

Sistema de telecomunicaciones para el proyecto ecuatoriano Plataforma de Gran Altitud

Alvarez Robin, Velasteguí Valeria, Guamialamá Diego

Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información (DETRI)

robin.alvarez@epn.edu.ec

Resumen

El presente trabajo de investigación consiste en desarrollar todo un sistema de comunicaciones orientado a dar servicios IP de internet, telefonía y difusión de radio y tv del Estado, para el Proyecto Plataforma de Gran Altitud (PGA) desarrollado entre la EPN y la FAE. Para conseguir este propósito, se revisó el estado del arte sobre sistemas de comunicaciones basados en PGA en el que se investigó sobre las posibles arquitecturas, frecuencias de funcionamiento y equipos comerciales disponibles. La arquitectura final fue implementada paso a paso, partiendo desde los servidores en ambiente LINUX. Estos servicios, fueron enviados desde la estación terrena hasta la nave (PGA) mediante un enlace Punto-Punto (PTP). Desde la PGA, aquellos servicios son difundidos hasta la zona de cobertura (huella) mediante un enlace punto-multipunto (PMP), y desde aquí, mediante una segunda fase de acceso inalámbrico o última milla, mediante un Access Point con tecnologías WiFi, son distribuidos hasta los usuarios finales. Finalmente, en la parte del usuario final se dispone de computadores portátiles con características, en hardware, de performance medio. Sobre este, se implementó una interfaz gráfica que permite al usuario escoger uno de los servicios ya descritos.

Palabras claves: Plataformas de Gran Altitud, HAP, High Altitude Platforms, carga útil.

1 Introducción

Previo a la determinación de los requerimientos de diseño del sistema de telecomunicaciones para la PGA, es de capital importancia comprender las bases teóricas de estas y su influencia determinante en aquella área. También es importante recalcar que todo lo expuesto a continuación tiene que ver única y exclusivamente con el área de telecomunicaciones. El resto de áreas del proyecto (modelos matemáticos, energía, control, aeronáutica, etc) emitirán sus respectivos informes y publicaciones.

1.1 Idea básica del origen de las PGAs y consideraciones de ubicación en la estratósfera

La idea básica que dio origen a la creación de los satélites geostacionarios fue la existencia de una zona en la que las fuerzas de atracción entre la Tierra y la Luna alcanzan un equilibrio. De manera similar, la idea básica para mentalizar una *Plataforma de Gran Altitud (PGA)* o en inglés *High Altitude Platform (HAP)*, es que en la estratósfera existe una zona de mínimo viento ubicada entre 18 y 22 km. En la Figura 1, se ilustra un perfil medio de la velocidad de viento en la atmósfera superior. Esta presenta un mínimo local alrededor de la altitud de 20 – 25 km. Se hace mayor a altitudes superiores a 25 km y es cuatro veces mayor en la altitud de 50 km respecto a la de

20 km. Sin embargo, cabe destacar también que este perfil varía en función de la latitud y longitud considerada, de modo que sería muy arriesgado generalizar este comportamiento y sería un error basarnos en esto para hacer consideraciones particulares. Este estudio es realizado por una de las áreas del proyecto (modelos matemáticos) y permitirá tener un perfil real para nuestra ubicación.

Uno de los mayores retos que enfrenta la idea de las PGAs, es resolver la interrogante de, una vez construida la nave, cómo lograr ubicarla en dicha zona de mínimo viento atravesando la zona de máximo viento alrededor de 14 km.

En esta gráfica también podemos apreciar que en la zona de alrededor de 80 km existe una zona de mínimo viento ideal para cumplir con los propósitos de las PGA pues prácticamente la velocidad del viento es nula y por tanto se tendría un consumo mínimo de los motores destinados a mantener a la PGA casi estática. En este caso, el reto de atravesar por la zona de máximo viento que queda alrededor de 50 km, sería más exigente que la anterior.

Por otro lado, al ascender por la tropósfera, la temperatura desciende hasta llegar a tener $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 2) o incluso $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este también es un reto crítico que se debe enfrentar ya que los equipos electrónicos no resisten

tan bajas temperaturas.

En cuanto a la variable de densidad atmosférica, esta disminuye significativamente al aumentar la altitud. La Tabla 1 muestra la densidad y la presión atmosféricas en diversas altitudes.

La densidad atmosférica a una altitud de 50 km es muy inferior a la de 20 km, en una relación aproximada de 1/90. Esto significa que la nave aérea situada a 50 km de altitud necesita 90 veces más de gas helio que la situada a 20 km y requiere una longitud de la estructura 4,5 veces mayor. Suponiendo que a una altitud de 20 km se necesita una nave de 200 m de longitud para aguantar un cierto peso, a una altitud de 50 km se requiere una nave de 900 m de longitud para el mismo peso. Es absolutamente imposible construir una nave aérea tan enorme con la tecnología actual y la de un futuro próximo.

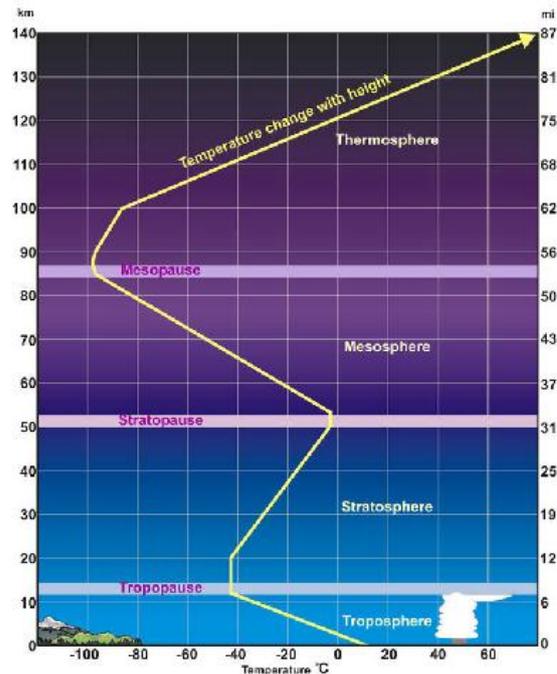


Figura 2. Gráfica de Temperatura vs Altura a medida que se asciende por la tropósfera.

Tabla 1. Densidad atmosférica y presión atmosférica en la estratósfera.

Altitud km	Densidad atmosférica kg/m ³	Presión hpa
0	1,22	1,013
15	0,195	121
20	0,0889	55,3
25	0,0401	25,5
30	0,0184	12
50	0,00103	0,789

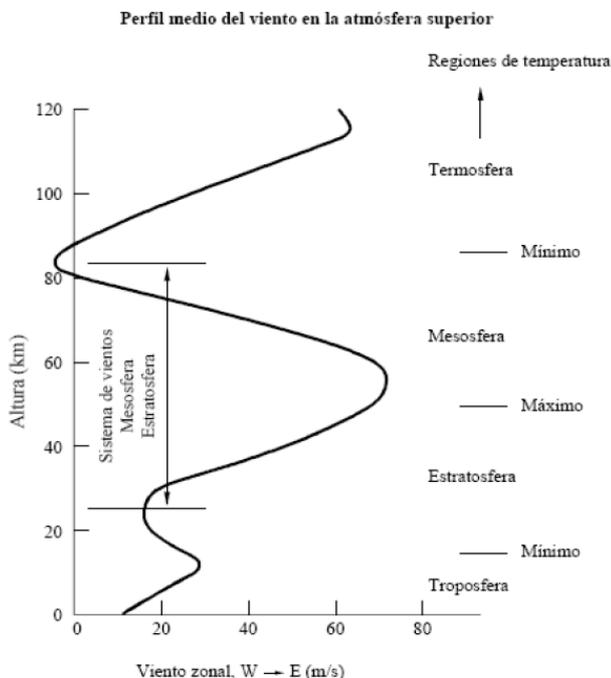


Figura 1. Gráfica de altura vs velocidad del viento. Perfil medio del viento en la atmósfera superior. La velocidad del viento presenta un mínimo local alrededor de la altitud de 20 – 25 km. Se hace mayor a altitudes superiores a 25 km y es cuatro veces mayor en la altitud de 50 km respecto a la de 20 km (tomado de informe del comité de investigación espacial (COSPAR), Akademie-Verlang, 1972).

