

Despliegue y aplicabilidad de una constelación de nanosatélites

Autor: Riesgo Juan, Luis José

Director/es: Núñez Ortuño, José María

Contacto: ljta1@hotmail.com

Resumen:

En los últimos años, el sector aeroespacial ha experimentado una importante evolución tecnológica, que se ve materializada con la puesta en órbita de satélites de mucho menor tamaño (nanosatélites), funcionando bien de manera individual, o conformando una constelación entre varios de este tipo de satélites. El coste de estas innovadoras soluciones es mucho menor (de un orden de magnitud de varias decenas o centenas de veces inferior respecto a un satélite convencional), lo que facilita la financiación de un mayor número de iniciativas tanto de empresas privadas como públicas (como los proyectos que dispone la empresa Marine Instruments o con los satélites Lume-1 desarrollados por la Universidad de Vigo, entre otros) e incluso se llevan a cabo hasta iniciativas de particulares.

El objetivo de este trabajo fin de Máster es presentar la composición de un nanosatélite bajo el estándar de diseño normalizado que se denomina Cubesat. También se expone información de distintas aplicaciones que se consiguen cuando se ponen en órbita diferentes nanosatélites conformando una nanoconstelación. Finalmente se presenta un caso de uso que se basa en un estudio sobre la viabilidad para la realización del despliegue de una constelación de nanosatélites enfocado en monitorizar cualquier punto de interés de nuestro planeta Tierra. Se analizarán todos los aspectos que se desarrollan en la fase inicial (fase 0) de una misión, tanto desde un aspecto técnico en el diseño del propio nanosatélite, como en aspectos que suponen la gestión e implementación del proyecto (planificación temporal, costes del proyecto,...). Para llevar a cabo este estudio se ha utilizado una de las herramientas comerciales más avanzadas para el diseño y simulación de la constelación junto a las estaciones terrestres y puntos de interés con los que se han hecho sus análisis.

Palabras clave: nanosatélite, cubesat, constelación, teledetección, STK

1. Introducción

En los últimos años el sector aeroespacial ha experimentado una destacable evolución tecnológica. Este hecho se ve reflejado en la puesta de cada vez un mayor número de satélites de menor tamaño y con un mayor número de funcionalidades que los que se disponían con los primeros satélites de la era espacial. Así mismo, el coste de estas innovadoras soluciones es mucho menor que en sus orígenes, lo que propicia un amplio desarrollo por parte de los principales países desarrollados del mundo, donde España también está llevando a cabo una labor destacable en este sector.

En los últimos veinte años han aparecido un mayor uso de los satélites de menor tamaño estandarizados bajo el concepto de los “*Cubesats*” [1], y que se denominan **nanosatélites** [2]. Este tipo de satélites se puede poner en órbita bien de manera individual o conformando una **constelación** de nanosatélites. Estas constelaciones además de ofrecer redundancia y robustez constituyen un sistema flexible para el que los conceptos de obsolescencia o vida útil ya no constituyen una limitación. Por su propia naturaleza, los nanosatélites de una constelación se van renovando periódicamente por lo que el sistema y todos sus componentes se encuentran totalmente actualizados, permitiendo ofrecer el mejor servicio tecnológicamente posible.

Este TFM presenta la composición de los diferentes subsistemas un nanosatélite según la definición que marca la normalización ideada del desarrollo de un Cubesat. El componente principal que determina las funcionalidades de una misión lo constituye su payload o carga útil, que llevan instalados los nanosatélites. Este subsistema, junto con el despliegue en órbita de otros satélites conformando una constelación, es lo que determina una gran variedad de aplicaciones en distintos sectores industriales, y que han sido revisados para cada uno de estos ámbitos en el presente trabajo. En la parte final de este trabajo, se presenta una propuesta de anteproyecto en uno de estos ámbitos de aplicación, demostrándose su viabilidad de realización y exponiéndose los beneficios que se pueden obtener con este tipo de soluciones aeroespaciales.

