

## RECEPTOR DE GPS PARA VEHÍCULOS EXPERIMENTALES VEX

Cogo, Jorge; Puga, Gerardo L.; Smidt Javier A.; López La Valle, Ramón G.; Díaz Juan G.; Rodríguez Santiago; Leibovich, Pablo E.; García, Javier G. y Roncagliolo, Pedro A.

LEICI, Dto. Elec., FI-UNLP.48 y 116, La Plata. CC 91. Mail: jorge.cogo@ing.unlp.edu.ar

Palabras Clave: GPS, vehículo experimental, VEX-1B.

### 1. Introducción

En este trabajo se presentan los resultados de la experiencia en vuelo a bordo de los cohetes experimentales VEX-1A y VEX-1B, lanzados durante el año 2014, de un receptor de GPS (Sistema de Posicionamiento Global) desarrollado en la Facultad de Ingeniería. Este receptor es producto de una serie de convenios de desarrollo firmados entre la Universidad Nacional de La Plata y la empresa VENG S.A (Vehículos Espaciales Nueva Generación, Sociedad Anónima), contratista principal para el proyecto Tronador II de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CoNAE), que depende del Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios.

Tanto el desarrollo del receptor GPS como los vehículos de los que formó parte se encuentran a su vez enmarcados en el proyecto de acceso al espacio Tronador II, cuyo objetivo final es el diseño y la validación del vehículo que lleva el mismo nombre. El Tronador II es un vehículo inyector de cargas satelitales con capacidad para transportar cargas útiles de hasta 250 kg hasta órbitas LEO (del inglés *Low-Earth Orbit*). Este tipo de órbitas, por su accesibilidad y por la posibilidad de revisita que ofrecen, son ampliamente utilizadas para satélites de observación terrestre y sensado remoto. El vehículo Tronador II es un eslabón imprescindible en el plan de desarrollo tecnológico coordinado por la agencia espacial argentina, la CoNAE. La ejecución de este plan permitirá a la República Argentina contar con un amplio nivel de independencia tecnológica en materia espacial, completando la cadena de producción, ensayo y transporte de cargas satelitales.

Como parte del proyecto de desarrollo del vehículo Tronador II, durante el año 2014 se llevó a cabo el lanzamiento de dos vehículos experimentales denominados VEX-1A y VEX-1B. Estos ensayos tuvieron como propósito verificar el correcto funcionamiento de los sistemas de NGC (Navegación, Guiado y Control) y de propulsión desarrollados, así como ejercitar los procedimientos de logística y apoyo a las campañas de lanzamiento, entre otras metas. El lanzamiento del primero de los vehículos experimentales, el VEX-1A, se llevó a cabo durante marzo del 2014. Si bien una serie de dificultades técnicas malograron el vuelo del vehículo apenas algunos segundos después del encendido de los motores, la información recabada durante el lanzamiento y su campaña previa así como la experiencia desarrollada durante éstas, fueron vitales para el éxito del segundo vehículo. Este último, denominado VEX-1B, despegó en agosto del 2014 de la rampa de lanzamiento ubicada en la bahía de Samborombón, apenas unos kilómetros en las afueras de la localidad de Pipinas, Provincia de Buenos Aires, y ejecutó una trayectoria correctamente controlada durante todo su vuelo propulsado, atestiguando de esa forma el mérito de los sistemas y los equipos de trabajo involucrados en el desarrollo y estableciendo una base de trabajo sólida para la evolución futura del proyecto Tronador II ([1],[2]).

Una de las tareas críticas que hacen al sistema NGC de este tipo de vehículos consiste en la determinación de la posición y la velocidad instantánea del mismo durante todas las fases del vuelo, con el fin de proveer de realimentación a los sistemas de control del vehículo que orientarán los sistemas de propulsión para mantener una trayectoria previamente planificada. Esto es particularmente crítico en el caso de vehículos inyectores de cargas satelitales, donde el éxito de la misión depende no solamente de la colocación de la carga en órbita, sino de los parámetros de la órbita lograda.