1.2 Definiciones de PGA dadas a nivel internacional

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) es el ente internacional, de la cual el Ecuador es miembro signatario, que regula las decisiones en lo que tiene que ver con el uso del espectro radioeléctrico para evitar posibles interferencias entre servicios de comunicaciones.

En cuanto a PGAs todavía no existen *Regulaciones* pero si han emitido *Recomendaciones*.

La UIT, en estricto rigor, en el número 1.66A del RR, define a una HAP de la siguiente manera:

Estación situada a una altitud de 20 a 50 km y en un punto nominal, fijo y especificado con respecto a la Tierra.

Este concepto tiene las siguientes implicaciones:

Si la nave se encuentra por debajo de 20 Km, entonces ya no cae dentro de la definición de PGAs.

Como detallaremos más tarde, este concepto, tendrá implicaciones y hará que se puedan utilizar frecuencias distintas a las recomendadas por la UIT, y que sean más convenientes desde el punto de vista de existencia de equipos comerciales.

1.3 Tipos de PGAs y otros proyectos de PGAs en el mundo

En cuanto a Plataformas de Gran Altitud, tradicionalmente han sido consideradas como tales las siguientes: globos, dirigibles, aeroplanos tripulados y no tripulados.

De todas estas posibilidades, la que interesa dentro del presente proyecto, debido a su estabilidad espacial similar a la de un satélite, es tipo dirigible (airship). Por lo anterior, nos centraremos en analizar el estado del arte sobre proyectos realizados empleando un **dirigible (airship)**.

Es importante saber que los países desarrollados ya han iniciado, y algunos terminado, proyectos de investigación de tipo airship, pero ninguno ha logrado todavía colocarlo en la estratósfera a una altura alrededor de 20 km, por lo que todavía es un reto mundial.

De todos los anteriores, para nuestro proyecto, hemos investigado principalmente los proyectos *basados en airships*: SKY STATION (USA, iniciado en 1996), SKY-NET (JAPÓN, iniciado en 1998), Lockheed Martin (USA, iniciado en 2003) y el más reciente CAPANINA (UNIÓN EUROPEA, iniciado en el 2003 y terminado en el 2007). Solo como referencia, este último proyecto tuvo un costo de 6 millones de euros y en este consorcio participaron 64 investigadores de universidades y de empresas relacionadas con las distintas actividades, entre ellas: National Institute of Information and Communications Technology Of Japan (NICT) y la National Stratosphera communications Inc.

1.4 Estado del arte acerca de sistemas de telecomunicaciones para PGAs

A continuación pondremos un extracto de los logros conseguidos, a nivel internacional, dentro del área de carga útil en la parte de servicios de telecomunicaciones para PGAs:

- Primeramente, se realiza un resumen de las regulaciones existente para PGAs, en el área de carga útil (telecomunicaciones), emitidas por la UIT.

- Después, se resume los logros más destacados en el área de carga útil (telecomunicaciones), conseguidos en proyectos precedentes que emplean PGAs. Luego de este estudio, se realiza una discusión con el propósito de *tomar una decisión sobre las frecuencias* y la arquitectura del sistema de comunicaciones de banda ancha *que emplearemos* en nuestro PROYECTO PGA - FAE - EPN.

- Basados en lo anterior, se llega a la determinación de los requerimientos de diseño del sistema de comunicaciones.

- Todo lo anterior permite, tal como debe ser, emitir los objetivos tanto general como específicos de la presente investigación.

1.5 Elección de las frecuencias de trabajo

Antes de citar las regulaciones de la UIT, conviene citar los tipos de bandas no licenciadas que existen. Para uso de comunicaciones inalámbricas, tenemos disponibles dos tipos de bandas NO LICENCIADAS

- Bandas: ISM (Industrial-Scientific-Medical) Rango 1: 902 - 928 MHz, Rango 2: 2.4 - 2.4835 GHz y c) 5.725 - 5.85 GHz.
- Bandas: U-NII (Universal Networking Information Infrastructure)

Estas operan en cuatro rangos:

U-NII Low: 5.15-5.25 GHz. Límite de potencia a 50 mW.

U-NII Mid: 5.25-5.35 GHz. Límite de potencia a 250 mW.

U-NII Worldwide: 5.47-5.725 GHz. Límite de potencia a 250 mW.

U-NII Upper: 5.725 to 5.825 GHz. Límite de potencia a 1 W.

Las ventajas, de trabajar con equipos en bandas no licenciadas son las siguientes:

- No tiene ningún costo.
- Para su utilización, basta con una simple comunicación a la CONATEL-SENATEL del uso de tales frecuencias y de los servicios que se van a dar.
- Las soluciones comerciales en cuanto a equipos que trabajan en bandas no licenciadas, son más económicos que los equipos que trabajan en bandas licenciadas.

La desventaja, es que estaríamos a merced de interferencias. Respecto a este punto, en nuestro caso, no tendremos este problema ya que serán soluciones destinadas a dar servicios en zonas rurales, en donde justamente el problema que tratamos de resolver es que no tenemos ninguna señal de telecomunicaciones.

Por lo anterior, en el presente proyecto, se buscarán soluciones comerciales en *frecuencias no licenciadas*.

1.6 Regulaciones de la UIT en cuanto a frecuencias de comunicaciones con PGAs

Las reglas de asignación y uso del radio espectro para PGA están documentadas en la *Radio Regulación Internacional* (RR por sus siglas en inglés) las cuales son el resultado de negociaciones entre los estados miembros de la *Conferencia Mundial de Radio Comunicación CMR* (en inglés *WRCs, World Radiocommunication Conferences*).

Hoy en día, *no existe una regulación bien definida* en cuanto al espectro en que puedan operar las PGAs, existiendo solo algunas *recomendaciones* para evitar posibles interferencias con algunos sistemas existentes.

Para la distribución de servicios a través de estas plataformas, la ITU ha decidido asignar una disponibilidad de bandas, de acuerdo con las *Recomendaciones* que se indican a continuación:

La banda de frecuencias actualmente identificada en todo el mundo para este tipo de aplicaciones PGA, formando parte del servicio fijo, es la banda entre 47,2-47,5 GHz (300 MHz para el trayecto descendente) y 47,9 - 48,2 GHz (otros 300 MHz para el trayecto ascendente). Estas bandas se designan como bandas en 47/48 GHz. La atribución mundial al servicio fijo para aplicaciones PGA se efectuó en 1997, concretamente en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de la UIT celebrada en Ginebra en ese año (CMR-97).

La última CMR celebrada en Estambul (Turquía) en el mes de Mayo del año 2000 (CMR-2000) designó, para algunos países (toda América, Rusia, Japón, Corea, etc), otras bandas de frecuencias inferiores: entre 27,5 - 28,35 GHz para el trayecto descendente, y 31,0 - 31,3 GHz para el trayecto ascendente, bandas denominadas 28/31 GHz. La justificación para esta nueva designación, era la dificultad de utilizar las bandas 47/48 GHz en zonas o regiones de lluvia intensa.

En cuanto a esto, hay mucha más información pero, en vista de que, a estas frecuencias tan altas (47,2-47,5 GHz y 47,9-48,2 GHz; 27,5-28,35 GHz y 31-31,3 GHz), los sistemas electrónicos y de comunicaciones aún están en proceso de desarrollo y por tanto su disponibilidad en el mercado es muy restringido o inexistente, no daremos mayores detalles. Además, cualquier intento de implementación en estos rangos de frecuencias, demandarían sistemas de seguimiento de antenas con requerimientos muy rígidos. Por todo lo anterior, se decide buscar sistemas comerciales en bandas no licenciadas y a frecuencias lo más bajas posible, que no requieran sistemas de seguimiento demasiado exactos.

