

CAPÍTULO 2

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Este capítulo aborda los antecedentes y la revisión de la literatura sobre temas principales tratados en esta investigación, tales como: redes de estaciones terrenas, en inglés *Ground Station Network* (GSN), inteligencia artificial (*Artificial Intelligence*) (AI) y otras relacionadas que permiten explorar estas temáticas. Especialmente, este capítulo describe las GSN existentes hasta la fecha, así también, esta revisión a la literatura rastreada desde el año 2004. En este ejercicio se hace énfasis en aquellas redes que tienen algún tipo de automatización o dinamismo. Al principio, las GSN fueron creadas para grandes satélites, la mayoría de ellos militares, subsecuentemente, para pequeños satélites.

Los primeros programas espaciales comenzaron desde 1950, cada uno poseía su propia arquitectura, así como, centros de control y comando. La mayoría de los satélites se encontraban en órbita terrena baja, *Low Earth Orbit* (LEO). No obstante, estas presentaban limitaciones en cuanto a las comunicaciones Tierra-satélite. Dicha situación exigía que las estaciones terrenas se ubicaran en puntos estratégicos para optimizar la cobertura y se aumentara la duración del acceso a los satélites.

Como resultado de este proceso, las GNS distribuidas alrededor del mundo, comenzaron a emerger y visibilizarse requiriendo estandarizar sus frecuencias de operación. Es decir que, las primeras redes se crearon para rastrear y controlar

grandes satélites militares, las cuales se describen a continuación y fueron el punto de partida en el desarrollo de otras GSN. A continuación, se describen algunos conceptos que permiten adentrarnos en el terreno de las estaciones satelitales.

2.1 DSN

En 1958, la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) creó *Deep Space Network* (DSN) con el objetivo primordial de proporcionar comunicaciones autónomas a las naves espaciales (NASA, 2014). Esta red mundial permitió la operación de tres estaciones terrenas iniciales ubicadas en España, Estados Unidos y Australia.

Consecuentemente, estas estaciones estaban estratégicamente ubicadas a 120 grados una de la otra y permitían la observación constante del espacio profundo. Cada estación cuenta con una infraestructura compleja con antenas de hasta 70 metros de diámetro. Toda esta información recibida por las antenas sobre el espacio profundo se procesa desde el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL, 2016).

Esta red de estaciones terrenas solamente se usa para el rastreo de satélites grandes, y aún se encuentra en operación. En (DSN, 2016) es posible ver las antenas, así como los satélites que se están monitoreando, sus características y ubicaciones actuales.

2.2 AFSCN

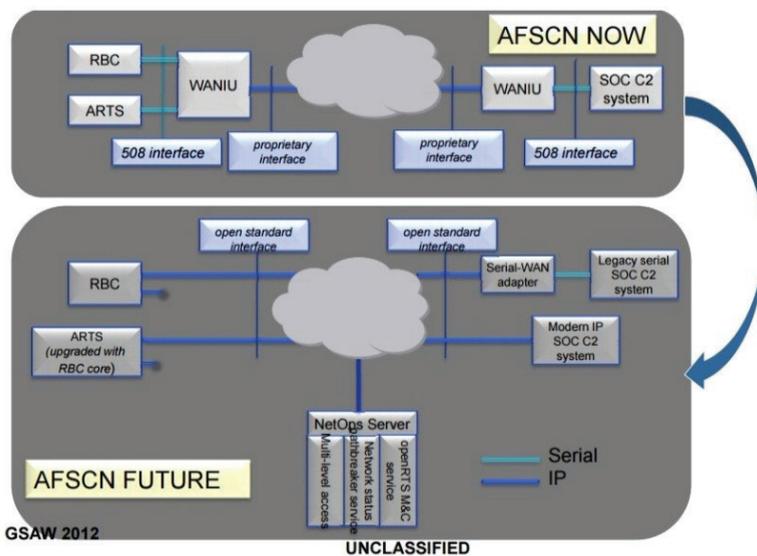
Por su parte, la *Air Force Satellite Control Network* (AFSCN) se creó en 1959 con el objetivo de prestar apoyo a los satélites del *Department of Defense* (USA DoD) (Spires y Sturdevant, 1990). La AFSCN se creó para transmitir telecomandos a los satélites en órbita desde redes de estaciones terrenas distribuidas por todo el mundo. La AFSCN es un sistema mundial que provee comando, control y comunicaciones a más de 80 satélites de comunicación, navegación, meteorología y prevención de misiles, así como otras misiones del DoD, la NASA y misiones del Reino Unido (FAS, 2016).

Según Devi y Williams (2012), en la actualidad, se está mejorando todo el sistema como se ilustra en la Figura 1. La modernización incluye el cambio del sistema de comunicación serial y el uso de *Internet Protocol* (IP) para la comunicación entre los distintos nodos de red, así como, el uso de interfaces basadas en una arquitectura abierta para que los sistemas de tierra AFSCN superen las limitaciones de la red actual.

En la actualidad, la DNS y la AFSCN tienen operaciones conjuntas que gestionan sus satélites y los nodos ubicados en todo el mundo, aunque las operaciones se ejecutan desde el nodo Sunnyvale, en California, donde hay una copia de seguridad del nodo operativo principal ubicado en la Base de la Fuerza Aérea de Schriever *Schriever Air Force Base* (SAFB), cerca de Colorado Springs. El número de misiones y satélites apoyados ha aumentado considerablemente, es decir, cada satélite funciona en una frecuencia diferente. Por esta razón, el *Space Ground Link System* (SGLS) ha estandarizado el uso de frecuencias. El SGLS opera en bandas de comunicación S y L, en frecuencias de 1755-1850 MHz para *uplink* y 2200-2300 MHz para *downlink*.

Figura 1

Interfaces de modernización de la AFSCN



Nota. Devi and Williams (2012). *508 Interface*: Interfaz 508; *Proprietary interface*: Interfaz de uso privativo; *Open Standard Interface*: Interfaz de código abierto; *Serial WAN adapter*: Adaptador Serial WAN; *Legacy serial SOC C2 system*: Sistema Antiguo Seriado SOC C2; *Modern IP SOC C2 System*: Sistema Moderno IP SOC C2; *Open RTS M&C service*: Servicio Abierto RTS M&C; *NetOps Server*: Servidor de operaciones de red; *Multilevel access*: Acceso Multinivel.

La AFSCN opera bajo el mando de la *Air Force Space Command* y la *50th Space Wing*, con una sucursal en el SAFB. Este también es un nodo principal y controla 8 estaciones de seguimiento remoto *Remote Tracking Stations* (RTS), ubicadas en Hawaii, California, Colorado, New Hampshire, Groenlandia, Inglaterra, Diego García y Guam. Estos lugares remotos están interconectados y transmiten telecomandos, telemetrías y datos de misión a muchos satélites en muchas órbitas (Fuerza Aérea, 2016).

En la siguiente sección se describen las redes de estaciones terrenas cuya función principal es rastrear y controlar pequeños satélites. Las GSN que se presentarán son: Mercury, GSN, MC3, GENSO, SatNOGS, Y SATNet. Actualmente, los dos últimos están en desarrollo. Las seis redes de estaciones terrenas mencionadas anteriormente operan en las bandas de radiofrecuencia de aficionados, es decir, *Ultra High Frequency* (UHF), *Very High Frequency* (VHF) y banda S.

2.3 Sistema Mercury (MERCURY)

En la Universidad de Stanford, en el *Space Systems Development Laboratory* (SSDL) la red Mercury, fue desarrollada con la premisa de dar autonomía de control y operación remota de una estación terrena del tipo *Orbital Satellite Carrying Amateur Radio* (OSCAR) y estuvo lista para ser lanzada en 1999. El SSDL OSCAR cuenta con estaciones con operaciones y arquitectura para multisatélites y multiestaciones (Cluter, 2006).

