

### Resumen

En este documento se expone la actividad de investigación que se desarrollará como nota suplementaria del tercer corte, la cual tendrá un peso significativo dentro de los cortes. En la primera parte del documento se introduce a los sistemas de navegación por satélite y sus principios de funcionamiento, luego brevemente se realiza una descripción acerca del proceso de adquisición de señales de sistemas de navegación global por satélite (GNSS, *ing.* Global Navigation Satellite System) mediante la implementación de la transformada rápida de Fourier (FFT, *ing.* Fast Fourier Transform). También se describen los distintos métodos existentes para la estimación de los parámetros de radionavegación de la señal, para luego exponer la etapa de calculo de coordenadas, que es el objetivo final de los sistemas de radionavegación. Al final del documento se especifica el proyecto propuesto para trabajo de investigación en el aula.

## Palabras clave

Radionavigation, GNSS, DSP, GPS, FFT, GNSS, RINEX.

## 1. Objetivo

Realizar un trabajo de investigación cuyo tema principal sea el análisis e implementación de los Sistemas globales de navegación por satélite, mediante un estudio del estado del arte, realización de modelos y simulaciones.

## 2. Introducción

Los últimos años la tecnología GNSS ha atraído considerablemente la atención de investigadores e ingenieros de todo el mundo, en gran medida debido a la alta aplicabilidad de estos en una amplia gama de aspectos de la vida humana, desde agricultura de precisión, hasta la optimización de sistemas de transporte terrestres, fluviales y navales. Los sistemas de posicionamiento GNSS son probablemente uno de los sistemas más complejos creados por el hombre. La precisión de posicionamiento es una herramienta clave en el desarrollo industrial y tecnológico de cualquier país, por eso el estudio, diseño y la reducción de errores en estos sistemas es una tarea de alta importancia académica y tecnológica en países desarrollados y en vía de desarrollo.

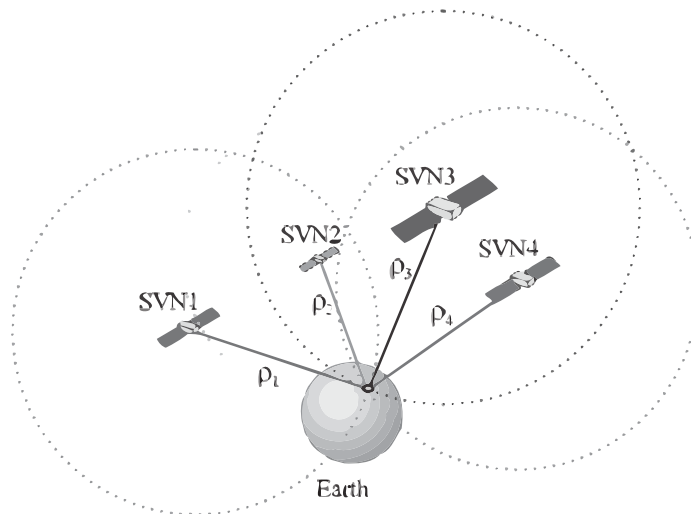
Durante el proceso de recepción de señales GNSS existen dos recursos que son determinantes para expresar la calidad y éxito del sistema, estos son la potencia y el espectro. Las comunicaciones por satélite a pesar de ofrecer toda una variedad de ventajas presentan limitaciones en ambos recursos. El ruido y la interferencias, sumados a la poca potencia de las señales recibidas, hacen que la calidad de la obtención del posicionamiento sea una tarea compleja que demande del constante desarrollo de nuevos algoritmos de procesamiento de las señales. Muchos de los errores que se presentan durante la recepción y transmisión de datos son generados por defectos en la sincronización de todo el sistema. La variación en la tasa de transmisión de datos, las desviaciones de la frecuencia central por el efecto Doppler, las interferencias ocasionadas por canales adyacentes y los efectos atmosféricos, un bajo factor geométrico (ángulo de vista), en condiciones de baja potencia o poca energía serían factores que negativamente afectarían una correcta recepción y posterior posicionamiento. Para las comunicaciones de satélite, específicamente las de posicionamiento GNSS, todas las herramientas y

técnicas al alcance de los diseñadores que permitan mejorar la calidad y las condiciones de la comunicación son esenciales y se recomienda no prescindir de ellas en lo posible. Por lo anterior, el desarrollo de algoritmos flexibles y con poco consumo de recursos de maquina, que permitan realizar un pos-procesamiento digital optimo de las señales GNSS para la corrección de errores y agregarle más inmunidad al ruido a estas, son de gran importancia.