1.7 Estado del arte en cuanto proyectos precedentes basados en PGAs

Si bien no existe todavía ningún sistema PGA en operación comercial, hay proyectos notificados a la UIT para su inscripción en el Registro Internacional de Frecuencias. Uno de estos sistemas notificado a la UIT, es el conocido como "SKY STATION" y sus características están contenidas en la Recomendación UIT-R F.1500.

Por otro lado, a pesar de que la bibliografía sobre HAPs es bastante amplia, muy pocos proyectos han llegado a la implementación práctica y de estos, casi no existe documentación que demuestre las pruebas realizadas sobre servicios de telecomunicaciones basadas en HAPs. A continuación vamos a resumir los más recientes y relevantes proyectos precedentes a nivel mundial que creemos, algo aporta a los objetivos que se persigue en el presente proyecto.

Una comparación de las tecnologías modernas de telecomunicaciones es realizada en [1]. En esta fuente, en el 2004, R&M International Consulting Group Ltd Engineering, Regulation & Business, contratada por el gobierno chileno, realiza una comparación entre las Nuevas Tecnologías (WiMax, UWB, FSO y HAPS) considerando dos puntos de vista, el técnico y el reglamentario a nivel internacional, y concluye cuál de ellos sería el más conveniente para el caso chileno. En la parte técnica concluye que "los resultados de la investigación tecnológica muestran las facilidades y atributos técnicos que poseen estas tecnologías, lo cual permite comprender la forma técnica de su operación, los tipos de topologías y arquitecturas de red factibles de utilizar, la utilización del espectro de radio frecuencias, las fortalezas, beneficios y servicios que ofrecerán al usuario en general. Estas características técnicas asociadas a cada una de las tecnologías mencionadas, se relacionan con las facilidades que ellas podrán ofrecer como redes de acceso hasta los usuarios finales, *para su utilización en servicios de Banda Ancha y comunicaciones hacia las zonas aisladas de nuestro país*". En lo que tiene que ver con la parte de HAPs, menciona que: "En relación a la implementación de redes y servicios utilizando HAPs en Chile, se concluye que esta tecnología está aún en etapa de definiciones por lo cual se recomienda un seguimiento a la espera de estandarizaciones internacionales".

De este estudio podemos emitir la siguiente conclusión: visto desde un punto de vista tecnológico, no vendría apostar por las HAPs, de entre las posibles tecnologías modernas. Sin embargo, siendo una opción con muchas expectativas, es factible realizar la presente investigación pues, de obtener buenos resultados, permitirá realizar las mismas funciones que las de un satélite geostacionario pero a un costo muy inferior debido básicamente a que no se requiere de plataformas de lanzamiento.

Por otra parte, en Chile también se realizó el proyecto denominado Globo Antena [2]. En este proyecto se fabricó un globo tipo zeppelin de estructura no rígida, cuyo volumen de helio fue de 26 m³. Este pudo levantar hasta

7 kg de carga útil. Si bien se realizan aportes teóricos sobre comunicaciones de datos de control, al no dar datos de pruebas realizadas, se puede inferir que no existieron pruebas reales. Peor aún, del dato de 7 kg de carga útil, se puede inferir que nunca tuvieron alguna solución de comunicaciones de banda ancha. No existe ningún dato de posible arquitectura de comunicaciones de banda ancha y no se menciona nada sobre sistemas de seguimiento de antenas, asunto de vital importancia para mantener los radioenlaces.

Alejandro Aragón-Zavala, et al, en su libro *High-Altitude Platforms for Wireless Communications* [3], realizan una investigación de todos los proyectos sobre HAPs. Lo más importante en cuanto a nuestro ámbito de servicios de telecomunicaciones, tenemos lo siguiente:

Japanese Activities

In Japan, national research and development (R&D) projects on stratospheric platform systems started in 1998.

At present, there are two organisations related to stratospheric technology (aircraft and airship): JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) and NICT (National Institute of Information and Communications Technology).

Skynet was the name of a project for the development of a balloon based on stratospheric platforms (SPF) capable of operating at an altitude of 20 km and carrying on board mission payloads for communications, broadcasting and environmental observations.

The airship had a semi-rigid hull of ellipsoidal shape with an overall length of nearly 200 m.

...A maximum user data rate of 100 Mb/s in the downlink and a maximum 6 Mb/s in the uplink could be expected. NICT has not conducted any experiments flying either aircraft or airships at stratospheric altitudes to date.

Conclusión: Como podemos ver, en este proyecto no se realizó ningún experimento real, lo cual implica ausencia de resultados prácticos, y por ello en la documentación buscada sobre este proyecto, no se tiene información o dato de posible arquitectura de comunicaciones de banda ancha y no se menciona nada sobre sistemas de seguimiento de antenas, asunto de vital importancia para mantener los radioenlaces de banda ancha.

Sobre el proyecto Skystation: Menciona que “es un proyecto muy ambicioso que pretende funcionar en las ciudades más grandes de todo el mundo; razón por la cual se plantea el funcionamiento solo en la banda de frecuencias de 47 GHz. Este proyecto prevee prestar servicio desde un Zeppelin con capacidad de carga superior a la tonelada, situado a 21 km de altura. El tamaño físico

será de 157 metros de largo y 62 de diámetro y la fuente de energía serán unos paneles solares fijados en la parte superior del globo”.

Conclusión: Ya que no se tiene ninguna noticia sobre resultados prácticos, solo ha quedado en un simple planteamiento de proyecto.

Korean Activities: Sobre su actividad de investigación sobre HAPs, menciona lo siguiente:

Research activities on stratospheric platforms started in Korea in December 2000.

Korean stratospheric platform projects have been included as part of a 10-year program, which consists of three phases. The aim is to develop an unmanned stratospheric airship and ground systems for basic operation and control of the airship.

The first phase was concluded, in which a 50 m scale-size unmanned airship was built. The second phase, started recently, aims to demonstrate the feasibility of developing a stratospheric system. It will show how station-keeping could be used at around 20 km altitude, including some communications relay tests with ground facilities.

For the third phase, a full-scale 200 m airship will be developed. It will carry mission payloads (telecommunications, remote sensing, etc.) on board. This airship will take 10(KW) of power and weigh up to 1000 kg. The stratospheric system will consist of five subsystems: platform (airship); telemetry, tracking and command; ground station control; mission payload; and ground support.

With regards to telecommunications, ETRI's activities commenced in February 2002.

Additionally, ETRI has played an important role within the WRCs, where they were instrumental in extending the use of the 28/31 GHz band for secondary use within ITU-R Region 2.

Some core technologies and studies include development of a direct beamforming multi-beam receiving system for S-band and Ka-band and mechanical beamsteering for 47/48 GHz horn antennas, and interference analysis and sharing studies for WCDMA and 28/31 and 47/48 GHz.

Conclusión: Como podemos ver, en este proyecto tampoco se consiguió ningún resultado en lo que tiene que ver con un sistema de telecomunicaciones de banda ancha.

Capanina Project

Este proyecto fue auspiciado por la Unión Europea dentro del Sexto Programa Marco. A nuestro parecer, luego de la revisión minuciosa del estado del arte, creemos que es el proyecto que, al menos, ya menciona aspectos sobre servicios de telecomunicaciones basados en un HAP. Debido a la importancia de lo realizado dentro de nuestra área, citamos textualmente lo más relevante encontrado en el documento oficial (paper) publicado y disponible en internet [4]:

Broadband trials to fixed users from aerial platforms

The project is also demonstrating the different broadband services/applications. Here we describe the System Testbed and equipment used in the trials.

Trial 1 took place between August-October 2004 in Pershore, UK, by means of a spherical aerostat, capable of operating at an altitude of 300m. The following aspects *were successfully demonstrated*:

- Broadband Fixed Wireless Access (BF-WA) up to a fixed user using 28 GHz band.
- Demonstration of end-to-end network connectivity, and services such as: high speed internet, video-on-demand
- Streaming audio/video media (Windows Media Server 2004 Enterprise Edition supporting IP Multicast)
- Content distribution (IP Multicast)
- Internet access (simulated ISP using Web Server) including FTP downloads/uploads
- WiFi backhauling (including WiFi access to the Internet from user's laptops).
- Optical communications - HAP ground - simplified overall system to perform tracking tests.

