

Propuesta de implantación de la subred VHF para la red de telecomunicaciones aeronáuticas de Cuba

MsC. David J. Fontanills Seisdedos, DsC. Jorge L. López Presmanes, MsC. José Á. Amador Fundora y DsC. Francisco Núñez Esquivel. Empresa Cubana de Aeropuertos y Servicios Aeroportuarios (ECASA S.A.), Direc. de Inform. (MES), Dpto. de Elec., Fac. de Ing. Eléctrica (ISPJAE)
dafose@infomed.sld.cu, pres@reduniv.edu.cu, amador@electrica.cujae.edu.cu, nunez@electrica.cujae.edu.cu

La Red de Telecomunicaciones Aeronáuticas

La Red de Telecomunicaciones Aeronáuticas —del inglés, *Aeronautical Telecommunication Network* (ATN)— es una red digital de alcance global normada y recomendada por la OACI —Organización de Aviación Civil Internacional—, y se utiliza para las aplicaciones aire-tierra y tierra-tierra de las que necesita el creciente desarrollo de la aeronáutica civil internacional.

Esta soporta la arquitectura de redes que permite el funcionamiento correcto como sistema único de las subredes de datos de tierra, aire-tierra y aviónica, mediante la adopción de servicios y protocolos con equipos basados en el modelo de referencia para la Interconexión de Sistemas Abiertos —del inglés, *Open Systems Interconnection* (OSI)—.

Los servicios brindados por la ATN [1][2] se orientan, por lo general, a la Comunicación, Navegación, Vigilancia y Gestión de Tránsito Aéreo —del inglés, *Communication, Navigation, Surveillance / Air Traffic Management* (CNS/ATM) [3]—. En cuanto a la radiocomunicación estos servicios ofrecen comunicaciones relacionadas con la seguridad operacional que requiere alta integridad y respuesta rápida, entre las que se destacan las Comunicaciones para los Servicios de Tránsito Aéreo —del inglés, *Air*

Principales características de los nuevos sistemas de comunicaciones

Existen algunas diferencias fundamentales entre los sistemas convencionales de comunicaciones aeronáuticas y los que forman parte de los nuevos sistemas de comunicaciones, navegación, vigilancia / gestión de tránsito aéreo, por recomendación del Plan Mundial de Navegación Aérea para los Nuevos Sistemas CNS/ATM, Documento 9750. Algunas de las características claves de los nuevos sistemas que difieren considerablemente de los convencionales son: la mayoría de las comunicaciones se efectúan por intercambio de datos; el acento se pone en la conectividad y funcionamiento a escala mundial; y las comunicaciones orales se utilizan sobre todo en situaciones que no sean habituales y de emergencia. Esto permite utilizar mejor los canales de comunicación y compartir las instalaciones y servicios entre muchos usuarios.

Situación en Cuba

En la Aviación Civil de Cuba, para el aseguramiento de los servicios de comunicaciones para el tránsito aéreo, ha sido necesaria una renovación del equipamiento aeronáutico en tierra destinado a soportar las comunicaciones de voz con las aeronaves en tránsito. El nuevo equipamiento adquirido tiene entre sus características técnicas, la posibilidad de emplear modos digitales de comunicación, recomendados por el Anexo 10 de la OACI [4].