### 3. Sistemas Globales de Navegación por satélite

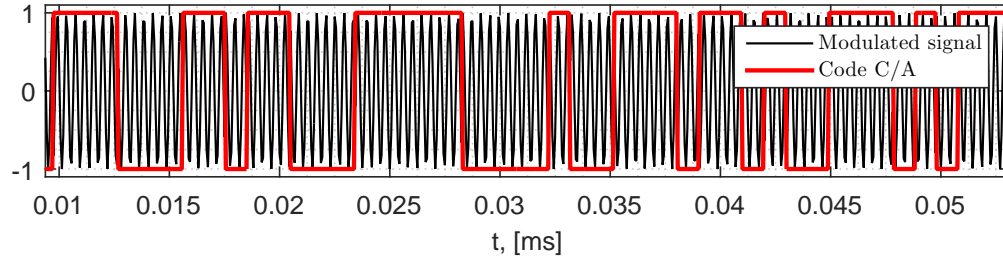
Los sistemas GNSS tienen una amplia gama de aplicaciones, quizás la mas común sea el determinar la posición de un objeto, también se utiliza para encontrar, predecir y modificar la trayectoria de objetos en movimiento, modificando los parámetros de control de estos, brindándoles mayor autonomía. Cabe destacar que la topografía y la geodesia últimamente utilizan los sistemas GNSS como fuentes de información relevante. La radionavegación por satélite abrió la posibilidad de utilizar satélites artificiales terrestres como puntos de referencia de radionavegación. Con ayuda de los satélites es posible determinar la posición, la velocidad y el tiempo preciso de vehículos aéreos, náuticos y otros tipos de usuarios con gran precisión en todo el globo terráqueo.

El observable básico para el calculo del vector de estados (las coordenadas espaciales, la corrección temporal de la escala de tiempos y el vector de velocidades) es la medición del tiempo propagación (pseudoretardo) de la señal de radio-navegación entre los satélites del sistema y el receptor usuario (ver figura 1). La distancia entre ellos (pseudodistancia) es el producto de la velocidad de propagación de la señal (velocidad de la luz) y el pseudoretardo. Este método se conoce como método telemétrico, y para la medición indirecta de las distancias mediante el calculo del pseudoretardo se hace necesaria la implementación de señales con propiedades particulares.



**Figura 1** – Principio básico de posicionamiento GNSS. Se pueden calcular la posición del usuario si se conoce la posición de cuatro satélites  $SV_i$  y el tiempo que viajan las señales las distancias  $\rho_i$ . Tomado de [1].

Para la evaluación de los parámetros de navegación con alta precisión es necesario que dentro de las característica de las señales de radio-navegación se incluya una alta inmunidad al ruido e interferencias, ya que la señal se propaga aproximadamente 20000 km, desde la órbita MEO donde se encuentran los satélites GNSS. Estas señales deben brindar una alta precisión de medida del tiempo de llegada (pseudodistancia) y corrimiento Doppler de la frecuencia. Además deberán contar con una probabilidad alta de correcta decodificación del mensaje de navegación.