Los sistemas de NGC pueden alimentarse de toda una gama de dispositivos con el fin de determinar la posición y la velocidad, siendo lo más habitual la utilización de

instrumentos llamados IMUs (del inglés *Inertial Measurement Units*), que se encuentran formados por una combinación de acelerómetros y giróscopos. Por sus características de funcionamiento, este tipo de dispositivos solamente pueden utilizarse para proveer información relativa de posición y velocidad, y generalmente requieren del soporte de sistemas externos -radares terrestres, receptores GPS, etc.- para limitar la acumulación de error a medida que progresa el vuelo.

En las últimas décadas, la disponibilidad de sistemas de posicionamiento global por satélite (GNSS) como GPS y GLONASS ha permitido la utilización de receptores de estos últimos como parte de los sistemas de navegación de vehículos inyectores. Estos receptores pueden proveer información de la posición y la velocidad del móvil respecto de un marco de referencia absoluto anclado en tierra [3]. La utilización conjunta de los sistemas de navegación satelitales y unidades IMU clásicas es una potente combinación que habilita la generación de sistemas NGC extremadamente precisos para guiar la inyección de cargas en órbitas satelitales.

Las características propias de la dinámica de los vehículos involucrados requieren de la utilización de receptores de sistemas de posicionamiento global especialmente acondicionados para operar en las exigentes condiciones de vuelo que se presentan a lo largo de una misión. Las tecnologías y las técnicas utilizadas para diseñarlos son consideradas de naturaleza sensible por su valor estratégico-militar, y por lo tanto se encuentran supeditadas a restricciones de exportación por parte de los países centrales donde generalmente son desarrolladas.

Esto último, sumado a la intención de incrementar el nivel de independencia tecnológica que tiene el país en el plano espacial, motivó que se optara por el desarrollo nacional de los receptores de posicionamiento satelital que han de ser utilizados por los vehículos del proyecto Tronador II. Esta iniciativa permite recuperar la inversión no solamente mediante la obtención del producto final sino también incubar equipos de trabajo locales con capacidad para el desarrollo de equipos espaciales de avanzada. El receptor presentado en este trabajo es uno de los productos de este esfuerzo de desarrollo.

El resto del trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se describen sucintamente las características del receptor diseñado y construido por el grupo de I+D+i en GNSS que forma parte del Instituto LEICI, en la Facultad de Ingeniería de la UNLP. En la sección 3 se presentan y se discuten los resultados obtenidos en el ensayo de vuelo en el vehículo VEX-1B. Por último se presentan las conclusiones de este trabajo en la sección 4.