Con el objetivo de elevar la integridad de los servicios de telecomu-

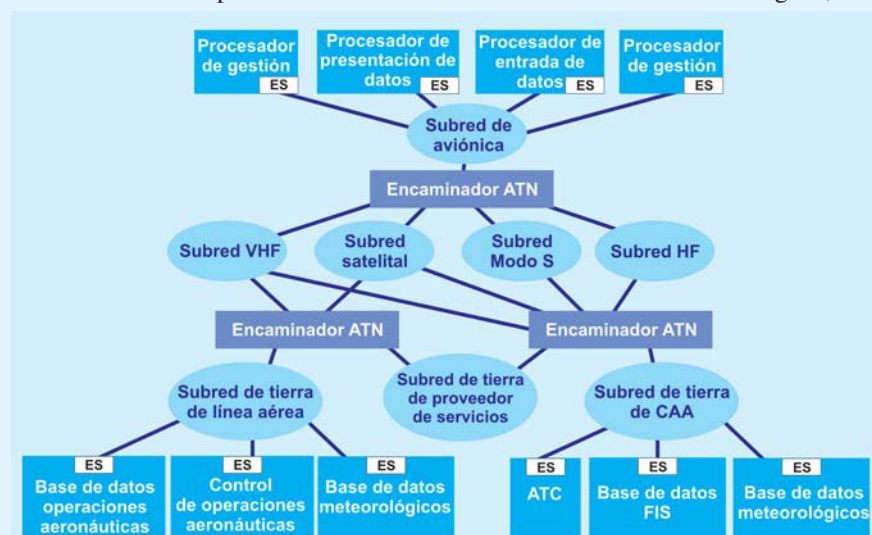


Figura 1 Ambiente de las comunicaciones de datos ATN

Traffic Service Communications (ATSC)— entre dependencias ATS —*Air Traffic Service*—, o entre una dependencia ATS y una aeronave para el Control del Tránsito Aéreo —del inglés, *Air Traffic Control* (ATC)—, información de vuelo, alertas, etc., y las Comunicaciones de las Operaciones Aeronáuticas —del inglés, *Aeronautical Operation Communications* (AOC)—.

nicaciones a las aeronaves en tránsito, ya equipadas con la tecnología para el enlace de datos en sus diferentes modos, existe la posibilidad de que estos equipos puedan emplearse para establecer y garantizar comunicaciones digitales aeronáuticas, con todas sus ventajas inherentes.

Prestación Requerida para las Comunicaciones (RCP)

Este concepto se refiere a un conjunto de requisitos de prestaciones de las comunicaciones, como la capacidad, disponibilidad, tasa de errores y demoras de tránsito. Una vez que se ha especificado la RCP para un escenario operacional en determinado espacio aéreo, puede considerarse operacionalmente todo el sistema individual o combinación de sistemas de comunicaciones que satisfaga los parámetros establecidos [4].

Comunicaciones aire-tierra

Se recomienda que la mayoría de las comunicaciones aire-tierra en la etapa de vuelo en ruta se hagan por intercambio de datos digitales; para lo cual el usuario selecciona un mensaje determinado a partir de un conjunto de mensajes predefinidos, con la utilización de un menú de pantalla, añade algunos parámetros específicos —o texto libre— y lo envía. Algunas transferencias de datos se efectúan entre los sistemas automáticos de a bordo y en tierra, sin necesidad de intervención manual. En estos intercambios de datos se reduce la carga de trabajo de los controladores y pilotos en las áreas terminales de intensa actividad.

La transmisión de mensajes aire-tierra puede efectuarse a través de un Enlace Digital por VHF en Modo 2 —del inglés, *VHF Data Link Mode 2* (VDL Mode 2 ó VDL2)—. En este tipo de enlace de datos aire-tierra compatible se emplean técnicas y sistemas digitales en los que la velocidad nominal de transmisión de datos es de 31,5 Kbps. La separación entre canales es de 25 kHz, compatible con la

utilizada en la radio analógica VHF —*Very High Frequency*—. El plan de modulación empleado en el modo 2 admite diversos protocolos de enlace para aplicaciones operacionales diferentes, que de ese modo mejoran mucho el uso eficaz del canal de radio.

Enlace de datos VHF (VDL Modo 2)

A mediados de 1988 se comenzó el desarrollo de enlace de datos para el servicio de las radiocomunicaciones aeronáuticas, y se inició en los años 90 con el Sistema ACARS —*Airplane Communication Automatic Report System*—. A finales de 1994, se emprendió el desarrollo de VDL Modo 1, que entró en explotación a finales de 1995. A principios del 1997, empezó el desarrollo del enlace de datos en modo 2 y, en el año 2000, se dispone del primer equipo para estaciones de tierra.

