

# Introducción

En este primer capítulo se detallan los antecedentes y necesidades que han dado lugar a la elaboración de este *Trabajo Fin de Máster* (TFM). Además, se exponen los objetivos principales planteados previamente a la realización de este TFM, junto con la estructura del documento dividida por capítulos correspondiente a la memoria.

## Antecedentes

La Industria aeroespacial y en concreto el mercado de los sistemas de navegación se encuentra en constante crecimiento con una tendencia estimada que apunta a una tasa de crecimiento anual compuesto del 9,84% [1]. No solo a nivel mundial, la *Agencia Espacial Europea* (ESA) lidera proyectos con financiaciones millonarias impulsando el sector espacial y el mercado de los sistemas globales de navegación por satélite o también conocido como *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Dentro de sus múltiples actividades, la ESA involucra el 16,5% de su presupuesto en este tipo de proyectos, convirtiéndose la navegación en el tercer sector con más presupuesto por detrás de las actividades relacionadas con la observación de la Tierra y el transporte espacial [2].

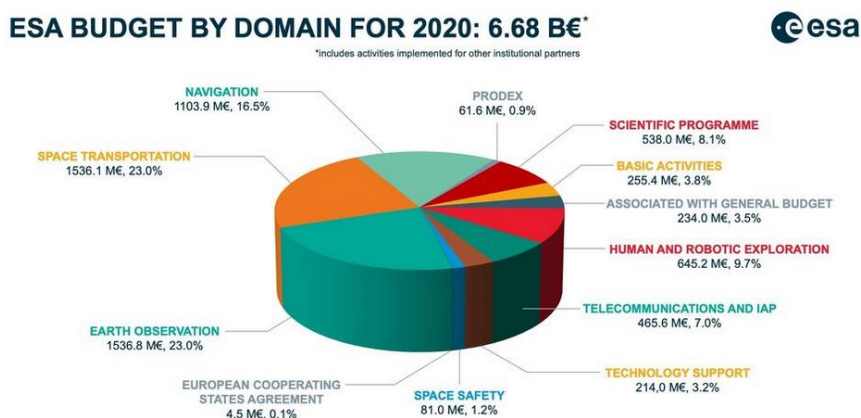


Figura 0.1. Presupuesto de la ESA por campos

En la Figura 2.1 [2] se muestra la diversificación del presupuesto invertido por la ESA en los diferentes ámbitos y actividades que lideran.

Acercando aún más el mercado, la Industria espacial española está en auge, representando el 5,4% del *Producto Interior Bruto* (PIB) industrial nacional. España se posiciona como el cuarto país en facturación dentro de la *Unión Europea* (UE), con un fuerte enfoque en telecomunicaciones, navegación y observación de la Tierra. Empresas como GMV lideran proyectos a nivel global. El surgimiento del *New Space* trae oportunidades, con empresas emergentes como *Pangea Aerospace* y *Sateliot*. La creación de la Agencia Espacial Española promete una mayor coordinación y desarrollo de programas espaciales, con proyectos ambiciosos como *Caramuel* para comunicaciones cuánticas [3].

En general, los mercados *Earth Observation* (EO), y GNSS tienen un valor actual de 263.400,00 M€. En la segunda edición del EO and GNSS Market Report se la agencia de la UE concluye, para el programa espacial *European Union Agency for the Space Programme* (EUSPA), que dicho valor se duplicaría en los siguientes 10 años [4]. Además, en dicho reporte se comentan la importancia de GNSS para diversos segmentos del Mercado como puedan ser: aviación, espacio, drones, clima, medio ambiente, biodiversidad, turismo, salud, gestión de emergencias, ayuda humanitaria, energía, materias primas, agricultura, pesca, navegación marítima, ferrocarril, carretera y automoción...