**Figura 2** – Osciloscopia de la señal GNSS con modulación PSK.

### 3.1. Características de la señal de radionavegación

Con el fin de resolver la tarea de navegación basada en posicionamiento, velocidad y tiempo (PVT), así como la planificación de las sesiones de navegación y observación, es indispensable una correcta medición de los parámetros de radionavegación de la señal GNSS y la correcta decodificación del mensaje de navegación que porta esta última. Las señales de navegación deben presentar ciertas características y una estructura concreta, con miras de evaluar con precisión sus parámetros de radionavegación y poder ser multiplexadas y procesadas en el dispositivo receptor. En los GNSS se utilizan señales de espectro ensanchado, en las cuales para el ensanche del espectro (con el fin de garantizar los requisitos de exactitud en la medición de los parámetros de radionavegación) se utiliza la manipulación por desplazamiento de fase de la señal por los símbolos de una secuencia de código binario PRN (pseudo-random noise). En la salida del RF Front-end de un receptor GNSS se tiene una señal GNSS con fase aleatoria en un fondo de ruido blanco gaussiano aditivo (WAGN). La señal GNSS en la salida del RF Front-end se puede expresar mediante la siguiente forma [1](#),

$$y(t, \lambda) = \sqrt{2P} h_{NM}(t - t_{rec}) h_{PRN}(t - t_{rec}) \cos(2\pi(f_{IF} + f_d)t + \varphi_0) + \eta(t), \quad (1)$$

donde,  $\lambda = [t_{rec}, f_d, \varphi_0]$  – vector de parámetros de radionavegación de la señal;  
 $t_{rec}$  – tiempo de retardo;  
 $f_d$  – corrimiento Doppler de frecuencia;  
 $f_{IF}$  – frecuencia intermedia;  
 $P$  – potencia de la señal;  
 $h_{PRN}$  – función de código PRN;  
 $h_{NM}$  – función envolvente del mensaje de navegación;  
 $\varphi$  – fase inicial de la señal de radionavegación recibida;  
 $\eta(t)$  – AWGN con media cero.

La función de correlación del AWGN es del tipo

$$R_\eta(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau),$$

donde,  $\delta(\tau)$  – función delta-Dirac;  
 $\frac{N_0}{2}$  – densidad espectral de potencia bilateral del ruido.

En la figura 2 se puede apreciar el código que modula la portadora para una señal GNSS que utiliza como técnica de modulación la PSK (Modulación por llaveo de fase, *ing.* Phase Shift Keying). En la gráfica 3 en la página siguiente se puede observar su forma espectral calculada mediante la implementación de la transformada rápida de Fourier (FFT), donde es apreciable la frecuencia central correspondiente a la intermedia y un ancho de banda igual a dos veces el inverso de tiempo de duración de bit (1,23 MHz).

Las señales de radionavegación de espectro ensanchado presentan una función de correlación con picos principales estrechos, esta característica garantiza una alta resolución en las distancias. Ya que la decisión

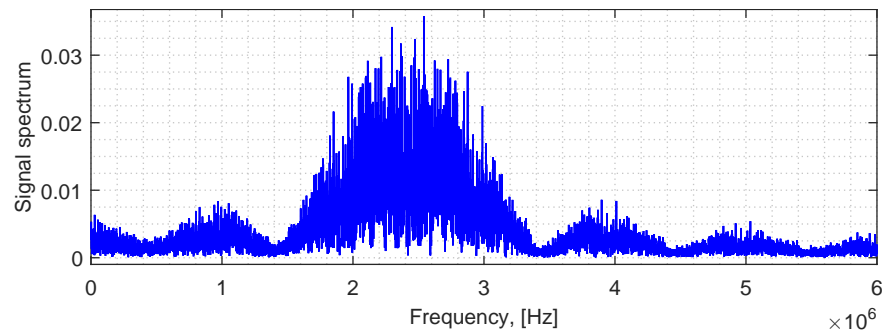


Figura 3 – Espectro de la señal GNSS con modulación PSK.