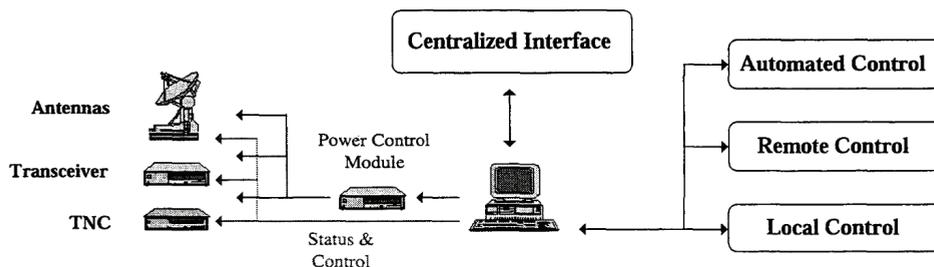
La estación terrena del SSDL tiene un bajo costo y se encuentra equipada con antenas de 2 m y 70 cm de longitud de onda, que utilizan la banda S de radiofrecuencia de aficionado de 140 MHz y 430 MHz, respectivamente. La estación tiene el control del microsátélite desde el momento del lanzamiento hasta que el momento en que entra en órbita. Algunas características de las

estaciones terrenas son: transmisión *full-duplex* operando en bandas de 2m y 70cm de longitud de onda, con un amplificador de 160W, dos antenas tipo Yagi con preamplificadores y motores de control de posicionamiento de las mismas, un *Terminal Node Control* (TNC), que hace las veces de módem, usando el protocolo AX.25 a tasas de 9600 baudios y por último, un computador con drivers de control de posicionamiento de las antenas.

En la Figura 2, se muestra un diagrama de bloques del proceso de cómo el sistema Mercury proporciona una interfaz de software central que controla todos los dispositivos de la estación, así como, el software para el funcionamiento autónomo. Además, la puerta de enlace a Internet para tener acceso a todo el sistema de estaciones terrenas.

Figura 2

Diagrama de bloque del sistema Mercury



Nota. Cluter et al. (2006). *Centralized Interface*: Interfaz Centralizada; *Antennas*: Antenas; *Transceiver*: Transmisor; *TNC*: Controlador de nodo terminal; *Power Control Module*: Modulo de Alimentación; *Status & Control*: Control y estado; *Automated Control*: Control automatizado; *Remote Control*: Control remoto; *Local Control*: Control local.

Algunas de las rutinas que Mercury tiene automatizadas: posicionamiento de antenas para hacer seguimiento al satélite durante la pasada, un *loop* cerrado que compensa la transmisión por el efecto doppler, almacenamiento y formateo de los datos que recibe a través del TNC, configuración de la estación para cada satélite en cuanto al protocolo a usar, la frecuencia de comunicación del satélite, los datos de tracking para cada sesión, diagnóstico y monitoreo del desempeño

RED INTELIGENTE DE ESTACIONES TERRENAS - ADSGS

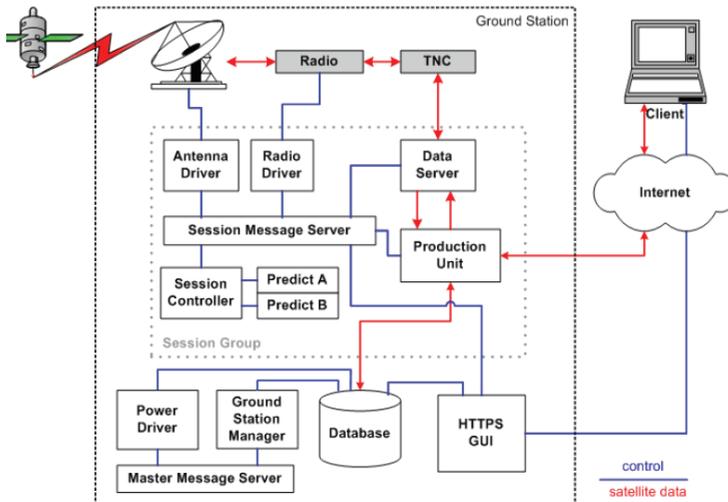
de los equipos de la estación, actualización y sincronización de los elementos Keplerianos.

Como lo afirma Cluter (2006) el TNC tiene una interfencia a través de un puerto serial de 9600 baudios, con 8 bits de datos, 7 de paridad y 1 de parada. Estos parámetros se pueden cambiar para optimizar la comunicación con el TNC. El sistema Mercury gestiona la salida del TNC en formato binario o de texto. Este sistema está diseñado para funcionar con estaciones terrenas de tipo OSCAR.

Así también, el TNC proporciona la modulación y la demodulación, y utiliza paquetes AX.25. El sistema Mercury está diseñado para funcionar con dos tipos de TNC, el servidor de datos provee un *socket* de tipo *Transfer Control Protocol* (TCP), que puede ser convertido al puerto RS232.

Figura 3

Arquitectura del sistema



Nota. MDT (2006). *Client*: Cliente; *Satellite Data*: Datos Satelitales; *HTTPS*, *HyperText Transfer Protocol Secure*: Protocolo de Transferencia de Hipertexto; *GUI*, *Graphic User Interface*: Interfaz Gráfica de Usuario; *Database*: Base de Datos; *Production Unit*: Unidad de Producción; *Data Server*: Servidor de Datos; *TNC*: Controlador de Nodo De Terminal; *Radio*

Driver: Controlador de Radio; *Antenna Driver*: Controlador de Antena; *Session Message Server*: Servidor de la Sesión de Mensajes; *Session Controller*: Controlador de Sesión; *Predict A*: Predictor A; *Predict B*: Predictor B; *Power Driver*: Controlador de alimentación; *Ground Station Manager*: Administrador de Estación Terrena; *Master Message Server*: Servidor Maestro de Mensajes.

La Figura 3 muestra la arquitectura del Sistema Mercury y sus componentes. Según (MDT, 2006) son:

- *Antenna/Radio/Power Drivers*
- *Data Server.*
- *Production Unit.*
- *Session Controller.*
- *Session Message Server.*
- *Predict.*
- *Ground Station Manager.*
- *Master Message Server.*
- *Database.*
- *HTTP GUI - Hyper Text Transfer Protocol. Graphics User Interface.*

Los mismos creadores de Mercury diseñaron un lenguaje de control y comando construido como un *framework* llamado *Ground Station Markup Language* (GSML), que permite a los usuarios trabajar con estaciones terrenas universitarias distribuidas por todo el mundo, las cuales llamaron *Mercury Ground Station Network* (MGSN) (Cluter, 2004).

GSML es un *framework* basado en *eXtensible Markup Language* (XML) y controla la estación en tres niveles de jerarquía: nivel de hardware virtual, nivel de sesión y nivel de red.

El primero, *Virtual Hardware Level* (VHL), da a la estación la capacidad de generar el código y los comandos para los componentes de hardware.

El *Session Level* (SL) captura las tareas típicas y automatiza los servicios de una estación terrena, el usuario define la sesión que reserva los recursos de hardware que van a ser usados para mantener el canal de comunicación conectado al destino.

Por último, el *Network Level* (NL) captura los servicios de la red de estaciones administradas de forma federativa. Esta red coordina las estaciones terrenas que están bajo su dominio, los usuarios, las tareas y las actividades a realizar, pone a disposición y optimiza la conexión con el satélite (CLUTER, 2004).

En este mismo sentido, el profesor Cluter (2006) afirma que el GSM se compone de objetos, métodos y protocolos que describen la interacción entre estos objetos. Los objetos son descritos como componentes, entre los cuales se encuentran los usuarios, las estaciones y las antenas capturando el estado de los atributos que los definen.

Por otro lado, los métodos describen los procedimientos de interacción entre los componentes que mejoran, por ejemplo, su eficiencia. Además, parte de la misión del Sistema Mercury fue apoyar las operaciones de los microsatelites QuakeSat1 operados por la Universidad de Stanford en Fairbanks, Alaska (FGS) y Stanford, California (SGS). Las estaciones eran tipo *Commercial Off-the-Shelf* (COTS) que funcionaban en banda S de radiofrecuencia amateur de 2 m y 70 cm de longitud de onda, con enlaces de 1200 y 9600 bps (Cluter & Fox, 2006).

2.4 GSN

La *Ground Station Network* (GSN) fue desarrollada en Japón en 2004 (Errico, 2012). La Universidad de Tokio les propuso a un grupo de estudiantes de la *University Space Engineering Consortium* (UNISEC) para que crearan un sistema de red basado en estaciones terrenas ubicadas en Japón y controladas remotamente a través de Internet.