2. Desarrollo

Tras realizar un amplio análisis del estado del arte que permite observar la evolución de la era espacial en su corta pero intensa trayectoria, así como observar la tipología de satélites en sus diferentes tipos de órbitas, se introduce en detalle en presentar la composición detallada de un nanosatélite genérico bajo la concepción normalizada siguiendo el concepto definido para los Cubesats.

Asimismo, se presenta la interrelación e interfaces de un nanosatélite con las partes que constituyen en la arquitectura de un sistema espacial bien de manera sencilla en una misión con una única nave o misiones constituidas por varias aeronaves conformando una constelación. En este

último escenario, se ha realizado un análisis completo de distintos usos y aplicaciones que actualmente se están llevando a cabo.

Se han abordado también algunas consideraciones necesarias para poder llevar a cabo la realización de una misión, y se finaliza este trabajo con la presentación una propuesta de una constelación de nanosatélites para poder llevar a cabo la observación óptica la de Tierra.

2.1 Composición de un Cubesat

Los principales subsistemas que definen un Cubesat son los siguientes [3]:

- **Payload o carga útil**, componente que realiza las principales funciones de la misión particular establecida.
- **Plataforma**, equipamiento encargado de soportar la carga útil de la misión y que su vez está compuesto por los siguientes módulos o componentes:
 - Módulo de control de la altitud y órbita - *Attitude and Determination Control Subsystem* (ADCS) o *Attitude and Orbital Control Subsystem* (AOCS)
 - Propulsion (PROP)
 - Mecanismos y estructura (MEC)
 - Subsistema de control térmico (TH)
 - Subsistema de energía eléctrica o *Electrical Power Systems* (EPS)
 - Comunicaciones: Telemetría, Seguimiento y Comunicaciones (TTC)

2.2 Arquitectura de una misión espacial

A alto nivel, una misión espacial consta de los siguientes tres segmentos interrelacionados entre sí [4]:

- **Segmento de tierra**, proporciona el enlace con los satélites. Por un lado recibe la información de **telemetría**, los datos científicos de la misión generados en el payload. Por otra parte, envía los **telecomandos** para ejecutar operaciones de la plataforma y de la misión el payload.
- **Segmento espacial**: genera los planes de operación, controla la nave espacial de acuerdo con los planes de operación y obtención de los datos solicitados por el usuario.
- **Segmento de usuario**: recibe las solicitudes de los usuarios y les distribuye los datos científicos del payload.

Para comunicarse con los nanosatélites generalmente operan en distintas bandas de frecuencias, que se presentan, si las bandas VHF, UHF, L o banda S, las más extendidas en su uso.

Es muy importante la interrelación y visibilidad que deban tener los satélites con la estación terrestre, que en algunos casos corresponde con más de una estación terrestre, bajo el concepto de “**Red de Estaciones Terrestres Distribuidas**” (DGSN).

Dependiendo la misión, también los propios nanosatélites tiene la opción de poderse tener comunicación entre ellos (comunicaciones intersatelitales – ISL-).

2.3 Aplicabilidades de las constelaciones de satélites

La funcionalidad básica de la misión de una constelación viene determinada principalmente por la carga útil que lleven instalados las aeronaves o el tipo de plano orbital en el que transitan. Se han podido ver las grandes ventajas y versatilidad que propician para los nanosatélites transitar en órbitas de tipo LEO, y dentro de estas en un tipo de órbitas específicas que son las de tipo SSO [5].

