

ANEXO A: LAS TECNOLOGÍAS SATELITALES DE TELECOMUNICACIONES

Por tecnologías satelitales se concibe el conjunto de conocimientos aplicados, medios o procedimientos empleados por el hombre para ofrecer servicios de telecomunicaciones a través de satélites y/o para el diseño e implementación de equipo para este propósito. Para efectos de una exposición más clara, en este anexo el análisis se ha dividido en tecnologías asociadas a la infraestructura y las asociadas a los servicios, donde las primeras están orientadas al conjunto de equipos hardware y la segunda a los elementos software.

1. TECNOLOGÍAS ASOCIADAS A LA INFRAESTRUCTURA

Los sistemas satelitales de telecomunicaciones son en esencia, un conjunto de dispositivos que se suman para hacer posible una comunicación a través de microondas entre un conjunto de estaciones terrenas empleando un repetidor hospedado en el espacio. Desde este punto de vista, no es arriesgado pensar que un sistema de comunicaciones por satélite es conceptualmente equivalente a un mecanismo de transmisión como lo sería una fibra óptica, un cable coaxial o un par de cobre, considerando debidamente las proporciones y características de cada uno. Aún cuando se hable de procesamiento a bordo de los satélites, este debe entenderse como procesos realizados sobre la portadora o la señal de banda base orientados a garantizar la integridad de la información durante el proceso de transporte y no a cambiar el contenido o significado que esta representa para el usuario, dado que el objetivo es hacer que el sistema satelital sea transparente para la información que se cursa a través del mismo.

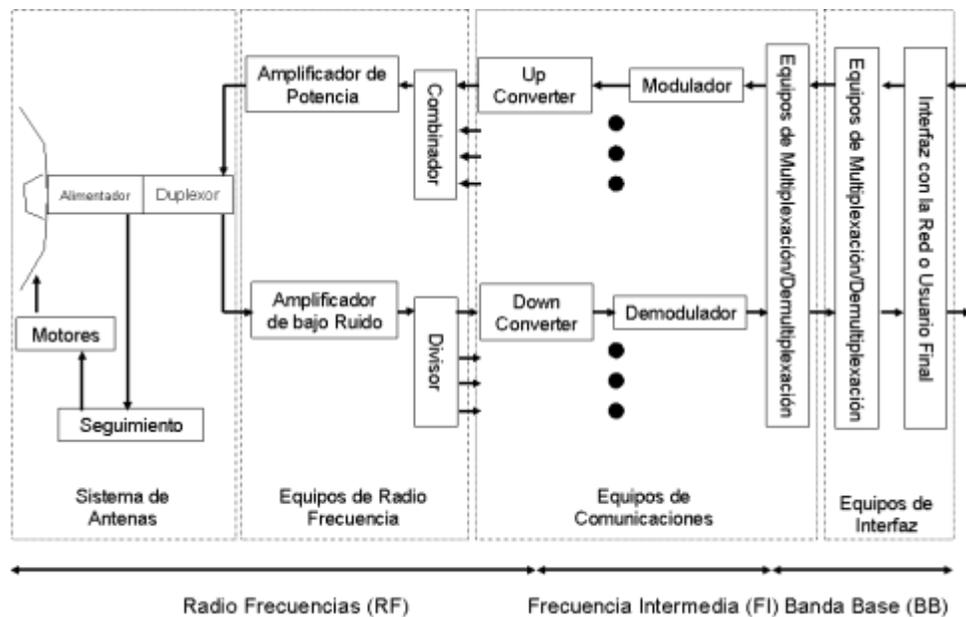
Siguiendo la dinámica de esta definición, todos los elementos que componen un sistema de telecomunicaciones por satélite se pueden asociar a uno de tres segmentos en los cuales el sistema está dividido. El primero, es el segmento terreno, el cual está constituido por todas las estaciones terrenas de una misma red habilitadas para capturar señales electromagnéticas u ópticas provenientes de un satélite específico y extraer de ella la información en el formato compatible con el equipo o red terrestre de cada usuario; de igual forma, estas estaciones pueden o no estar dotadas con equipos para adaptar la información al formato compatible con el enlace satelital y transmitirla sea a través del espectro de radio u óptico hacia el repetidor en el espacio.

En segunda instancia, el segmento espacial, referido al conjunto de satélites a través de los cuales se cursa el tráfico generado por el segmento terreno y como resultado, hacen posible la conexión de todos los puntos de la red en tierra. Los satélites son fundamentalmente elementos que capturan la señal electromagnética u óptica proveniente del primer usuario y la retransmiten con el nivel suficiente para recuperar la información en el extremo del segundo usuario con la posibilidad de realizar procesamiento a bordo de la señal, dependiendo de las capacidades con que haya sido dotado el satélite.

El tercero o segmento de control, está constituido por todos los sistemas en tierra y espacio que hacen posible la permanencia y control de la infraestructura en órbita. Son entonces, las estaciones de seguimiento, telemetría y telecomando dispuestas en tierra y todo el equipo a bordo cuyo objetivo sea el monitoreo y control remoto de las condiciones de cada uno de los subsistemas del satélite, la determinación de su posición y orientación en el espacio.

1.1 TECNOLOGÍAS ASOCIADAS AL SEGMENTO TERRENO.

Figura 1: Estructura de una Estación Terrena



Copyright © Avantes 2005

De acuerdo a la función, existen tres categorías de estaciones terrenas; la primera comprende estaciones de interfaz o pasarelas que interconectan una red terrestre con el segmento espacial, de ahí que cursen alto tráfico y requieran enlaces de gran ancho de banda y elevada disponibilidad. Entre tanto, las estaciones de usuarios, clasifican los terminales pequeños como dispositivos móviles o Antenas de Apertura muy Pequeña (VSAT, Very Small Aperture Terminal) donde la señal electromagnética capturada del satélite es directamente convertida en información para el usuario final. Por último, las estaciones de servicio consisten en instalaciones que actúan como concentradoras de la información proveniente de los usuarios y/o como fuentes de información que debe ser enviada hacia estos, de manera que a través de ellas se cursa todo el tráfico de la red. La estructura común de una estación terrena, independiente de su función, se expone en un diagrama de bloques en la Figura 1 para posterior discusión de cada uno.

1.1.1 Sistema de Antenas.

En vista del inconveniente derivado de las obstrucciones que se generan por la infraestructura que sostiene el alimentador además del volumen y peso de los reflectores parabólicos, se ha desarrollado dos tipos de antenas. En el primer caso, se consideran los Terminales de Apertura muy Pequeña denominados **VSAT** por la abreviación en inglés, en el segundo, están las antenas con reflectores planos.

Las antenas **VSAT** también conocidos como Terminales Personales, son aquellas antenas cuyo diámetro está comprendido entre 0.8m y 3.8m con un peso nominal entre 9,4Kg y 41Kg respectivamente. La reducción en el diámetro de las estaciones terrenas radica en la necesidad de ofertar servicios satelitales cada vez más directamente al usuario final o consumidor del servicio a un menor costo y con facilidades competitivas con las tecnologías terrestres. Esta tendencia condujo a reducir la Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE) de las estaciones de usuario y con ello el tamaño de la antena. La compensación de esta reducción se realiza a través de la inclusión de una nueva estación a la red, como se verá en la sección siguiente.

Las antenas con reflectores planos, se logran a partir de un conjunto de reflectores grabados o impresos sobre una superficie plana, efecto que reduce considerablemente la exigencia del volumen y se adapta fácilmente a una superficie ya existente. De otra parte, la posición del alimentador la cual se define previamente, determina la posición exacto de cada reflector del arreglo en la superficie plana, con lo cual se evita totalmente el efecto de las obstrucciones. No obstante, la construcción de este tipo de antenas exige extrema precisión en la forma y ubicación tanto de cada reflector como del alimentador, pues es precisamente este par de variables las que definen las condiciones de fase con que el arreglo de reflectores retransmitirá la señal para generar el patrón de radiación. Por otra parte, las características del arreglo de reflectores cambian drásticamente de acuerdo a la frecuencia debido a que las dimensiones de cada uno están relacionadas muy estrechamente con este parámetro y en consecuencia estos reflectores deberán diseñarse especialmente para la frecuencia exacta de operación, sin embargo la factibilidad de reflectores planos y livianos, la posibilidad de estos ser plegados, el bajo costo respecto de una antena parabólica equivalente y la facilidad de implementación, son las razones que impulsan al uso de este tipo de antenas tanto en el segmento terreno como en el segmento espacial.

Las antenas parabólicas e incluso los arreglos planos de reflectores, son en sentido estricto antenas con patrón de radiación fijo, aun cuando los paraboloides gocen de dos o más alimentadores desplazados del foco, cada uno generando un lóbulo orientado en dirección diferente como en el caso de las antenas multihaz que permiten capturar o transmitir señales a satélites diferentes con la misma antena, estos son fijos y su desplazamiento implica necesariamente un movimiento mecánico de toda la infraestructura de la antena mediante el uso de motores como en la **Figura 1**. En el caso de los arreglos reflectivos para cambiar el patrón de radiación se requiere cambiar las dimensiones de cada uno de los reflectores lo cual se puede lograr cargando cada reflector con un varactor que involucre una capacitancia que modifique la longitud

eléctrica equivalente de cada uno y con ello, producir un cambio del lóbulo de radiación como resultado del voltaje aplicado a cada varactor. Otra posibilidad puede ser la incorporación de pequeños motores que roten cada uno de los reflectores, pero se debe considerar que esta solución incrementa el costo, el peso y la complejidad de la construcción del arreglo de reflectores.

Otra generación de antenas es conocida como arreglos de lentes, también empleada para generar haces móviles. Inicialmente, un lente consiste en un par de antenas interconectadas a través de una línea de transmisión que de acuerdo a su longitud incorpora un cambio de fase. Según esta dinámica, una antena apunta en la dirección de la fuente u objetivo de radiación y la otra hacia el alimentador que recibirá o transmitirá la señal radioeléctrica. Así, un arreglo de lentes es un conjunto de estas estructuras con la particularidad de que la longitud del medio de transmisión varía de acuerdo a la posición del lente en el arreglo. La dirección del lóbulo principal de radiación, en el modo transmisión, esta determinada por la posición del alimentador alrededor del arco focal del arreglo, en cambio en el modo de recepción, las señales provenientes de diferentes direcciones son concentradas a puntos específicos del arco focal, lo que redundo en una mejor respuesta a los efectos del multitrayecto. Un arreglo de lentes se puede lograr a partir de dos arreglos de reflectores planos contrapuestos con conexiones de longitud variable, y dado el modo de funcionamiento, se pueden disponer varios alimentadores estratégicamente ubicados para generar múltiples haces fijos y además, generar formación dinámica de estos a través del movimiento del alimentador o a través de la variación de la amplitud de la señal radiada hacia los lentes, no obstante, el efecto solo es efectivo en el modo de transmisión y el desplazamiento de las partes móviles debe ser muy fino.

La orientación dinámica del lóbulo principal toma un papel de vital importancia teniendo presente que los satélites de órbitas no geoestacionarias se encuentran en continuo movimiento obligando a efectuar un seguimiento a estos satélites, aún los de órbita geoestacionaria sufren movimientos debido a la interacción con otros cuerpos celestes que los desplazan temporalmente de su posición, produciendo un efecto de variación en la intensidad de la señal en las estaciones terrenas cuando estas son suficientemente directivas. Para los efectos de seguimiento mecánico se conocen varias técnicas que varían desde la programación del movimiento de la antena de acuerdo al movimiento del satélite o a través de la detección sucesiva del nivel de amplitud de la señal de información o de una señal piloto generada por el satélite para este fin. Los desplazamientos de las antenas están muy ligados a la directividad de estas debido a que cuanto más directivas, mayor es la exigencia de apuntamiento, presentándose el caso de antenas que no requieren de seguimiento, dado que su amplio haz permite mayor flexibilidad en el apuntamiento a costa de radiación y recepción de energía radioeléctrica en direcciones no deseadas.

En cuanto al apuntamiento, la realidad es que cuanto mejor orientada esté la antena hacia el satélite mayor es la intensidad de la señal y menor el nivel de interferencias. Ahora bien, también debe considerarse que un movimiento brusco de la antena en tierra debido a fricciones mecánicas o al viento, genera un efecto degenerativo sobre la amplitud de la

señal, por lo cual se requiere que los sistemas de apuntamiento tengan una respuesta lo más dinámica y rápida posible, característica difícil de lograr a través de procesos mecánicos que incorporan vibraciones y movimientos aleatorios durante la reorientación. Para eliminar estos efectos se ha planteado el uso de arreglos de antenas con la capacidad de conformar dinámicamente un haz móvil como resultado de la interacción controlada de los haces de cada arreglo a través de mecanismos electrónicos. Esta característica que además de optimizar el proceso de apuntamiento al satélite a través de la creación de máximos de radiación en tal dirección permite la evasión de interferencias a través de la generación de nulos de radiación en la dirección de las fuentes interferentes, ha permitido mayor flexibilidad en el reuso de frecuencias y rechazo de señales no deseadas desde o hacia otros satélites. Mayor es la importancia de estos mecanismos cuando se trata de estaciones terrenas móviles, las cuales además de cambiar de posición y orientación respecto del satélite, se enfrentan a escenarios cambiantes en términos de interferencia y multitrayectos.

Además de la ganancia de la antena y el patrón de radiación, existen otros parámetros como el rango de frecuencia de operación, polarización y aislamiento entre polarizaciones ortogonales, los cuales no están definidos propiamente por el tipo de reflector sino más bien por el tipo de alimentador que radia o recoge la energía electromagnética. Estos dispositivos además están muy comprometidos con la eficiencia de las antenas, dado que la mayor parte de los problemas en el sistema, entre estos, la sobreiluminación o subiluminación, los errores de fase, difracción en los bordes del reflector e incluso los lóbulos laterales están asociados tanto a la posición como a las características de radiación del alimentador, las cuales se definen a partir de las variables que se conjugan en su construcción y tales no son más que sus dimensiones y formas geométricas. En este sentido, la tarea es mejorar su comportamiento para garantizar su operación en polarizaciones duales y/o en múltiples bandas buscando hacer cada vez más flexible el sistema de antenas.