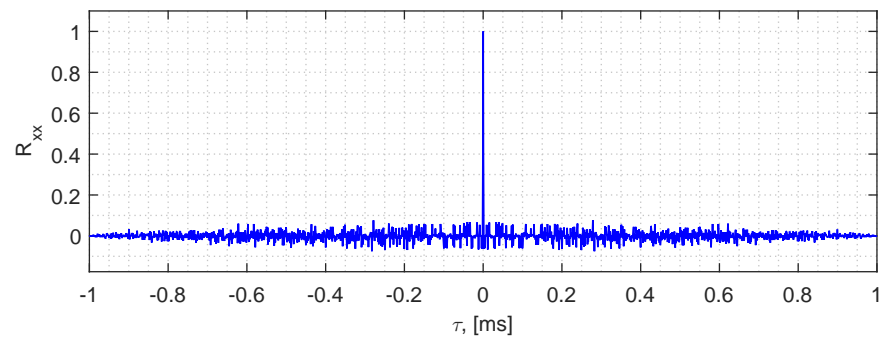


Figura 4 – Función de autocorrelación del código PRN Gold normalizada.

de método de la señal de navegación se lleva a cabo sobre la base del establecimiento del pico principal de la integral de correlación entre la señal recibida y una señal de referencia generada en el receptor de acuerdo a determinado criterio.

En la gráfica 4 se puede apreciar la función de autocorrelación del código Gold utilizado para el SV (Vehículo espacial, *ing.* Space vehicle) de PRN 2.

En la gráfica 5 se puede observar la misma función aumentada en su lugar de origen  $\tau = 0$ , en la cual se puede distinguir el pico de correlación máxima, su ancho que determina la precisión en la determinación del tiempo de retardo y su relación a los picos secundarios.

### 3.2. Adquisición

La resolución de la tarea de navegación basado en posicionamiento, velocidad y tiempo (PVT), el cálculo del vector de estado del receptor, comienza con la búsqueda de las señales de navegación de los distintos

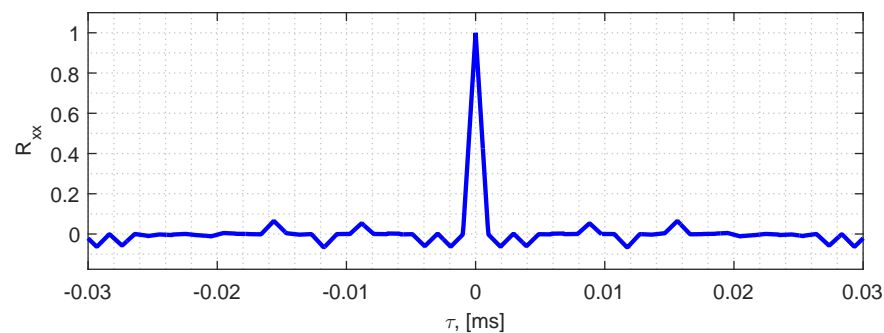


Figura 5 – Función de autocorrelación del código PRN Gold normalizada y aumentada.

satélites en un espacio de parámetros de radionavegación desconocidos  $\lambda = [t_{rec}, f_d]$ .

La principal tarea realizada durante la detección de una señal es la estimación del tiempo de retardo  $t_{rec}$  de la misma y el corrimiento Doppler de la frecuencia  $f_d$ . El estimado de la fase inicial y la amplitud misma de la señal se pueden desestimar, ya que estos parámetros no presentan ningún tipo de información durante la toma de decisión sobre la detección de la señal de radionavegación.

Tal cual como se había expresado, en el lazo de recepción del usuario, la señal de radionavegación recibida GNSS se define como una señal con fase aleatoria en un fondo de ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN).

Tradicionalmente el proceso de búsqueda y detección de la señal se realiza mediante procesos de correlación en el dispositivo receptor. Para ejecutar el procesamiento de correlación de la señal de radionavegación recibida en el trazo de recepción se puede utilizar un detector de fase (PD, *ing.* Phase detector), el cual y casi por regla se realiza bajo del principio de procesamiento de correlación en cuadratura de IQ, mediante la correlación de la señal recibida con una copia local compleja de referencia  $\dot{s}_{LO}(t, \tilde{\lambda})$ . La copia de la señal local compleja,  $\dot{s}_{LO}$ , formada localmente en el aparato receptor presenta la siguiente forma

$$\dot{s}_{LO}(t, \tilde{\lambda}) = h_{PRN}^X(t - \tilde{t}_{rec}) e^{i(2\pi(f_{IF} + \tilde{f}_d)t)}, \quad (2)$$

donde,  $h_{PRN}^X(t - \tilde{t}_{rec})$  – unción de amplitud modulada de referencia para un código de pseudo-distancia (*ing.* ranging code) de tipo  $X$ ;  
 $\tilde{\lambda} = [\tilde{t}_{rec}, \tilde{f}_d]$  – vector de estimaciones de los parámetros de radionavegación de la señal recibida;  
 $\tilde{t}_{rec}$  – estimación del retardo del código de pseudodistancia;  
 $\tilde{f}_d$  – estimación del corrimiento Doppler de la frecuencia portadora de la señal de radionavegación recibida.