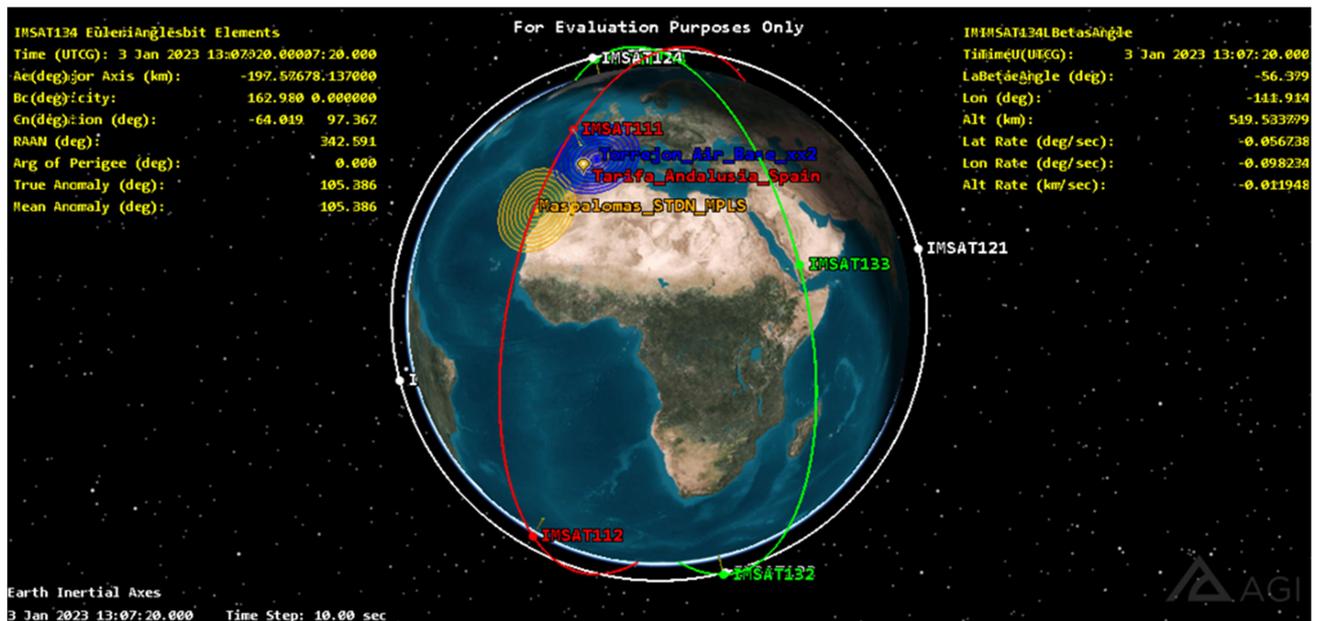
De manera agrupada las principales aplicaciones que una constelación de satélites puede disponer son las siguientes:

- Observación de la Tierra: de gran versatilidad y variedad de usos en misiones que permiten por ejemplo realizar labores de **teledetección** y así, analizar el medioambiente y habitad de la Tierra [6]. Otros ámbitos de relevante utilidad es para defensa ó análisis de intereses estratégicos de una nación.
- IoT o M2M, permitiendo una gran conectividad mundial con Internet (**IoT**), y a través de una red de nanosatélites interconectados en órbita [7] [8], se puede llevar a cabo comunicaciones en zonas sin cobertura terrestre u oceánica, donde adicionalmente, se están desplegando una gran de cantidad de objetos con sensores que transmiten información a través de la cada vez mayores y más evolucionadas redes de comunicaciones y servidores. Las rápidas conexiones y servicios permiten conectar distintas máquinas (**M2M**) u objetos de manera más eficiente.
- Geolocalizaciones y logística, se puede llevar a cabo la **gestión de flotas** de vehículos, aviones o barcos, entre otros, desde el espacio, incluso en zonas sin cobertura terrestre, y tener una visión global de manera prácticamente instantánea [9] [10] [11].
- Usos **científicos**, realización de pruebas e investigaciones de diversa índole.
- Usos militares [12], ampliando el espectro de comunicaciones militares surgen nuevos conceptos como, **IoMT** (*Internet of Military Things*) que incluye sensores, dispositivos portátiles, municiones, armas inteligentes, **IoBT** (*Internet of Military Things*), o **combat cloud**, entre otros.