Normalmente la antena o arreglo de antenas que se emplea para la transmisión de radiofrecuencia, es la misma que se emplea para recepción. Esta posibilidad se hace realidad gracias a la acción de un proceso denominado duplexación, el cual consiste en separar el sentido de transmisión y recepción en la misma antena, tal y como se ve en la **Figura 1**. Este proceso se puede llevar a cabo a través de interruptores basados en componentes semiconductores tipo Transistores de Electrones de Alta Movilidad (**HEMT, High Electron Mobilty Transistor**) que intercambien entre recepción y transmisión si se trata de sistemas de duplexación por división de tiempo (**TDD, Time Division Duplex**). En el caso de flujos continuos en ambos sentidos sobre frecuencias diferentes, es decir duplexación por división de frecuencia (**FDD, Frequency Division Duplex**) los dispositivos empleados pueden ser circuladores, acopladores direccionales o arreglos de filtros pasabanda.

La duplexación exige necesariamente que los dispositivos empleados para este proceso manipulen los niveles de potencia máximos de operación sin caer en distorsiones, generen mínimas pérdidas de inserción y al mismo tiempo, un alto aislamiento entre los sentidos de transmisión y recepción para evitar filtraciones de ruido entre estos y proteger

a los sistemas de transmisión y recepción. Lamentablemente, estos parámetros están asociados a determinadas bandas de operación para los cuales estos fueron optimizados, en este sentido se conocen procesos de duplexación adaptativos que permiten mayor flexibilidad para la banda de operación de las estaciones terrenas a través del uso de arreglos de filtros y lazos activos de cancelación de señales, efecto que redundante en capacidad de acceso a diferentes satélites con variedad de tecnologías de duplexación.

1.1.2 Sistema de Radiofrecuencia.

En la etapa de radio frecuencia según se mostró en la Figura 1, a partir del sistema de duplexación tanto la recepción como la transmisión siguen caminos diferentes. En el sentido de recepción los equipos involucrados son los Amplificadores de Bajo Ruido (LNA, Low Noise Amplifier) y los sistemas para separar las diferentes portadoras, mientras que en el sentido de transmisión son los sistemas de combinación de portadoras y los amplificadores de potencia.

1.1.3 Amplificadores de Bajo Ruido.

Los Amplificadores de Bajo Ruido (LNA, Low Noise Amplifier), son elementos que deben elevar el nivel de la señal capturada a niveles aceptables, garantizando la menor contribución de ruido a la señal debido a que los niveles en recepción son demasiado bajos y el ruido podría enmascararlos totalmente y continuar siendo amplificado por las etapas siguientes. Inicialmente la amplificación para la banda C en recepción se adelantaba a través de Masers enfriados por helio, posteriormente con amplificadores paramétricos enfriados criogénicamente logrando temperaturas de ruido de 20°K y alrededor de 500MHz de ancho de banda, no obstante el costo de estos dispositivos y la necesidad de mayores anchos de banda, alta ganancia y linealidad, condujo rápidamente a la búsqueda de otras alternativas como los Transistores de Efecto de Campo (FETs, Field-Effect Transistors) con los cuales se logran temperaturas de ruido entre los 80°K a 300°K sin sistemas de enfriamiento mediante la selección del tipo y características geométricas de los semiconductores. Con enfriamiento por efecto Peltier, se logra reducir la temperatura equivalente hasta 55°K, sin embargo con el incremento en la utilización de la banda Ku y posteriormente de la banda Ka, la respuesta de los amplificadores construidos con transistores tanto de efecto de campo como de juntura presentaban comportamientos deficientes a estas frecuencias y hoy en día, los amplificadores de bajo ruido son desarrollados con Transistores de Electrones de Alta Movilidad (HEMT, High Electron Mobility Transistor), los cuales son también transistores de efecto de campo pero con respuesta mejorada en las altas frecuencias, hasta tanto que la temperatura equivalente de ruido aproximada es de 200°K para un Amplificador de Bajo Ruido (LNA, Low Noise Amplifier) operando a 40GHz.

Los retos en el desarrollo de estos amplificadores además de la reducción de las contribuciones de ruido que estos incorporan a la señal recibida, la linealidad y amplio ancho de banda son la búsqueda de sistemas dinámicos que ayuden a compensar las

caídas aleatorias de nivel, de manera que se obtenga del Amplificador de Bajo Ruido (LNA, Low Noise Amplifier) una señal que sea independiente de las condiciones de recepción.

1.1.4 Divisores de Señal.

Cuando las estaciones terrenas deben procesar más de una señal recibida del satélite, después del Amplificador de Bajo Ruido (LNA, Low Noise Amplifier) se debe adicionar una etapa orientada a separar cada portadora para que cada una tenga una conversión y tratamiento particular a Frecuencia Intermedia (IF, Intermediate Frequency). Este proceso se adelanta a través de dispositivos pasivos como acopladores híbridos o arreglos de filtros pasabanda, no obstante estos incorporan altas pérdidas por inserción, por lo cual es mejor considerar opciones con circuitos integrados de microondas o incluso delegar esta función a sistemas de Procesamiento Digital de Señal (DSP, Digital Signal Processing), una vez se ha realizado la debida adaptación a frecuencia intermedia y conversión analógica a digital como se verá más adelante.

1.1.5 Amplificadores de Potencia.

También conocidos como Amplificadores de Alta Potencia (High Power Amplifier), son elementos cuya función es aumentar el nivel de potencia de las señales generadas por el equipo de comunicaciones para que sumado con la ganancia de antena se obtenga una Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE) suficiente para su posterior detección en el satélite. Los amplificadores más comunes son el Klystron (KPA, Klystron Power Amplifier), el Tubo de Ondas Viajeras (TWTA, Travelling Wave Tube Amplifier) y el Amplificador de Potencia de Estado Sólido (SSPA, Solid State Power Amplifier).

El primero y ya ampliamente utilizado por sus altas condiciones de ganancia resulta ser el KPA, pero sus inconvenientes son tales que, su máxima ganancia está determinada por la capacidad de calor tolerable por la estructura del tubo antes que se derrita su estructura o que el tubo sufra daños mecánicos. Por otra parte, se debe considerar la aparición de ruido blanco debido a que el haz de electrones dentro del **KPA** nunca es perfectamente uniforme, lo cual degrada considerablemente la señal amplificada. Con una arquitectura más compleja que el **KPA** y con características de funcionamiento diferentes, surge el **TWTA**. Este amplificador, aún basado en tubos de vacío presenta alta fiabilidad, más ancho de banda y alta ganancia respecto del primero, sin embargo su operación no es completamente lineal lo cual genera la aparición de productos de intermodulación y con estos distorsiones de la señal. Para compensar estos efectos en el **TWTA**, la solución más frecuente es la disminución de la potencia de salida del amplificador, lo cual representa ineficiencias en el empleo de los recursos.

Los Amplificadores de Estado Sólido o **SSPAs**, los cuales son el resultado de los adelantos en los transistores **FET** de Arseniuro de Galio (GaAs) y cuyo rendimiento en términos de linealidad y fiabilidad es muy superior al de los anteriores y además,

presentan menores requerimientos de potencia, característica fundamental de los **SSPA** que se ve compensada con la alta ganancia de las antenas en el segmento espacial.

Los desafíos en la construcción de los Amplificadores de Potencia (PA, Power Amplifier) independiente de la técnica empleada, son la linealidad de la respuesta buscando emplear la mayor potencia sin temer a los efectos de la intermodulación. Por otra parte, la estabilidad de la ganancia como función del tiempo, como función de la frecuencia para una potencia dada y como función de la frecuencia para una porción definida de ancho de banda con el objetivo de evitar las variaciones aleatorias de la señal que se transmite al satélite. Otra dificultad a superar es la evasión de ondas estacionarias y los adelantos o atrasos que pueden sufrir las diferentes portadoras a través de los amplificadores. Si estos inconvenientes no son superados satisfactoriamente en la construcción de estos amplificadores, se deben adicionar equipos que minimicen estos efectos, como es el caso de ecualizadores de fase en el caso de tiempos de propagación diferentes para cada portadora o linealizadores en el evento de presentarse niveles de potencia no proporcionales a los presentes en la entrada.

1.1.6 Acopladores de Señal.

En el caso de que una estación terrena transmita más de una portadora, estas deben ser acopladas sobre un mismo medio de transmisión para radiarse posteriormente por una única antena. Este proceso se puede realizar antes o después del proceso de amplificación de potencia, sin embargo, si se acoplan las señales antes del amplificador sea bien a través de circuladores o acopladores híbridos, además de exigir gran ancho de banda al amplificador se deben considerar los efectos de la intermodulación. Caso contrario si el acople se realiza posterior a la etapa de amplificación de cada portadora, donde los amplificadores pueden operar en saturación sin el riesgo de producir armónicos interferentes y sin mayor exigencia de ancho de banda, el efecto a tener en cuenta en este caso son las pérdidas por inserción de los elementos acopladores, las cuales tienen mayor impacto en esta estructura. La forma en que se acoplan las portadoras en la estación terrena, puede ser en diferentes ocasiones, una combinación de las dos estructuras anteriores donde las portadoras asociadas a un mismo transpondedor se acoplan y se amplifican como conjunto, entre tanto que otras sea bien por el requerimiento de ancho de banda o nivel de potencia se amplifican separadamente.

1.1.7 Sistema de Comunicaciones.

La sección de comunicaciones en las estaciones terrenas se compone de los equipos que en el sentido de recepción se encargan de convertir la señal de Radiofrecuencia (RF, Radiofrequency) proveniente del LNA en una señal de Frecuencia Intermedia (IF, Intermediate Frequency), filtrar y ecualizar para controlar los efectos de la no homogeneidad de la velocidad de grupo y finalmente realizar la demodulación para extraer la Banda Base (BB, Base Band). En sentido de transmisión se aplica la modulación de la portadora con la banda base, filtraje, ecualización y finalmente la

conversión a la frecuencia de transmisión. Independientemente de la naturaleza digital o analógica del sistema estos procesos son realizados indiferentemente para ambos casos, sin embargo cabe recordar que en el dominio analógico se realizan otros procesos como pre-énfasis y de-énfasis y en el digital la encriptación, codificación del canal, mezcla de bits y control de errores. Además se debe comentar que la evolución de las telecomunicaciones por satélite se produce en el dominio digital donde todos los procesos mencionados anteriormente son llevadas a cabo por procesadores digitales sea bien para datos o incluso voz y video. Siguiendo esta condición, a continuación se realiza el análisis de cada bloque de esta sección mostrado en la Figura 1 y se analiza las opciones hardware y al final se describe un sistema de comunicaciones basado en tecnologías de Procesamiento Digital de Señal (DSP, Digital Signal Processing).

1.1.8 Adaptadores de Frecuencia.

La adaptación de frecuencia es un proceso que se realiza para trasladar una porción de ancho de banda desde la Frecuencia Intermedia (IF, Intermediate Frequency) hasta la banda de transmisión a través de los Convertidores Elevadores (Up Converter) y de manera contraria, es decir desde la banda de recepción hasta la Frecuencia Intermedia (IF, Intermediate Frequency) por medio de los Convertidores Reductores (Down Converter). Ambos son procesos que han sido adelantados por medios analógicos empleando osciladores encargados de generar una frecuencia que se suma o se resta con la señal de interés en mezcladores donde se generan nuevas señales cuya frecuencia es la suma y la resta de ambas frecuencias, así que según sea el interés, se elimina una de las dos, la suma en el caso de los convertidores elevadores o la resta en el caso de los convertidores reductores.

Según lo anterior, el funcionamiento de estos aparatos depende de la estabilidad de la frecuencia del Oscilador Local (LO, Local Oscillator), la capacidad de rechazar los niveles de los armónicos espurios que puedan involucrarse dentro del ancho de banda de la señal requerida y además la linealidad de la respuesta del dispositivo tanto en función de la amplitud como de la frecuencia de las entradas. Estos parámetros que son necesariamente inherentes a la naturaleza analógica de este entorno, son superados ampliamente con el uso de técnicas digitales, en este sentido se conoce el Conversor Digital Elevador (**DDC, Digital Down Conversión**) y el Conversor Digital Reductor (**DUC, Digital Up Conversion**), los cuales transforman la señal analógica en una señal digital y a través de algoritmos realizan la translación de frecuencias y posteriormente vuelven la señal al dominio analógico, de manera que en esta dinámica los parámetros de estabilidad, armónicos y linealidad son mejor controlados.

1.1.9 Códigos de Corrección de Errores.

Los códigos de corrección de errores son fundamentalmente una herramienta empleada para disminuir la Proporción de Bits Erróneos (BER, Bit Error Rate) cuando los incrementos de potencia de transmisión no son técnica o económicamente posibles. El proceso consiste en la generación e inserción de bits redundantes dentro del flujo de

información para que en el extremo receptor un algoritmo identifique los errores y realice las correcciones (FEC, Forward Error Correction). La eficiencia de los códigos depende en gran medida de la cantidad de información adicional que se incorpore a la información, de manera que el precio a pagar en esta técnica es un mayor requerimiento de ancho de banda y mayor capacidad de procesamiento tanto en transmisión como en recepción. Sin embargo es la técnica de mayor aceptación considerando que la contraparte, es decir, la Solicitud de Retransmisión Automático (ARQ, Automatic Repeat reQuest) no es viable dado el retardo de propagación que sufre la señal en el canal satelital.

El mayor adelanto en la corrección de errores y que además ha permitido aumentar la capacidad del canal muy cerca de la máxima teórica, ha sido el uso de códigos turbo, cuya particularidad radica en la combinación de diferentes códigos por medio de un intercalamiento aleatorio, que consiste en un reordenamiento temporal del flujo de bits generado por cada uno de los códigos. Esta característica es la que al final otorga mejor desempeño, dado que relacionan los errores que se generan fácilmente en una parte del código con otros que son poco probables en la otra mitad, facilitando tanto la detección como la corrección. A pesar del aumento de la eficiencia con estos códigos aún persiste el sacrificio de ancho de banda debido a la información redundante, lo cual también representa aumento de costo para el enlace. Esta es la principal razón que conduce a pensar que el código no debe ser estático, es decir, la cantidad de bits redundantes debe aumentar o disminuir en proporción a las variaciones de la tasa de bits erróneos debidas a los cambios de las condiciones del canal de transmisión. En esta dinámica, la tendencia en la codificación del canal se orienta hacia la generación de algoritmos adaptativos de corrección de errores y como se verá en la siguiente sección, integrados con los procesos de modulación para balancear el efecto de mayor eficiencia en la corrección a costa de mayor ancho de banda.