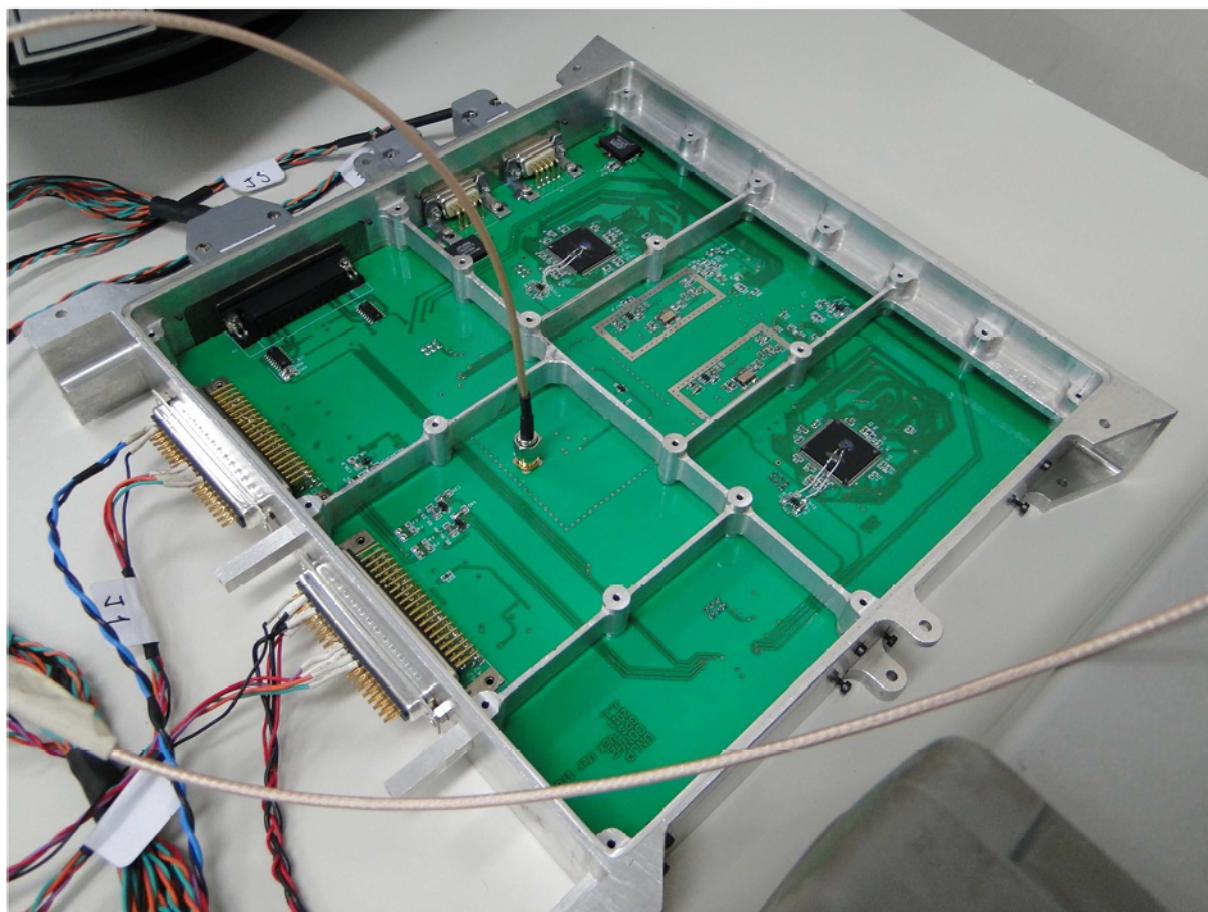
## 2. Descripción del Receptor

El receptor desarrollado como parte del Proyecto Tronador II no es el primero en su clase, sino que pertenece a una familia de desarrollos que tienen sus raíces en dispositivos anteriores que fueron utilizados en los proyectos Tronador I (cohete sonda, 2007), VS-30 (cohete sonda, 2007), T4000 (cohete sonda, 2011) y SAC-D (misión satelital, 2011) [4].

El receptor GPS para vehículos VEX agrega una serie de importantes innovaciones respecto a los diseños anteriores. La primera y más importante de ellas consiste en su arquitectura doble redundante, donde cada equipo se encuentra formado por dos submódulos GPS absolutamente autónomos.

Cada submódulo es equivalente a un receptor GPS convencional, siendo capaz de cumplir con todas las tareas de procesamiento de señal y cálculo de navegación de forma independiente. Cada uno de los submódulos interactúa de forma separada con la computadora de NGC, la cual puede detectar fallas en cualquiera de dichos submódulos a partir de la evaluación independiente de la calidad de los servicios prestados por éstos. Los submódulos son energizados a través de sendos canales de alimentación independientes, minimizando de esta forma la existencia de puntos simples de falla en la regulación de tensión de alimentación de los submódulos individuales. Ambos receptores comparten únicamente el sistema de antenas de entrada, el cual no puede ser redundado debido a razones de espacio ocupado en el vehículo. Esto último es otra característica distintiva del receptor.