2.4 Constelación IMSAT

Se presenta y desarrolla el análisis de la misión de una constelación de nanosatélites para la observación con cámaras ópticas de la Tierra. Se han partido de unos requerimientos para cubrir unas necesidades entre ellas garantizar un número de visitas diarias a cualquier zona de interés, se ha realizado un estudio y dimensionamiento de la constelación que se ha denominado IMSAT. En este caso, estará constituida por 12 satélites dispuestos en 3 planos orbitales según una configuración definida mediante el **esquema de Walker (Delta 97,4°:12/3/1)**. Para ello, se han realizado distintas simulaciones con el programa **STK Systems Tool Kit** [13] (anteriormente Satellite Tool Kit). Con esta aplicación se ha podido comprobar no sólo los tiempos de paso por cada zona de interés para su captación óptica sino también con las estaciones terrestres propuestas que para este proyecto son dos, una situada en la actual estación del INTA en Torrejón de Ardoz, y la otra en la estación de Maspalomas. También ha permitido simular en función de diferentes pesos y alturas orbitales su

tiempo de vida. Para esta misión se ha planteado en órbita LEO a 550 kms de altitud, que junto a un diseño planteado en estructura Cubesat de 6U, permite un ciclo de vida estimado de unos 4 años para cada nanosatélite. Se ha podido comprobar con STK la gran potencia de simulación que tiene para comprobar otros parámetros de vuelo de interés como son las comunicaciones mediante diferentes antenas planteadas y que para este caso se ha propuesto para transmisión en banda S, condiciones de temperatura, radiaciones, etc.



Adicionalmente, con las características requeridas se han podido decidir y seleccionar los principales componentes de los distintos subsistemas de los nanosatélites. Sin lugar a dudas el más destacado de estos componentes es la carga útil o payload, que es el que determina la funcionalidad y aplicación del proyecto espacial. Por este motivo, se ha seleccionado una cámara ISIM-90 de la empresa SATLANTIS [14], de reducido tamaño y peso (4 kgs) que puede perfectamente montarse en una estructura 6U sobre la que se montarán el resto de subsistemas, y cuyo peso total de cada nanosatélite será de poco más de 8 kgs. Este tipo de cámara permitirá tomar imágenes ópticas de muy baja resolución (1,65 metros).

En paralelo al estudio del peso de la nave, se ha tenido que seleccionar los adecuados componentes que permitan garantizar su alimentación en vuelo. Para ello se han seleccionado tras ponderar el balance energético del consumo total que requerirá (48,28W) con la energía proporcionada por 4 paneles solares seleccionados para el tamaño 6U del satélite y que suministrarán en media unos 51,47 W teniendo en cuenta el tiempo estimado de exposición solar con la inclinación de la órbita determinada. Mientras la nave no está en exposición a la luz del solar, se seguirá alimentando con un array de baterías recargables en cada giro con parte de la energía que se obtendrá de los paneles solares.

Siguiendo los estándares de realización de este proyecto creados por la Cooperación Europea para la Estandarización del Espacio (ECSS) desglosado en 7 fases, se tiene planificado poder poner en órbita el primer nanosatélite un año y medio del inicio del proyecto, y poder tener desplegado la misión completa de 12 satélites tras dos años de proyecto. De este modo si el proyecto se iniciara en enero de 2024, podría tener desplegado los primeros nanosatélites entre junio de 2025 y enero de 2026.

Teniendo en cuenta la planificación del proyecto con sus recursos tanto materiales como de personas implicadas en su realización se ha cuantificado un coste total de unos 14.255.000 € en sus primeros cinco años de la misión, con un coste estimado anual de mantenimiento de 3.397.360 € (3.056.400 € de CAPEX en la renovación anual de 3 satélites y 340.960 € de OPEX dedicados a su mantenimiento y operación).

3. Resultados y discusión

Se ha podido constatar en este trabajo que los costes de una constelación con pequeños satélites en órbita LEO como la planteada son muy inferiores a los que implicaba su realización a proyectos que se realizaban en el pasado y que culminaban con el lanzamiento de satélites de mucho mayor tamaño y peso en órbitas geoestacionarias.

En el estudio, confección y configuración de la constelación IMSAT que se ha presentado, se ha podido también comprobar que esta solución mejora sustancialmente la misión inicial que se inició en el año 2007 con INGENIO [15], y que no dio a luz en el año 2020 como se tenía previsto.