El investigador Errico (2012), afirma también que la GSN se basa en *Ground Station Management Server* (GMS) que es un software que controla de forma remota el hardware de la estación. Cada estación terrena tiene una arquitectura de hardware diferente y controladores específicos para los diferentes dispositivos,

que implementa la interfaz o el software del cliente GMS. El intercambio de información entre el cliente local y los dispositivos usa la tecnología de servicios web. Es decir, al utilizar GMS, el operador puede controlar de forma remota los radios o el TNC de la estación, o cualquier otro hardware.

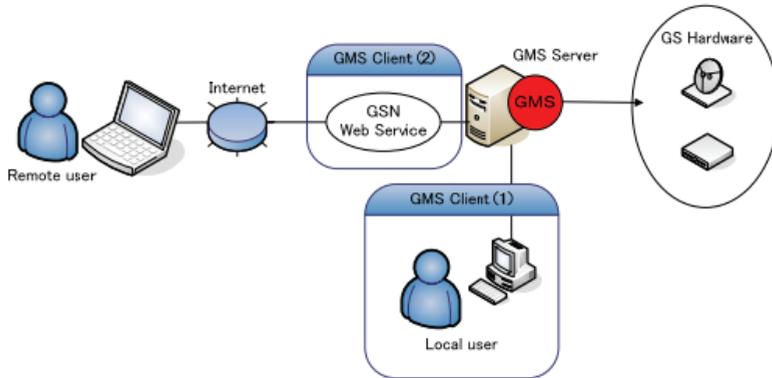
El sistema consta de dos partes: GMS y *Ground Station Operation Web Service* (GROWS). El primero, la GMS proporciona el control de la estación terrena y los controladores de los diferentes computadores que la forman, y que son utilizados por nanosatélites que, al mismo tiempo, utilizan banda S de radiofrecuencia de aficionados. El segundo, GROWS proporciona acceso seguro a las estaciones remotas utilizando los servicios web de GMS. En 2006, se inició una colaboración internacional entre Estados Unidos, Japón y Suecia en la operación de picosatélites utilizando la tecnología GSN (Oda et al., 2009).

Lo más importante de este método es que las acciones de cada tarea pueden dar lugar a una optimización total, lo cual significa que es posible utilizar un computador paralelo (cada tarea corresponde a un único nodo de dispositivo), por lo que se puede obtener un resultado óptimo en un periodo corto de tiempo. Esta es una característica ventajosa de la GSN, donde la reprogramación se observa como una necesidad frecuentemente requerida (Nakasuka, 2009).

En el manual de funciones de la GMS se puede leer e interpretar como un software de “ventana de servicio”, que necesita de un cliente para tener acceso; en este caso el operador local de las estaciones terrenas conduce el computador, generando algunos formularios que servirán como cliente GMS (GSN, 2006).

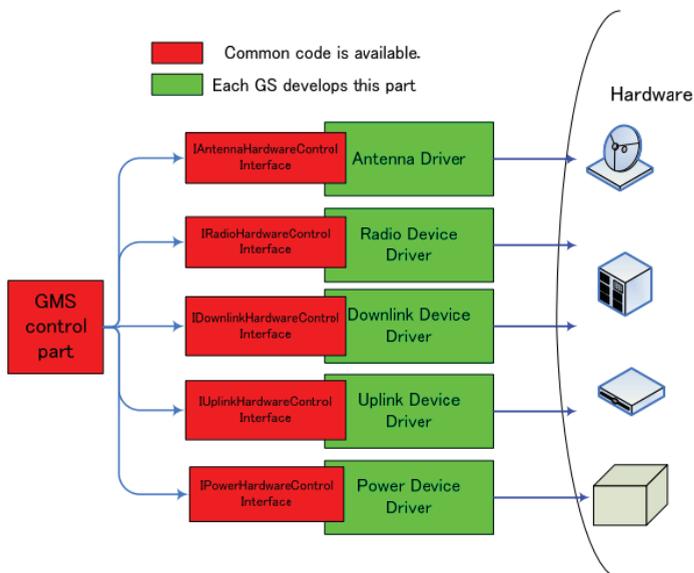
En este caso, los usuarios pueden utilizar el sistema de forma remota con un navegador web que el cliente haya instalado para utilizar este servicio. Cada estación puede desarrollar su propia aplicación. Para ello, no es necesario conocer la configuración interna de GMS, pero sí es necesario comprender las funciones e interfaces del sistema. En la Figura 4 se puede observar cómo un usuario puede tener acceso remoto (a través de internet) al hardware de una estación terrena, utilizando GMS con este fin.

Figura 4
Clientes GMS



Nota. GSN (2006). *Remote User:* Usuario Remoto; *Internet:* Internet; *GMS Client (1):* Cliente GMS (1); *GSN Web Service:* Servicio Web GNS; *GMS Client (2):* Cliente GMS (2); *Local User:* Usuario Local; *GMS Server:* Servidor GMS; *GS Hardware:* Hardware GS.

Figura 5
Implementación de los controladores de GMS



Nota. GSN (2006). *Common Code is Available:* El Código Común está disponible; *Each GS develop this part:* Cada ET desarrolla esta parte; *GMS Control Part:* Parte de Control GMS; *Antenna Hardware Control Interface:* Interfaz de control de hardware de la antena; *Antenna Driver:* Controlador de antena; *Radio Hardware Control Interface:* Interfaz de control de hardware de radio; *Radio Device Driver:* Controlador de Dispositivo de Radio; *Downlink Hardware Control Interface:* Interfaz de control de hardware del enlace descendente; *Uplink Device Driver:* Controlador de dispositivo de enlace ascendente; *Power Hardware Control Interface:* Interfaz de control de hardware de alimentación; *Power Device Driver:* Controlador de dispositivo de alimentación.

De otro lado, la GMS permite la creación de controladores para cada máquina, sea esta genérica o no. Como se puede observar en la Figura 5, se puede acceder a los siguientes *drivers* de: dispositivos de control de energía, TNC para *uplink*, TNC para *downlink*, *drivers* del *transceiver* y para el control del ángulo de las antenas (GSN, 2006). Esto hace que el sistema GSN tenga múltiples ventajas con respecto a la configuración de hardware de cada estación terrena.

2.5 Comando y Control de CubeSat Móvil (MC3)

La red *Mobile CubeSat Command and Control* (MC3) fue desarrollado como parte del segmento de tierra del programa de satélites Colony (Kalman, 2009; Schulz, 2010), con el fin de realizar experimentos con CubeSat debido a su bajo costo. Colony I fue comprado a la compañía Pumpkin, mientras que Colony II fue comprado a Boeing (Kalman, 2009; Schulz, 2010)

La red MC3 contiene hardware tipo COTS y el software fue desarrollado con la colaboración de agencias del estado y universidades que participaron en el programa Colony II. MC3 fue desarrollado en el *Naval Research Laboratory* (NRL) junto con la *Naval Postgraduate School* (NPS) de Estados Unidos, y fueron estudiantes universitarios, con la ayuda de los militares, quienes desarrollaron la red de estaciones terrenas para CubeSat. La arquitectura de esta red fue diseñada para rastrear los picosatélites Colony I y Colony II. Tanto el NPS como el NRL colaboraron en el diseño de las antenas que operaban en la banda S (2.1 GHz) y la banda UHF (450 MHz).

En el rack del MC3, presentado en la Figura 6, se observan todas las partes que componen una estación terrena: los radios tanto de banda S como UHF, los controladores de rotor de las antenas, el computador y las fuentes de alimentación.

Figura 6

El rack MC3 y su contenido



Nota. Griffith (2011).

De acuerdo con el software MC3, este usa *Common Ground Architecture (CGA)*, que se encuentra en la arquitectura de software disponible, la cual posibilita las pruebas en órbita de las operaciones durante la misión del satélite. Al usar la CGA toda la estación puede automatizar el seguimiento y la comunicación con sus satélites.