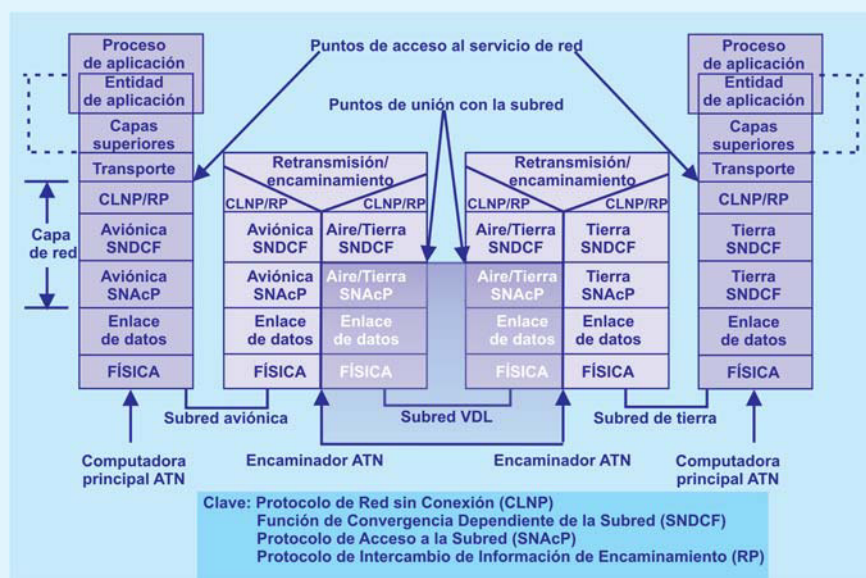


Figura 2 Arquitectura de protocolo ATN

Posteriormente a mediados del 2002, se instala el primer equipo de abordaje para VDL2.

Las funciones de comunicaciones VDL Modo 2 son compatibles con la estructura por capas de funciones y protocolos, establecidas por el modelo de referencia OSI. En la figura 2 se muestra la arquitectura de protocolo ATN [2][3].

El sistema VDL Modo 2 proporciona transparencia de código a la ATN entre los sistemas que se conforman. Estas funciones serán ejecutadas en las tres capas inferiores del modelo OSI —*Open Systems Interconnection*—: la capa física, la capa de enlace de datos y la subcapa inferior de la capa de red —es decir, la capa de subred—.

En el nivel físico se emplea la modulación en fase diferencial a 8 niveles (8DPSK), con un ecualizador del tipo coseno elevado con un factor de caída con valor $\alpha = 0,6$. La velocidad de señalización es de 10500 ± 50 baudios, y la velocidad de transmisión es de 31500 bits/s. El método de corrección de errores empleado está basado en la codificación Reed-Solomon. La tasa de error tolerada por el sistema está por debajo de 10^{-3} . La capa física ofrece el control de la frecuencia de operación del transceptor, el intercambio de *bits* sobre el sistema de radio, empleando procesos de modulación, codificación de datos y un mecanismo de control de errores en el terminal receptor sin retransmisiones —mediante *Forward Error Correction*—.

La capa de Control de Enlace VHF para la Aeronave —del inglés, *Aeronautical VHF Link Control* (AVLC)— se inspira en la empleada en el protocolo denominado Protocolo de Control de Alto Nivel para el Enlace de Datos —del inglés, *High Data Link Control* (HDLC)—, según lo especificado por las recomendaciones ISO-3309, ISO-4335, ISO-7809 e ISO-8885.

Para el caso del VDL Modo 2, el nivel de enlace ha sido optimizado para las condiciones específicas de aplicación sobre sistemas aeronáuticos de radio, en la que los terminales de red VDL utilizado por toda la subred aire-tierra VHF, se especifican en la recomendación ISO-8208. La capa 2 se subdivide en dos subcapas MAC —*Media Access Control*— y DLS —*Data Link Service*— y una entidad dedicada al manejo del enlace. La subcapa de Control de Acceso al Medio (MAC) proporciona el acceso al medio físico mediante el algoritmo denominado Acceso Múltiple con Sensado de Portadora —del inglés, *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA)—. Esta subcapa controla el acceso al canal y la compartición del mismo entre los diferentes usuarios.

La subcapa de Servicios del Enlace de Datos —*Data Link Services* (DLS)— se compone del Control de Enlace VHF para Aviación —*Aviation VHF Link Control* (AVLC)— que se deriva del Protocolo de Control de Alto Nivel para el Enlace de Datos —*High Level Data Link Control* (HDLC)— (ISO/IEC-3309).