1.1.10 Sistemas de Modulación y Demodulación.

Está claro que cuanto más compleja es la constelación del esquema de modulación, mayor es la eficiencia espectral, lo cual redundando en mayor capacidad sobre el mismo ancho de banda. Sin embargo, este hecho implica mejores condiciones de transmisión en términos de potencia y linealidad de los dispositivos, dado que tales constelaciones son más vulnerables a las distorsiones, lo cual está directamente relacionado con el indeseado aumento de la Proporción de Bits Erróneos (BER, Bit Error Rate).

Considerar un aumento de la potencia de transmisión significa aumentar los costos de la estación terrena y exigir mayor energía a las baterías en el caso de los terminales móviles, de modo que este efecto debe compensarse con el uso de códigos para permitir la corrección de errores en el extremo receptor. No obstante, cuanto mejor compensación realice un código, mayor es la complejidad de los codificadores y decodificadores, por lo cual se considera como la opción más acertada la integración de los procesos de codificación y modulación para obtener lo que se conoce como Modulaciones Codificadas. Este nuevo concepto traslada el desafío de aumentar la distancia **Hamming** de los códigos de corrección de errores, en el incremento de la distancia Euclidiana a través de

la inserción de patrones sobre la señal transmitida a fin de facilitar la detección de cada estado en constelaciones muy complejas.

Un elemento importante en la consideración de modulaciones codificadas es que cuanto mayor es su complejidad mayor es el tiempo de demodulación que se requiere, lo cual representa necesariamente una contribución adicional al retardo de propagación que está ligado al canal satelital. Esta condición necesariamente implica el uso de procesadores de muy alta velocidad, de manera que la eficiencia espectral no se obtenga a costa de un mayor retardo de la señal de información.

Hoy en día los parámetros de diseño de un enlace, incluido el esquema de modulación, se determinan de manera fija considerando la disponibilidad requerida en las condiciones más adversas que se puedan presentar. Según lo anterior, en situaciones diferentes se presenta una subutilización de los recursos puesto que con prestaciones mínimas se garantiza la misma disponibilidad. Este hecho, ha conducido al desarrollo de sistemas adaptativos de modulación cuyos parámetros, como la tasa de transmisión, tamaño de la constelación y esquema de codificación varían dinámicamente de acuerdo al escenario permitiendo obtener siempre la mayor eficiencia del sistema. Los desafíos que aparecen en este empeño son los mecanismos de modelamiento del escenario que permitan determinar las condiciones y en consecuencia los parámetros de operación.

1.1.11 Procesos de Encriptación de la Información.

La mimetización, cifrado o encriptación de los datos como se le conoce a este procedimiento se realiza buscando evitar la interceptación y usurpación de los mensajes por parte de usuarios diferentes a los implicados directamente en la comunicación. La técnica consiste en ejecutar algoritmos que emplean un código conocido en ambos extremos para representar la información, de manera que un usuario que desconozca el código aún cuando capture el flujo de información no puede interpretarlo. Existen dos mecanismos empleados para este efecto: cifrado en Bloque y cifrado de Flujo.

El Cifrado de Flujo o **Stream Ciphering** es un tipo de algoritmo de encriptación simétrico, cuya operación es más rápida que el Cifrado en Bloque, dado que actúa sobre cada bit del texto plano, centra su tarea en la generación de una secuencia de bits usada como clave (**keystream**), la cual mediante combinación con el texto plano a través del uso de la operación lógica XOR realiza el proceso de encriptación en el lado del emisor. En el otro extremo de la comunicación, mediante el uso de una llave secreta compartida, el receptor genera un **keystream** idéntico al del emisor y a través de un proceso semejante, logra la recuperación del mensaje de interés.

De otro lado, el Cifrado de Bloques, genera el flujo binario encriptado a partir de la transformación por bloques del flujo original del mensaje, valiéndose de la lógica de una clave criptográfica secreta que se comparte tanto en el lado emisor como en el receptor. Su técnica de encriptación simétrica, denominada así por sus propiedades de confidencialidad e intercambio de llaves y carencia de autenticación e integridad, actúa en

un bloque de tamaño fijo de bits, típicamente 64 o 128 bits dependiendo de la capacidad de procesamiento.

Ahora bien, aun cuando se logra confidencialidad e integridad con la criptografía, la desventaja de su uso en las redes de comunicación, se presenta en el cálculo implícito de las operaciones de cifrado que exigen mayor capacidad de procesamiento en ambos extremos y además retardo debido al tiempo en cifrar y recuperar la información.

1.1.12 Proceso de Aleatorización del Flujo de Bits.

La Aleatorización es un método de reorganización de los bits que permite eliminar cadenas de símbolos idénticos consecutivos, reducir el efecto de errores en ráfaga y con esto asegurar la recuperación precisa de la temporización en el receptor. El proceso consiste en cambiar el orden de los bits de manera aleatoria pero conocida en ambos extremos de la comunicación, de manera que sea posible la recuperación de la información.

Otra de las razones por las cuales se emplean mecanismos de Aleatorización es debido a que las cadenas de bits idénticos contribuyen a la generación de nuevas componentes de frecuencia en el espectro de la potencia radiada por el satélite, cuyas amplitudes pueden contribuir a elevar la potencia atendiendo a que existen limitaciones de este parámetro para garantizar la no interferencia de sistemas que operan en la misma frecuencia. Esta es la razón por la cual estos procesos son conocidos también como dispersión de la energía y son realizados antes de la modulación.

1.1.13 Filtros y Ecuilibradores.

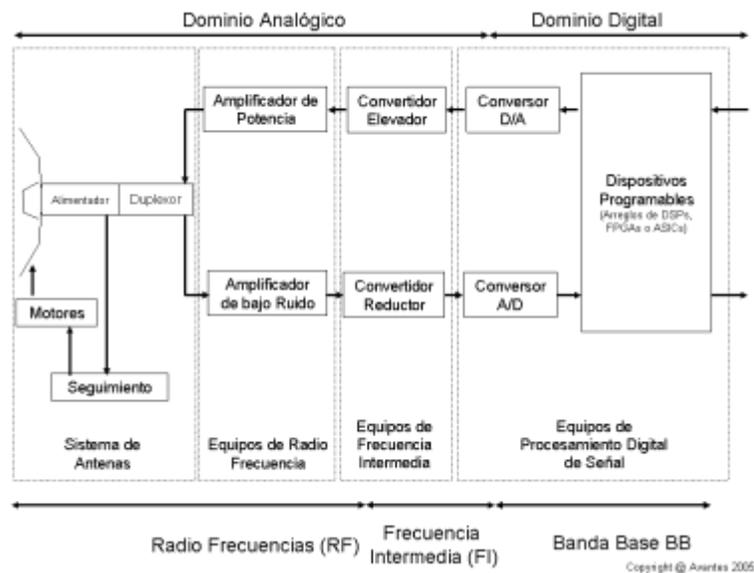
En la etapa de Frecuencia Intermedia (IF, Intermediate Frequency) de la estación terrena diferentes filtros son usados para definir el espectro de la señal de interés y para reducir el ancho de banda de ruido. La importancia de estos elementos, así como las etapas de amplificación mencionadas anteriormente es el efecto de retardo de propagación sobre algunas componentes de frecuencia, lo cual genera desórdenes de fase que deben corregirse a través de ecualizadores, en vista a que estos efectos no son convenientes en términos de detección en esquemas de modulación muy complejos. Normalmente los ecualizadores están incorporados tanto a los filtros como a las etapas de amplificación y dependiendo del grado de precisión se deben o no considerar dispositivos ecualizadores para mejorar la respuesta atendiendo a que estas alinealidades también se asocian a los efectos de la propagación.

1.1.14 Sistemas de Radio Definido por Software.

La incompatibilidad entre los diferentes sistemas de acceso a los servicios de comunicaciones en el entorno inalámbrico, redundante necesariamente en la necesidad de terminales especiales en términos de frecuencia, ancho de banda, esquema de modulación, codificación y tasa de transmisión, de manera que los usuarios están forzados a disponer de un terminal diferente cada vez que exista la necesidad de emplear

un sistema o servicio diferente. Este hecho inspiró el desarrollo de Sistemas de Radio Definidos por Software o SDR, donde todos los procedimientos de frecuencia intermedia y banda base son llevados a cabo a través de técnicas de procesamiento digital de señal y empleo de componentes programables como los Arreglos de Compuertas de Campo Programable (FPGAs, File Programmable Gate Arrays), Procesadores Digitales de Señal (DSPs, Digital Signal Processors) o Circuitos Integrados de Aplicación Específica (ASICs, Application Specific Integrated Circuits) como muestra la Figura 2. La mayor ventaja de esta generación de equipos de radio es que sus componentes son actualizables, en términos prácticos, el cambio de cualquier parámetro como el esquema de modulación o incluso la frecuencia de operación, solo requiere una reprogramación de los algoritmos residentes en los dispositivos programables.

Figura 2: Arquitectura de una Estación Terrena con Tecnología SDR.

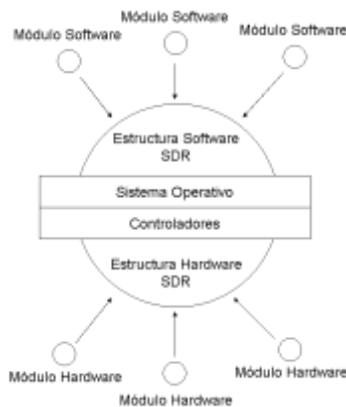


En lo que respecta al segmento terreno, se ha comentado que el propósito de garantizar eficiencia y confiabilidad en la transmisión, ha conducido a que los parámetros de operación de una estación terrena se establezcan de acuerdo a las condiciones existentes para la transmisión, de tal forma que el sistema responda dinámicamente a los cambios del medio y garantice en cualquier caso, la mejor utilización de los recursos. Los dispositivos hardware cuyo funcionamiento está definido de manera fija desde la fabricación, definitivamente no son el camino para lograr este objetivo, el desarrollo de sistemas adaptativos requiere del uso de dispositivos con elevada capacidad de procesamiento, así que la tecnología de Radio Definido por Software está llamada a ser la tecnología de las estaciones terrenas adaptativas.

Las altas frecuencias de las señales de radiofrecuencia de los sistemas satelitales constituyen una barrera para la incorporación de sistemas SDR a las estaciones terrenas, dado que se requieren conversores analógico a digital y digital a analógico de muy alta tasa de muestreo para cumplir con lo establecido por el teorema de **Nyquist**. Cuando más

alta es la frecuencia, mayor dificultad se presenta en la conversión, forzando a preservar los sistemas hardware de conversión de frecuencia tanto elevadores como reductores. Cuando se emplean conversores **ADC** y **DAC** de muy alta resolución se puede realizar la conversión desde las frecuencias de radio directamente, mientras que con conversores de baja resolución se deben mantener la estructura de la **Figura 2** donde los convertidores de frecuencia aún son hardware. Otro parámetro a tener en cuenta, es la cantidad de instrucciones por segundo que soporta el hardware programable, pues la cantidad de hardware que se puede reemplazar por algoritmos depende de la velocidad de procesamiento de estos dispositivos.

Figura 3: Estructura General de un Sistema SDR



Con el uso de tecnologías **SDR** la incorporación de técnicas de conformación de haces móviles con arreglos de antenas se transforma básicamente en el diseño de algoritmos y al final, solo se requiere actualizar el software sin que esto represente un aumento de costo en el valor de los equipos. Existe una gran flexibilidad para añadir, mejorar o eliminar capacidades a las estaciones terrenas, esto se debe fundamentalmente a la arquitectura de un sistema **SDR**. En la **Figura 3** se muestra cómo la lógica de operación está separada del hardware a través del sistema operativo y los controladores. Cada proceso de comunicaciones en el Hardware goza de un controlador dedicado, de manera que es posible actualizar separadamente cada uno de estos controladores y por ejemplo, pasar de un esquema de codificación a otro sin que esto represente un cambio en los demás procesos o incluso un deterioro o caída de la comunicación, pues otra de las características es que las actualizaciones pueden realizarse incluso cuando el sistema está en operación.

1.1.15 Equipos de Interfaz con Redes Terrestres.

El propósito de esta etapa consiste en adaptar la información a las características del canal satelital, en otros términos se trata de generar la Banda Base (BB) a partir de la multiplexación de todos los canales asociados y aplicar procesos de optimización de ancho de banda de acuerdo al tipo de tráfico. Esta operación se realiza a través de

diferentes procedimientos dependiendo del tipo de tráfico que se curse debido a la existencia de diferentes redes terrestres, diferentes usuarios o simplemente diferentes aplicaciones del mismo usuario.

1.1.16 Interfaz para Tráfico de Datos.

El tráfico de datos se soporta en la familia de protocolos de TCP/IP de manera que los procesos de optimización de este tipo de flujo se realizan esencialmente sobre los protocolos de la capa de transporte, tanto en TCP como en UDP, siendo más vulnerable el primero por estar orientado a conexión.

1.1.17 Interfaz para Tráfico de Telefonía.

Teniendo en cuenta que la voz es sensible a retardos de propagación, tolerable a las altas tasas de bits erróneos y que además no es un flujo continuo de datos, la optimización del canal se lleva a cabo a través de numerosas formas. Inicialmente se evitan la transmisión de silencios, los cuales redundan en la inutilización del canal, para lo cual se ha empleado Interpolación de Voz Digital (DSI, Digital Speech Interpolation), los cuales consisten en la detección de los silencios en una comunicación para insertar en ellos bits que correspondan a información de voz de otros canales, este procedimiento realizado en el transmisor permite disminuir el número de canales necesarios para la transmisión, dado que en el extremo receptor se realiza una demultiplexación al número real de canales conmutando los bits respectivos a cada uno y recuperando nuevamente los silencios. Estas técnicas tienen asociadas desventajas en el momento en que el tráfico crezca y no existan recursos disponibles para cursar el tráfico, produciéndose pérdidas de bits e incluso la finalización de la comunicación. Para aumentar la eficiencia de los sistemas DSI, es posible combinarlos con técnicas de Bit Stealing o esquemas adaptativos de Modulación por Codificación de Pulsos Diferencial (DPCM, Differential Pulse Code Modulation), de manera que sean necesarios menos bits para cada muestra de voz, permitiendo incrementar el tráfico telefónico sin aumentar el ancho de banda satelital.

En el caso de sistemas Único Canal por Portadora (SCPC, Single Carrier Per Carrier), la eficiencia del sistema se refleja en la transmisión de señal solo cuando existe información de voz para transmitir, en otras palabras, se aplica el mismo concepto de detección de la voz para activar la transmisión y con ello evitar radiación que puede aumentar la intermodulación y gasto de potencia en el satélite cuando no existe información sobre el canal.