De la misma manera, los usuarios pueden programar las pasadas y el software asigna automáticamente los recursos para su seguimiento, por ejemplo, los comandos necesarios, el movimiento de las antenas, los datos del satélite, entre otros. Así también, la CGA permite el acceso remoto a la estación a través de la red. La Figura 7, muestra la funcionalidad de CGA (Griffith, 2011). La red de estaciones terrenas MC3 conecta las diferentes estaciones distribuidas por todo el mundo mediante una *Virtual Private Network (VPN)* a través de Internet. Algunas de las estaciones están ubicadas en Estados Unidos: Logan, UT; Fairbanks, AL; Guam; College Station, TX; Dayton, OH; Albuquerque, NM; Universidad de Hawaii; y Melbourne, FL.

Figura 7

Capacidades y características de CGA

CGA Arquitectura Común Terrena		
Común	Terrena	Arquitectura
Los propietarios gubernamentales poseen un producto de infraestructura común	El cual provee comando y control de las aplicaciones terrenas	Usando una arquitectura de un software de computador distribuida
Procesos de comunicación y métodos de distribución de datos	Comando actual y telemetría procesada por satélites múltiples	Plataformas solares de Multi nodo/UNIX
Grabación de datos y conjunto de herramientas de recuperación	Asignación y control de recursos de hardware	Red TCP/IP
Interfaces de usuarios gráficos	Sistema automatizado y programación de contactos	Procesamiento distribuido y control centralizado
Métodos de registro	Grabación de datos y análisis	Conectividad a plataforma a Windows XP
Herramientas de formateo de datos	Pantalla del operador y control	Bibliotecas de aplicaciones e interfaces para usar software común
Conjunto de herramientas de desarrollo de misión única	Soporte de determinación orbital	Escalable y extensible por 1 a 255 satélites

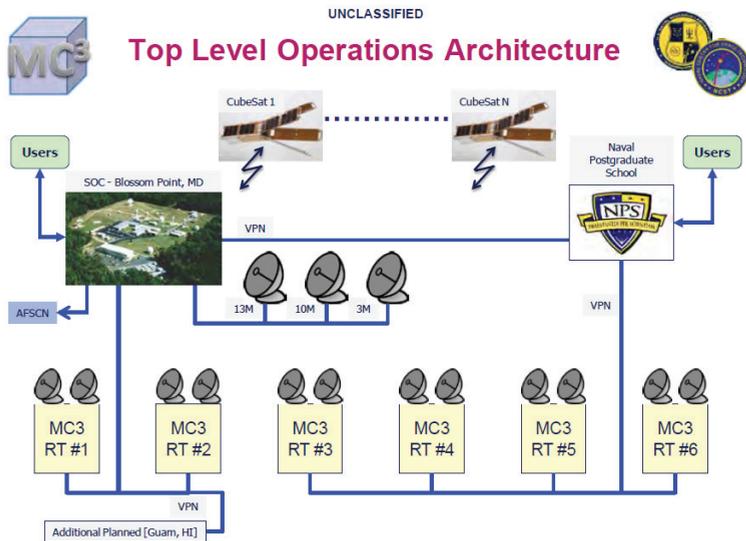
Nota. Griffith (2011).

En la Figura 8, se observa la conexión de la red MC3 a través de una VPN. El MC3 recibe y envía información TT&C tanto al bus, como a la carga útil del satélite Colony II. En este caso, el CGA determina qué estación MC3 está disponible para comunicarse con el satélite, definiendo la hora, la ubicación, la prioridad y la disponibilidad de MC3. Este proceso brinda el apoyo necesario para muchas misiones espaciales.

La Tabla 1, muestra una lista de radios y antenas usadas por el MC3, que se encuentran debidamente certificados para operar en las bandas de frecuencias previamente establecidas.

Figura 8

La arquitectura del MC3



Nota. Arnold (2011). *Top Level Operations Architecture*: Arquitectura de Operaciones de Nivel Superior; *Unclassified*: no confidencial; *Additional Planned*: Planeación Adicional; *Users*: Usuarios; *AFSCN*: Red de Control del Satélite de la Fuerza Aérea; *SOC Blossom Point MD*: Punto Blossom SOCMD; *CubeSAT*: programa de comando y control CubeSAT; *Naval Postgraduate School*: Escuela Naval de Posgrado.

Tabla 1

Radios y antenas del MC3

Nomenclatura	Propósito
Radio (2) ICOM 9100	Transmisor
Radio GDP	Receptor
Antena Yagi	Antena 450 MHz
917 Antena Yagi	Antena 915 MHz
197523 Antena Yagi	Antena 19252100 MHz
222721 Antena Yagi	Antena 22102245 MHz

Nota. Griffith (2011).

2.6 GENSO

El proyecto internacional *Global Educational Network for Satellite Operations* (GENSO) fue creado oficialmente en octubre de 2006, con el objetivo principal de proporcionar comunicaciones a satélites universitarios, así como, constituir una red internacional de estaciones terrenas universitarias y de radioaficionados (Leveque et al., 2007). Gracias a la creación de esta red es posible descargar datos experimentales y un gran número de estudiantes pueden participar operando las misiones de satélites en tiempo real.

La GENSO comenzó con el apoyo y la coordinación de la *International Space Education Board* (ISEB) y recibió el apoyo de la *European Space Agency* (ESA). Este proyecto fue integrado también por varias universidades de Estados Unidos, Europa y Japón, quienes desarrollaron el software para el funcionamiento de la red GSN (Oda et al., 2009).

Como ya se mencionó, tiene ventajas, en el acceso y control remoto de las estaciones terrenas y de su programación automática. Asimismo, la GENSO está formada por la *Canadian Space Agency* (CSA), la *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) y la NASA.

El proyecto incluye universidades e institutos como *California Polytechnic State University* (CALPOLY) en Estados Unidos; la Universidad de Tokio y UNISEC en Japón; la Universidad de Aalborg en Dinamarca; *Technical University of Vienna* en Austria; la Universidad de Lulea, en Suiza; AMSAT-UK en Inglaterra; y SETI Association en Francia (Leveque et al., 2007).

El objetivo de GENSO es desarrollar una red de estaciones terrenas distribuidas por el mundo, con el fin de ofrecer apoyo operativo a los satélites universitarios. Para ello, se utiliza un software de código abierto, que permite capturar datos de la misión a través de Internet desde diferentes estaciones terrenas y realizar el control de la misión. El software está basado en Java, el cual fue desarrollado por un equipo de estudiantes y radioaficionados (Lange; Foley, 2011).

RED INTELIGENTE DE ESTACIONES TERRENAS - ADSGS

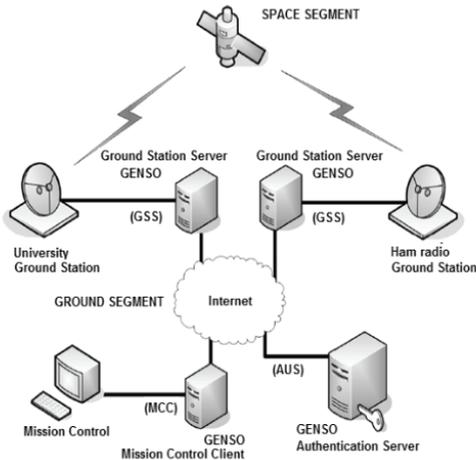
Entre otros objetivos con que cuenta GENSO, se tienen los siguientes (GENSO, 2016):

- Acceso mundial a los operadores de misiones de naves espaciales educativas y de radioaficionados.
- Acceso remoto de los operadores a los datos de la misión en tiempo real.
- Programación de enlaces ascendentes a través de estaciones terrenas.
- Corrección de errores de enlace descendente mediante la comparación de múltiples flujos de datos.
- Definición de la solución estándar para el hardware opcional del segmento de tierra, diseñado para optimizar el rendimiento de GENSO a un bajo costo.
- Recomendaciones para el hardware GENSO con el fin de mejorar el desempeño de la misión.
- La estrecha colaboración con la comunidad de radioaficionados para apoyar una interfaz común, con el fin de solicitar la asignación y coordinación de frecuencias.

El acceso a la red GENSO se efectúa utilizando una o más aplicaciones de software. El operador de la estación terrena utiliza *Ground Station Server* (GSS) y el controlador de la misión ejecuta el *Mission Control Client* (MCC). La seguridad de acceso a la red es ejecutada por el *Authentication Server* (AUS), que se encarga de verificar que todos los usuarios de la red tengan los permisos adecuados. En la Figura 9, se ilustra un diagrama básico de su arquitectura (Dascal et al., 2011).