...An Alvarion WalkAir 3000 "base station" system was used to offer 36 Mbit/s net payload per customer premise equipment (CPE). The CPE antennas were two fixed small parabolic dishes (one used for user's data and other for transmitting beacon signal used by tracking system at the payload) as illustrated in Figure 3'.

Trial 2 is scheduled for Summer 2005 near Kiruna, Sweden and will use a stratospheric balloon for a single mission of several hours, aimed to evaluating the following aspects:

- A selection of the broadband trials carried out in Trial 1 using custom built aerial and ground nodes operating in the 28/29 GHz bands.
- Optical communications, including high data rate backhaul link tests and measurement of atmospheric parameters on the channel. Results will be compared with simulation and an equivalent Japanese trial
- Integration of a multi-payload system on a dedicated stratospheric carrier, subject to specific environment, and to challenging weight and power constraints.

Trial 3 is scheduled for 2006 and the *details are still being determined*. It is likely to involve a HAP and *be organised by NICT*, as part of their parallel on-going programme [3]. They have access to HAP equipment and will be performing broadband trials in future years.

Conclusión: Se puede comprender que sí se realizaron pruebas de enlaces de comunicaciones pero solo a 300 m de altura y con sistemas fijos. Sin embargo, como se debería entender, a esas frecuencias tan altas, haría falta un sistema de apuntamiento de antenas bastante exacto pero no dan detalles al respecto. No se menciona nada sobre los equipos comerciales empleados, solo se dice que se emplea un equipo Alvarion WalkAir 3000 "base station" pero no se indica la manera cómo estaba constituida la arquitectura general y no se dan datos de las pruebas reales realizadas en el globo atado. Además, en la prueba 2, menciona que la siguiente prueba será en un globo troposférico, pero solo deja indicado. En la prueba 3, menciona que las pruebas en un HAP serán planificadas por la NICT, ya estudiada anteriormente en este documento. Como sabemos, la NICT no tiene ningún experimento realizado en HAPs (airships) hasta la fecha, dentro de todo lo revisado en el estado del arte.

1.8 Discusión y toma de decisiones

De lo anterior, en cuanto a logros alcanzados en el área de telecomunicaciones, podemos destacar lo siguiente:

- En ninguna de las publicaciones se muestra la arquitectura empleada.
- No se dice cómo fue resuelto el problema de movilidad pues no se comenta nada sobre algún sistema de apuntamiento de antenas, haciendo pensar que los experimentos, fueron realizados con antenas omnidireccionales las cuales reducen drásticamente la capacidad del enlace.
- No se da ningún detalle de los experimentos ni de los resultados alcanzados.

- Las frecuencias empleadas en aquellos proyectos tienen que ver con VHF o con 802.11b. La cantidad de investigaciones y desarrollos comerciales realizados en las bandas de frecuencia tan altas como las sugeridas por la UIT, es casi nulo y, suponemos, demasiado costoso. Solamente el proyecto CAPANINA dice haber empleado las frecuencias sugeridas por la UIT pero no da ningún detalle de los equipos comerciales empleados y tampoco da detalles sobre el sistema de apuntamiento de antenas, factor determinante para conseguir buenos resultados.

Como ya se mencionó en el análisis anterior, en ninguna de las publicaciones revisadas, existe una arquitectura de telecomunicaciones tal y como debe ser, *similar a la de un satélite*, en el cual tenemos un enlace de subida desde una estación terrena hasta la nave y desde esta, un enlace de bajada que produzca una huella dentro de la cual se puedan recibir todos aquellos servicios que se transmitan desde la estación base.

Por todo lo anterior, es de importancia capital aportar al estado del arte, centrando los esfuerzos en dos áreas bien definidas:

- Implementación de una arquitectura de telecomunicaciones que permita proveer de servicios de telecomunicaciones de banda ancha desde la estación terrena hasta la zona rural.
- Implementar un *sistema de apuntamiento automático* entre las antenas de tierra y de la PGA de modo que los radioenlaces resistan al problema de movilidad de la nave y se mantenga sin interrupciones. Como ya se dijo, al ser un sistema de control, *éste fue asumido por el CID-FAE y deberá ser probada junto con los sistemas del Grupo de Carga Útil de la EPN*. No obstante, de manera no oficial, nuestro equipo de investigación también ha desarrollado dicho sistema el cual es detallado en otra publicación.

Por otro lado, como ya se ha mencionado, la UIT define a una PGA (en inglés HAP) de la siguiente manera: *Estación situada a una altitud de 20 a 50 km y en un punto nominal, fijo y especificado con respecto a la Tierra.*

Una decisión muy crítica que debe tomar el Grupo de Carga Útil del la EPN es asumir o no frecuencias de trabajo ubicadas en las bandas sugeridas por la UIT.

En este punto debemos hacernos una pregunta muy estricta:

¿El presente proyecto ecuatoriano, alcanzará la altura de los 20 km?

Si la respuesta es afirmativa, al ser nuestro país signatarios de la UIT, probablemente se deberían respetar sus recomendaciones en cuanto al empleo de aquellas frecuencias tan altas, sin embargo, del estudio del estado del arte, no existe ningún precedente. Por otro lado, si la respuesta es negativa, la nave ya no entraría dentro de la definición formal de PGA y habrá sido inútil haber adquirido alguna solución en las bandas propuestas por

la UIT, el sistema de apuntamiento se complicaría pues debería cumplir con muy altas prestaciones y en general se tendría una solución inútil, desde todo punto de vista.

Por todo lo anterior, por el corto tiempo que dura este proyecto en la parte de Carga Útil (algo más de un año) y por la cantidad de recursos económicos disponibles, el grupo de carga útil decidió, en base a los criterios anteriores, diseñar una arquitectura basada en equipos comerciales con tecnología lo suficientemente probada, que esté al alcance del presupuesto disponible y cuyas frecuencias de operación no sean tan altas como las sugeridas por la UIT, y además que estén en bandas libres, de forma que el sistema de apuntamiento no exija demasiadas prestaciones de exactitud.

1.9 Arquitectura del sistema de comunicaciones de banda ancha en el proyecto PGA - FAE - EPN

En la Figura 3, se muestra el escenario general de comunicaciones con PGA, donde los servicios de telecomunicaciones a ser enviados (internet, telefonía, radio y tv del Estado) hacia la zona de cobertura o huella pueden ser provistos mediante un enlace punto-punto (backhaul) desde la Estación Terrena hasta la PGA. Mediante un enlace punto-multipunto, los servicios ya mencionados, son enviados hacia la zona de cobertura y desde aquí, mediante un Access Point, son distribuidos hasta los usuarios finales.

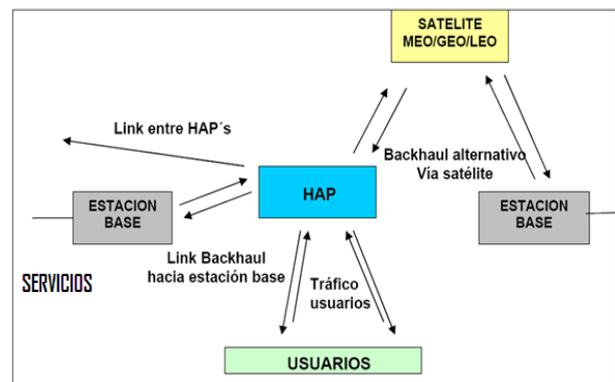


Figura 3. Escenario general de comunicaciones con PGA.

Para ajustarnos a estas ideas generales, nuestra propuesta consta de un enlace de radio punto a punto desde una estación en tierra, en donde tenemos los servidores de los servicios a ser prestados a los usuarios. Considerando que los posibles usuarios pueden estar alejados unos de otros, como tecnología de acceso aire-tierra se emplea un enlace punto-multipunto con el fin de establecer celdas de cobertura hacia las cuales llegaremos con los servicios de telecomunicaciones antes mencionados. Finalmente, mediante una segunda fase de acceso inalámbrico, con tecnologías WiFi, se llega hasta los usuarios finales.