Dependiendo de la aplicación y sobre todo en aplicaciones críticas debido al riesgo de vidas humanas como el caso de la aviación, se declaran unos requisitos mínimos en cuanto a precisión, integridad, disponibilidad y continuidad. Para este tipo de servicio GNSS no cumple con los requisitos necesarios y se hace uso de sistemas complementarios e interoperables como *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS) que es un sistema *Satellite Based Augmentation System* (SBAS) europeo que consigue mejorar el rendimiento de sistemas GNSS mediante información aumentada [5]. En el caso de *EGNOS V2*, desarrollado por *Thales Alenia Space*, se basa en receptores mono frecuencia utilizando solo la señal L1 de la constelación *Global Positioning System* (GPS). Actualmente Airbus se encuentra desarrollando *EGNOS V3*. Entre sus objetivos se encuentran mantener o mejorar la calidad de servicio respecto a *EGNOS V2* para los receptores mono frecuencia y crear un servicio para usuarios multi constelación (GPS, Galileo) y multi frecuencia [6]. Esto permite la mejora, entre otros parámetros, de la precisión en la posición y reloj del usuario. Futuras implementaciones

como pudiera ser el caso de coches autónomos requieren aún más precisión, llegando a un nivel de cm o mm de diferencia con la posición real del usuario. Para ello, la técnica *Precise Point Positioning* (PPP) es un protagonista clave [7]. Incluso empresas punteras en el sector como GMV, están interesadas en el Mercado de la automoción haciendo uso de la navegación por satélite. Entre sus propuestas de soluciones avanzadas para vehículos autónomos conectados también hacen referencia al uso de técnicas de posicionamiento preciso como PPP [8].

## El problema del posicionamiento por satélite

En la tecnología GNSS, para poder realizar el posicionamiento influyen innumerables factores. El entorno, principalmente, se engloba en 3 segmentos: espacial, terrestre y usuarios.

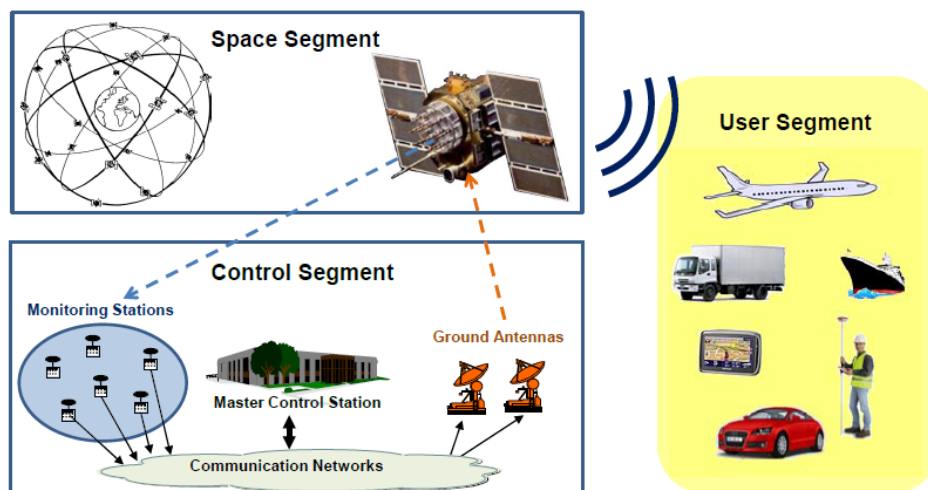


Figura 0.2. Arquitectura GNSS

La Figura 0.2 [9] muestra la arquitectura general de GNSS con sus 3 segmentos. El segmento espacial consta de una constelación de satélites GNSS en órbita alrededor de la Tierra. Estos satélites son los encargados de transmitir señales con la información necesaria para que los usuarios puedan determinar su posición. El segmento terrestre incluye estaciones de control y monitoreo alrededor de la Tierra que gestionan y supervisan los satélites GNSS [9]. Las actividades clave de este segmento son:

- **Monitoreo y control:** supervisar continuamente los satélites GNSS y corregir sus órbitas y relojes a través de comandos desde estaciones terrestres.

- *Procesamiento de datos*: analizar los datos recibidos de los satélites y de estaciones de referencia para mejorar la precisión de las señales.
- *Correcciones y actualizaciones*: enviar correcciones y actualizaciones a los satélites para asegurar la precisión e integridad de las señales GNSS.

El segmento de usuarios abarca todos los receptores y aplicaciones que utilizan las señales GNSS para determinar la posición, velocidad y tiempo. El elemento más importante del segmento de usuarios es el receptor GNSS.