Figura 9

Arquitectura de la red GENSO

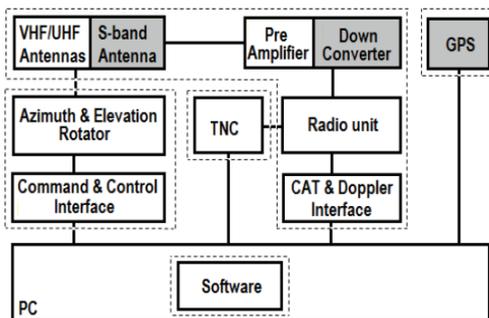


Nota. Dascal et al. (2011). *Space Segment*: Segmento Espacial; *University Ground Station*: Estación Terrena Universitaria; *Ground Station Server*: Servidor de la Estación Terrena; *Ham Radio Station Server*: Servidor de la Estación de Radio; *Mission Control*: Control de la Misión; *Mission Control Client*: Cliente de Control de la Misión; *GENSO Authentication Server*: Servidor de Autenticación GENSO.

La arquitectura del hardware de GENSO se muestra en la Figura 10, en donde es posible observar tanto el hardware como el software integrado dentro de la estación terrena.

Figura 10

Diseño de estación terrena VHF/UHF



RED INTELIGENTE DE ESTACIONES TERRENAS - ADSGS

Nota. Melville (2008). *VHF/UHF Antennas*: Antenas VHF/UHF; *S Band Antenna*: Antena Banda S; *Pre Amplifier*: Pre Amplificador; *Down Converter*: Reductor de Frecuencia; *GPS*: Sistema de Posición Global; *Azimuth & Elevation Rotator*: Módulo de Rotor Azimut o de Elevación; *Command & Control Interface*: Interfaz de Control y Comando; *TNC*: Controlador de Nodo Terminal; *Radio Unit*: Unidad de Radio; *CAT & Doppler Interface*: Interfaz Doppler; *Software*: Software; *PC*: Computadora.

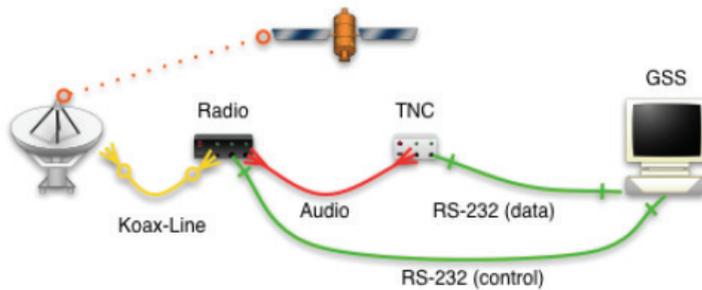
La arquitectura de GENSO es modular y reúne diferentes requerimientos para óptimo desempeño. GENSO recomienda las siguientes especificaciones:

- El módulo del servomotor incluye la interfaz automática de comandos para girar en azimut o en elevación.
- El bloque RF depende del uso del satélite; este tiene antenas para las bandas VHF, UHF y S, además de preamplificadores, transmisores, y correctores de efecto Doppler.
- El bloque del *Terminal Node Controller* (TNC) se utiliza para técnicas de comunicación digital por satélite (paquetes AX.25 y APRS).
- El bloque del *Global Positioning System* (GPS) se utiliza para la ubicación geográfica.
- Un PC que tenga un software (código abierto o propietario) para rastrear los satélites usando *Two Line Elements* (TLE) y una base de datos donde se guardan los datos de la misión.

Es decir que, la estación GENSO tiene dos antenas tipo Yagi usadas para recibir y enviar frecuencias de radioaficionados; 434-437 MHz en UHF y 2.4 GHz en la banda S. El radio es usado para recibir la señal de *beacon*.

Figura 11

Diseño del hardware



Nota. Preindl et al. (2009a). *Koax Line*: Línea coaxial; *Audio*: Audio; *RS-232 (control)*: Control RS-232; *RS-232 (data)*: Datos RS-232; *TNC*: Controlador de Nodo Terminal; *GSS*: servidor de la estación terrena.

En la Figura 11, se observa el cableado entre los diferentes componentes, la radio está conectada a través de un puerto RS232 al TNC, y al mismo tiempo, está conectado al GSS (Preindl et al., 2009a).

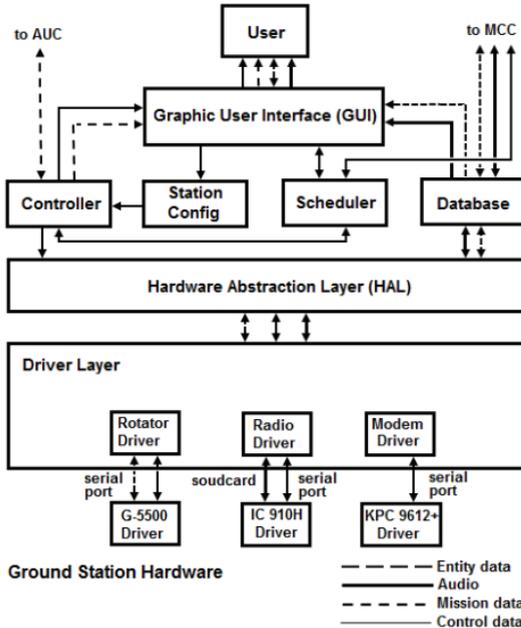
El GSS es parte del estándar GENSO que describe el software y hardware utilizado en la estación. De esta manera, la integración de la estación terrena en la red GENSO implica el uso del software GSS.

En la Figura 12, se observa un diagrama de bloques del software, en donde se muestran todos los detalles de los componentes de hardware (rotores, transceptores, etc.) Estos se configuran manualmente a través de la *Graphic User Interface* (GUI) de la aplicación GSS. El planificador es automático y ejecuta el *downlink* en las diferentes pasadas del satélite, y además, permite que el MCC reserve las sesiones de trabajo de forma bidireccional.

El módulo de control se comunica con la AUS y recibe una lista actualizada de los detalles técnicos de los satélites GENSO. Todos los datos de las misiones se archivan en una base de datos enviada automáticamente al operador de control de misión.

Figura 12

Diagrama Funcional de la aplicación GSS



Nota. Dascal (2011). *Station Config*: Configuración de Estación; *Scheduler*: Programador; *Database*: Base de datos; *Hardware Abstraction Layer (HAL)*: Capa de abstracción de hardware; *Driver Layer*: Capa del Controlador; *Rotator Driver*: Controlador del Rotador; *Modem Driver*: Controlador del Modem; *Serial Port*: Puerto Serial; *G5500 Driver*: Controlador G5500; *IC 910H Driver*: Controlador IC 910H; *KPC 9612+ Driver*: Controlador KPC 9612+; *Entity data*: Datos de Entidad; *mission data*: Datos de la misión; *Control Data*: Datos de control; *Ground Station Hardware*: Hardware de la Estación Terrena.

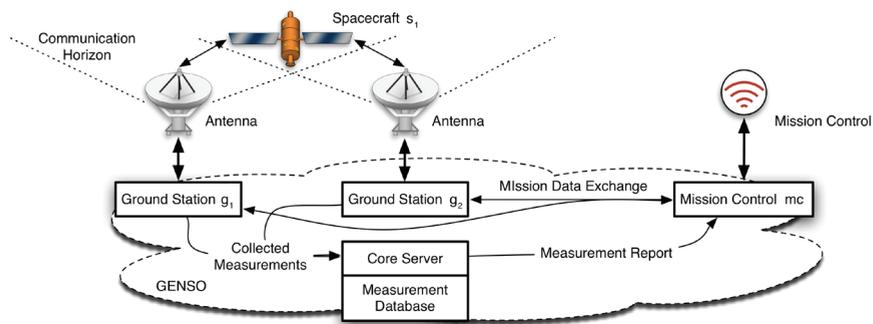
La capa *Hardware Abstraction Layer (HAL)* proporciona especificaciones de los controladores necesarios para el hardware local y garantiza la compatibilidad con el software GSS. Este software también tiene una base de datos donde se almacenan los TLE con la información de cada satélite. Así también, los datos de la modulación, la tasa de bits, la frecuencia de operación, entre otros. Esta información está disponible para cada satélite que pasa sobre la estación terrena, y está disponible para su acceso, tanto para la configuración de la antena como para la ubicación y otras características técnicas.