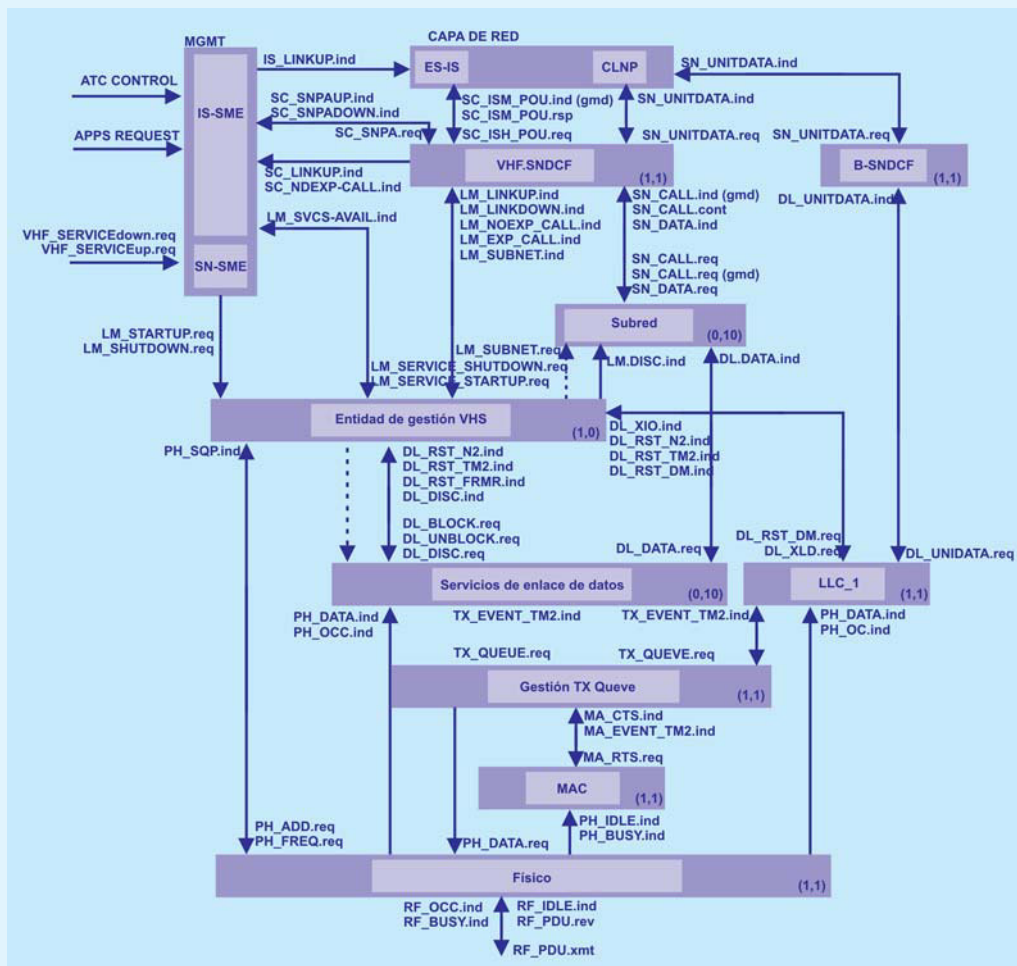


Figura 3 Diagrama de flujo de primitivas

Este protocolo se dedica al intercambio y procesamiento de tramas de datos así como a la detección de errores.

La Entidad de Gestión del Enlace —*Link Management Entity (LME)*— controla el establecimiento y el mantenimiento del enlace entre subcapas de Servicios del Enlace de Datos.

La interfaz entre la subcapa MAC y la subcapa DLS se controla con la primitiva de servicio AV2M-UNITDATA y AV2M-STATUS.

Especificaciones de la subcapa MAC

Esta subcapa garantiza una adquisición transparente del canal de radio compartido, hace invisible a la subcapa DLS. La subcapa MAC toma las tramas a ser transmitidas de la subcapa DLS y las entrega a la capa del nivel físico, y las recibidas de este nivel las entrega a la subcapa DLS.

| Parámetro | Valor Mínimo | Valor Máximo | ID | Valor por defecto | Incremento |
|-------------------------------------|------------------|------------------|-----|-------------------|------------------|
| Retardo Interaccesos | 0,5 milisegundos | 125 milisegundos | TM1 | 4,5 milisegundos | 0,5 milisegundos |
| Canal Ocupado | 6 segundos | 120 segundos | TM2 | 60 segundos | 1 segundo |
| Persistencia | 1/256 | 1 | P | 13/256 | 1/256 |
| Número máximo de intentos de acceso | 1 | 65 535 | M1 | 135 | 1 |