1.1.18 Interfaz para Tráfico de Televisión.

La televisión por ser un servicio de difusión que no es vulnerable a los efectos del retardo de propagación del canal satelital, el proceso de interfaz se reduce a garantizar la Relación de Potencia de Señal a Potencia de Ruido (SNR, Signal-to-Noise Ratio) o la

Relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Ruido (E_b/N_0 , Ratio of Bit Energy to Noise Power Spectral Density) pertinente para la calidad de imagen requerida. Los procesos de optimización que se generan en este ambiente atendiendo a la tendencia de la digitalización, están orientados hacia la compresión de la señal basándose en el estándar de facto MPEG-2 (Motion Picture Expert Group 2) y asignación de contenidos por demanda, lo cual se ha logrado a través de diferentes equipos propietarios proporcionados por el operador del servicio.

1.2 TECNOLOGÍAS ASOCIADAS AL SEGMENTO ESPACIAL.

El segmento espacial como ya se comentó, esta compuesto por los satélites que cursan el tráfico generado por las estaciones terrenas de una misma red, de manera que esta sección se concentra en el análisis de las tecnologías asociadas a estos dispositivos, considerando que además del repetidor de microondas incorporan un gran conjunto de subsistemas. Para aclarar términos, el sistema de comunicaciones es conocido como la carga de comunicaciones o carga útil y los demás componentes constituyen la Plataforma.

Los subsistemas que componen la plataforma son de manera general los que permiten que el satélite soporte las condiciones del espacio y además se mantenga en la órbita en la posición y orientación correcta. Según esto se identifica el subsistema de control encargado de mantener el satélite orientado en la posición correcta respecto del sistema de coordenadas definido, el subsistema de propulsión, responsable de corregir las posibles variaciones en el seguimiento de la órbita a través de la aplicación de impulsos y torques obtenidos de cohetes adheridos a la estructura, el subsistema de fuentes de energía que se ocupa de la generación, administración y suministro de energía eléctrica con los niveles apropiados a cada uno de los demás subsistemas del satélite y por último el subsistema de control de temperatura y estructura que es el que contiene todos los demás subsistemas y los protege de las vibraciones y radiaciones a las cuales son sometidos los satélites tanto en el proceso de lanzamiento como de permanencia en órbita durante las exposiciones al sol y a los eclipses.

Según sean las capacidades del satélite, así mismo se constituye el subsistema de comunicaciones, dado que todos tienen necesariamente un subsistema de antenas y un conjunto de repetidores o transpondedores, ahora dependiendo del tratamiento que realizan estos últimos sobre las señales de RadioFrecuencia (RF, RadioFrequency) se clasifican en satélites transparentes, multihaces y regenerativos. A continuación se discuten las tecnologías asociadas a las tecnologías de antenas y a cada uno de los tres tipos de cargas de comunicaciones.

1.2.1 Subsistema de Antenas.

Cada una de las tecnologías analizadas para el subsistema de antenas de las estaciones terrenas, aplican también en el segmento espacial, sin embargo se deben sumar otras

consideraciones derivadas de la necesidad de ajustar la forma del haz a la zona de cobertura o mejor permitir la creación de nuevas zonas de servicio a través de la reorientación dinámica de los haces aún cuando el satélite se encuentre en órbita. Por otra parte, las consideraciones de optimización de potencia junto a la posibilidad de haces móviles conduce a ofrecer la cobertura a través de múltiples haces pequeños (spot beam), de manera que se optimicen los procesos de reutilización de frecuencias, control del tráfico por medio de la reasignación de haces en zonas de mayor concentración de usuarios y además, contribuir en la minimización del tamaño de las estaciones terrenas buscando antenas en el segmento espacial cada vez de mayor ganancia y en consecuencia, más efectivas y de gran tamaño.

Una forma de moldear la forma de los haces consiste en la modificación del contorno o perfil de los reflectores para que este se parezca suficientemente al de la zona de servicio. Las complicaciones con esta técnica surgen en el momento que se requieren formas complejas de haces teniendo en cuenta las dificultades que surgen al momento de realizar el balance entre la sobreiluminación y la subiluminación según la ubicación y configuración del sistema de alimentación, lo cual redundaría en una disminución de la eficiencia de la antena y la necesidad de medios mecánicos para cambiar la forma del haz imposibles de lograr una vez el satélite se encuentra en órbita, lo cual es razón para considerar esta técnica como no adecuada.

Mejores resultados se obtienen a partir de la utilización de un reflector con un sistema de iluminación logrado con un arreglo de alimentadores, donde cada uno tiene un control de fase y amplitud que permite la conformación de haces como resultado de la variación asistida por telecomando de estos dos parámetros a través de herramientas de Procesamiento Digital de Señal (DSP, Digital Signal Processing), lo cual convierte a esta posibilidad en una solución muy atractiva dado que se ajusta a las limitaciones de peso y volumen al momento del lanzamiento.

Las tecnologías de antenas con reflectores impresos sobre superficies aislantes aún cuando tiene la posibilidad de ser plegados para el momento del lanzamiento, presentan limitaciones derivadas de la dependencia tanto entre la forma, posición y tamaño de cada reflector como posición del alimentador y la capacidad de conformar dinámicamente los haces, lo que hace de esta opción una solución muy rígida que exonera al satélite de adaptarse a los cambios que puedan presentarse en el transcurso del tiempo de vida.

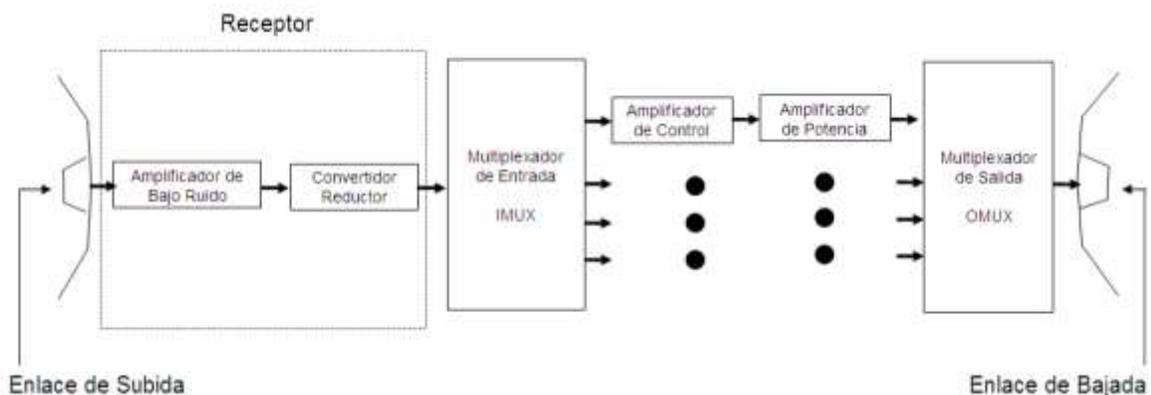
Un parámetro muy importante a tener en cuenta es el aislamiento entre polarizaciones ortogonales pues está dicho que es crucial en la ambición de reuso de frecuencias, para este efecto, se consideran antenas cuyos reflectores sean arreglos de conductores en la dirección del sentido de la polarización deseada, así que la polarización orthogonal no puede ser capturada, esta característica puede emplearse en la construcción de reflectores secundarios para reflectores principales compactos, y con ello obtener dos posiciones diferentes para iluminar el reflector con dos polarizaciones diferentes. Incluso, mayor optimización se logra con el uso de reflectores dicróicos los cuales reflejan determinadas bandas de frecuencia y son transparentes para el resto de la banda, lo cual sumando a la anterior no solamente permite construir arreglos para iluminar un mismo

reflector desde diferentes puntos sino también con diferente polarización y banda de frecuencia.

Ahora bien, la reducción en el tamaño de las estaciones terrenas es sinónimo de mayor sensibilidad y mayor potencia de transmisión de los satélites y existen hoy en día antenas con reflectores de hasta 12 metros de diámetro puestas en órbita para ofrecer servicios de comunicaciones móviles, sin embargo estas antenas deben ser diseñadas para desplegarse en órbita tal como los paneles solares, para lo cual se han discutido diferentes posibilidades como estructuras tipo sombrilla e incluso antenas inflables, no obstante el incremento en diámetro del reflector exige un mejor sistema de iluminación.

1.2.2 Transpondedores Transparentes.

Figura 4: Estructura de un Transpondedor Transparente



Esta es la clasificación que se da a los primeros repetidores puestos en órbita, se les ha otorgado este nombre pues se encargan esencialmente de trasladar la frecuencia de las portadoras desde la banda asignada para el enlace de subida hasta la asignada para el enlace descendente, además amplifican la señal para que sea capturada con un nivel suficiente en las estaciones terrenas. Según esto, no existe ningún procedimiento de procesamiento sino más que el redireccionamiento de la señal radioeléctrica, tal y como si se tratara de un flujo de agua que pasa por un tubo doblado donde solo se cambia su dirección, razón por la cual estos transpondedores también son conocidos como repetidores bent-pipe. A consecuencia de las limitadas capacidades de estos sistemas, hoy en día son considerados como una tecnología en consideración, sin embargo se debe considerar que este tipo de satélites son los que se encuentran en servicio y dadas sus vidas útiles, se espera que continúen operativos por varios años más por razones económicas que tecnológicas. Por esta razón, se ha considerado en el presente anexo el

estudio de estas arquitecturas y de esta forma, acercar la tecnología existente para posteriores propuestas de investigación.

La arquitectura general se muestra en la **Figura 4**, según esto la señal capturada por la antena es amplificada por medio de un Amplificador de Bajo Ruido (LNA, Low Noise Amplifier) similar al de una estación terrena excepto que en este caso se exige mayor ancho de banda, dado que a través de él se cursa todo el tráfico asociado al satélite.

El paso siguiente es el traslado de frecuencia hasta la banda asignada para el enlace descendente. Esta operación se adelanta siguiendo el mismo mecanismo que en el caso de las estaciones terrenas y como tal, puede desarrollarse en una sola etapa, sin embargo, atendiendo a la generación de intermodulación en los mezcladores y Amplificadores de Potencia (PA, Power Amplifier) según sea el ancho de banda a tratar, se puede considerar realizar este proceso en dos etapas, de manera que después del amplificador de bajo ruido se realiza el traslado a Frecuencia Intermedia (IF, Intermediate Frequency) y luego una preamplificación después del modulador **IMUX (Input MULTipleXer)** para posteriormente elevar la frecuencia hasta la banda de bajada para su amplificación en alta potencia y transmisión. En la **Figura 4** se muestra una conversión de una sola etapa, sin embargo, se rescata que la segunda configuración fue también muy utilizada.

El Amplificador de Bajo Ruido (LNA, Low Noise Amplifier) y el convertidor de frecuencia integran un módulo conocido como receptor a través del cual se cursa todo el ancho de banda asociado al transpondedor, no obstante para realizar la amplificación de potencia bajo las condiciones de amplio espectro, necesariamente se generan productos de intermodulación debido a las no linealidades de estos dispositivos, así que para la solución de este inconveniente se pensó en dividir este ancho de banda en porciones más pequeñas de manera que la intermodulación fuera más controlable a través de la amplificación de señales con ancho de banda más reducidos. A cada uno de estos canales posteriormente se ha denominado transpondedor y sus anchos de bandas son típicamente de 36, 72, 96 y 120MHz. El dispositivo que separa el tráfico entre cada uno de estos canales se denomina demultiplexador (**IMUX, Input MULTipleXer**) y el proceso básico consiste en separar bandas de frecuencias correspondientes a cada canal.

Existe un control de ganancia o proceso de preamplificación antes del Amplificador de Potencia (PA, Power Amplifier) o **HPA (High Power Amplifier)**, su función consiste en aumentar o disminuir la ganancia para estimular correctamente a este último y en la medida en que sea necesario compensar el desgaste del **HPA (High Power Amplifier)** durante el transcurso de la vida útil del satélite, de manera que desde la estación de control en tierra se varía la ganancia para garantizar un nivel constante de señal aún cuando exista deterioro de los equipos a bordo.

El Amplificador de Potencia (PA, Power Amplifier) es en resumidas cuentas el que incorpora la potencia requerida por la señal para alcanzar el destino con nivel suficiente. Cada transpondedor cuenta con un amplificador de potencia evitando la dependencia de un amplificador para todo el espectro, dada las condiciones de intermodulación que deben

evitarse a toda costa. Una vez se ha adquirido el nivel de señal suficiente, nuevamente se concentra todo el ancho de banda para ser transmitido a través de la antena. Esta operación es realizada por el Multiplexador de Salida (**OMUX, Output MULTipleXer**).

1.2.3 Transpondedores con Múltiples Haces.

Los transpondedores de múltiples haces son la respuesta tecnológica a la necesidad de disminuir la Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE), tamaño y costo de las estaciones terrenas, a través de la disminución de la densidad de flujo de potencia en recepción y aumento de la potencia en transmisión logrando una reducción significativa de la abertura de cada haz. En este caso, la cobertura se ofrece a través de múltiples haces muy angostos y no a través de uno solo de gran amplitud, lo cual establece mayores posibilidades de incrementar la capacidad del sistema a través de un mayor reuso de frecuencias. El inconveniente que surge es la necesidad de sistemas de conmutación de tráfico entre haces y sistemas de conformación de haces, efecto que se traduce en mayor complejidad de la carga útil, no obstante es una solución bastante atractiva.

Las redes de conformación de haces fueron dominio de análisis en el subsistema de antenas, entre tanto que los sistemas de conmutación son competencia de la carga de comunicaciones y a continuación se analizan tres arquitecturas diferentes para el logro de este propósito, conmutación por salto de transpondedor (**transponder hopping**), conmutación por división de tiempo (**SS/TDMA, Satellite Switched/Time Division Multiple Access**) y conmutación por recorrido del haz (**beam scanning**).

La conmutación por salto de transpondedor consiste en el empleo de un repetidor específico el cual tiene asociado el haz que ilumina el destino, tal selección se realiza siguiendo un estricto plan de frecuencias donde se establece que banda ha sido asignada a cada transpondedor y además qué haces de subida y bajada se han asociado a cada uno de estos. Así, cada estación terrena transmite en la frecuencia correspondiente para lograr el haz de bajada correspondiente, tal y como se muestra en la **Figura 5**. Dada la necesidad de transmitir y recibir en múltiples frecuencias, la carga útil debe gozar de un conjunto grande tanto de filtros como de transpondedores y se estima que el número de estos deber ser al menos igual al cuadrado del número de haces que el sistema posee. Esta dificultad hace de esta opción una solución poco atractiva para un número grande de haces o lo que es lo mismo para una amplia zona de cobertura.