En la Figura 1 se presenta una fotografía del receptor de GPS dispuesto en el *frame*, o marco de aluminio, que luego será integrado a la electrónica del vehículo.



**Figura 1: Fotografía del receptor de GPS integrado en el *frame*.**

Debido al requerimiento de mantener visibilidad de cielo abierto durante todas las fases de vuelo, independientemente de la orientación del cuerpo del vehículo, el receptor utiliza como entrada un arreglo de antenas compuesto de cuarenta elementos radiantes individuales, unidos mediante un combinador de potencia. Estos elementos radiantes se encuentran distribuidos a lo largo de la periferia del vehículo, otorgando de esa forma una visibilidad de 360 grados en todas las etapas de la misión.

La dinámica propia del vuelo de los vehículos cohete tiene una serie de características que la distinguen de la de otros vehículos más convencionales. Es particularmente relevante desde el punto de vista del receptor de GPS utilizado como instrumento de a bordo los altos valores de velocidad alcanzados, la aceleración permanente durante todo el vuelo propulsado, y las variaciones súbitas en la aceleración del vehículo que ocurren durante el encendido y el apagado de los motores. Este tipo de dinámicas de la velocidad del vehículo provocan variaciones rápidas de la frecuencia de las señales recibidas, debido al efecto conocido como efecto Doppler. El receptor debe estar preparado para compensar estas distorsiones, lo cual requiere el diseño, la implementación y el ensayo de algoritmos de procesamiento especialmente adaptados para operar en estas condiciones sin perjuicio de la capacidad de demodulación de las señales [5].

Cada uno de los submódulos del receptor provee al sistema de NGC de soluciones de posición y velocidad en tiempo real a intervalos de un segundo, además de generar una señal de sincronismo global llamada PPS (del inglés *Pulse-per-Second*) para permitir la sincronización de todos los relojes de a bordo con una única referencia temporal referida a la hora central del sistema GPS. Además, a través de un enlace de telemetría compartido con otros instrumentos del vehículo, el receptor GPS transmite a los equipos de soporte en



tierra la posición y la velocidad del vehículo en tiempo real; esto cumple con el doble propósito de registrar la trayectoria del vehículo para su análisis posterior, y de permitir detectar cualquier desviación inesperada que pueda significar un riesgo que para las instalaciones y/o las personas en tierra.

### 3. Resultados y Discusión

El día 15 de agosto de 2014 se llevó a cabo el lanzamiento del vehículo VEX-1B desde una rampa de lanzamiento instalada en las cercanías de la localidad de Pipinas, en la costa de la provincia de Buenos Aires. A lo largo de dicha misión se llevaron a cabo incontables ensayos de funcionamiento del receptor durante todas las etapas de la campaña: desarrollo, integración, verificación y vuelo del vehículo. Se presentan aquí algunos de los registros de funcionamiento del receptor durante el vuelo del vehículo, obtenidas a través del enlace de telemetría del mismo.

En la Figura 2 se puede ver la trayectoria seguida por el vehículo VEX-1B durante el vuelo del 15 de agosto, obtenida en base a las mediciones del receptor de GPS. Del lado izquierdo se observa (en línea amarilla) la proyección horizontal del vuelo sobre un mapa de las regiones cercanas, donde se han indicado los puntos de lanzamiento y de impacto del vehículo para ayudar a interpretar el sentido del recorrido. Del lado derecho puede verse (en línea azul) una representación tridimensional de la trayectoria de vuelo en coordenadas locales ENU (del inglés *East-North-Up*) relativas a la rampa de lanzamiento. En esta figura doble puede apreciarse que el vehículo inicialmente sigue un recorrido prácticamente vertical, para luego inclinarse en dirección sudeste al alcanzar aproximadamente los 500 m de altura y adentrarse de esa forma en el Río de La Plata. La distancia horizontal recorrida fue de aproximadamente 1,9 km.