Tabla 1 Parámetros de servicio de la capa MAC

Los servicios asociados a la subcapa MAC son:

1-Acceso Múltiple: para este servicio la subcapa implementa un algoritmo CSMA p-persistente no adaptativo, que ofrece igual probabilidad a todas las estaciones de transmitir, al mismo tiempo maximiza el flujo de datos transmitidos, minimiza los retardos de tránsito y las colisiones.

2-Detección y notificación de congestión del canal.

3-Implementación de parámetros de servicio: implementan los parámetros definidos en la tabla 1.

El protocolo VDL2, al igual que otros protocolos como el X.25 y el AX.25, garantiza la transmisión ordenada y libre de errores entre las estaciones en las que se realiza. También se estructura en un modelo jerarquizado por niveles con la definición de primitivas de servicio con las que se implementan los procesos establecidos en este protocolo.

En Cuba, para garantizar el enlace de datos en modo 2 puede, en principio, ser empleado el equipamiento ya instalado para comunicaciones analógicas. Este consiste de un sistema con radios Harris VDR-2135 y VDR-2205, los cuales poseen las características técnicas adecuadas, no sólo para las comunicaciones orales, sino también para las digitales, de acuerdo con las exigencias y normas de la OACI.

Conexión a redes terrestres

En la figura 4 se muestra una variante de conexión en la que se enlaza directamente el radio a un *router* a la salida de la red ATN a través de un par de módems y una línea arrendada. En esta configuración no se establece

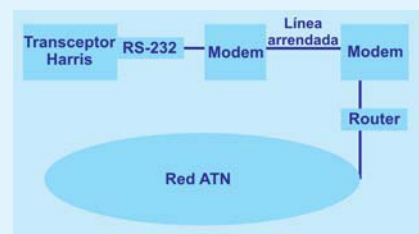


Figura 4 Sistema Remoto sin Inteligencia Local Externa

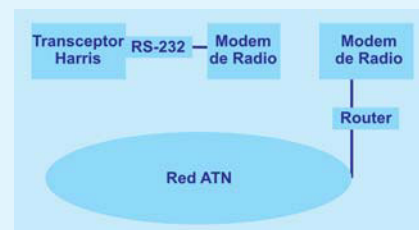


Figura 5 Sistema remoto sin inteligencia local externa

una conexión al puerto de control de los radios, no permite hacer cambios remotos de configuración.

En la figura 5 puede observarse una variante de configuración en la que la línea arrendada ha sido sustituida por un enlace de radio adicional. Esta variante permite tener acceso a ubicaciones con topografía adversa.

En ambas configuraciones el *router* que se incorpora posibilita el estable-

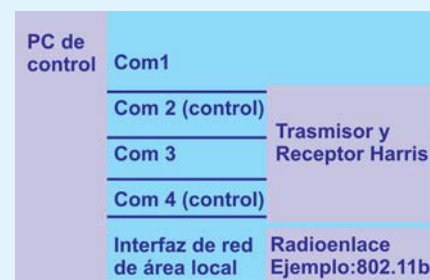


Figura 6 Sistema remoto con inteligencia local externa

cimiento de mecanismos de protección y seguridad para la información que se ofrece por estos servicios de comunicaciones para el tránsito aéreo, al igual que se hace en redes cableadas.

Sistema remoto con inteligencia local externa

También puede aplicarse otra variante de conexión en la que se unen los equipos de radio a una computadora —industrial o robusta— que tiene los puertos e inter-

faces apropiados para establecer conexiones de datos y de señales de control con ellos (ver figura 6).

Con esta variante la conexión hacia la red terrestre puede ser hecha a través de una interfaz de red o a través de un puerto serie. Puede emplearse una conexión a través de línea arrendada y *módems* o a través de sistemas de radioenlaces adicionales. Existen muchas variantes de radioenlaces de la norma 802.11 con alcance de decenas de kilómetros y de bajo coste que pudiesen ser empleados. Esta configuración es muy flexible y puede incorporar un sitio web para la administración y el control del enlace.