La **Tabla 1** resume las principales mejoras que se obtiene mediante la misión IMSAT, comparándola con la misión INGENIO. De este modo y de una manera sencilla, se puede apreciar que IMSAT es un proyecto mucho más económico, que asume menos riesgos para su realización y tiene una mayor versatilidad y flexibilidad de evolución futura, establecido por un diseño diferente, modular y mucho más sencillo de cada satélite que compone la constelación.

Aunque en este trabajo, se ha comprobado los grandes beneficios y múltiples beneficios que se pueden llevar a cabo con constelaciones de nanosatélites, también hay otros tipos de proyectos que por la magnitud de sus requerimientos tal vez deban implementarse con otros tipos de satélites de mayor tamaño, o en su caso buscarse alguna solución tecnológica alternativa para poder llevarse a cabo de manera viable. Este es el caso, por ejemplo, del Programa de conectividad segura de la Unión Europea para el periodo 2023-2027 [16], o de proyectos actualmente en curso como las constelaciones Starlink [7] o Oneweb cuyos objetivos son conseguir dar una capacidad de telecomunicaciones con cobertura a nivel mundial.

MISIÓN	INGENIO	IMSAT
Coste	Muy Alto 200 M€	Medio 14 M€
Despliegue	Plazos largos 13 años (2007-2020)	Plazos cortos 2 años (2024-2025)
Riesgo	Muy Alto Misión fallida	Bajo/Medio Equirepartida por cada nanosatélite de la constelación
Peso	700 kg/sat.	8 kg/sat.
Diseño	Complejo	Sencillo
Cobertura	Parcial Limitada por su órbita GEO	Global Facilitada por su órbita LEO
Revisitas	Limitada	2 imágenes diarias/punto de interés Ampliable con más nanosatélites
Capacidad (estimada)	Menor 100 imágenes/diarias	Superior 1.440 imágenes/diarias
Resolución Óptica	10 metros Fija	1,65 metros Renovable con nuevas y avanzadas cámaras
Tecnología	Fija Definida al inicio de la misión	Flexible Renovable en nuevos nanosatélites
Sostenibilidad	Basura Espacial Mayor dificultad y costo su eliminación por su gran tamaño	Ecológica Mejor eliminación por su menor tamaño

Tabla 1 Comparativa entre las misiones INGENIO e IMSAT

4. Conclusiones

La tendencia actual en el mundo aerospacial es a la realización de proyectos y misiones con pequeños sistemas de satélites (generalmente micro o nanosatélites) distribuidos y descentralizados de manera uniforme en uno o más planos orbitales, y constituyéndose en constelaciones.

Las constelaciones de nanosatélites dan lugar a una gran variedad aplicaciones, que se han detallado en este TFM, con costes totales muy reducidos frente a los primigenios proyectos espaciales que se realizaban con enormes satélites.

Además de la reducción en costes, se han podido comprobar que se obtienen otras mejoras con este tipo de misiones con un menor riesgo de realización y mayor flexibilidad y adaptación en tiempo a los cambios y modernizaciones tecnológicas que se vayan requiriendo.

De manera sencilla se ha propuesto la implementación de una misión con una constelación de doce nanosatélites que permitiría a España reemplazar el proyecto que se pretendió abordar con la misión fallida INGENIO.

Si bien es cierto que se ha comprobado que, por envergadura de las necesidades, no toda solución se puede resolver con satélites del tamaño “nano” como se ha desarrollado principalmente en este trabajo, si se puede plantear su evolución y desarrollo con otros tipo de constelaciones de satélites de mayor tamaño, o mediante una solución combinada con satélites de diferentes tamaño e interconectados entre sí.