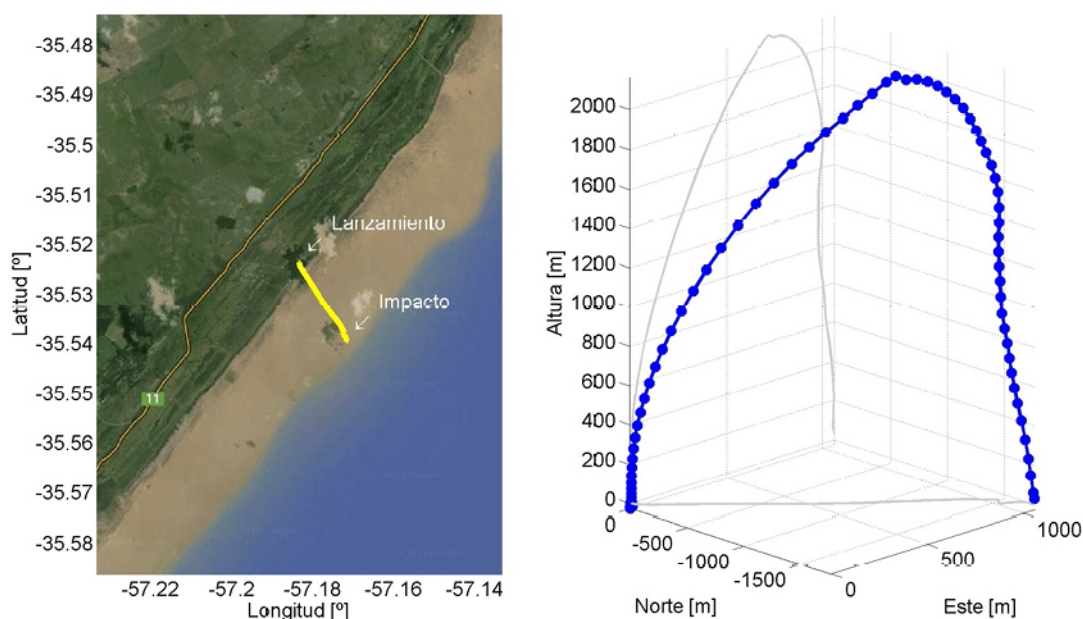
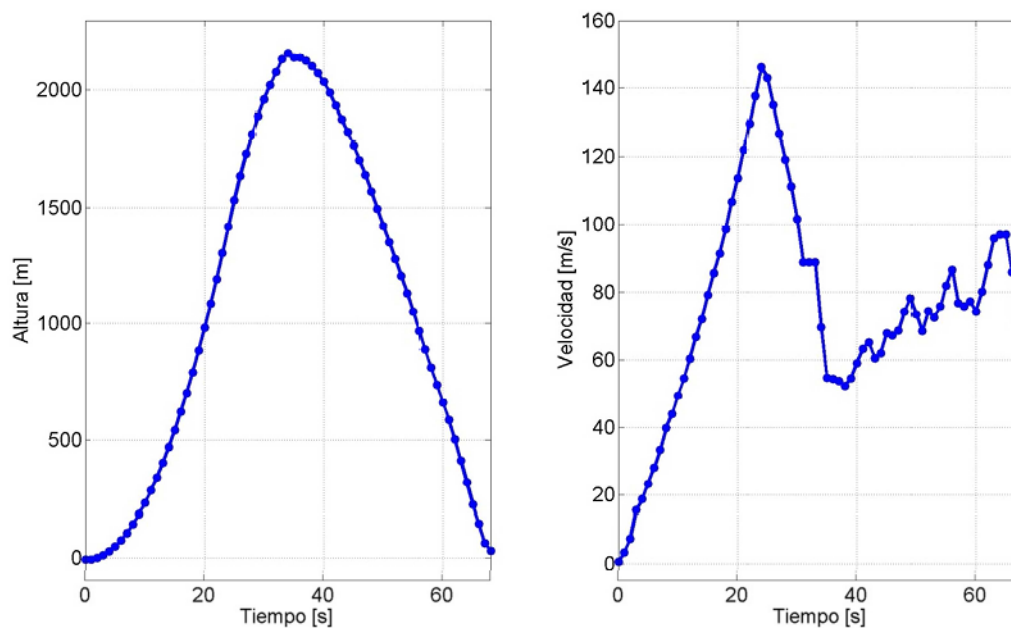


Figura 2: Trayectoria del vehículo VEX-1B determinada por el receptor de GPS.