Cálculo de la cobertura de radiocomunicaciones VDL2

Por la importancia en el aseguramiento preciso y de aplicación del enlace digital modo 2 —*data link*—, se ha realizado el cálculo de la cobertura de radiocomunicaciones en la Región de Información de Vuelos de la República de Cuba —FIR Cuba—. Para esto se ha utilizado un programa denominado *Radio Mobile for Windows*. Es una herramienta que permite predecir el comportamiento de un sistema de radiocomunicaciones móviles, desarrollado por Roger Coude, quien continúa añadiendo nuevas prestaciones y se encuentra disponible y gratis en Internet [5][6].

Este software puede utilizar varios modelos digitales de elevación del terreno y situar los puntos de interés en un mapa para calcular los radioenlaces entre ellos. Para este trabajo se ha empleado el modelo SRTM —*Shuttle Radar Topography Mission*— [7]. El modelo de propagación que emplea el software es el ITS —*Institute Telecommunications Scientific*— para terreno irregular o *Longley-Rice*, válido entre 20 MHz y 20 GHz.

Las bases de datos digitales de elevación del terreno también gratis en Internet con una resolución de 100 m. Estos son los datos topográficos de mayor resolución dispo-

nibles. Los errores son, generalmente, menores que los que introducen otros programas comerciales existentes en nuestro país, cuyo costo es considerable.

El modelo de propagación es de propósito general, basado en la teoría electromagnética y en análisis estadísticos de las características del terreno y de mediciones de radioenlaces. El algoritmo del modelo se describe en su versión 1.2.2 en el documento “*The ITS Irregular Terrain Model, version 1.2.2 Algorithm*” [8]. La representación definitiva del modelo se encuentra disponible en el sitio [9], y contiene código fuente y documentación abundante. El código fuente en Fortran, manuales y otros documentos también se encuentran en el sitio [10].

Se han realizado cálculos en diferentes corredores aéreos de nuestro espacio y desde la ubicación de los transeceptores que se han empleado para las radiocomunicaciones analógicas. Este trabajo propone comenzar la explotación de las posibilidades que brindan estos equipos para las radiocomunicaciones para el enlace de datos en modo 2. Se refieren a los niveles de vuelo en pies por ser la práctica oficial en la navegación aérea mundial reglamentada por la OACI.

El empleo de VDL2 permite aumentar la seguridad de las operaciones sobre nuestro espacio aéreo, por la cantidad creciente de información aeronáutica disponible. Una seguridad mayor puede aumentar la cantidad de sobrevuelos sobre nuestro FIR. Esta mejora en la seguridad operacional incrementa los ingresos económicos de ECASA.

El análisis se ha dividido por la funcionabilidad de las aeronaves, es decir, por su fuselaje y aviónica. Estas pueden tener niveles de vuelo diferentes y establecer enlaces VDL2 en el FIR Cuba para el sobrevuelo por los corredores aéreos, aerovías y rutas RNAV —*Route Navigation*—. El nivel de vuelo del tránsito aéreo depende del tipo de aeronave:

A) 27 000 pies: nivel mínimo empleado por las aeronaves que nos sobrevuelan en ruta hacia los FIR contiguos o adyacentes. Está considerado como el nivel de vuelo de mayor importancia que utilizan aeronaves de fuselaje ancho —R-7realizó 1600 sobrevuelos en marzo de 2004 y en el año 2005 hubo un aumento para las operaciones aéreas de 3771—. Se garantiza el enlace digital en todo el FIR Cuba por los transeceptores situados en Sandino, Pico San Juan y la Gran Piedra. Esta cobertura cubre todo el FIR con un nivel de señal recibida superior a -75 dBm.

B) 17 000 pies: nivel de vuelo promedio de las aeronaves que realizan operaciones nacionales. Se garantiza el enlace digital en modo 2 con los transeceptores situados en la Gran Piedra, Pico San Juan, y Sandino. El nivel de intensidad señal recibido es superior a -75dBm a la entrada de los receptores en la mayoría del área de cobertura.