Otro mecanismo de conmutación es la conexión temporal de haces, a través de una matriz de interconexión con un número de entradas y salidas igual al número de haces de subida y bajada respectivamente como muestra la **Figura 6**. Esta es la encargada de establecer la conexión entre un haz ascendente en particular con otro descendente. El control de la matriz de conmutación lo ejerce la Unidad de Control de Distribución (**DCU, de Distribution Control Unit**), la cual establece el orden secuencial de conexiones. El inconveniente de esta técnica deriva de la interconexión cíclica dado que las estaciones deben almacenar la información a transmitir un lapso igual al periodo del ciclo de

conmutación, el cual se eleva de acuerdo al número de haces y además se exige gran sincronización entre todas las estaciones de la red para transmitir en los intervalos debidos, lo que representa una estación en tierra adicional para esta función, al igual que sistemas de señalización que faciliten este proceso.

Figura 5: Conmutación por Salto de Transpondedor (Transponder Hopping).

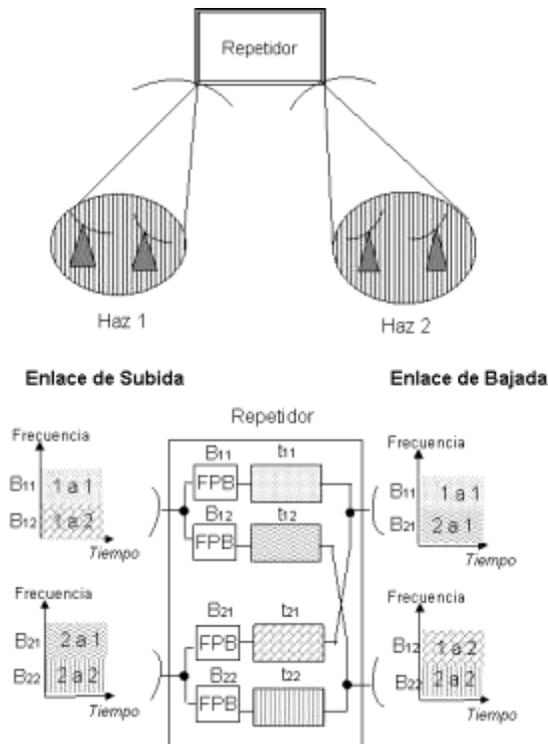
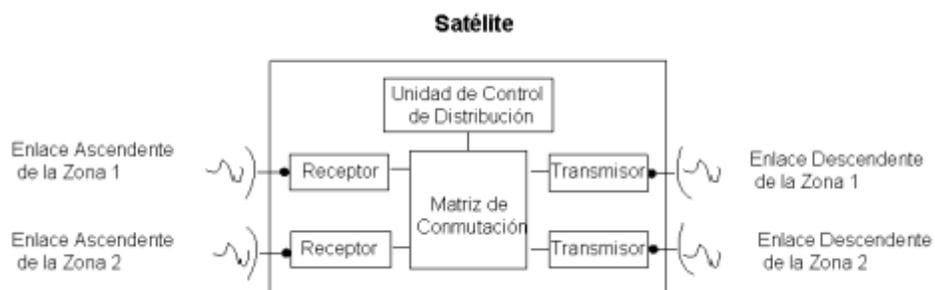


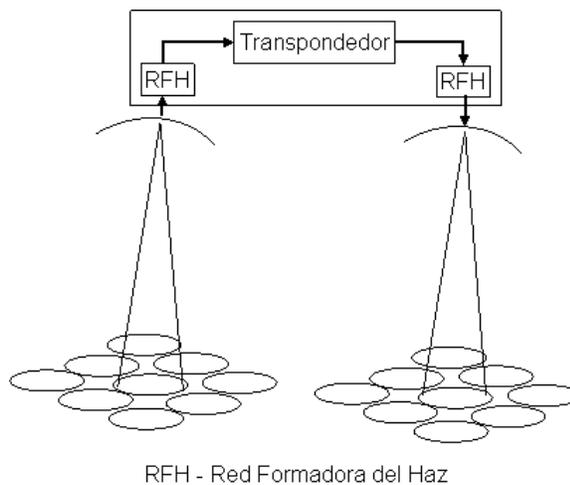
Figura 6: Conmutación por División Temporal



La conmutación por Recorrido de Haz, consiste en un haz muy angosto para cubrir una gran área a través de continuo movimiento como muestra la **Figura 7**, así, a través de una Red de Formación del Haz se consigue esta movilidad cuya velocidad responde a parámetros de tráfico y área en la zona de servicio. En esta solución, los requerimientos

de sincronización son nuevamente exigentes pues las estaciones deben conocer el momento justo cuando están siendo iluminadas por el haz, no solamente en el extremo transmisor sino también receptor, por lo cual se requiere como en el caso anterior mecanismos de sincronización y señalización. Por otra parte continúa existiendo la latencia derivado de la espera de la llegada del haz.

Figura 7: Conmutación por Recorrido de Haz (Beam Scanning)



Aún cuando esta clasificación de transpondedores optimiza recursos como la potencia, no existe una solución que balancee convenientemente el aumento del peso y la latencia para realizar eficientemente el proceso de conmutación entre haces. Esta arquitectura no permite conocer el tipo de información que se está cursando debido a que las señales nunca son demoduladas o convertidas a banda base, así que el tipo de servicio es indiferente para el transpondedor, lo cual no permite otorgar un tratamiento especial a los flujos sensibles a la latencia como es el caso de los servicios interactivos. Sólo la posibilidad de conocer la información permitiría realizar un modelo de conmutación satelital al menos similar a la conmutación de paquetes.

1.2.4 Transpondedores Regenerativos.

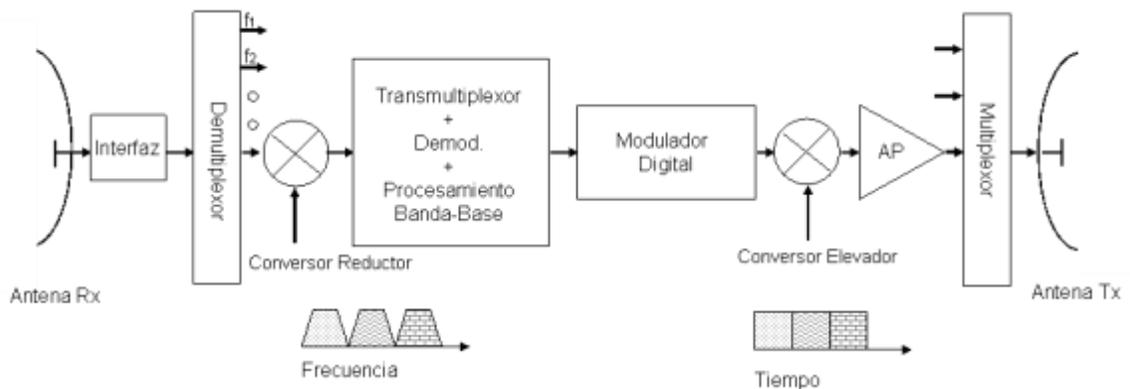
Los Transpondedores regenerativos, a diferencia de los anteriores, realizan demodulación de la señal, tratamiento de la banda base y en consecuencia, la retransmisión se realiza con niveles de potencia independientes de los del enlace de subida, características que les permite tolerar mayores niveles de interferencia y al mismo tiempo reducir la complejidad de las estaciones terrenas, puesto que se requiere menor densidad de flujo de potencia para iluminar al satélite. La implementación de los repetidores regenerativos se justifica a partir de las ventajas derivadas de hospedar en el espacio infraestructura más inteligente que un repetidor de microondas, capaz de realizar tareas de corrección de errores, conmutación entre haces e incluso establecimiento de enlaces con adaptación

dinámica de la potencia, esquemas de modulación y codificación con constelaciones variables entre el satélite y cada estación terrena atendiendo a las condiciones particulares de cada enlace.

La arquitectura de un transpondedor regenerativo se muestra en la **Figura 8**. En esta se identifican las mismas unidades funcionales que se encuentran en un transpondedor transparente y adicionalmente un bloque de procesamiento a bordo encargado de realizar los procesos mencionados. Dependiendo de la misión para el cual fue construido el satélite, existen dos clases de procesamiento a bordo, estos son: procesamiento/conmutación en banda base y procesamiento asistido desde tierra.

El procesamiento asistido, incluye la conmutación a través de intercambio de guías de onda y procesos donde interviene la estación terrena de control para definir los movimientos y definición de la forma de los haces, procesamiento de protocolos de red, corrección y detección de errores y control dinámico de memorias, razón por la cual, el procesamiento asistido, tradicionalmente se asocia a áreas como al “telemando” del satélite.

Figura 8: Estructura de un Transpondedor Regenerativo



El procesamiento y conmutación en banda base es el más complejo primeramente porque es autónomo, es decir que la estación de control no interviene y además porque involucra adicional a la demultiplexación y demodulación de la señal recibida, la detección y corrección de errores, control del flujo de bits, conmutación entre múltiples haces siguiendo el concepto tanto de identificación de la fuente y destino de cada paquete o flujo de bits como los requerimientos de cada tipo de tráfico para ofrecer tratamiento particular a cada uno, lo que implica compatibilidad con los protocolos de las redes terrestres como sería el **TCP/IP**, **MPLS** y si fuera necesario, incluso hasta **ATM**. Las tecnologías requeridas por este tipo de transpondedores son fundamentalmente los microprocesadores, debido a que todos estos procedimientos se realizan en el dominio digital.

La etapa de modulación/demodulación en una carga de procesamiento puede ser coherente, diferencial o multiportadora. En el primer caso, el demodulador interpreta la fase de la portadora recibida por comparación de esta con la fase de la señal de referencia. La demodulación coherente permite la reconstrucción del flujo binario en casos tanto de transmisión codificada directa (**BPSK** y **QPSK**) y diferencial (**DE-PSK** y **DE-QPSK**). En el caso diferencial, se realiza una comparación de dos estados sucesivos de la señal recibida, situación que incorpora mayor sensibilidad al ruido y debe ser compensada mediante el incremento en la potencia del enlace de subida.

La modulación multiportadora o mejor conocida como Modulación por División de Frecuencias Ortogonales (**OFDM, Orthogonal Frequency Division Modulation**), se soporta en el principio de dividir un canal de banda ancha, en múltiples subcanales de banda estrecha mediante el uso de subportadoras ortogonales donde cada una de estas transmite una pequeña cantidad de datos y reduce de manera significativa la presencia de la Interferencia Intersímbolo (**ISI, InterSymbol Interference**). **OFDM** constituye uno de los adelantos más recientes de la ingeniería de radio comunicaciones, que aún no ha sido explotada completamente por la industria satelital.

La desventaja asociada a los sistemas de procesamiento a bordo consiste en que la caracterización de los parámetros del procesador a bordo define las características que deben tener las estaciones terrenas para realizar un enlace al satélite, es decir, se requieren de esquemas de modulación y codificación muy particulares, lo que redundaría en una reducción de la flexibilidad y que exige a la industria manufacturera de segmento espacial realizar profundos estudios antes del lanzamiento, puesto que este hecho incorpora un riesgo consistente tanto en la limitación en la gama de servicios que soportará la carga útil una vez sea puesta en órbita, como en la reutilización de estaciones terrestres por incompatibilidad de formatos. Esta situación ha conducido al concepto de transpondedores regenerativos, es decir, aquellos cuya carga de procesamiento a bordo, puede ser actualizada o cambiada según las necesidades o adelantos tecnológicos que ocurran durante la vida útil del satélite, de manera que sean satélites más flexibles y reutilizables en caso de cambiar la misión para la cual fueron diseñados. La arquitectura de estos satélites es la misma arquitectura general mostrada en la **Figura 8**, solo que el hardware del módulo de procesamiento se construye con tecnología de Radio Definido por Software (SDR, Software Defined Radio) mediante el uso de **FPGAs** y **DSPs** optimizados para soportar el ambiente del espacio exterior.

1.2.5 Enlaces Intersatelitales.

Establecer una red inalámbrica tipo Ad-Hoc en el espacio, ha despertado gran interés en el sector de telecomunicaciones por satélite bajo las premisas de extender la zona de cobertura y evitar saltos adicionales que incorporan retardos poco convenientes. Los enlaces ópticos o de radiofrecuencia entre satélites se plantean con la existencia de Procesamiento a Bordo (OBP, On-Board Processing) disponible, puesto que es necesario conocer la información recibida para ejecutar un redireccionamiento a una estación terrestre o simplemente interpretarla para responder a una petición de la red.

Existen tres tipos diferentes de enlaces intersatelitales (**ISL, Inter Satellite Link**), estos son: entre satélites de órbita geoestacionaria, entre un satélite geoestacionario y uno no geoestacionario y entre satélites no geoestacionarios. Estos dos últimos son conocidos como Enlaces InterOrbitales (**IOL, Inter. Orbital Link**).

Los **ISLs** se realizan mediante la transmisión de una señal de radiofrecuencia o señal óptica, donde optar por una u otra implica considerar los costos, masa y desempeño. En este sentido, los costos resultan ser más representativos para enlaces en RF en relación con la masa a colocar en órbita, no obstante, la implementación con RF resulta ser más fácil dado a un mayor ancho de haz y en consecuencia mayor facilidad para capturar la señal de radiofaro encargada de alinear y sincronizar ambos extremos antes de dar inicio a la transmisión de datos. Esto mismo no sucede para una señal óptica cuyo haz es del orden de los micro-radianes bajo un control de alineación del orden de los mili-radianes representando un mayor problema técnico, pero que se intenta resolver con el desarrollo de dispositivos de apuntamiento avanzado en transmisión y tecnología de detección por píxeles activos **APS (Active Pixel Sensor)** que buscan la miniaturización e incremento del nivel de sensibilidad de los receptores. Por otra parte, la capacidad de transmisión alcanzada en el espectro óptico es del orden de los Gbps mientras que en el espectro de microondas son decenas de Mbps. A pesar del menor desempeño del enlace Inter-satelital en RF, la regulación en radiocomunicaciones establece secciones en las Bandas K, Ka y U para su implementación. Esta última banda presenta la ventaja de inmunidad a interferencias con enlaces de microondas terrestres en vista a la alta atenuación que esta sufre con el oxígeno terrestre. De otra parte, los enlaces de tipo óptico definen sus frecuencias de acuerdo al tipo de diodo láser a utilizar, su rango se encuentra entre 0,8 y 10,6 μm .