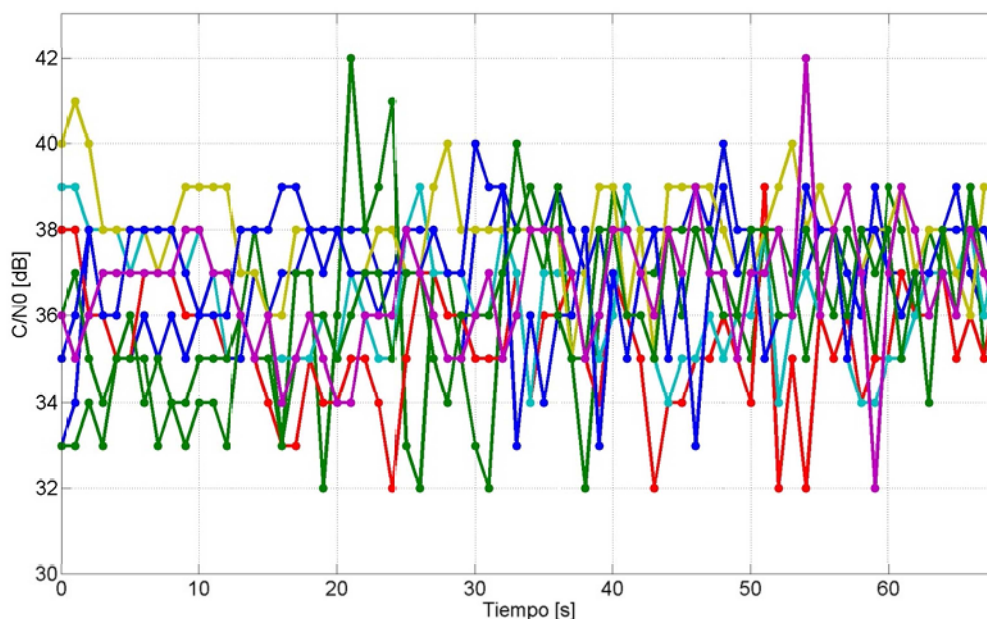
En la Figura 3 se presenta una representación alternativa, donde la posición (izquierda) y la velocidad (derecha) del vehículo se encuentran graficadas en función del tiempo de vuelo. En estas figuras se puede apreciar el progresivo incremento en la velocidad del vehículo durante los primeros segundos, hasta que aproximadamente 25 segundos después del despegue se produce el apagado del motor de propulsión. Inmediatamente posterior a este evento, el vehículo continúa su vuelo de forma balística durante algunos segundos más, hasta que se despliega un pequeño paracaídas de estabilización que limita la velocidad de caída durante lo que resta del vuelo. El impacto del

vehículo contra la superficie del agua se produce aproximadamente 68 segundos luego del despegue inicial. La máxima altura se alcanza poco después del apagado de los motores, y es de aproximadamente de 2,2 km sobre la altura del río.



**Figura 3: Altura en función del tiempo (izq.) y velocidad en función del tiempo (der.) del vehículo, relevadas por el receptor de GPS.**

La trayectoria registrada por el receptor GPS del vehículo VEX-1B fue contrastada con la trayectoria planificada previamente para el vehículo, verificando de esta forma la fidelidad con la que los algoritmos de NGC de la aeronave lograron seguir el curso de vuelo designado por el planeamiento de la misión.