C) 9 000 pies: nivel mínimo autorizado en la FIR Cuba para los sobrevuelos de aeronaves monomotor y bimotor, con equipamiento para VDL2, que por su techo de vuelo no puedan ascender a nivel de vuelo de 10 000 pies. Aquí el enlace VDL2 se garantiza por los transeceptores de la Gran Piedra, Florida, Pico San Juan, Rayo y Sandino. A este nivel de vuelo se garantiza el área de responsabilidad en el FIR Cuba. El nivel promedio de señal es superior a -75 dBm.

D) 4 000 pies: nivel promedio en que vuelan aeronaves nacionales para el servicio turístico, modelo AN-2. El enlace VDL2 se garantiza con la cobertura brindada por las posiciones en tierra en la Gran Piedra, Florida, Pico San Juan, Amaro, Rayo y Sandino. A este nivel de vuelo, el nivel de señal recibida fluctúa entre -75dBm y -63 dBm. Debe hacerse notar que a este nivel la mayoría de los vuelos se realizan mediante orientación visual —*Visual Fly Rules* (VFR)—, con comunicación de voz con las torres de control de

aeródromo en su ruta. No obstante, la cantidad de aeronaves dotadas para el vuelo por instrumentos —*Instrumental Fly Rules* (IFR)— no opera habitualmente a estos niveles.

El valor de los parámetros empleados para el cálculo ha sido:

- Sensibilidad de los receptores (-95 dBm).
- Ganancia de las antenas empleadas (0 dBd).
- Pérdidas en las líneas de transmisión y conectores en cada instalación.
- Potencia de los transmisores (50 W).
- Niveles de vuelo.
- Características del relieve.

El fabricante del receptor Harris VDR-2205 especifica una sensibilidad de -95 dBm con FEC —*Forward Error Correction*— para una tasa de error menor de 1 bit erróneo cada 10 000 bits. La ganancia de las antenas empleadas se ha tomado como 0 dBd. La potencia de los transmisores se ha fijado en 50 watts.