Agradecimientos

En mi primer lugar, quiero agradecer a las personas que más cerco tengo y que me han apoyado durante la realización de este Máster. A mi hijo Raúl, por estar siempre conmigo, además de haberme apoyado de manera especial cuando fue necesario en un par de momentos concretos en las que tuvo que declarar y supo defenderme durante la realización de este Máster. A mis padres, por estar ahí, y sobre todo por haberse podido hacer cargo de la atención de mi hijo cuando tuve que abordar la parte presencial en Marín. Y a mi pareja, por todo su apoyo, cariño y paciencia con el tiempo que la he quitado para poder dárselo a este curso.

Quiero también agradecer el apoyo de mi tutor, José María Núñez Ortuño, que gracias a su tutoría y apoyo incondicional me ha permitido desarrollar de manera confortable este trabajo. Además me facilitó el contacto directo con Fernando Aguado Agelet, experto en la materia que se ha tratado en este TFM. Ambas personas, pese a tener sus agendas muy ocupadas, fruto de la demanda que les requiere su buen trabajo y profesionalidad, se han volcado mucho conmigo, con absoluta disponibilidad, y facilitándome todo lo que necesitaba para poder aprender mucho en el tema que se ha trabajado. Gracias a sus muy adecuados consejos, comentarios e indicaciones he podido realizar este trabajo.

Por último, quiero mencionar a todos los profesores y asociados, así como a todos mis compañeros, con los que he podido compartir de manera muy agradable la realización de este Máster, y aprender de este modo las últimas novedades de este dinámico mundo TIC y su gestión.

Referencias

- [1] B. Twiggs, CUBESAT HANDBOOK From Mission Designs to Operations, 2021.
- [2] Varios, Nanosatellites. Space and Ground Technologies. Operations and Economics, Wiley, 2020.
- [3] «Curso de Ingeniería de Diseño de una misión y sistemas de un Satélite,» [En línea]. Available:
moodle.aerospacetech.org/pluginfile.php/1465/mod_resource/content/2/20200903_Master_Satellites_Platform_Cubesats_examples.pdf.
- [4] «Survey on Optimization Methods for LEO-Satellite-Based Networks with Applications in Future Autonomous Transportation,» [En línea]. Available:
[//www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8877282/](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8877282/).

- [5] «Current Situation and Future Innovations in Arctic Communications,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/283042184_Current_Situation_and_Future_Innovations_in_Arctic_Communications. [Último acceso: 15 12 2022].
- [6] «Casos de éxito de Alen Space,» [En línea]. Available: alen.space/es/casos-de-exito/.
- [7] «Starlink,» [En línea]. Available: www.starlink.com.
- [8] «Sateliot,» [En línea]. Available: www.sateliot.space/en/.
- [9] «Proyecto Adelis -Samson,» Asher Space Research Institute, [En línea]. Available: asri.institute/space-missions/adelis-samson/.
- [10] «Startical,» [En línea]. Available: www.startical.com/.
- [11] «Flightradar24,» Live Air Traffic, [En línea]. Available: www.flightradar24.com.
- [12] «Tecnologías para la Defensa,» *BIT de COIT*, vol. 224, nº 41, 2022.
- [13] «Ansys Company,» [En línea]. Available: www.ansys.com.
- [14] «Satlantis,» [En línea]. Available: www.satlantis.com.
- [15] «SEOSAT/INGENIO. Satélite Español de Observación de la Tierra,» [En línea]. Available: www.aeroespacial.sener/productos/seosat-ingenio-satelite-espanol-de-observacion-de-la-tierra.
- [16] «Reglamento. Programa de conectividad segura de la Unión para el periodo 2023-2027,» Comisión Europea, 2022.
- [18] «Curso de Ingeniería de Diseño de una misión y sistemas de un Satélite,» [En línea]. Available: moodle.aerospacetechnology.org/pluginfile.php/1465/mod_resource/content/2/20200903_Master_Satellites_Platform_Cubesats_examples.pdf. [Último acceso: 15 09 2022].
- [19] «Tecnologías para la Defensa,» *BIT de COIT*, nº 224, p. 41, 2022.
- [20] «Reglamento. Programa de conectividad segura de la Unión para el periodo 2023-2027,» Comisión Europea, 2022.
- [21] «Solution for Cubesats,» [En línea].