En la practica la señal local de referencia puede no ser totalmente idéntica a la señal recibida. Por consiguiente, la expresión IQ en la salida del correlador de tipo cuadratura se puede definir bajo la forma de integral de correlación siguiente

$$\dot{z}(\lambda, \tilde{\lambda}) = \int_0^{T_N} y(t, \lambda) \dot{s}_{LO}(t, \tilde{\lambda}) dt, \quad (3)$$

donde,  $\dot{z}$  — Función estadística de decisión (resultado de correlación);  
 $T_N$  — intervalo de acumulación (integración) de la señal de radionavegación, el cual a su vez generalmente es igual a la duración de un periodo del código de pseudodistancia.

El método de detección esta basado en la realización de la correlación de la señal de entrada de radionavegación con la serie del código de interés. Este procedimiento es posible gracias a las propiedades de ortogonalidad entre los códigos de los distintos satélites.

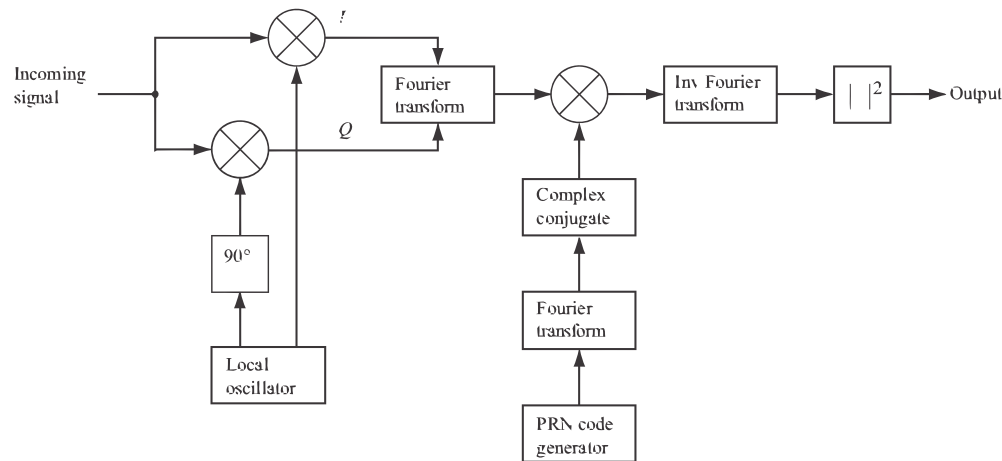
En la gráfica 6 en la página siguiente se muestra el diagrama estructural del método de detección implementando la transformada rápida de Fourier.

A continuación se presenta el resultado del cálculo dela estadística de decisión *dotz* con el registro real de una realización de la señal GPS (ver gráfica 7 en la página 7).

En el gráfica 7 en la página 7 el máximo de la función estadística de decisión se puede identificar fácilmente a simple vista, también se puede observar que los lóbulos laterales, cuyos valores dependen en gran medida del nivel de ruido [1].

### 3.3. Seguimiento de parámetros de Navegación, Tracking

El seguimiento a la señal recibida es una de las principales operaciones que se llevan a cabo en cualquier receptor de radionavegación para la solución de la tarea PVT. Debido al constante movimiento del disposi-



**Figura 6** – Diagrama estructural del esquema de búsqueda utilizando el método de detección de la transformada rápida de Fourier (FFT). Tomado de [1].

tivo receptor y los satélites, el retardo y corrimiento Doppler de frecuencia cambian constantemente. Como resultado, el problema de formar estimaciones precisas de los parámetros de radionavegación de la señal, y en consecuencia del vector del estado del receptor del usuario, se resuelve con la ayuda de métodos basados en la teoría de filtrado óptimo de procesos estocásticos.