En seguida de la revisión del hardware y el software que forman la estación terrena tipo GENSO, se propuso el desarrollo de un enfoque autónomo y dinámico para automatizar las redes de estaciones terrenas, con el objetivo de reducir los costos operacionales (Dascal et al., 2011). No obstante, ese desarrollo no fue posible.

De acuerdo con Preindl et al., (2009), el intercambio directo de datos entre el control de la misión y las estaciones terrenas registra la calidad de las mediciones de la señal de la estación, las cuales son registradas en un servidor central. De esta manera, el servidor guarda todas las mediciones fundamentales recopiladas para la investigación científica, como se observa en la Figura 13, que también muestra la información para crear informes del control de la misión.

Figura 13

Intercambio directo de datos en la estación GENSO

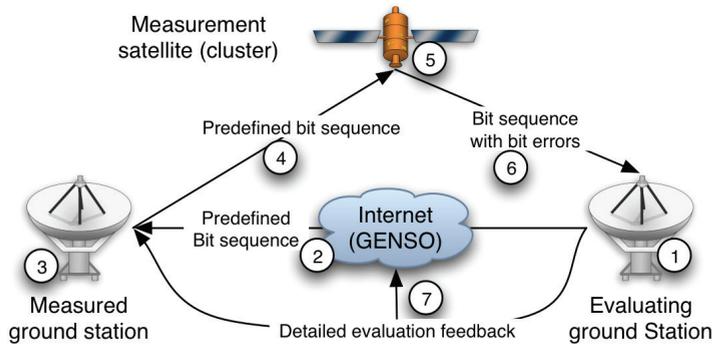


Nota. Preindl et al. (2009a). *Communication Horizon*: Horizonte de Comunicación; *Spacecraft*: nave espacial; *Ground Station*: Estación Terrena; *Collected Measurements*: Mediciones recogidas; *Core Server*: Núcleo del servidor; *Measurement Database*: datos de medición; *Mission Data Exchange*: Intercambio de datos de la misión; *Mission Control*: Control de la Misión; *Antenna*: Antena.

En la Figura 14, se muestra un ejemplo de cómo un satélite transfiere la secuencia de bits a la estación terrena a través de Internet mediante GENSO. Cuando el satélite hace una pasada sobre la estación, continúa transmitiendo la secuencia de bits al satélite. Cuando el satélite pasa sobre la estación base principal, transmite lo que ha guardado en el *buffer*, incluyendo la secuencia y el error de bit a la estación y a la red GENSO (Preindl et al., 2009b).

Figura 14

Esquema de Secuencia de Upilnk

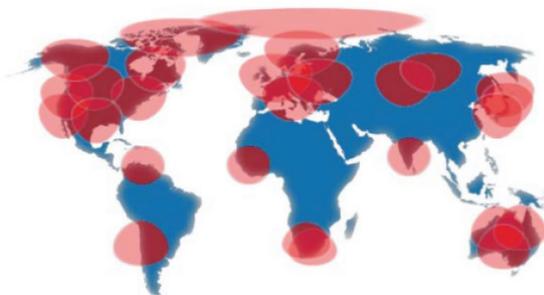


Nota. Preindl et al., (2009b). *Measurement Satellite (cluster)*: Medición de los satélites; *Measured ground station*: Medición de estación terrena; *Predefined bit sequence*: Secuencia de bits predefinida; *Bit sequence with bit errors*: Secuencia de bits con errores; *Evaluating ground Station*: Estación terrena evaluadora.

En la Figura 15 se observa la cobertura que hacia el año 2012 tenía GENSO en el mundo. En este mismo año, la red GENSO dejó de recibir mantenimiento por parte de sus creadores y colaboradores, dejando un gran vacío en el rastreo de satélites universitarios.

Figura 15

Cobertura LEO proyectada para la red GENSO



Nota. Melville (2007).

2.7 SatNOGS

Satellite Networked Open Ground Station (SatNOGS) es una plataforma basada en estándares de código abierto que actualmente se está desarrollando en la Universidad de Atenas, Grecia. Esta tiene como propósito esencial crear una pila modular y escalable de estaciones terrenas para el seguimiento de satélites en órbita LEO (Charitopoulos, et al., 2015). SatNOGS proporciona la creación de una red de estaciones terrenas, que son fáciles de construir con materiales disponibles y asequibles; estas son diseñadas para integrarse con tecnologías existentes y futuras, con una variedad de instrumentos para operar la estación. El diseño se centra en una forma sencilla de construir, utilizando componentes de tipo COTS y materiales de construcción rápida, utilizando impresoras 3D.

De acuerdo con Charitopoulos (2015), todos los diseños están disponibles bajo licencia de *open hardware* (CERN OHL v1,2), maximizando la reproducción dentro de la comunidad que coopera con el desarrollo de este proyecto. Los subsistemas de recepción y transmisión de radio (RF, Rx, Tx) utilizan bandas de radioaficionados (2 m y 70 cm de longitud de onda) implementadas a través de antenas Yagi-Uda, *Low Noise Amplifier* (LNA) y *Software Defined Radio* (SDR). El software del cliente/servidor se desarrolla en Python (incluyendo el *framework* Django y la biblioteca PyEphem). Todos los códigos están bajo licencia *open source* (AGPL v3 y GPL v3). Los operadores de satélites tienen la información sobre los satélites en una base de datos disponible a través de una interfaz web y de aplicaciones para todo lo relacionado con el programador de red.

La *Global Management Network* (GMN) es una parte clave de la pila SatNOGS y consiste en la conexión de varios observadores con múltiples estaciones terrenas, lo que permite el rastreo y vigilancia de los satélites LEO desde múltiples lugares en todo el mundo. Todos los datos recogidos serán accesibles al público a través de su sitio web.

La SatNOGS provee la base para:

- La fabricación a gran escala y el despliegue de estaciones terrenas asequibles.

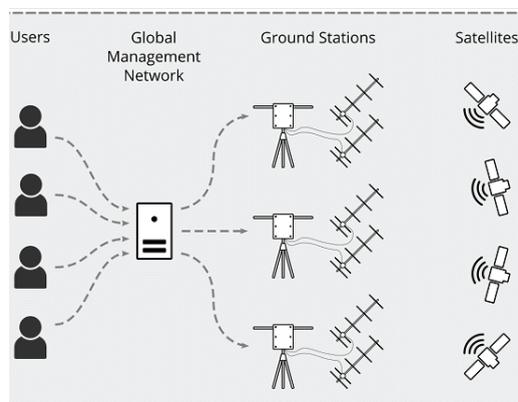
RED INTELIGENTE DE ESTACIONES TERRENAS - ADSGS

- Diseño modular para la integración de tecnologías existentes y futuras.
- Una plataforma para una variedad de instrumentos para operaciones de estaciones terrenas.
- Una plataforma adecuada para la red de estaciones terrenas (de uno a uno, de uno a muchos, de muchos a muchos).
- El enfoque está basado en la comunidad de desarrollo.
- La solución permite la automatización masiva de estaciones terrenas por parte del operador, basada en estándares abiertos.

Según Charitopoulos (2015), los componentes básicos de SatNOGS son: (1) red SatNOGS, (2) Conectividad de red, (3) Cliente SatNOGS (para conexiones con la red SatNOGS), (4) Uso de gPredict y Gqrx como software para seguimiento, (5) RaspberryPi, (6) UdroidU3, (7) Beaglebone Black, (8) Un PC, (10) Rotor SatNOGS, (11) Rotor comercial (YAESU G5500), (12) Antena UHF (yagi o helicoidal), (13) Antena VHF (yagi o helicoidal).