1.10 Determinación de requerimientos de diseño del sistema de comunicaciones

A partir de los análisis anteriores, podemos ya plantear un resumen de requerimientos que deberá tener nuestro sistema de comunicaciones de banda ancha.

a) Ubicación

Como ya se dijo anteriormente, según la literatura científica, la idea de tener Plataformas de Gran Altitud, surge a raíz de la existencia de una zona de mínimo viento entre 18 y 22 km. Los datos reales proporcionados por el Grupo de Modelos Matemáticos, muestra los datos reales para el caso de nuestro proyecto (Figura 4). Aquí se puede ver que la zona de mínimo viento está ubicada alrededor de 17 km sobre el aeropuerto de Ambato el cual está a unos 2500 metros sobre el nivel del mar. Por lo anterior, el dato promedio teórico que se manejaba, casi coincide con el dato real para nuestro caso.

b) Arquitectura

Como se puede ver en la Figura 5, el escenario general será cuando la estación terrena esté ubicada en una zona donde sí existan todos los servicios (internet, telefonía, radio y tv del Estado). Estos 4 servicios deberían ser proporcionados mediante los servidores correspondientes.

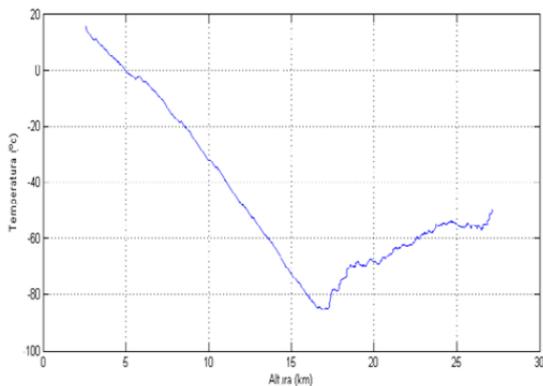


Figura 4. Temperatura vs. Altura: datos reales en el proyecto Ecuatoriano.

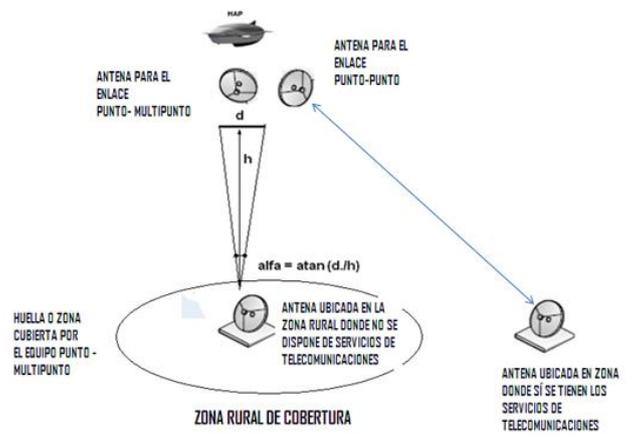


Figura 5. Rango de movilidad de la PGA tanto para el enlace de subida como para el enlace de bajada.

Desde aquí, estos servicios irán hasta la PGA mediante un enlace punto-punto (PTP) el mismo que deberá ser de la mayor capacidad de enlace posible (lo mejor del mercado) con el fin de garantizar servicio al mayor número de usuarios. Como consecuencia de la movilidad de la PGA (traslación y rotación), es indispensable un sistema de apuntamiento de antenas.

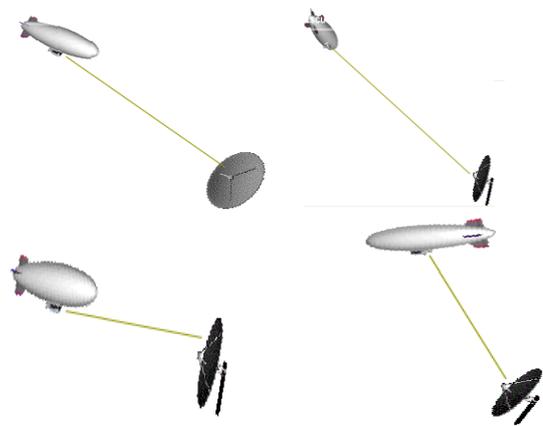


Figura 6. Algunas de las posiciones que podría tener la PGA respecto del apuntamiento de las antenas de tierra.

c) Sistema de apuntamiento de antenas para el enlace punto-punto

Como ya se mencionó anteriormente, el enlace que lleva la información de los 4 servicios deberá ser asistido por un sistema de apuntamiento. Mientras más exacto sea este, se evitará la reducción en la capacidad de enlace debido a la movilidad de la nave. La distancia desde la Estación Terrena hasta la PGA deberá ser la mayor posible (lo mejor del mercado) de modo que la nave pueda alejarse lo que más pueda, para dar servicios a zonas rurales

lo más alejadas posible. Algunas de las posiciones que podría tener la PGA respecto del apuntamiento de las antenas de tierra, los podemos ver en la Figura 6.

Todos los posibles grados de libertad de movimiento que podría presentar la PGA, los podemos ver en la Figura 7.

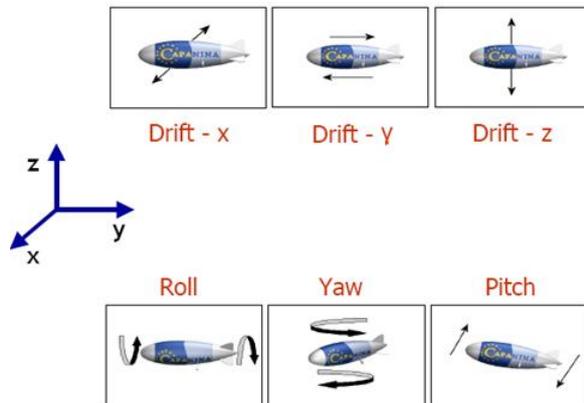


Figura 7. Grados de libertad de movimiento que podría presentar la PGA.

d) Evitando un nuevo sistema de apuntamiento para el enlace punto-multipunto

La idea original consistió en difundir varias huellas de modo que con una sola PGA se pueda cubrir varias zonas rurales, pero esto complica demasiado el sistema puesto que, si consideramos la rotación de la nave, dichas huellas se moverían y para evitarlo, serían necesarios sistemas de apuntamiento de antenas para cada enlace de bajada. Una manera de evitar esto es por medio de una idea bastante sencilla y que consiste en ubicar la nave justo encima de la zona rural a la que se pretende proveer de los servicios (Figura 8) y además, para que el enlace resista cualquier tipo de movilidad de la nave (movimientos de pitch, yaw y roll), la antena deberá estar sujeta mediante un soporte o cuerda de modo que, por gravedad, siempre apunte hacia abajo (Figura 9).



Figura 8.



Figura 9. Huella en el suelo procedente de la PGA: (a) Nave ubicada justo encima de la zona rural, (b) Antena sujeta mediante un soporte o cuerda de modo que, por gravedad, siempre apunte hacia abajo.

La distancia para la que debería ser diseñado este enlace de bajada, depende de la ubicación de la zona de mínimo viento. Como ya se dijo, el dato real para nuestra ubicación (aeropuerto de Ambato), según datos del grupo de modelos matemáticos, es de alrededor de unos 20 km sobre el nivel del mar y si consideramos que dicho aeropuerto está a una altura de 2500 (metros) sobre el nivel del mar, la distancia para la que debería funcionar el enlace, sería de unos 17.5 km (Figura 10).