De la calidad de la realización del proceso de seguimiento de los parámetros de navegación depende directamente la precisión de la medición de las coordenadas. El objetivo principal del sistema de seguimiento es el llevar al error entre la señal recibida y la local de referencia a cero. Durante este proceso se obtiene información más precisa acerca de los parámetros de radionavegación de la señal. Se realizan los filtros PLL (doppler frequency tracking) y DLL (Code Tracking) mediante la implementación de discriminadores.

### 3.4. Cálculo de coordenadas

La principal tarea PVT consiste en el cálculo del vector de estado del receptor, en otras palabras la obtención de la ubicación del receptor (sus coordenadas). Existen una serie de métodos para la solución de esta tarea, entre los métodos más utilizados se encuentra el método de las pseudodistancias. El cálculo del vector de estados en el receptor se basa en la medida de las distancias del receptor a cada uno de los satélites visibles (no menos de 4), para después calcular sus coordenadas.

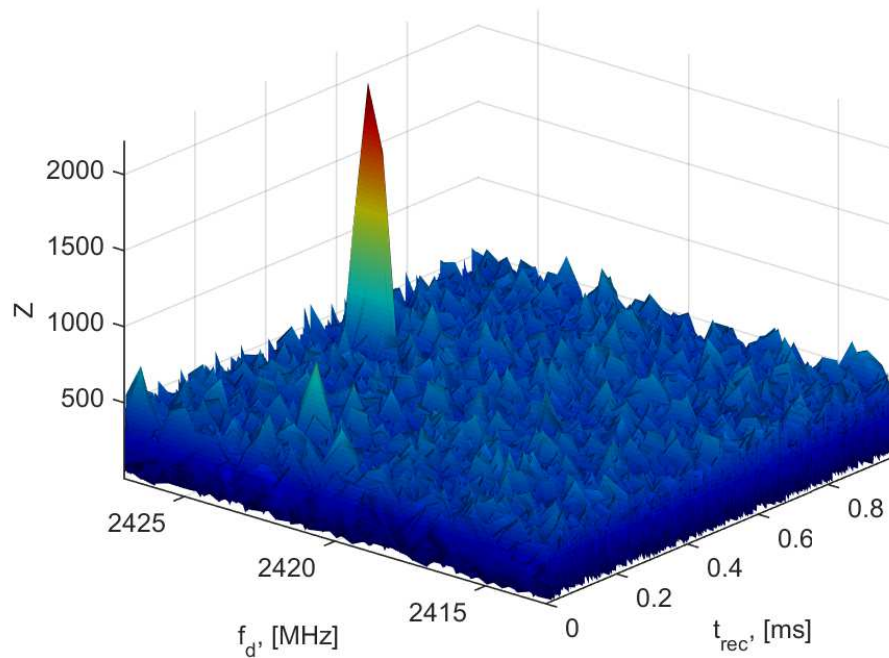
## 4. RINEX: GLONASS

**Código de proyecto:** *GNSSNumeroEntrega*. Ej. **PC01** — primera entrega.

**Objetivo:** Desarrollar un *algoritmo* que determine la **solución de navegación y tiempo (cálculo de posición)** del sistema **GNSS GLONASS**, mediante la implementación de archivos **RINEX** como datos de origen.

### 4.1. Descripción del proyecto

Como resultado final del *proyecto de investigación en el aula* será desarrollado un *algoritmo* en *Matlab* que realice cálculos de coordenadas mediante la utilización de archivos **RINEX** como datos de entrada. El algoritmo de *Matlab* debe ser capaz de extraer toda la información de *observables* y *mensaje de navegación* disponible en el archivo **RINEX 3.0**. Este algoritmo debe ser genérico y a prueba de errores, ya que es necesario que pueda abrir y extraer la información de cualquier otro tipo de archivo **RINEX 3.0** y realizar el cálculo de coordenadas. Se deberá presentar un informe completo de acuerdo al formato de trabajos L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X,



**Figura 7** – Estadística de decisión del registro real de una realización de la señal GPS L1 mediante la implementación del método de detección FFT en presencia del satélite PRN 4.

adjuntando a su vez los códigos utilizados para su desarrollo, tanto *.tex*, como los *scripts* de *Matlab*. El código debe ser genérico y con comentarios, y se deben adjuntar los archivos **RINEX** utilizados.

