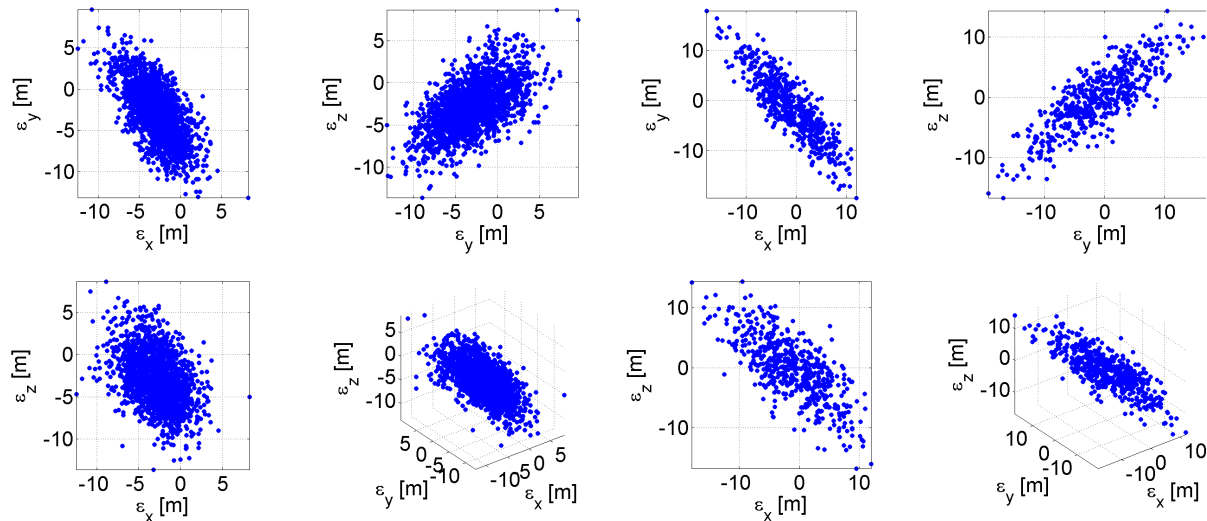


Figura 6: Resultados de posición con sistema GPS (izq.) y GLONASS (der).

A modo de ejemplo se muestran en la Figura 6 algunos resultados de posición obtenidos con la señal de GPS y con el sistema GLONASS. Puede apreciarse que los resultados obtenidos con ambos sistemas son muy similares, indicando un correcto funcionamiento del receptor. Puede notarse también que, a pesar de no haberse realizado un filtrado temporal, los errores están en el orden de los 5m en el caso de GPS, y en el orden de 10m en el caso de GLONASS. Que el error obtenido con GLONASS sea de aproximadamente el doble del obtenido en GPS es esperable debido a que el ancho de banda de la señal de GLONASS es la mitad del de la señal de GPS [4]. Estos valores son considerablemente mejores que los obtenidos con receptores comerciales y permiten verificar la calidad del procesamiento analógico y digital realizado por el receptor.

## 5. Conclusiones

Se presentó el diseño, la construcción y la validación experimental de un receptor de los sistemas de posicionamiento global estadounidense, GPS, y ruso, GLONASS, con la particularidad de poseer múltiples entradas de antena simultáneas. Esta característica lo hace apto para ser utilizado en aplicaciones donde la orientación del vehículo puede cambiar sustancialmente a lo largo de su trayectoria, como ocurre habitualmente en aplicaciones aeroespaciales. Se desarrolló tanto el hardware como el software necesario combinando diversas especialidades de la ingeniería electrónica como el diseño de circuitos de radio frecuencia y circuitos impresos para señales de alta velocidad, sincronización de señales de comunicaciones digitales, diseño de software de tiempo real y algoritmos de estimación no lineal. Se presentaron los resultados experimentales obtenidos con un primer prototipo operativo y un arreglo móvil de cuatro antenas. Actualmente se continúa trabajando en el desarrollo de este receptor a fin de que pueda ser utilizado como parte del sistema de navegación, guiado y control de los vehículos lanzadores que está desarrollando la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CoNAE).

## 6. Bibliografía

- [1] Parkinson, Bradford W. y Spilker, James J. Jr. (eds), *Global Positioning System: Theory and Applications*, vols. I y II. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), Washington, 1996.
- [2] R. E. Ziemer and W. H. Tranter, *Principles of Communications: Systems, Modulation and Noise*. Fifth edition. John Wiley & Sons Inc., 2002.
- [3] Altera Corporation, *DE2 Development and Education Board. User Manual*, 2006.
- [4] E. D. Kaplan and C. J. Hegarty, *Understanding GPS: Principles and Applications*, Second Edition, Artech House, 2006.