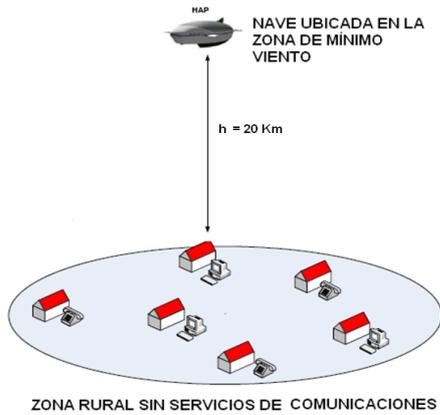


Figura 10. Altura ideal de posicionamiento de la PGA para que se ubique en la zona de mínimo viento.

e) Grado de movilidad que debería tener la nave

Si consideramos que la PGA está ubicada a una altura h , desde la superficie terrestre, y si dicha PGA se mueve una distancia d en horizontal (ver Figura 5), observemos cómo se comporta el ángulo alfa (en la Figura 11) visto desde tierra. Se puede observar que para una distancia de 20 km, el ángulo es de unos 3 grados.

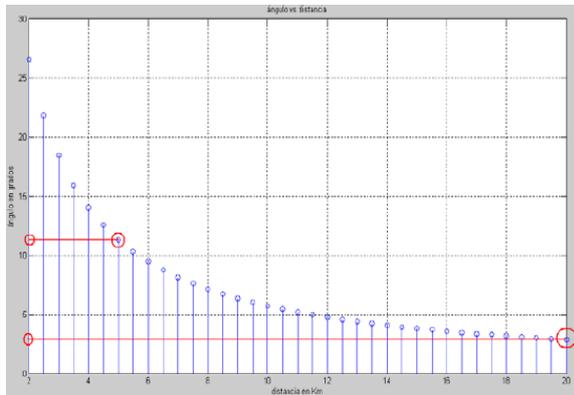


Figura 11. Gráfica de variación del ángulo de desplazamiento en función de la altura de la PGA.

Para una distancia de 36.000 km, que es el caso de un satélite geostacionario, si mantenemos una movilidad de 1 km^2 , este ángulo es de 0.0016 grados. Poniéndolo al revés, 1 grado de movilidad significaría 628 km de desplazamiento del satélite.

Todo lo anterior nos indica que a menor altura de la nave, el ángulo de abertura del lóbulo principal de la antena se hace cada vez más crítico, lo cual es lógico. Entonces, debemos plantearnos la siguiente interrogante:

¿Qué grado de movilidad deberíamos darle a nuestra nave?

El grado de movilidad de la nave viene determinada por dos principales criterios:

- **Un rango pequeño** de movilidad haría que los motores deban estar en funcionamiento continuo, produciéndose un consumo de energía elevado, el mismo que más bien debe ser lo más reducido posible. Por otro lado sería *ventajoso* ya que para el radioenlace de subida no habría problemas de apuntamiento de antenas, en cuanto a exactitud.
- **Un rango demasiado grande** haría que tengamos problemas de apuntamiento de las antenas pero por otra parte, tendríamos *ventajas* de consumo de energía.

Como vemos, la determinación del grado de movilidad, nos lleva a un *compromiso entre consumo de energía y calidad de la comunicación*.

2 Implementación de la arquitectura de telecomunicaciones para la PGA

Antes de llegar a tener la *solución final*, se atravesó por el estudio de diversas tecnologías, investigación de los equipos disponibles en el mercado y asesoramiento con las más importantes empresas de telecomunicaciones tanto a nivel nacional como internacional. A continuación detallamos dicha solución final.

En la Figura 12, podemos ver que los servicios de internet, telefonía, radio y tv del Estado, que los denominaremos *servicios de telecomunicaciones*, están ubicados en una zona en la que sí se dispone de dichos servicios, denominada *estación terrena*, y son provistos por equipos de cómputo denominados *servidores proveedores de servicios*. Desde aquí, los mencionados servicios son enviados hasta la nave por medio de un enlace que lo denominaremos de *banda ancha o punto-punto (PTP)* que soporte la demanda de algunos cientos de usuarios y que lo denominaremos *enlace de Punto-Punto de banda ancha*. Desde la nave se proyectará una *huella*, por medio de un enlace que lo denominaremos *Punto-Multipunto (PMP)*. Este enlace está compuesto por un equipo de origen denominado *Punto de Acceso (Access Point)* y por otro equipo complementario de destino denominado *suscriptor*. Este último deberá estar ubicado en el interior de la huella y será el que reciba dichos servicios. La diseminación de esta información llegará hasta los *usuarios finales* (computadores), ubicados en la zona rural (*denominada de servicio*), de dos formas: una a través de un enlace con una antena omnidireccional que lo denominaremos *red de segundo acceso (última milla)* y otra por medio de un enlace punto-punto, denominado *red de segundo acceso de largo alcance*, llevado a cabo mediante un equipo Motorola que nos permitirá llegar a lugares más lejanos.

ESQUEMA DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES EN ZONAS RURALES

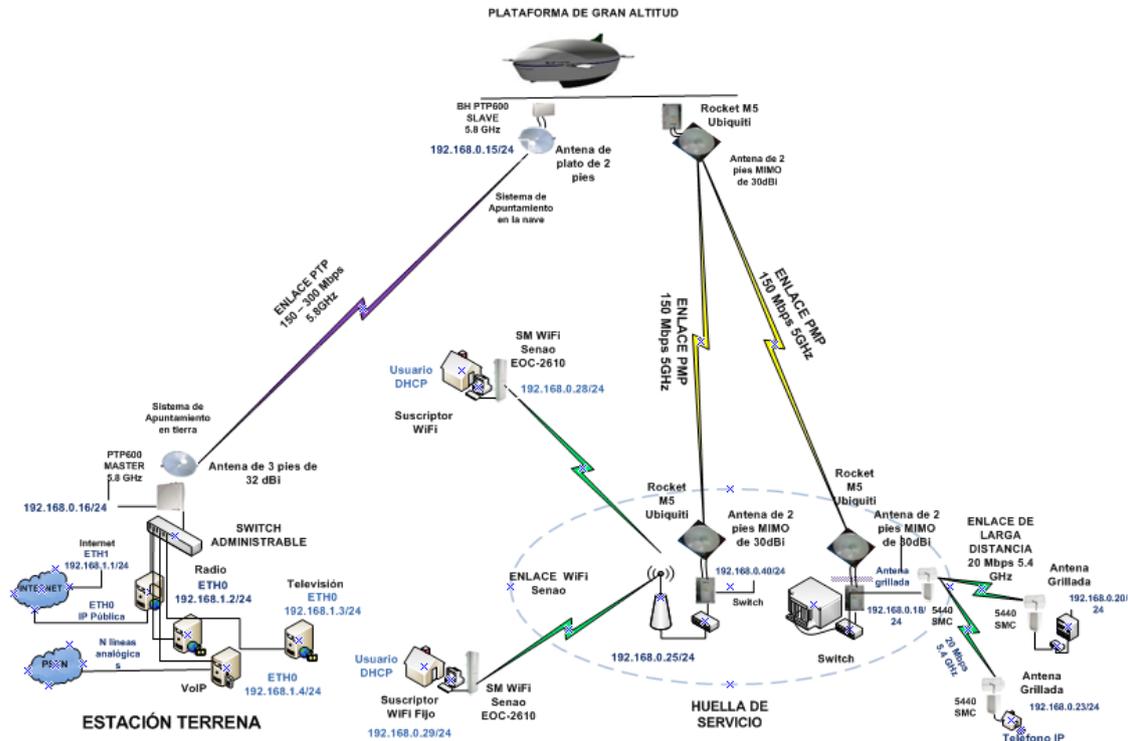


Figura 12. Arquitectura de telecomunicaciones para la PGA.

A continuación detallaremos las características más importantes de cada uno de los componentes de la anterior arquitectura:

2.1 Enlace punto-punto

Después de una evaluación de alternativas comerciales, se escogió un equipo que permite cumplir con los propósitos inicialmente planteados:

- Que sea de banda ancha: este equipo tiene una capacidad de enlace de 300 Mbps. Suponiendo que cada usuario final disponga de 512 kbps, suficientes para tener todos los servicios mencionados, entonces este enlace podría abastecer a 600 usuarios conectados al mismo tiempo. Por otro lado, si consideramos la teoría de tráfico, es decir, que no todos los usuarios hacen uso de los servicios al mismo tiempo, el enlace podría soportar a más de 1000 usuarios.
- Que sea de bajo consumo de energía y de peso reducido: la solución comercial encontrada, en la parte de la PGA que es lo crítico, los equipos del enlace PTP tienen 4.3 kg de peso total y un consumo de 65 W.
- Además, la frecuencia de funcionamiento está en la banda libre de 5.8 GHz. Esto fue de suma importancia pues los trámites a realizar son casi nulos. No se debería tener problemas de interferencias en estas bandas en sitios poblados y peor aún

en zonas alejadas, objetivo del proyecto, donde justamente el problema es que no llega ningún tipo de servicio de telecomunicaciones.