## 4.2. Contenido de la primera entrega del proyecto

**Código:** PC01.

Para la primera entrega del informe del *proyecto de investigación en el aula*, para una completa fase de investigación, es necesario que en el trabajo se encuentren expuestos las siguientes temáticas:

- Sistema GNSS.
- Señales utilizadas en los sistemas GNSS. Señales utilizadas en el GNSS GLONASS.
- Proceso de adquisición de señales (*GNSS Acquisition*).
- Seguimiento de parámetros de señales (*GNSS tracking*). Observables del *tracking*.
- Procesamiento secundario: cálculo de coordenadas GNSS.
  - Tiempo **GPS** y **GLONASS**.
  - Sistemas de coordenadas GNSS: **GPS** y **GLONASS**. Modelo de la tierra.
- Formato **RINEX** Descripción general y evolución.
  - Filosofía del formato.
  - Tipos y versiones de formatos **RINEX**.
  - **RINEX 3.0**.
  - Fuentes de archivos **RINEX** en Colombia.
  - Descripción de un conjunto particular de observables GNSS en el formato **RINEX 3.0**.
- **The Easy Suite** : ¿Qué es el Easy Suite y cómo utiliza los archivos RINEX en Matlab?
- Conclusiones.

- Apéndices.
- Fuentes bibliográficas especializadas.

**Entregable** Documento informe con los temas propuestos. Máximo 4-5 páginas.

### 4.3. Contenido de la segunda entrega del proyecto

**Código:** PC02.

Para la segunda entrega del informe del *proyecto de investigación en el aula*, para una completa fase de investigación, es necesario que en el trabajo se encuentren expuestos las siguientes temáticas:

- Acumulado de trabajos hasta el momento. Con sus respectivas correcciones.
- Cálculo de coordenadas de los satélites GNSS.
  - Algoritmo para calcular las coordenadas de los satélites del **GNSS GPS**.
  - Algoritmo para calcular las coordenadas de los satélites del **GNSS GLONASS**.
- Algoritmo *script* de *Python* que extraiga y guarde en variables (utilice tipo estructura) la información de los archivos observables y de navegación **RINEX 3.0** de los **GNSS GPS** y **GLONASS**. Abrir y extraer información de archivos **RINEX** en *Python*. Gráficas de parámetros observables.
- Conclusiones.
- Apéndices.
- Fuentes bibliográficas especializadas.

**Entregable** Documento informe con los temas propuestos. Algoritmo *script* de *Matlab* que calcule la posición implementando archivos **RINEX 3.0** del **GNSS GPS**.

### 4.4. Contenido de la tercera entrega del proyecto

**Código:** PC03.

Para la tercera entrega del informe del *proyecto de investigación en el aula*, para una completa fase de investigación, es necesario que en el trabajo se encuentren expuestos las siguientes temáticas:

- Acumulado de trabajos hasta el momento. Con sus respectivas correcciones.
- Implementar un algoritmo que extraiga y calcule la posición de los satélites para el sistema **GNSS GPS** de acuerdo a los observables y al mensaje de navegación, con archivos **RINEX 3.0** como fuente de datos en *Python*.
- Implementar un algoritmo que extraiga y calcule la posición de los satélites para el sistema **GNSS GPS** de acuerdo a los observables y al mensaje de navegación, con archivos **GLONASS** como fuente de datos en *Python*.
- Conclusiones.
- Apéndices.
- Fuentes bibliográficas especializadas.
- Diapositivas L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X(bonus).
- Póster L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X(bonus).