Figura 16

Visión Global del Concepto SatNOGS



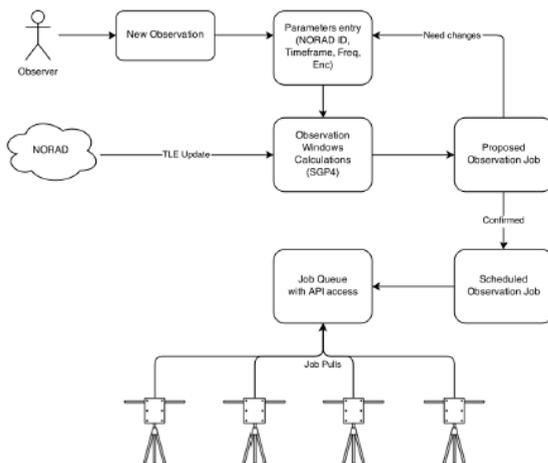
Nota. White et al., (2015). *Users:* usuarios; *Global Management Network:* Red de administración global; *Ground Stations:* Estaciones Terrenas; *Satellites:* Satélites.

La arquitectura básica de SatNOGS se muestra en la Figura 16, la cual se encuentra compuesta por los usuarios, el GMN, las estaciones terrenas y los satélites. De la misma manera, la SatNOGS implementa cuatro subproyectos como parte de la pila general de la red (White et al., 2015).

La red SatNOGS. Proporciona la programación y detección de servidores, así como una interfaz de gestión global para facilitar las múltiples operaciones de la estación terrena de forma remota y un observador puede aprovechar toda la red SatNOGS de estaciones terrenas en todo el mundo. Los usuarios pueden acceder a ella a través de una interfaz web, brindando detalles sobre la observación que desean realizar (qué satélite, banda, señal de codificación, etc.), (ver Figura 17). Esta información es utilizada por el sistema para calcular una posible ventana de observación desde la estación terrena disponible conectada a la red.

Figura 17

Diagrama de Programación de Observación de la Red



Nota. White et al., (2015). *Observer*: Observador; *Next Observation*: Siguierte Observación; *Parameters Entry (NORAD, ID, Timeframe, Freq, Enc)*: Parámetros de Entrada (NORAD, ID, Marco de Tiempo, Frecuencia, Enc) *Need Changes*: Nuevos Cambios; *Proposed Observation Job*: Trabajo de Observación Propuesta; *Confirmed*: Confirmado; *Scheduled Observation Job*: Trabajo de Observación Programado; *Job Queue with API access*: Cola de Trabajos con acceso API; *Observation Windows Calculations (SGP4)*: Cálculos de la Ventana de Observación (SGP4); *TLE update*: Actualización TLE.

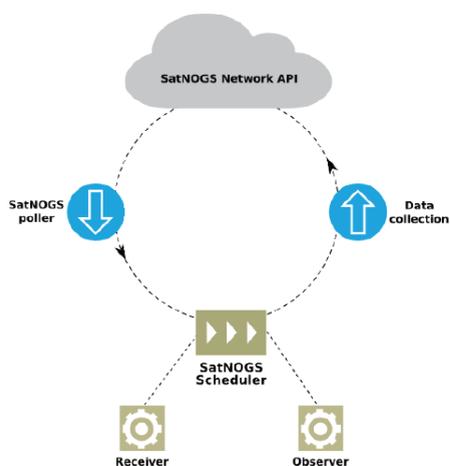
Base de Datos SatNOGS. Guarda la información de los *transponders* de los satélites, como las frecuencias de transmisión y la modulación, así como la información emitida por el *North American Aerospace Defense Command* (NORAD) sobre el número de catálogo y el nombre de cada satélite. Esta base de datos es de acceso abierto. La información aquí recogida es usada por la red para posibles observaciones.

Cliente SatNOGS. Consta de un software que se ejecuta en el computador. Controla el software de la estación terrena, también recibe la operación programada desde la red, registra una observación y la devuelve. En la Figura 18, se puede ver la interacción del cliente con la red.

Estación Terrena SatNOGS. Hay diseños disponibles de los componentes de la estación terrena, entre los que se encuentran instrumentos, tales como: un sistema de seguimiento (rotor), antenas, LNA, y la conexión con el cliente, los cuales pueden ser elaborados con una impresora 3D.

Figura 18

Interacciones y Componentes del Software Cliente



Nota. White et al., (2015). *SatNOGS Network API*: Red SatNOGS API; *SatNOGS poller*: Sondeador SatNOGS; *SatNOGS scheduler*: Programador SatNOGS; *Receiver*: Receptor; *Observer*: Observador; *Data Collection*: Recolección de datos.

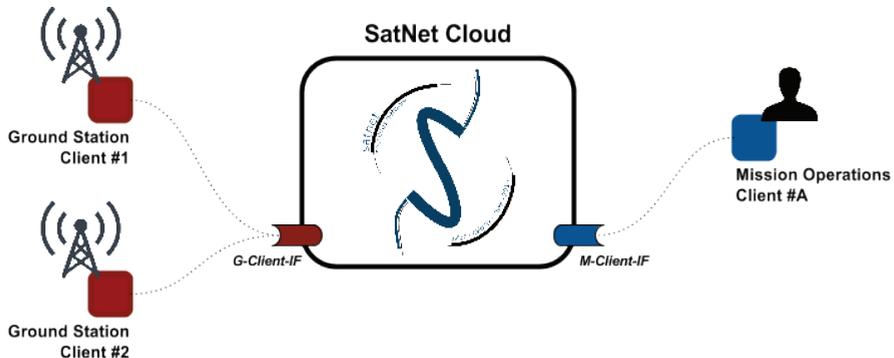
2.8 SATNet

En el 2013, surgió la red SATNet desarrollada actualmente por un grupo de investigadores de la Universidad de Vigo en España (Uvigo), del *California Polytechnic State University* (Calpoly) de Estados Unidos y del *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* (INPE) de Brasil.

SATNet es una red de estaciones terrenas con un número creciente de nodos alrededor del mundo. Su objetivo es mantener un control más eficiente del rastreo de satélites pequeños. En el futuro y con muchas estaciones terrenas, será fácil incrementar el tiempo de contacto con la señal del satélite. De acuerdo con Tubio (2013), la arquitectura básica de SATNet es conformada por conceptos que se encuentran representados en bloques, tal y como se puede observar en la Figura 19. La arquitectura de la red se encuentra estructurada por Servidores Distribuidos: a) N-System: nodo de red principal; b) G-Client: estación terrena cliente; c) M-Client: operador de la misión cliente; d) servicios proporcionados por el N-System central; y e) *Client*: Librería de acceso remoto.

Figura 19

SATNet – Concepto Básico de la Red



Nota. Tubio (2013). *SATNet Cloud*: Nube SATNet; *Ground Station Client (1)*: Cliente (1) de la Estación Terrena; *Ground Station Client (2)*: Cliente (2) de la Estación Terrena; *GClient*: Cliente G; *MClient*: Cliente M; *Mission Operation Client # A*: Cliente #A Operación de la Misión.

RED INTELIGENTE DE ESTACIONES TERRENAS - ADSGS

Cada nodo central crea una subred aislada, es decir, un enfoque similar a los enrutadores IP. En este proceso, los usuarios deciden interconectar los nodos para ajustar la escala de las subredes. Como resultado se encontrará que los nodos de interconexión tienen la capacidad de crear estabilidad, redundancia y privacidad.

La red SATNet está diseñada para ofrecer una solución basada en computación flexible en la nube. Esta solución permite el uso de los recursos en la nube, y así, las estaciones terrenas tipo CubeSat tengan acceso.

Este repositorio contiene el código fuente de un cliente genérico de la red SATNet. Dicho código de software es de código abierto y posibilita a la estación utilizar el TNC para modular/desmodular las tramas que se reciben/envían desde o hacia el satélite.

Los elementos que conforman la red, se ilustran en la Figura 19, así:

- Un conjunto de software tipo cliente para operar los satélites de forma remota, definidos como clientes de operaciones de la misión o *M-Clients*.
- Un conjunto de software tipo cliente para proporcionar acceso directo a los servicios de las instalaciones de la estación terrena, definidos como clientes de la estación terrena o *G-Clients*.
- Un sistema en la nube para la coordinación de las comunicaciones entre estos dos tipos de clientes, denominado sistema de comunicaciones de red o *NSystem*. Es importante tener en cuenta que *NSystem* no es un único servidor, sino un sistema basado en computación en la nube. De esta forma, y dependiendo de las decisiones de implementación posteriores, este sistema de nube puede evolucionar hacia una red de servidores interconectados que proporcionen el servicio necesario.