La implementación de enlaces intersatelitales se orienta más hacia el uso de tecnologías ópticas, al respecto, el tipo de modulación puede deberse a modificación de la operación del láser en intensidad o frecuencia (tipo interna) o mediante la modificación del haz de luz después de su emisión sea en fase o polarización (tipo externa). De tipo interna y comúnmente empleada corresponde el esquema de modulación de encendido-apagado para representar datos en formato digital con la presencia o ausencia de una onda portadora, no obstante, las bajas tasas obtenidas conducen al empleo de modulación en intensidad con detección directa (**IM/DD**) estableciendo teóricamente una Proporción de Bits Erróneos (BER, Bit Error Rate) de 10^{-12} . A la vez, es posible emplear técnicas de multiplexación como **WDM (Wavelength Division Multiplex)** y **DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex)** que incrementan en gran medida la tasa de transmisión.

La iniciativa de redes en el segmento espacial representa una gran ambición, por esto, las investigaciones se orientan en la optimización de los resultados actuales, sin embargo, existen limitantes como la carente capacidad de la infraestructura espacial existente para realizar interconexiones satelitales, lo que significa, que el desarrollo tomará tanto tiempo, como puesta en órbita de cargas adaptadas para este efecto.

2. TECNOLOGÍAS ASOCIADAS AL CONTROL.

El segmento de control se ocupa principalmente de tres procesos tendientes a mantener al satélite operando normalmente con la posición y orientación adecuadas respecto de las estaciones en Tierra en cualquier punto de la órbita. Tales procesos son la telemetría, el Seguimiento y Telecomando, razón por la cual en ocasiones se refiere a este segmento con la sigla TT&C (Telemetry, Tracking and Command). Todos estos procesos son desarrollados conjuntamente entre el satélite y el centro de control a través de un intercambio de mensajes que permite conocer, verificar y ajustar el funcionamiento de los equipos a bordo.

2.1 SISTEMA DE TELEMETRÍA.

La Telemetría, consiste en la transmisión desde el satélite al centro de control de los resultados de las medidas de diferentes variables como temperatura, presión, corriente, tensión, aceleración, ángulos relativos e incluso, en satélites con procesamiento de banda base, se pueden incluir medidas de variables como volumen del tráfico, tipos de servicios o concentración geográfica de usuarios entre otras dependiendo de las capacidades de las cuales posea el satélite, pues está claro que se requiere una red con gran cantidad de sensores según sea el número de variables físicas, una interconexión con el módulo de procesamiento a bordo para las variables relacionadas con el comportamiento del tráfico, un módulo adicional para el procesamiento de toda esta información y un sistema de comunicaciones a parte de todos los mencionados anteriormente para realizar la transmisión.

2.2 Sistema de Telecomando.

Igual como el satélite envía información de su configuración a la estación de control en tierra, esta última a través del sistema de Telecomando, envía órdenes para la modificación de diferentes parámetros del satélite para corregir posibles anomalías o para adaptarse a nuevas demandas en servicios o zonas de cobertura, sin embargo, el procesador de control a bordo puede realizar autónomamente cambios para responder a las variaciones del entorno. Entre las órdenes de telecomando autónomas está el encendido y apagado de los cohetes o electroimanes para corregir la posición del satélite cuando este se ve afectada por otros cuerpos celestes, entre tanto, las señales que son decisión de la estación de control están la configuración de la forma de los haces para definir las zonas de cobertura cuando se emplean tecnologías de multihaces.

Las señales de telecomando, sean bien las recibidas desde la estación de control o las generadas autónomamente, requieren de un alto nivel de seguridad, que se alcanza a través de sucesivas verificaciones, claves de encriptación y con disponibilidad de 99,7% en el enlace de control.

2.3 SISTEMA DE SEGUIMIENTO.

Adicional a las funciones anteriores está el seguimiento que debe realizarse al satélite para determinar su posición exacta, es decir la efeméride, la cual es información fundamental para el apuntamiento de las antenas de los usuarios. Este procedimiento consiste básicamente en la definición de los ángulos de azimut y de elevación respecto de la estación de control para establecer cómo realizar el seguimiento en el evento en que estos sean no geoestacionarios. Cuando los satélites son de órbita geosíncronica, más que un seguimiento se realiza una verificación de la posición puesto que estos son aparentemente estáticos, sin embargo, este proceso se orienta al monitoreo de la respuesta del sistema autónomo de corrección de actitud.

2.4 INTERCAMBIO DE INFORMACIÓN DE CONTROL.

Para el entendimiento de ambas partes, es necesario establecer un formato estándar de mensajes que permita la compatibilidad entre la estación de control y el sistema TT&C del satélite. En este marco, existen dos formatos: Modulación por Codificación de Pulsos (PCM, Pulse Code Modulation) y el Estándar de Paquetes (Packet Standards).

El estándar **PCM** adaptado por la Agencia Espacial Europea (ESA, European Space Agency), organiza el mensaje de comando en tramas constituidas por palabras de varios bits. La primera palabra se encarga del sincronismo y direccionamiento al decodificador indicado, la segunda es una palabra de selección del tipo de comando y contiguo a estas, se envían los datos de control en palabras redundantes que aseguren la confiabilidad de la señal de comando. Por su parte, el estándar de paquetes define para los mensajes de comando una estructura en capas en la cual se realiza segmentación del paquete, construcción y encapsulamiento para el envío, definiendo así, características de seguridad, confiabilidad y eficiencia requeridas en la transmisión.

Por su parte, el mensaje de telemetría en el estándar **PCM** se organiza en tramas sincronizadas por código. La primera trama contiene un formato de identificación del tipo de dato a enviar, las siguientes tramas contienen la información enviada y su control de llegada se realiza a través de un contador. El estándar de paquetes en cambio, determina para los mensajes de telemetría una estructura por capas que permiten la multiplexación de varios tipos de mensajes sobre un único canal de radiofrecuencia. Además define dos tipos de estructuras de datos, el paquete fuente y la trama a transferir. El primero encapsula un bloque de datos fuente y su cabecera contiene un identificador que permite direccionar la información a su destino como información de secuencia y características del mismo.

2.5 TECNOLOGÍAS DE CONTROL A BORDO.

Las tecnologías **OBDAH** (OBDAH On-Board Data Handling) hacen referencia al procesamiento de comandos, es decir, decodificación, validación, reconocimiento y

ejecución de señales de comando, uso de memorias de almacenamiento masivo y tareas de mantenimiento autónomo del sistema como toma de decisiones, sincronización y gestión de tráfico de acuerdo a los resultados del proceso de diagnóstico del sistema y el ambiente alrededor de este. Para la realización de estos procesos existen estándares ya establecidos donde se definen los mecanismos de codificación de bits y estructura de trama tanto para comunicaciones full dúplex, en el caso del estándar OBDH de ESA como para comunicaciones half dúplex, en el caso del estándar 1553B.

La banda de frecuencias para las comunicaciones de **TT&C** hace parte de la Banda S, pero la saturación de esta por la cantidad de comunicaciones que se cursan a través de ella, ha conducido al empleo de técnicas de Espectro Ensanchado (SS, Spread Spectrum) a fin de evitar interferencias y realizar mayor aprovechamiento de este ancho de banda. Sin embargo esta tarea es difícil puesto que la radiación de control por parte de los satélites debe ser de tipo isotrópica al menos mientras se encuentra en la fase de despliegue y ubicación en la posición orbital definitiva, dado que durante este lapso, el satélite se encuentra en movimiento respecto de la estación de control y además sin una orientación fija. Una vez hospedado definitivamente en su lugar, es pertinente realizar procesos de optimización de la potencia y modificar el patrón de radiación de estas antenas, lo que conduce a pensar en antenas inteligentes también en el segmento de control.

3. TECNOLOGÍAS ASOCIADAS A LOS SERVICIOS

Los sistemas satelitales pueden ser empleados para misiones de investigación del espacio exterior, telecomunicaciones y teleobservación con fines científicos o militares, sin embargo, sujetos al dominio de estudio establecido para este documento, en esta sección se realiza un análisis sobre las tecnologías asociadas a los servicios de comunicaciones únicamente. Con el propósito de aclarar conceptos, a continuación se realiza una definición de los tres tipos de servicios por satélite que se asocian a procesos de telecomunicaciones.

Los Servicios Fijos por Satélite (FSS, Fixed Satellite Service), hacen referencia a los enlaces de radiocomunicaciones adelantados a través de uno o varios satélites para ofrecer servicios de comunicaciones entre estaciones terrenas con una posición específica o un conjunto finito de posiciones fijas. En el evento en que las estaciones gocen de movilidad, tanto el intercambio de información mediante satélites como la conexión de una estación móvil a varios satélites simultáneamente se conoce como Servicios Móviles por Satélite (MSS, Mobile Satellite Service). De igual forma, si la información se cursa en un solo sentido y directamente hacia los usuarios, sea bien, por recepción individual con instalaciones o dispositivos de escaso tamaño o recepción comunitaria donde varios usuarios están asociados a un mismo terminal, el servicio se conoce como Difusión por Satélite o (BSS, Broadcast Satellite Service).

3.1 ACCESO MÚLTIPLE AL MEDIO.

Las técnicas de acceso múltiple son los mecanismos que posibilitan a más de un par de estaciones terrenas acceder simultáneamente al mismo transpondedor para utilizar los recursos necesarios y cursar el tráfico correspondiente. En los inicios de la tecnología satelital la técnica empleada fue el Acceso Múltiple por División en Frecuencia (FDMA, Frequency Division Multiple Access) que consistía en asignar a cada enlace una portadora y un ancho de banda fijo, de manera que cada estación transmitía en tantas frecuencias como destinos tuviera asociados. Posteriormente emergen otras técnicas como el Acceso Múltiple por División en Tiempo (TDMA, Time Division Multiple Access) donde el procedimiento consiste en la asignación de intervalos de tiempo a cada estación para realizar la transmisión sobre todo el ancho de banda del transpondedor lo que permite emplear la totalidad de la potencia sin temer a los efectos de intermodulación que se presenta en la primera técnica. Una variante de TDMA es el Acceso Múltiple por asignación por demanda (**DAMA, Demand Assignment Multiple Access**) el cual asigna intervalos de tiempo contiguos de acuerdo a la demanda mediante un procedimiento de reservación que implica un flujo de señalización paralelo al de la información de usuario.

Otra técnica de acceso múltiple que ha sido trasladada desde el escenario de las redes terrestres al de las redes satelitales es la de Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, Code Division Multiple Access). Bajo esta técnica varios usuarios acceden al transpondedor asincrónicamente en la misma frecuencia haciendo uso de un código de secuencia pseudo-aleatoria pre-asignada, con el cual cada usuario codifica su información antes de transmitirla al satélite. En el destino, la información se recupera si se comparte el mismo código. La posible interferencia presente entre usuarios es posible contrarrestarla en la medida en que los códigos de ensanchamiento sean mutuamente ortogonales, lo que implica que el número de usuarios habilitados para transmitir simultáneamente es limitado. Una técnica adicional de acceso es CDMA de Banda Ancha o **WCDMA (Wideband CDMA)**, considerada una de las principales tecnologías para la implementación de la tercera generación de telefonía móvil y como interfaz adaptable a la tecnología espacial.

WCDMA utiliza como principio al **CDMA** y bajo la condición de espectro ensanchado traslada la información de banda angosta a una banda de mayor ancho, para de esta manera asegurar gran capacidad de envío de datos, alto rendimiento de la comunicación en ambientes con bastante interferencia y por ende, una excepcional inmunidad al ruido. Además, **WCDMA** o **CDMA** de Banda Ancha puede operar en los modos de Dúplexación por División en Frecuencia (FDD, Frequency Division Duplex) o Dúplexación por División en el Tiempo (TDD, Time Division Duplex), esta versatilidad ofrece la oportunidad de obtener una mayor eficiencia del sistema.

La implementación de un receptor **RAKE** en el destino, con el propósito de sumar las componentes por multi-trayectoria y fortalecer el nivel de la señal dominante, incrementa notoriamente el desempeño del **CDMA** de banda ancha. Esta propiedad sumada a la diferenciación de usuarios mediante un código único ha sido la razón por la cual esta técnica ha sido considerada como una solución en los sistemas de telecomunicaciones

por satélite. Por otra parte, se debe considerar que es posible el cambio de la frecuencia de transmisión durante una misma comunicación, según el concepto de Salto de Frecuencia (FH, Frequency Hopping), lo cual puede ser una herramienta para compensar las adversas condiciones a las cuales se somete el canal de radio. No obstante, los estudios sobre **W-CDMA** como interfaz aplicada al entorno satelital, es decir, **SWCDMA (Satellite-WCDMA)** se enmarcan en el requerimiento de disminución de su compleja sincronización y en el desarrollo de receptores con menores exigencias computacionales.

Un método de acceso prometedor en el escenario de las comunicaciones por satélite es el Acceso Múltiple por División en Frecuencias Ortogonales (**OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing**) que consiste en la división del ancho de banda total en canales paralelos más angostos, con portadoras ortogonales, lo que permite anular los problemas de Interferencia Intersimbólica (ISI, InterSymbol Interference) e interferencia intercanal. Entre cada canal existe una pequeña banda que en conjunto conforman una trama de sub-portadoras piloto dedicadas a obtener la respuesta en frecuencia del canal y combatir los efectos producidos por los desvanecimientos.

De otro lado, existe una combinación entre el **OFDM** y **TDMA (OFDM/TDMA)** cuyo esquema consiste en dividir el ancho de banda de canal en un número de sub-portadoras, cada una con un transporte de flujo de bit individual y utilizando una o más ranuras de tiempo. Estas propiedades permiten a la estación transmisora manejar todas o algunas de las sub-portadoras disponibles y soportar servicios con tasas de transmisión dinámicas de una ranura a otra. **OFDM/TDMA** brinda la posibilidad de transmitir altas tasas de datos bajo canales extremadamente hostiles y con una complejidad relativamente baja, sin embargo, esta flexibilidad ha sido entendida por muchos como un incremento en la complejidad por el requerimiento de sincronización entre estaciones móviles.