### 4.5. Producto final

Documento informe con los temas propuestos. Algoritmo capaz de extraer información de un archivo **RINEX 3.0** para los sistemas **GNSS GPS** y **GLONASS**. El algoritmo debe generar gráficas con los observables del proceso de *tracking* de las señales, debe calcular la posición de los satélites de acuerdo al mensaje de navegación, y realizar gráficas de la constelación de satélites visibles. Extraer en variables de Matlab tipo **estructura** toda la información posible del archivo **RINEX**. Se debe realizar una exposición con diapositivas, realizar un resumen de dos hojas y presentar un póster.



## 5. Evaluación de proyectos

La presente actividad se realiza con el objetivo de fortalecer las competencias académicas de los estudiantes del programa de ingeniería electrónica de la **Universidad Sergio Arboleda**, mediante distintas propuestas de actividades de investigación, las cuales a su vez son problemas actuales de la ingeniería. Esta actividad de investigación será **evaluada** con la **calidad** que se habría de esperar de un estudiante de **ingeniería de semestres avanzados**. Es un proyecto de carácter investigativo, el cual estará dividido en tres fases. Cada fase se calificará de 0.00 a 5.00. Las preguntas y temáticas planteadas en las distintas etapas del proyecto de aula deben ser presentadas sin excepción en el **formato de tareas propuesto** para este curso<sup>1</sup>.

Los trabajos que se envíen por la web, pero no se entreguen en físico (o viceversa) se tomarán como no entregado. No se aceptará el Proyecto de investigación fuera de la fecha estipulada (a menos que la demora sea resultado de una ausencia justificada oficialmente) sin excepción.

El proyecto con mayor calificación será exonerado del examen final. Si el proyecto llegara a obtener el primer puesto en la feria de proyectos, la calificación total de corte será de 5.0.

Durante la evaluación, se tendrá un alto grado de atención a la calidad de los recursos y fuentes bibliográficas utilizadas, las cuales deben ser indexadas y de calidad garantizada (DOI, ISBN, etc.). No se acepta bibliografía de otro tipo, en especial páginas de Internet de origen dudoso. Incluso en el caso de utilizar una fuente con licencia de dominio público o Copyleft, (Ver: <http://creativecommons.org/>), el estudiante debe proporcionar la atribución de ese trabajo con el fin de mantener las políticas de autoría y modelos de contratos de licenciamiento. El estudiante debe establecer claramente la autoría de su trabajo. Plagio y trampa durante algún tipo de evaluación se reflejará en una anulación automática de esta y su respectivo reporte ante la dirección de programa para los respectivos correctivos, consulte el *Reglamento Estudiantil*.

Las rubricas de evaluación serán presentadas más adelante. **Nota:** Si existen problemas para conseguir un artículo, libro o capítulo de libro, por favor comunicarlo al docente. En adjuntos deben estar todos los *datasheet*, los códigos en lenguaje de programación, imágenes de alta calidad, etc.

## Referencias

- [1] Kai Borre, Dennis M Akos, Nicolaj Bertelsen, Peter Rinder, and Søren Holdt Jensen. *A software-defined GPS and Galileo receiver: a single-frequency approach*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [2] John G Proakis. *Digital signal processing: principles, algorithms, and application-3/E*. 1996.
- [3] Paulo SR Diniz, Eduardo AB Da Silva, and Sergio L Netto. *Digital signal processing: system analysis and design*. Cambridge University Press, 2010.
- [4] Ralph D Hippenstiel. *Detection theory: applications and digital signal processing*. CRC Press, 2010.
- [5] Dimitris G Manolakis, Vinay K Ingle, and Stephen M Kogon. *Statistical and adaptive signal processing: spectral estimation, signal modeling, adaptive filtering, and array processing*, volume 46. Artech House Norwood, 2005.
- [6] Alan V Oppenheim, Ronald W Schafer, John R Buck, and Javier Portillo García. *Tratamiento de señales en tiempo discreto*, volume 2. Prentice Hall México, 2000.

---

<sup>1</sup>Trabajo que no cumpla el formato no se calificará.