- Las antenas utilizadas son las siguientes: en la estación terrena tenemos una antena parabólica de 3 pies de diámetro y en la nave, tratando de reducir peso, tenemos una antena de 2 pies de diámetro. Ambas antenas deberán ser montadas empleando el sistema electrónico de apuntamiento automático, de modo que el enlace se mantenga pese a las condiciones de movilidad de la nave.
- Está basado en una de las más potentes tecnologías inalámbricas denominada OFDM, además de que permite realizar enlaces con un algoritmo de selección automática de frecuencia (DFS), de modo que el enlace se mantiene en la frecuencia que menor interferencia reciba.
- Según el manual, este equipo está diseñado para trabajar a una distancia de 200 km con línea de vista y a 10 km sin línea de vista, con una capacidad de enlace de 300 Mbps, ideal para las funciones de banda ancha requeridas dentro del proyecto.

2.2 Enlace punto-multipunto (PMP)

En cuanto al equipo de radiocomunicación que realiza el enlace PMP, es un equipo de radio inalámbrico para exteriores de marca UBIQUITI, basado en tecnología OFDM y MIMO 2×2 , que trabaja en toda la banda de

frecuencias de 5 GHz, su peso es de alrededor de 1 kg y consume 6.5 W de potencia. La antena conectada al equipo PMP de la nave es de tipo MIMO de diámetro 2 pies y pesa 2.5 kg. Según sus características de fábrica, está diseñado para trabajar a una distancia de 50 km con una capacidad de 150 Mbps. Como ya se mencionó, para obtener la mejor capacidad de enlace posible y para evitar colocar otro sistema de apuntamiento de antenas, la nave deberá estar justo encima de la zona a la que se desea dar cobertura y esta antena debe estar suspendida de modo que, a pesar del movimiento de la nave, esté apuntando siempre hacia abajo.

2.3 Red de segundo acceso

Aquí se emplea equipos wi-fi, de uso común en redes inalámbrica, y que son soportados por los equipos del usuario final. Se usa Access Points marca UBIQUITI que permiten difundir los servicios hasta los usuarios finales de manera inalámbrica pero a una distancia corta, llegando hasta unos 500 m de radio. Las computadoras deberán tener tarjetas inalámbricas que soporten estándares 802.11b o 802.11g.

2.4 Red de segundo acceso de largo alcance

En el caso de tener grupos de usuario ubicados fuera de la huella, se ha empleado un equipo marca MOTOROLA el cual es otro punto de acceso inalámbrico para exteriores que trabaja en la banda de frecuencia de 5.470 - 5725 GHz y posee una capacidad de enlace típico de 21 Mbps. Su utilización permitirá extender la huella hasta una distancia sobre los 10 km.

2.5 Usuarios finales

Finalmente, en la parte del usuario final se dispone de un PC con características en hardware de performance medio, es decir, un PC común diseñado para usuarios tipo home. Este PC está bajo *Fedoracore 14* y sobre él se ejecuta una interfaz gráfica desarrollada en lenguaje de programación VISUAL BASIC, la misma que le permite integrar todos los servicios ya mencionados. Las aplicaciones de usuario llamadas desde la interfaz gráfica son las siguientes:

- a) Para el servicio de internet, se llama al Navegador de internet *Mozilla Firefox*
- b) Para los servicios de radio y tv, se llama al *reproductor de multimedia VLC* y
- c) Para el servicio de telefonía, se llama al *Sofphoneekiga*.

2.6 Servidores implementados

Como parte de la arquitectura ya descrita, se implementaron 4 tipos de servidores: un servidor de Internet y servicios generales, un servidor de telefonía IP, un servidor

de streaming de audio, orientado a difundir la señal de *Radio Pública del Ecuador* y un servidor de streaming de video, orientado a difundir la señal de *Ecuador TV*.

En cuanto al Servidor de Servicios Generales, este dispone de hardware apto para trabajar en sistemas de producción mediano-grande. El sistema operativo que opera este servidor es CentOS 5.5, con una suite de paquetes llamada ClearOS diseñada para este tipo de tareas. El manejo de ClearOS es muy fácil, versátil e intuitivo, justamente diseñado para usuarios principiantes y expertos. Este servidor será la puerta de enlace para comunicar a los usuarios de la PGA al mundo exterior como también será aquel que permita a los usuarios conectarse a los diferentes servicios que se encuentran en los servidores de la DMZ.

En cuanto al Servidor de Telefonía IP, al igual que todos los servidores, también dispone de hardware apto para trabajar en sistemas de producción mediano-grande. El sistema operativo que opera este servidor es CentOS 5.5, con una suite de paquetes llamada Elastix que basa su funcionamiento en Asterisk. Este servidor será la entrada y salida de los usuarios de la PGA con la Red Pública Conmutada. El manejo de Elastix es muy fácil, versátil e intuitivo, justamente diseñado para usuarios principiantes y expertos.

En lo que tiene que ver con el servidor de streaming de radio y televisión, para definir la forma como se brindará estos servicios, se tuvo el soporte de los técnicos de Ecuador TV. La decisión tomada consiste simplemente en recibir la señal de broadcast analógico, ingresarla en el servidor, digitalizarla y hacer el streaming.

Sobre el Servidor de Radio, su hardware también es apto para trabajar en sistemas de producción mediano-grande. El sistema operativo que opera en este servidor es CentOS 5.5, con una aplicación de digitalización llamada *Ices* y como servidor la aplicación *IceCast*.

A este servidor se conecta un sintonizador de radio el mismo que ingresa el audio a nuestro servidor, se lo digitaliza y posteriormente se lo envía a los usuarios finales.

Sobre el Servidor de Streaming de Televisión, su hardware también es apto para trabajar en sistemas de producción mediano-grande. El sistema operativo que opera en este servidor es CentOS 5.5, con una aplicación digitalizadora llamada *ffmpeg* y como servidor la aplicación *ffserver*. Al igual que el servidor de streaming de radio, a este servidor se conecta un sintonizador de televisión sobre el que ingresa el video y audio, se lo digitaliza y posteriormente se lo envía a los usuarios finales.

3 Resultados

Se realizaron las siguientes pruebas:

- Prueba de funcionamiento de toda la arquitectura en conjunto
- Primeramente, se verificó el correcto funcionamiento de todos y cada uno de los componentes:

enlace PTP, enlace PMP, enlaces de segundo acceso y servidores. Los usuarios pudieron recibir los 4 servicios sin ningún problema y de manera ininterrumpida. En este caso, la prueba fue realizada entre sitios fijos.

- Pruebas de alcance de enlaces PTP y PMP

Con el propósito de mostrar el correcto funcionamiento de los distintos componentes de la arquitectura, fue indispensable realizar pruebas de larga distancia. Dicha prueba se la realizó entre el aeropuerto de Chachoán y el Parque de la Familia ubicado a 9.7 km, sitios lo más alejados posible que permitieron tener línea de vista. Primeramente se probaron los equipos del enlace Punto-Punto (PTP) y a continuación se probaron los equipos del enlace Punto-Multipunto (PMP). La capacidad del enlace equipo PTP fue de 138 Mbps y del enlace del equipo PMP fue de 52 Mbps.