3.2 Comunicaciones Móviles.

Dentro de las redes de comunicaciones móviles los satélites son reconocidos como parte integral y fundamental en virtud a su capacidad de proveer amplia cobertura y facilitar la difusión de información. Es por ello, que el modelo del Sistema Universal de Comunicaciones Móviles (UMTS, Universal Mobile Telecommunication System) considera dos componentes para ofrecer estos servicios: el componente basado en tecnologías terrestres (T-UMTS) y el componente basado en sistemas satelitales (S-UMTS), con completa compatibilidad e interoperabilidad entre ellos.

En un primer momento, los servicios ofrecidos por los sistemas satelitales, son solamente un subconjunto del total ofrecidos por la red terrestre. Esto se debe fundamentalmente a que ambas tecnologías se desarrollaron por separado y los servicios móviles se soportaron desde el principio en tecnologías terrestres, luego muchas características técnicas de estas no son las más apropiadas para emplearse en el componente satelital y se deben adaptar o establecer nuevas tecnologías para este efecto. En este sentido, no existe una reglamentación internacional que permita un desarrollo rápido y homogéneo, pues las tecnologías aún se encuentran en proceso de estudio.

El componente satelital puede verse como un elemento complementario de la red terrestre, el cual permite ofrecer servicios en regiones donde no existe cobertura o no es económicamente viable hacerlo a través de tecnologías terrestres. En este caso, la solución satelital debe estar en capacidad de ofrecer los mismos servicios que su homóloga terrestre, sin embargo, puede considerarse el caso donde el componente satelital es un elemento cooperativo concentrado en los servicios de difusión de multimedia y no en servicios interactivos donde se considera que la componente terrestre es más efectiva. Desde esta última perspectiva, se exige una mayor interoperabilidad pues se trata de una interacción constante entre el usuario, su estación base y el satélite que además no perfila a los satélites como elementos de expansión, pues para el canal de retorno aún se requieren estaciones terrenas.

De acuerdo a la perspectiva cooperativa comentada anteriormente, existen diferentes escenarios donde la presencia de los satélites adquiere una necesidad fundamental. En el primero de ellos, el componente satelital se emplea para difusión de diferentes servicios de entretenimiento, control de flotas, información general, noticias y estado del tiempo, como un servicio paralelo al ofrecido por la red terrestre. Esta arquitectura ha dado lugar a sistemas como Difusión Digital de Multimedia por Satélite (**Satellite Digital Multimedia Broadcast S-DMB**) que están orientados al mercado punto-multipunto dentro del esquema de tercera generación y a través de sistemas **GEO**. En el caso de tráfico interactivo, el canal de retorno se cursa por la red terrestre conservando un modelo de distribución asimétrica de datos. Otra tarea importante que ha sido otorgada a los satélites es la interconexión del núcleo de red del sistema, para esto el satélite interconecta estaciones base que se encuentran muy dispersas simulando un canal de transmisión físico sobre el cual se cursa tráfico de usuarios y señalización.

El canal de retorno del terminal móvil directamente al satélite **GEO** se considera exclusivamente sino existe cobertura del componente terrestre, esto es entonces una perspectiva de complemento geográfico, donde el terminal debería enfrentar diferentes desafíos atinentes a identificar la red satelital y vincularse a ella una vez ha abandonado el área de cobertura de la red terrestre y durante la permanencia en esta nueva red, procurando una eficiencia de potencia para no agotar las baterías, mantener una Proporción de Bits Erróneos (BER, Bit Error Rate) aceptables y al mismo tiempo garantizar una velocidad de transmisión al menos igual a la alcanzada con la red terrestre, lo que se convierte en un desafío tecnológico en términos de procesos de modulación/codificación adaptativos, exploración en nuevas bandas de frecuencia y al mismo tiempo métodos eficientes de Control de Acceso al Medio (AMC, Access Medium Control), características que demandan procesamiento a bordo y extrema atención al tamaño de los terminales de usuario.

Actualmente la oferta de servicios móviles se realiza a través de satélites **GEO**, en este contexto, una tecnología que ha hecho un aporte importante, son los reflectores desplegables, puesto que con sus altas ganancias debido a su gran tamaño, compensan en buena parte las limitaciones de los móviles en términos de potencia de transmisión. Al mismo tiempo, la tecnología de múltiples haces permite conseguir un amplio reuso de

frecuencias e incluso mayor concentración de la potencia y con esto una mayor cantidad de usuarios y además, terminales mas pequeños. El problema que persiste, en los sistemas geosincrónicos para ofrecer servicios móviles interactivos, es el retardo, lo cual conduce a considerar nuevamente soluciones sobre constelaciones **LEO** y **MEO**, sin embargo, el costo y la complejidad de las constelaciones no los hace suficientemente viables.

3.3 SERVICIOS SATELITALES BASADOS EN IP.

El alto despliegue alcanzado por las redes IP, que además de haberlas convertido en un estándar de facto para el transporte de datos, también las ha posicionado como la plataforma universal sobre la cual se integran todos los servicios. Tal convergencia, llamada en nuestros días “redes de nueva generación” o “todo sobre IP”, representa un escenario donde el núcleo de red está basado en IP, e incluso las interfaces de radio están optimizadas para el tráfico de paquetes puesto que se espera que todos los dispositivos de acceso a servicios de telecomunicaciones sean componentes de esta red, de manera que la telefonía, la radio y la televisión serán en corto tiempo parte de la red Internet tal y como lo son los servicios de correo electrónico o transferencia de archivos. En este marco, los satélites desarrollan un rol protagónico dadas las características de amplia cobertura y accesibilidad a localidades donde no existe infraestructura de red terrestre, sin embargo, aún cuando se ofrecen servicios de Internet por satélite directamente al usuario, se debe resaltar que el rendimiento de toda la familia de protocolos de TCP/IP no es el deseado y cuando se incluyen saltos por satélite en las redes IP, estas se ven afectadas negativamente. Este efecto, sumado a la proyección de IP como soporte universal de las redes del futuro, es razón suficiente para concentrar esfuerzos en el análisis de las tecnologías que hacen posible la optimización del tráfico IP sobre las redes satelitales y con ello garantizar que estas se acoplarán y formarán parte activa del nuevo modelo de redes de nueva generación.

3.3.1 Tecnologías de Red.

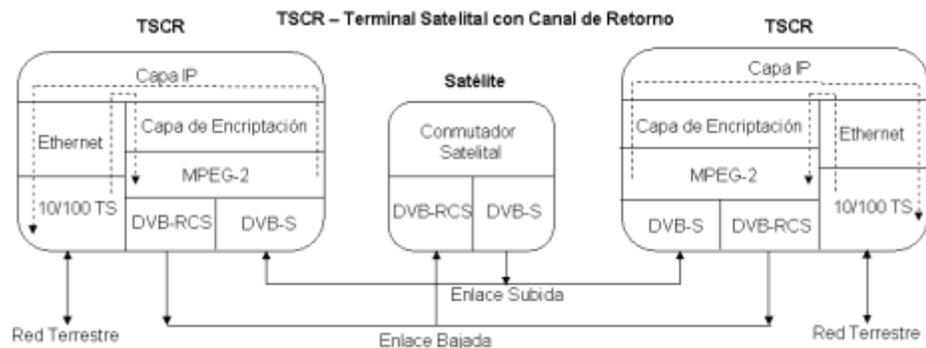
Los proveedores y la industria espacial se han dado a la tarea de brindar sobre la infraestructura satelital servicios que requieren características de banda ancha que sólo había sido posible mediante soluciones terrestres. Para este objetivo, se han creado estándares como el DVB-RCS (Digital Video Broadcasting-Return Channel Satellite) el SurfBeam y últimamente IPoS (IP over Satellite).

DVB-RCS especificado por la **ETSI** en 1999, es el primer intento por introducir un estándar internacional abierto para redes con servicios multimedia por satélite, que define un canal de retorno por satélite utilizando terminales de usuario de bajo costo.

DVB-RCS define una topología en estrella con unas características técnicas a considerar para el enlace de ida similares a la especificación **DVB-S**, como interfaz de aire **MPEG-2/DVB-S**, multiplexación **TDM**, modulación **QPSK**, codificación bajo convolución

concatenada y técnicas de cifrado Reed-Solomon, una única portadora de hasta 50 Mbps y además la posibilidad de encapsulamiento de tramas IP en contenedores **MPEG-2** de 188 bytes. Para el enlace de retorno, usuario – Hub, se define una técnica de acceso **MF-TDMA**, modulación **QPSK** y codificación con códigos turbo o bajo convolución concatenada, cifrado **Reed-Solomon** para una velocidad de datos hasta de 2 Mbps. Se resalta además la posibilidad de transportar los datos encapsulados en celdas ATM usando el protocolo **AAL-5 (ATM Adaption Layer 5)**, o utilizando encapsulado IP sobre transporte **MPEG-2** con la inclusión de mecanismos de seguridad.

Figura 9: Protocolos de un enlace DVB-S/DVB-RCS



Una característica sobresaliente del estándar **DVB-RCS** es la extrema flexibilidad que provee para configurar capacidades de transmisión por canal individual y permitir un mejor aprovechamiento de los recursos, mientras tanto su debilidad es la restricción para interoperar con equipos de estándares diferentes a este, por mencionar: **surfBeam** e **IPoS**.

Los servicios que se implementan bajo **DVB-RCS** corresponden a servicios de Internet, servicios interactivos, servicios de red, servicios de transporte IP, que le permiten una abierta competencia con las tecnologías de infraestructura terrestre. Su mercado ha tenido un mayor despliegue con la disminución de costos debida a la implementación de técnicas de Circuitos Integrados Monolíticos de Microondas (MMIC, Monolithic Microwave Integrated Circuits), antenas de diseño avanzado y Amplificadores de Potencia de Estado Sólido (SSPA, Solid State Power Amplifier), que conllevan a reducir el tamaño y complejidad de los terminales.

Otra opción para despliegue de redes satelitales de banda ancha es **SurfBeam**, el cual se constituye como el más inmediato competidor de **DVB-RCS**. Este también es un estándar abierto para interconexión en banda ancha que surge a partir de la penetración a nivel de mercado de los sistemas cable-módem y del traslado de estos al escenario de las comunicaciones por satélite. **SurfBeam**, se basa en la Especificación de la Interfaz para el Servicio de Datos por Cable (DOCSIS, Data Over Cable Service Interface Specification) y aplica para redes en estrella donde el concentrador soporta enrutamiento multidifusión IP y además puede definir enlaces hacia los terminales con características multi-tasa y

alta disponibilidad. La propuesta es el uso de códigos turbo, multiplexación en banda base empleando TDM, modulación 8PSK ó QPSK y tasas entre 2 y 30 Mbps en el enlace ascendente (Downlink). Para el canal de retorno, usuario-hub, se utiliza codificación con códigos turbo, modulación QPSK para tasas entre los 160 y 1280 Kbps y múltiple acceso a través de **MF-TDMA**.

Figura 10: Arquitectura del Hub SurfBeam



El sistema **SurfBeam** en el terminal remoto se compone de una unidad exterior la cual incluye la antena tipo VSAT y una unidad interior o módem similar al ofrecido para **xDSL**. En las instalaciones del hub se destaca el Sistema de Terminación de Modem Satelital (SMTS, Satellite Modem Termination System) encargado de gestionar, enrutar y controlar tráfico entre suscriptores y el servidor local, el gestor de red mediante el Protocolo de Gestión de Red Simple (SNMP, Simple Network Management Protocol) que en conjunto con el Gestor de Nodo de Red configura los terminales y mantiene informado del estado de la red, el Protocolo de Mejoramiento de Desempeño Integrado (IPEP, Integrated Performance Enhanced Protocol) protocolo que mejora considerablemente el desempeño de aplicaciones IP por satélite mediante técnicas que incluyen la reducción de cabeceras - como reconocimientos y almacenamiento local, así como el Enrutador de Acceso que se encarga de facilitar el acceso al backbone de Internet y al Centro de Operaciones de Red (NOC, Network Operational Centre).

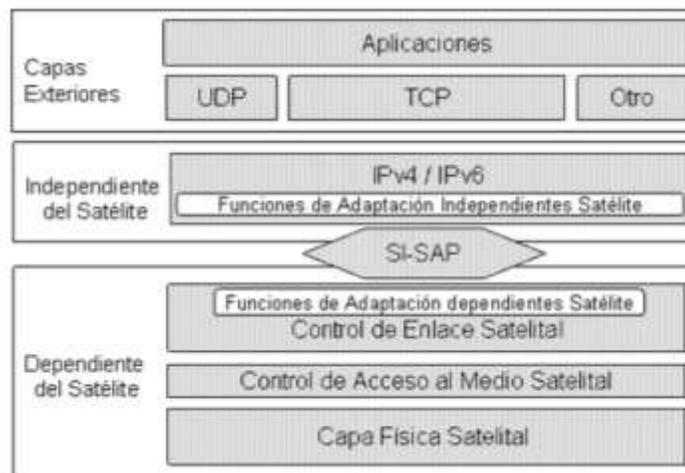
Las bandas de frecuencia sobre las cuales este nuevo estándar se ha desarrollado corresponden a la banda Ku y Ka, 12-18 GHz y 27-40 GHz respectivamente, para implementar aplicaciones de Acceso a Internet, Voz sobre IP, MPEG Video sobre IP, Multicast y Protocolo de Transferencia de Archivos (FTP, File Transfer Protocol) de alta capacidad.

Otro estándar que aparece junto a los dos anteriores es el **IPoS (IP over Satellite)**, como el primer estándar global para la industria satelital en acuerdo común entre la Asociación de Industrias de Telecomunicaciones (TIA, Telecommunications Industry Association) y el

Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeos (ETSI, European Telecommunications Standards Institute). IPoS abre la puerta de la optimización y de una economía de escala que permita reducir los costos de equipos para los usuarios y con esto, diversificar la banda ancha a nivel mundial.

En la arquitectura de IPoS se destaca el **SI-SAP (Satellite Independent-Service Access Point)**, como una función de interoperabilidad entre las especificaciones dependientes del segmento satelital y las capas de aplicación, con la intención de ofrecer una plataforma abierta a nuevos servicios.

Figura 11 Modelo de Referencia de IPoS



De otro lado, se ha planteado los atributos a involucrar en la versión siguiente de IPoS, como el uso de la promisoría banda Ka, tasas de transmisión superior a 0,5 y 1,0 Msps (Msps, Mega Samples per Second) para el terminal de usuario y la implementación de modulación y codificación adaptativa.