El *NSystem* implementa las siguientes interfaces para permitir la comunicación automática entre entidades de software, sin necesidad de interacción humana directa:

- Interfaz *G-Client* (*G-Client-IF*), permite que los clientes de la estación terrena puedan conectarse a los servicios de red.

- Interfaz *M-Client* (M-Client-IF), permite al cliente operar la misión, así como conectarse a los servicios de la red.
- Interfaz *DirectClient* (Direct-IF), posibilita a los clientes que operan la misión, conectarse con los clientes de la estación terrena.

La implementación actual de la red SATNet sólo proporciona las interfaces de G-Client-IF y M-Client-IF, así como, la conexión directa si se deja para versiones futuras. Esta decisión fue tomada dado que es posible incorporar la retroalimentación de la comunidad. Una vez que se haga el despliegue inicial, la definición de esta interfaz remota de cliente a cliente, se puede adaptar a las necesidades operativas específicas de los desarrolladores de CubeSat.

Aunque este enfoque permite el uso de estaciones terrenas totalmente automatizadas, también ofrece la posibilidad de intervención humana durante el funcionamiento de los CubeSats. Este es un requisito básico del software, dado que la *International Amateur Radio Union* (IARU) requiere la presencia de un operador humano en las estaciones remotas si se utiliza una banda de radiofrecuencia amateur (Garpestad, 2015). La red SATNet ofrece tanto estaciones terrenas totalmente automatizadas como aquellas a cargo de operadores humanos, para permitir el uso de diferentes segmentos de tierra como parte de la misma red.

En el capítulo 3, se retomará esta red como parte de los componentes externos de la arquitectura ADSGS propuesta.

En la Tabla 2, se ilustra un resumen del estado del arte realizado en la GSN, en donde se caracterizan algunos aspectos comunes, como el paradigma utilizado por cada red, el tipo de información al que se puede acceder de forma remota, si su administración es federativa, si el planificador es centralizado o distribuido, qué tipo de seguridad utiliza, dónde se encuentran los códigos fuente, y si hay acceso o no, qué tipo de licencia de software tienen, y finalmente, el país donde fue o está siendo desarrollada.

Tabla 2

Comparación de las Diferentes Redes de Estaciones Terrenas

	Mercury	GSN	MC3	GENSO	SatNOGS	SATNet
Paradigma	Cliente Servidor	Cliente Servidor	Legalidad GCA	Hibrido P2P	Centralizado	Distribuido Red
Remoto GS	Datos	Datos	Datos	Audio/ Datos	Datos	Datos
Administración federativa	Sí		Sí		Sí	Sí
Programación			Central	Distribuida	Central	Híbrida
Seguridad	Central		Central	Central	Central	Distribuida
Recursos	Fuente Olvidada (2003)			No es compartida	Github ¹	Github ²
Licencia	GPLv2				GNU Affero GPL	Apache v2
Automatizada	Sí					Sí
Usa IA (Inteligencia Artificial)						
País	Estados Unidos	Japón	Estados Unidos	Agencia Espacial Europea	Grecia	España/ Estados Unidos / Brasil

A partir de la tabla anterior, se destaca que ninguna de las estaciones terrenas ha utilizado la Inteligencia Artificial en su desarrollo, y sólo la red Mercury y SATNet utilizan algún tipo de automatización. Así mismo, en la Tabla 3 se describe lo siguiente: la misión de cada una de estas redes, las ventajas, desventajas y el tipo de bandas de frecuencia que soportan cada una de ellas en las estaciones terrenas.

¹ Disponible en: <<https://github.com/satnogs>>. Recuperado en: 20 Abr. 2017

² Disponible en: <<https://github.com/satnet-project>>. Recuperado en: 20 Abr. 2017

Tabla 3

Misiones, ventajas, desventajas y bandas de frecuencia

Red	Misión, uso y aplicabilidad	Ventajas, oportunidades y fortalezas	Desventajas, limitaciones y debilidades	Banda de Frecuencias
Deep Space Network (DSN) Red de Espacio Profundo	Observación al espacio profundo			
Air Force Satellite Control Network (AFSCN) Red de Control satelital de la Fuerza Aérea	Brinda soporte a los satélites del DoD de los Estados Unidos.	Primeras redes para monitorear satélites de gran tamaño	Infraestructura Compleja Altos costos operacionales	S y L
MERCURY Mercurio	<ol style="list-style-type: none"> 1. Brinda soporte a las operaciones de microsátélites. 2. La arquitectura para los multisatélites y multiestaciones. 3. Brinda la autonomía y el control, así como la operación remota de OSCAR. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rutinas de operación automatizadas. 2. Documentación completa de la arquitectura y sus componentes. 3. Bajo costo de la estación terrena. 4. Transmisión dúplex completa. 5. Lenguaje de control y mando creado como un marco, que permite trabajar con estaciones terrenas universitarias de todo el mundo. 	Los servicios son gestionados de forma gubernamental, esto puede provocar el fracaso de la misión si no se sincronizan todas las redes.	HF, VHF y UHF

RED INTELIGENTE DE ESTACIONES TERRENAS - ADSGS

<p>Ground Station Network (GSN) Red de Estación Terrena</p>	<p>1. Crea un Sistema de red basado en estaciones terrenas ubicadas en Japón que son controladas remotamente a través de internet, usado en la obtención de imágenes provenientes de nanosatélites y picosatélites.</p>	<p>1. Cronograma de actividades específicas (centralizadas) según la necesidad de cada estación terrena. 2. Configuración remota del hardware de las estaciones. 3. Red controlada remotamente a través de Internet.</p>	<p>Los usuarios pueden tener problemas de programación dado que es posible que dos operadores deseen utilizar la misma estación terrena al mismo tiempo.</p>	<p>UHF, VHF y S</p>
<p>Mobile Cubesat Command and Control (MC3) Comando y control móvil de Cubesat</p>	<p>1. Traza el programa del picosatélite de la Constelación Colony.</p>	<p>1. La estación puede automatizar el seguimiento y las comunicaciones con el satélite. 2. Permite el acceso remoto a la estación.</p>	<p>Este fue desarrollado sólo para algunos picosatélites y su código no es abierto.</p>	<p>S y UHF</p>
<p>Global Educational Network for Satellite Operation (GENSO) Red Educativa Mundial para la Operación de Satélites</p>	<p>1. Permite la comunicación entre los satélites de la universidad. 2. Crea una red internacional de estaciones terrenas universitarias y de radio aficionados amateur.</p>	<p>1. Usa un software de acceso abierto basado en Java. 2. Es parte de la comunidad de radioaficionados. 3. Tiene acceso y control remoto y programación automática de estaciones terrenas.</p>	<p>En 2012 dejó de recibir mantenimiento por parte de sus creadores y colaboradores.</p>	<p>VHF, UHF y S</p>

<p>SATNOGS</p>	<p>Permite el seguimiento por satélite con el objetivo de compartir información con todas las redes de estaciones terrenas ubicadas en todo el mundo, para publicarla posteriormente en el sitio web de las redes.</p>	<p>Contempla cuatro módulos para cada estación terrena:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Programación y detección de servidores. 2. Bases de datos con la información de las características de los satélites. 3. Manejo, automatización y programación de software. 4. Diseños disponibles de los componentes para implementar las estaciones terrenas. 	<p>Está orientado a la creación de software. Se encuentra en desarrollo, por esta razón, no hay evidencia sobre cómo funciona.</p>	<p>VHF, UHF y S</p>
<p>SATNet</p>	<p>Seguimiento de picosatélites tipo Cubesat. Para la comunicación, navegación y otros servicios, como la recopilación de datos meteorológicos.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Las estaciones terrenas que desean unirse a esta red no necesitan cambiar su hardware. 2. Tienen acceso de código abierto a la red. 3. Cuenta con flexibilidad en la administración de la Estación Terrena. 	<p>Esta red se está probando en este momento. En desarrollo.</p>	<p>VHF, UHF y S</p>