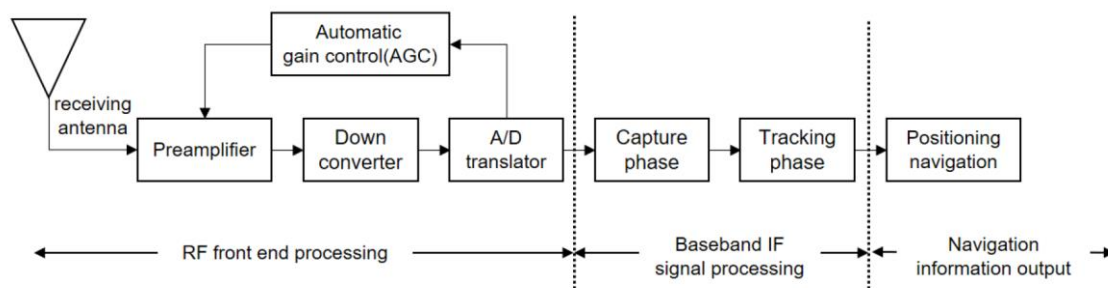


Figura 0.3. Flujo de trabajo de un receptor GNSS típico

La Figura 0.3 [10] muestra el flujo de trabajo de un receptor GNSS por bloques. En receptores GNSS se distinguen 3 bloques principales. En primer lugar, el *front end* encargado de la recepción de las señales RF transmitidas por los satélites GNSS, su filtrado, amplificación y digitalización. En segundo lugar, el *measurement engine*, encargado de la adquisición e identificación de las señales de cada satélite y las primeras estimaciones de las medidas GNSS y el *tracking* o seguimiento/actualización de las medidas a lo largo del tiempo. En tercer y último lugar, el *positioning engine* o motor de posicionamiento, encargado de utilizar la información de las medidas obtenidas posteriormente para determinar la posición [10]. En este contexto, dentro de una tecnología con una infraestructura gigantesca e innumerables aspectos físicos, matemáticos, *hardware* y *software*, el posicionamiento de un usuario viene a estar determinado por el motor de posicionamiento dentro del receptor.

El post procesamiento en GNSS con correcciones PPP es un componente crucial en la precisión del posicionamiento [11]. A diferencia de las técnicas en tiempo real, el post procesamiento permite una mayor precisión al tener en cuenta una variedad de factores y correcciones que pueden no estar disponibles o ser lo suficientemente precisos en tiempo real [11]. Además, el post procesamiento permite analizar el rendimiento de las

herramientas en entornos específicos, lo que puede ser útil para tareas de optimización y mejora. El post procesamiento es útil en aplicaciones geodésicas y topográficas, donde se requiere de una alta precisión y no necesariamente se necesita un resultado en tiempo real.

En el Mercado existen diferentes soluciones cómo *MagicPPP* de GMV, el cuál proporciona una solución web de posicionamiento preciso basado en GNSS con correcciones PPP en post procesado [12]. Otra alternativa similar es ofrecida por *GNSS Analysis and Positioning Software* (GAPS) [13].

Estas aplicaciones tienen un papel cada vez más importantes en aplicaciones de diferentes mercados como la agricultura, aviación, drones, marítimas, pesca, turísticas, servicios climáticos o ferroviario [14].

## Conclusiones y posibles ampliaciones

En este capítulo se expondrán las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo del presente TFM y sus posibles continuaciones o ampliaciones.

### Conclusiones

Una vez finalizado el TFM denominado “Diseño y verificación de un motor de posicionamiento *software* para receptores GNSS multifrecuencia con algoritmo de precisión PPP”, se comprueba que se han cumplido los objetivos prefijados en el anteproyecto. El objetivo principal de este TFM consiste en el diseño y desarrollo de un motor de posicionamiento *software* con correcciones PPP, reduciendo así las diferentes fuentes de error proyectadas en el cálculo de la posición, mejorando el posicionamiento al nivel de cm y reduciendo enormemente el error de posición respecto a soluciones básicas SPP.

En cuanto al estudio de la tecnología GNSS, se utilizaron diversas referencias *online* y bibliográficas. De esta manera, se partió de un concepto simple como el posicionamiento a partir de la triangulación de objetos de referencia (satélites) y se desembocó en una arquitectura compleja llena de pequeños detalles y parámetros a

tener en cuenta y que afectan en la solución final. Además, de considerar la gran implicación de los diferentes modelos matemáticos, estadísticos y conceptos complejos como el filtro de Kalman. En cuanto a las correcciones PPP, se ha reflejado la necesidad de obtener datos precisos, ofrecidos por terceros, de las diferentes fuentes de error como la posición y reloj de los satélites en post procesamiento o la aplicación de técnicas como la combinación lineal de frecuencias *iono-free* para reducir el error en el posicionamiento.