- Medición de la huella proyectada por el equipo PMP

Con el objetivo de realizar mediciones de potencia tanto en el eje axial como medición del máximo radio de la huella en función de la altura de la nave, se realizó una prueba con un aerostato atado con límite de altura de 250 m. En el aerostato atado se instalaron el equipo PMP y una cámara IP como servicio para comprobar el establecimiento del enlace. Se tomaron mediciones del radio máximo en función de la altura de la nave: a una altura de 59 m, el radio máximo de servicio fue de 185 m, una altura de 111 m, el radio máximo de servicio fue de 285 m; una altura de 139 m, el radio máximo de servicio fue de 435 m. Se pudo observar que el ángulo máximo, donde permaneció el servicio de video, permaneció constante y fue de unos 71°. Empleando este dato experimental, se puede inferir que para una altura de 17500 m (sobre la altura del aeropuerto de Chachoán, que es la altura en donde se encuentra el sitio de viento mínimo y hasta donde se debería llegar para hacer posible las aplicaciones de satélite geostacionario), el radio de cobertura máximo hasta donde se podrá tener servicios IP, será de alrededor de unos 50 km. Además se pudo ver que, en el borde de la huella, al medir una potencia de -90 dBm, los enlaces se pierden, corroborando así la sensibilidad teórica del equipo. Por lo anterior, lo ideal es que el receptor esté directamente ubicado debajo de la nave y no hacia los extremos. También se probó el sistema PTP pero, debido a la ausencia del sistema de seguimiento de antenas, se realizaron pruebas sustituyendo la antena tipo plato de doble polaridad con dos antenas omnidireccionales. Esto permitió tener un sistema totalmente inmune a los movimientos de la nave pero la capacidad de enlace se redujo drásticamente hasta alrededor de 30 Mbps.

- Pruebas de materiales de la góndola

Con el fin de determinar el material para la fabricación de la góndola, estructura donde serán colocados todos los componentes de comunicaciones, de control, motores, etc, se probaron tres tipos de material: fibra de vidrio, kevlar y fibra de carbono. De estos, únicamente, la fibra de carbono impidió el paso de la señal electromagnética; los otros dos fueron totalmente transparentes y por ello, fueron empleados en la fabricación de dicha góndola.

- Pruebas de interferencias con los equipos de comunicación inalámbrica de datos

Además se realizaron pruebas de interferencias con los equipos de comunicación inalámbrica empleados para la transmisión de datos de control e instrumentación. En ambos casos, las pruebas fueron exitosas ya que no se provocaron ningún problema de mal funcionamiento. Esto se explica por los rangos de frecuencia bastante alejados en los que trabajan aquellos sistemas: los unos en la banda de 5 GHz y los otros en 900 MHz.

- Pruebas de funcionamiento a bajas temperaturas

Por otro lado, ya que a medida que la PGA sube a mayor altura, la temperatura desciende, como parte del proyecto se creó un grupo denominado de bajas temperaturas el mismo que creó un sistema para emular las condiciones reales de la atmósfera. Asimismo, el grupo de modelos matemáticos proporcionó el dato de que a 5 Km sobre el nivel del mar (a la que se espera suba la nave), la temperatura desciende hasta -0.15°C . Para demostrar que los equipos tanto PTP como el equipo PMP funcionarían sin problemas en aquellas condiciones, se realizaron las pruebas correspondientes en las que estos equipos fueron introducidos en el mencionado sistema de bajas temperaturas y se verificó su correcto funcionamiento hasta una temperatura de -6 grados centígrados, temperatura que habría a una altura de 6500 m sobre el nivel del mar. Es importante resaltar que, según datos de los manuales respectivos, tanto el equipo PTP como PMP, funcionan correctamente entre -40°C y $+60^{\circ}\text{C}$. De estos, el dato que nos interesa sería el umbral bajo, el mismo que correspondería, según datos del grupo de modelos matemáticos, a una altura aproximada de 11 km sobre el nivel del mar. También cabe resaltar que, si alguna vez se lograse colocar la PGA a la altura de mínimo viento, en el que se conseguiría emular las condiciones de un satélite geostacionario, este está ubicado, según datos reales del grupo de modelos matemáticos, a una altura de 19500 metros sobre el nivel del mar. En este caso, habría que idearse un sistema de acondicionamiento de temperatura pues, como ya se mencionó, los equipos PTP y PMP resisten únicamente hasta -40°C .

4 Conclusiones

1. En cuanto al ESTADO DEL ARTE sobre servicios de telecomunicaciones basados en PGA, hasta el momento de presentación de este documento, no existe ningún prototipo en servicio a nivel mundial y en los intentos descritos en las distintas publicaciones científicas aquí citadas, no existe ninguna idea sobre una posible arquitectura y peor aún propuestas concretas de uso de equipos comerciales. No se habla sobre el problema de movilidad de la PGA y por tanto no se trata sobre algún sistemas de apuntamiento. No se dan datos específicos de pruebas reales.
2. La solución encontrada en cuanto a la implementación de la arquitectura de telecomunicaciones para la PGA, está basada en equipos comerciales que funcionan en bandas no licenciadas, por lo que no es necesarios adquirir licencias ni realizar procedimientos legales de ningún tipo.
3. Los equipos adquiridos cumplen con las características que deben tener para aplicaciones de PGAs: peso reducido, consumo de potencia reducido, que funcionen en frecuencias relativamente bajas para evitar complicaciones con el grado de exactitud del sistema de apuntamiento de antenas para el enlace PTP.
4. Los equipos del enlace PTP (basados en tecnología OFDM) demostraron su gran capacidad de enlace a distancias considerables (10 Km) y sin ningún procedimiento de apuntamiento fino. Según su manual de funcionamiento, está diseñado para brindar 300Mbps de capacidad de enlace a una distancia de 200 km. Su característica de DFS, permite que el equipo funcione en la zona de frecuencias de menor ruido o interferencia. En pruebas de apuntamiento, demostró mantener el enlace a pesar de introducir un grado de movilidad de aproximadamente unos 15 grados.
5. Los equipos del enlace PMP (basados en tecnologías OFDM + MIMO 2×2) resultaron ser muy robustos frente a la movilidad, incluso en pruebas de enlace realizados entre montañas, estos se mantienen levantados a pesar de que una de las antenas estuvo caída y apuntando hacia el suelo. Se recomienda su utilización para aplicaciones de gran movilidad.
6. Si bien quedan pendientes pruebas empleando el sistema de seguimiento de antenas, mediante este trabajo se demuestra la factibilidad de tener un sistema de telecomunicaciones para aplicaciones de PGAS brindando los 4 servicios IP de internet, telefonía, streaming de radio y streaming de video.
7. Luego de las pruebas de la huella generada, se concluye que para una altura de 17500 m (sobre la altura del aeropuerto de Chachoán), que es la altura en donde se encuentra el sitio de viento mínimo, el radio de cobertura máximo hasta donde se podrá tener servicios IP, será de alrededor de unos 50 km. Esto demuestra que la aplicación de la PGA como satélite geostacionario sí es factible.
8. Otro aporte muy importante consistió en verificar el funcionamiento del enlace PTP empleando dos antenas omnidireccionales de modo que, aún en el caso de *movilidad externa de la nave* (en todos los grado de libertad) o de no disponer del sistema de apuntamiento, el enlace seguiría manteniéndose pero a costa de una reducción importante de la capacidad de enlace (de 300 Mbps a unos 30 Mbps).
9. Se realizaron todas las pruebas que hacen falta para asegurar el funcionamiento de la arquitectura: a) De funcionamiento de toda la arquitectura, b) De larga distancia, c) De materiales para la góndola, d) De interferencias con otros sistemas de la nave y e) De funcionamiento de los equipos a bajas temperaturas.

Referencias

- [1] R&M International Consulting Group Ltd Engineering, Regulation & Business, *Estudio de Nuevas Tecnologías (WIMAX, FSO, HAPS y UWB)*, Septiembre 2004.
- [2] Proyecto fondef - Chile, *Aeroplataforma globo antena como base de un sistema de comunicación digital para redes inalámbricas*.
- [3] Alejandro Aragón Zabala, *High-Altitude Platforms for Wireless Communications*, John Wiley & Sons, Ltd. 2008
- [4] D. Grace, et all, *CAPANINA - Communications from Aerial Platform Networks Delivering Broadband Information for All*