**Figura 4: Relación de potencia de portadora a potencia de ruido de la señal recibida en los diferentes canales del receptor de GPS.**

Es de resaltar también que el receptor de GPS se mantuvo operativo en todas las etapas del vuelo, apagándose solamente luego del impacto del vehículo contra la superficie del agua. Esto permite verificar tanto la correcta recepción de las señales de GPS en toda la trayectoria, que involucra diferentes orientaciones del vehículo; como la correcta operación de los algoritmos de seguimiento de dicha señal.

Esto último puede verificarse también analizando la relación de potencia de portadora a potencia de ruido (C/N0) estimada por el receptor durante la trayectoria, que se presenta en la Figura 4. Allí, cada color corresponde a un canal del receptor, es decir, a la señal proveniente de un satélite GPS particular. Puede verse que si bien existen variaciones de C/N0, los valores se mantienen por encima de 30 dB, lo cual representa una condición aceptable para el buen desempeño de los algoritmos de seguimiento.

#### 4. Conclusiones

Durante las fases de diseño y verificación se llevó a cabo la validación de los algoritmos de detección y de seguimiento de señales bajo las condiciones dinámicas presentes durante el vuelo de un vehículo cohete, así como también de los algoritmos de navegación necesarios. Se implementaron dichos algoritmos, desarrollando el hardware y el software necesario, siempre en seguimiento de las normas y procedimientos apropiados demandados por la aplicación específica.

Una vez construido el receptor se llevó a cabo una extensa campaña de ensayos del mismo. Estos últimos se realizaron mediante la utilización de un simulador de señales GPS propiedad de la CoNAE, el cual permite la realización de ensayos de funcionamiento en condiciones totalmente controladas y altamente repetibles.

Se ejecutaron las tareas de integración del receptor con el vehículo, seguida de ensayos de funcionamiento e interacción con los sistemas de navegación y de telemetría de la plataforma. Finalmente, los resultados experimentales obtenidos durante la campaña de lanzamiento del vehículo VEX-1B permitieron validar exitosamente el funcionamiento del receptor GPS desarrollado.

El éxito logrado sienta una base sólida para los desarrollos correspondientes a las etapas siguientes del proyecto Tronador II, rumbo al lanzamiento del primer vehículo de escala completa, el Tronador II.

#### Bibliografía

- [1] Página web de CoNAE: [www.minplan.gob.ar/noticia/16751/se-realizo-con-exito-un-nuevo-ensayo-de-las-pruebas-del-lanzador-de-satelites-tronador-ii.html](http://www.minplan.gob.ar/noticia/16751/se-realizo-con-exito-un-nuevo-ensayo-de-las-pruebas-del-lanzador-de-satelites-tronador-ii.html), accedida: 26/02/15.
- [2] Proyecto "Tronador II", Lanzamiento del Segundo Vehículo de Prueba VEx 1B, disponible en: [www.minplan.gob.ar/noticia/16751/se-realizo-con-exito-un-nuevo-ensayo-de-las-pruebas-del-lanzador-de-satelites-tronador-ii.html](http://www.minplan.gob.ar/noticia/16751/se-realizo-con-exito-un-nuevo-ensayo-de-las-pruebas-del-lanzador-de-satelites-tronador-ii.html), accedida: 26/02/15.
- [3] Kaplan, E. D. *Understanding GPS: Principles & Applications*, Artech House (1996).
- [4] García, Javier G.; Roncagliolo, Pedro A.; López La Valle, Ramón G.; Cogo, Jorge; Puga, Gerardo L.; Smidt, Javier A.; y Muravchik, Carlos H., Receptor de GPS experimental para satélites de órbita baja. Primeras Jornadas de Investigación y Transferencia 2011 - Facultad de Ingeniería, UNLP.
- [5] Pedro A. Roncagliolo, Javier G. García, and Carlos H. Muravchik, *Optimized Carrier Tracking Loop Design for Real-Time High-Dynamics GNSS Receivers* International Journal of Navigation and Observation, Volume 2012.