La implementación de la teoría en el desarrollo *software* conllevó el uso de diferentes herramientas y bibliotecas de *software* para alcanzar el objetivo final. El motor de posicionamiento desarrollado, PEPPUS, logra con éxito calcular una solución PPP para receptores *dual-frequency* tras varios procesos donde se: Preprocesan todas las medidas en crudo recibidas por los receptores, Corrigen las medidas preprocesadas con archivos de correcciones precisas, Calcula una solución PVT a través de un filtro de Kalman para separar de forma precisa las ambigüedades de las fases, el *delay* instrumental la componente *Wet* del *delay* troposférico de la posición y reloj del receptor.

Se comprueba la calidad y rendimiento de la herramienta desarrollada mediante la comparación estadística con la posición exacta de referencia para varios receptores desplegados por Europa donde se demuestra que, la solución PPP alcanza los valores esperados en el error de posición manteniendo una precisión aproximada de 25 cm después de un tiempo de convergencia aproximado de 30 m. Además, se han realizado diferentes comprobaciones estadísticas a lo largo de todo el día de prueba como el RMS y el uso de percentiles del 95% para comprobar la validez y el correcto funcionamiento del sistema.

Finalmente, se puede concluir que la herramienta desarrollada cumple con todos los requisitos de sistema impuestos en el diseño del sistema y con los objetivos expuestos en el anteproyecto del presente TFM. La herramienta PEPPUS puede ser usada para calcular una solución PPP para receptores estáticos en post procesamiento y analizar el rendimiento durante el periodo de tiempo deseado, por lo que será posible utilizarla para comparar el desempeño de una misma estación en diferentes momentos en el tiempo o comparar el rendimiento de varios receptores situados en localizaciones diferentes en el mismo instante de tiempo.

## Posibles ampliaciones

En relación con las posibles ampliaciones que se proponen para futuros Trabajos Fin de Grado (TFG) o TFM tras el desarrollo del presente TFM, se consideran varias.

Implementar verificaciones adicionales en el módulo de preprocesamiento para mejorar la integridad de la detección de los posibles *cycle slips*. Actualmente sólo se comprueba si una de las señales se ve afectada por este evento mediante la combinación *geometry-free* de las fases, sin embargo, es posible que ocurra un *cycle slip* para cada una de las señales en el mismo instante de tiempo y el algoritmo actual no lo detectaría. Otra posibilidad es la optimización del algoritmo de detección debido a que como se comprobó en este TFM, el algoritmo no detecta los *cycle slips* que ocurren en el periodo entre la detección de un *cycle slip* previo y la construcción del polinomio de 7 épocas.

Implementar más modelos de corrección. Debido a las señales que se utilizan y la combinación de medidas *iono-free*, los *offset* de los relojes son C1P2. Sin embargo, los productos precisos que proporciona la IGS usan las frecuencias P1P2. Por lo que persiste un DCB de las frecuencias P1C1. Se podrían utilizar archivos DCB adicionales que se pueden obtener mediante terceros como producto preciso en post procesamiento para mejorar la precisión de la herramienta. Por otro lado, en vez de aplicar el modelo UNB3m descrito en el estándar MOPS, el cual tiene una función de mapeo para ambas componentes del *delay* troposférico (*Dry* y *Wet*), se podría aplicar otros modelos, como el *Saastamoinen Tropospheric*, que detallan diferentes funciones de mapeo para cada componente y su correcto modelado [58]. Además de implementar los diferentes modelos no aplicados descritos en el apartado de la Tabla [].

Otra posible ampliación sería el ajuste del algoritmo y filtro de Kalman para el posicionamiento de receptores dinámicos en post procesamiento en vez de únicamente funcionar con receptores estáticos.

Por último, otra propuesta interesante sería la reestructuración de la arquitectura del sistema para ofrecer una solución PPP en tiempo real con correcciones precisas obtenidas en la nube o enlace por satélite a través de servicios de terceros cómo podría ser *HEXAGON* [59]. Esta última propuesta requeriría de al menos un receptor físico disponible para las pruebas de campo.