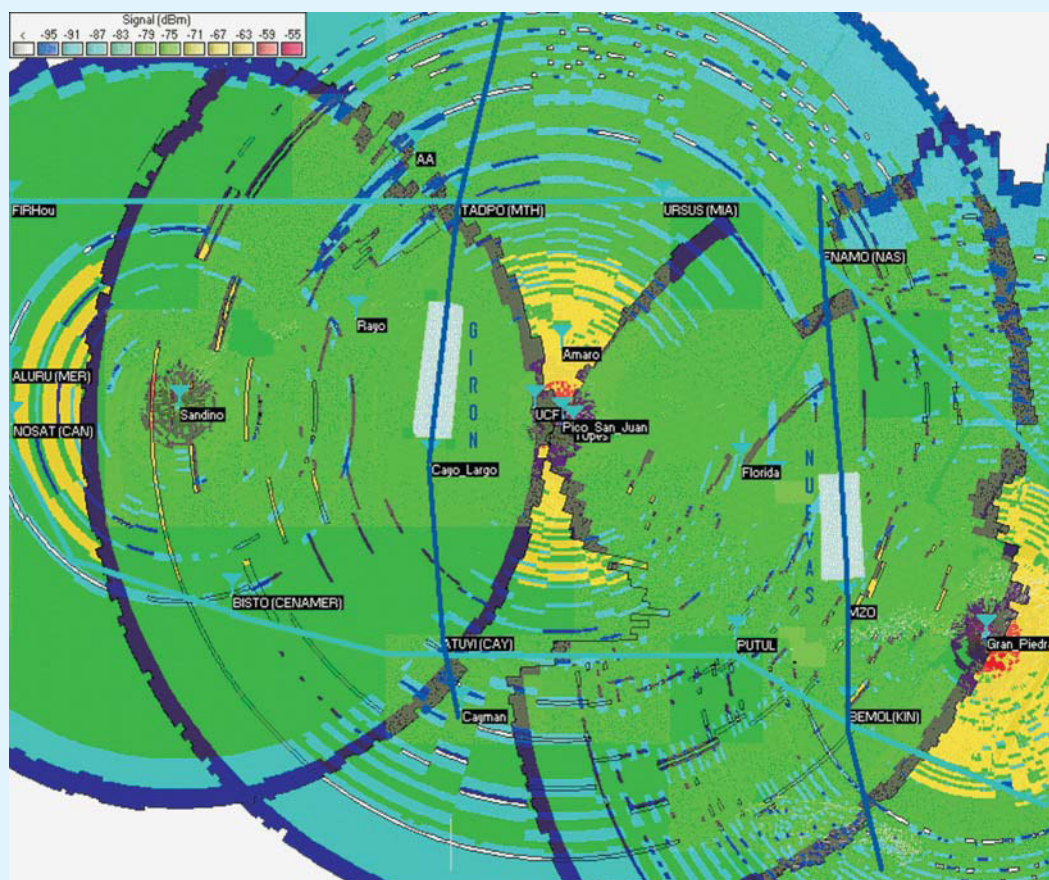


Figura 7 Cobertura a 27000 pies - 8229 m

Conclusiones

La implantación de la subred VDL2 contribuirá a cumplir con conceptos y exigencias de mejorar la capacidad, la integridad, la seguridad, el rendimiento y la cobertura de los sistemas de radiocomunicaciones aeronáuticas en Cuba. Se mejoran considerablemente los requisitos de la gestión del tránsito aéreo con una mayor seguridad operacional, mayor capacidad del sistema, utilización óptima de la capacidad del aeropuerto, menos retrasos de vuelos, reducción de los costos de explotación de los vuelos, reducción del consumo de combustible y las emisiones, mayor eficiencia en la utilización del espacio aéreo y más flexibilidad. Asimismo permite fijar con precisión una separación más reducida entre aeronaves, hacer la planificación dinámica de los vuelos, brindar más facilidades para dar cabida a los perfiles de vuelos óptimos y lograr disminuir la carga de trabajo para el controlador, con lo que este aumenta su productividad. ■

Referencias bibliográficas

- [1] Plan Mundial de Navegación Aérea para los Sistemas CNS/ATM. Documento 9750-Segunda Edición, OACI, 2002.
- [2] Manual Completo de la Red de Telecomunicaciones Aeronáuticas. Documento 9739 OACI.
- [3] Manual de las Disposiciones Técnicas para la Red de Telecomunicaciones Aeronáuticas. Documento 9705.
- [4] Anexo 10, Telecomunicaciones Aeronáuticas, OACI.
- [5] Coude, Roger. Radio Mobile for Windows, Software. ITS Irregular Terrain Model, version 1.2.2 Algorithm. Disponible en: <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>. (Consulta: noviembre/2004)
- [6] Ibídem. Disponible en: <http://www.qsl.net/ve2dbe/english1.html>. (Consulta: noviembre/2004).
- [7] Ibídem. Disponible en: <http://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/>. (Consulta: noviembre/2004)
- [8] Ibídem. Disponible en: <http://elbert.its.bldrdoc.gov/itm.html>. (Consulta: noviembre/2004)
- [9] Ibídem. Disponible en: ftp://flatop.its.bldrdoc.gov/itm/itm_alg.pdf. (Consulta: noviembre/2004)
- [10] Ibídem. <ftp://flatop.its.bldrdoc.gov/itm/itm.pdf>. (Consulta: noviembre/2004)

Bibliografía complementaria

- Anexo 11. Servicios de Tránsito Aéreo, OACI. Manual de implantación de una separación vertical mínima de 300 metros (1000 pies) entre nivel de vuelo 290 y 410 inclusive. Documento 9774, OACI.
- ETSI EN 301 841-1. Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); VHF Air-Ground Digital Link (VDL) Mode 2; Technical Characteristics and Methods of Measurement for Ground-Based Equipment; Part Physical Layer and MAC Sub-Layer. Disponible en: http://www.etsi.org_en_30184101v010101p.doc. (Consulta: noviembre/2005).
- ICAO International Standards Recommended Practices and Procedures for Air Navigation Services ANNEX 10, volume 1, part. 1.
- Manual para la performance de navegación requerida (RNP). Documento 9613, OACI.
- Manual sobre ensayos de radioayudas a la navegación, volumen 3, Ensayo de Sistemas del Radar de Vigilancia. Documento 8071, OACI Manual sobre la metodología de planificación del espacio aéreo para determinar las mínimas de separación. Documento 9689, OACI.
- Manual sobre el Enlace de Datos VHF (VDL) en Modo 2. Documento 9776, OACI.
- Manual sobre los sistemas del radar secundario de vigilancia (SSR). Documento 9688, OACI.