Finalmente, comparando **SurfBeam** con el estándar **DVB-RCS**, sus características resultan en una capacidad 100% a 150% más alta a nivel del transpondedor y con menor requerimiento hardware a nivel del concentrador, esto no ha significado para **SurfBeam** convertirse en estándar mundial como lo pretenden sus propietarios. Lo que si es cierto, es el desarrollo de una arquitectura de servicio común para entregar aplicaciones de banda ancha por satélite que permita reducir los costos y favorecer la estandarización de los terminales, para lo cual se tiene al protocolo de Internet como el fundamento para este desarrollo.

3.3.2 Rendimiento de los Protocolos de Transporte.

El conjunto de protocolos TCP/IP ha sido diseñado para operar sobre entornos de redes terrestres donde existe una baja Proporción de Bits Erróneos (BER, Bit Error Rate) y retardos de propagación despreciables. En este ambiente el comportamiento es óptimo, sin embargo, un canal satelital ofrece parámetros diferentes en términos de retardos de propagación muy prolongados, tasas de bits erróneos inferiores a las de redes terrestres, y además, asimetría de ancho de banda en los flujos de subida y bajada debido a las limitaciones de potencia que presentan algunas estaciones terrenas para transmitir. Todas estas características afectan los Algoritmos de Control de Flujo basados en el principio de ventana deslizante que están asociados a TCP. Estos algoritmos son fundamentalmente el Comienzo Lento (Slow Start) y el de Evasión de Congestión (Congestion Avoidance).

El comienzo lento se produce en la etapa de establecimiento de la conexión y se basa en acuses de recibo por parte del receptor para aumentar la cantidad de paquetes que se envían de un extremo a otro. Por cada acuse recibido, el transmisor aumenta la ventana de congestión en uno de manera que cada vez duplica la cantidad proporcionando un crecimiento exponencial del flujo. Dado el alto retardo de propagación del canal satelital una comunicación sobre TCP que se cursa a través de este medio tardaría mucho tiempo en alcanzar la velocidad de transmisión apropiada, pues existe un tiempo en el que el extremo transmisor debe esperar la llegada de los acuses para enviar nuevos paquetes, originando una subutilización del canal, teniendo presente que transcurre tiempo donde el canal satelital no está completamente explotado. Este fenómeno, adquiere mayor importancia cuando la conexión TCP satelital regresa a una sección de red terrestre donde debe compartir recursos con otras conexiones sin saltos por satélite, debido a que estas últimas adquirirán rápidamente tasas de transmisión altas apoderándose de la mayor parte del ancho de banda disponible, mientras la conexión con salto satelital no estará en capacidad de competir en igualdad de condiciones.

El protocolo TCP, considera que los errores en la transmisión siempre se deben a efectos de la congestión, debido a que estaba orientado a redes con mínima Proporción de Bits Erróneos (BER, Bit Error Rate), por esta razón, cuando se presentan daños por corrupción de paquetes este aplica restricciones al flujo de transmisión para impedir la congestión. Este efecto representa un serio inconveniente dado que los enlaces por satélite presentan altas Proporciones de Bits Erróneos (BER, Bit Error Rates), de manera que en cada evento de corrupción de paquetes este se confundirá con congestión en la red forzando a reducir inútilmente la velocidad de transmisión. Igual sucede cuando el retardo de propagación se confunde con pérdidas de los paquetes si este excede el tiempo de **RTT (Round-Trip Time)** establecido para el enlace, forzando al protocolo a reducir la tasa de transmisión debido a la descoordinación en el intercambio de segmentos, lo que representa igualmente una disminución del rendimiento.

El retardo de propagación es inherente a los enlaces por satélite dada la condición de la velocidad de la luz y la longitud del trayecto, así es que no existe forma de eliminar este fenómeno. La solución es mitigar los efectos de este sobre el rendimiento de TCP, y las propuestas consisten en cambios en el protocolo e incluso migración a un nuevo protocolo que reemplace a TCP durante el trayecto satelital. El Grupo de Trabajo en Ingeniería de Internet (IETF, Internet Engineering Task Force) ha sugerido varias propuestas para el

control de flujo en TCP, pero estos cambios en primer lugar, deben ser implementados por todos los usuarios involucrados para experimentar mejoramientos, lo que implica una reconfiguración de muchos terminales, evento que inicialmente es impráctico y además contradice la norma que establece que los protocolos deben ser independientes del medio de transmisión. Por otra parte, estas actualizaciones aumentan el rendimiento cuando TCP se cursa a través de canales con alto retardo de propagación y gran ancho de banda, pero esto no significa que se mejore o mantenga el rendimiento cuando este atravesase canales de muy poco retardo de propagación y gran ancho de banda, como podría ser la fibra óptica.

Incluir un protocolo nuevo o adaptado al trayecto satelital, es una solución conocida como **TCP splitting** y consiste en incorporar una pasarela en la frontera entre la red terrestre y la red satelital para realizar la conversión de protocolos. Es importante resaltar que aún cuando se logran notables mejoramientos en la capa de transporte a través de este mecanismo, también es considerable la dificultad de garantizar compatibilidad de estos protocolos, dado que consiste en un cambio total de la semántica de TCP. Otras posibilidades consisten en la inclusión de equipos en la periferia del entorno terrestre con la red satelital para manipular el comportamiento de TCP de acuerdo a las condiciones del trayecto a través del satélite. Una de estas, consiste en la incorporación de un dispositivo hardware o software el cual se encarga de generar acuses de recibo a cada segmento TCP recibido desde la red terrestre, de manera que este adquiere la responsabilidad de enviarlo al otro extremo de la red satelital y conservarlo en memoria en caso de retransmisión hasta recibir el verdadero acuse de recibo del destino. Esta técnica conocida como “**TCP spoofing**” es afectada por el efecto de ventana descrito anteriormente, en la misma proporción que la implementación con TCP únicamente.

La solución más adecuada para minimizar los efectos del canal satelital sobre el rendimiento de TCP, depende básicamente de las condiciones del enlace y la aplicación en particular, de manera que es necesario analizar las características de cada técnica y evaluar el rendimiento de las variables que afectan directamente la aplicación del usuario final, para luego poder definir cuál es la técnica más conveniente.

El protocolo de Datagramas de Usuario, UDP, no orientado a conexión, no realiza control de flujo ni tampoco control de errores. Estas características lo hacen menos susceptible a los efectos del canal satelital dado que no existe la limitación de una ventana de transmisión o de la recepción de acuses de recibo. Este hecho, permite que exista mayor independencia ante el retardo de propagación en el canal satelital, no obstante, mayores complicaciones se presentan cuando existe corrupción de los paquetes debido al canal satelital teniendo presente que no se realizan acuses de recibo que certifiquen que el paquete alcanzó el destino.

3.3.3 Conmutación de Paquetes en el Segmento Espacial.

Hoy en día, interconectar un conjunto de redes LAN requiere garantizar una conexión fija entre una estación y todas las demás independiente del volumen de tráfico que se curse

entre cada una. En un acceso FDMA, cada conexión es un ancho de banda estático que puede o no ser empleado en su totalidad, en este caso, según la dirección del paquete se debe seleccionar la frecuencia de transmisión y en el peor de los casos, todo el tráfico de una estación debe transmitirse a las demás para que cada una seleccione los paquetes que le corresponden. De igual forma, en un esquema TDMA pueden presentarse intervalos donde los recursos están completamente inutilizados porque en determinado instante no existe tráfico entre un par de estaciones o todos permanecen ocupados con tráfico probablemente innecesario. En el primer caso, la selección de frecuencia, intervalo o código dependiendo del destino de cada paquete en la estación terrena involucra requerimientos adicionales de procesamiento que redundan sea bien en volumen o en costo para el usuario final. En el caso contrario, transmitir todos los paquetes sin una previa selección no constituye una solución eficiente debido al ancho de banda y procesamiento dedicado a paquetes que no son necesarios.

Una solución acertada es realizar el envío de todo el tráfico de IP generado por cada estación hasta el satélite y delegar a este la tarea de seleccionar el destino de acuerdo a las direcciones de fuente y destino de cada paquete. Esta tarea consiste en la definición del haz y la frecuencia, intervalo o código según sea la técnica de acceso múltiple para que cada paquete alcance su destino correspondiente. Así, solo es necesario una banda de frecuencia o intervalo de subida y bajada para cada estación dado que el satélite se encarga de realizar la tarea de cambio de frecuencia, intervalo o código. En otros términos, la propuesta consiste en otorgar a los satélites capacidades de enrutamiento de paquetes tal y como si se trataran de un componente adicional de la red terrestre. El trayecto de los paquetes se genera directamente en el segmento espacial y se evita el doble salto necesario para llevar el paquete hasta un enrutador en tierra para que sea enviado de vuelta al satélite y finalmente a su destino.

La conmutación de paquetes a bordo del satélite, corresponde esencialmente al tratamiento de los paquetes en términos de lectura de las direcciones IP, definición del próximo salto, construcción de las tramas de red compatibles con la red de destino, selección del haz correspondiente y selección de la frecuencia, intervalo o código necesario según sea el método de acceso que se emplee en cada haz. Además de las tareas de un enrutador, en el segmento espacial se generan tareas adicionales debido a la existencia de múltiples haces y diferentes técnicas de acceso.

La exigencia de esta solución no se restringe únicamente al notable incremento de procesamiento a bordo que se requiere para recuperar los paquetes e identificar las direcciones de fuente y destino para seleccionar el haz de bajada apropiado. En este escenario, los satélites resuelvan el tráfico tanto para las redes como usuarios asociados tal y como si se tratara de un enrutador de altas prestaciones, además, tales deben ser suficientes para evitar situaciones de congestión y para garantizar el tratamiento especial a aquellos paquetes que lo requieren por las condiciones de calidad del servicio.

3.3.4 Calidad del Servicio en Redes Satelitales basadas en IP.

Por calidad de servicio (**QoS, Quality of Service**) se entiende la capacidad de una red y todos sus elementos para asegurar que los requerimientos de tráfico y rendimiento establecidos por el usuario del servicio puedan ser satisfechos. Desde este punto de vista, existen cuatro formas diferentes de considerar esta definición, puede ser el QoS ofrecido por el operador de acuerdo a la planificación y administración de los recursos, el QoS realmente alcanzado por la red obtenido de mediciones y pruebas de rendimiento, el QoS esperado por el usuario de acuerdo a las expectativas y tipo de servicio o, en ocasiones el más influyente, el QoS percibido por el usuario el cual se define por la apreciación del usuario en términos de variables como tasa de transmisión y disponibilidad sin tener en cuenta las condiciones de la red. Cada uno de estos son necesariamente diferentes por las características del tráfico IP lo cual exige un acuerdo previo entre el operador y el usuario del servicio para establecer las condiciones mínimas de operación. Estos convenios son conocidos como acuerdos de nivel de servicio o **SLA, Service Level Agreement**.

Existen diferentes criterios o métricas para definir la calidad del servicio, entre las cuales se pueden citar el retardo de los paquetes, **jitter**, ancho de banda, tasa de pérdida de paquetes y disponibilidad. Cada uno de estos parámetros dependen fundamentalmente del tipo de tráfico que se curse; en un sistema de comunicaciones por satélite estas habilidades son sinónimo de cargas satelitales con procesamiento a bordo capaces de reconocer el tipo de servicio y las condiciones exigidas en cada caso. Las métricas para el establecimiento de los acuerdos de nivel de servicio obedecen a la existencia de servicios muy sensibles a determinados parámetros e inmunes a otros, por ejemplo, el retardo puede afectar gravemente las aplicaciones de voz y videoconferencia, lo cual no sucede con servicios de difusión, de igual forma, la vulnerabilidad a errores dada la condición redundante del tráfico de voz no es la misma que la del flujo de datos. Esta condición exige a la carga de comunicaciones del satélite, capacidad de control de colas de paquetes, planificación, modelamiento y discriminación del tráfico, por otro lado, debe permitir mecanismos para señalización o intercambio de información de los recursos disponibles y necesarios extremo a extremo.

Para las redes terrenas basadas en IP se han considerado varios modelos para la garantía de la calidad del servicio, entre los cuales se consideran el modelo de servicios integrados, modelo de servicios diferenciados y el modelo de conmutación de etiquetas basado en MPLS.

3.3.4.1 Modelo de Servicios Integrados.

El control de la calidad de servicio a través del modelo de servicios integrados (**IntServ, Integrated Services**) se basa en la reservación dinámica de recursos de acuerdo al tipo de servicio. Este proceso se realiza como paso previo al inicio de la comunicación a través del Protocolo de Reservación de Recursos **RSVP (Resource reSerVation Protocol)**. El emisor transmite un mensaje con las condiciones necesarias para el servicio particular, este recorre el camino hasta el destino añadiendo la información de disponibilidad de recursos en cada nodo de la red y una vez se ha alcanzado el destino

final, este construye un mensaje de solicitud de recursos a partir de la información recolectada, así, este nuevo mensaje recorre el mismo camino que el inicial pero en sentido contrario confirmando la reservación de los recursos en cada uno de los nodos.

Este modelo requiere el intercambio de información extremo a extremo antes de iniciar el intercambio de datos, tal efecto redundante en un aumento de la señalización e instalación del protocolo en todos los nodos y por otra parte, en el ambiente satelital, la negociación sería un proceso lento y se empobrecería el rendimiento de la red como consecuencia del alto retardo de propagación.

3.3.4.2 Modelo de Servicios Diferenciados.

El modelo de servicios diferenciados (**Diffserv, Differentiated Services**) se basa en la incorporación de una secuencia de bits a los paquetes para que estos sean discriminados y tratados de manera particular en cada uno de los nodos a lo largo del trayecto. La secuencia de bits se incorpora en el campo de Tipo De Servicio (Type Of Service) en el encabezado del datagrama IP y se especifica de acuerdo a las métricas definidas para el control de la Calidad del Servicio (QoS, Quality of Service). Cuando un paquete entra al dominio de DiffServ, el primer enrutador asigna la secuencia de bits de acuerdo a los requerimientos del servicio y a la política de clasificación, modelado y marcado de paquetes, en adelante los enrutadores sólo deben atender al tratamiento especial de cada paquete.

Además de la alta escalabilidad del modelo, se resalta la ausencia de negociación previa a la comunicación, lo que se convierte en características bastante convenientes en el entorno satelital.

3.3.4.3 Modelo de Conmutación de Etiquetas.

Este modelo se soporta en la conmutación de etiquetas multiprotocolo (**MPLS, Multi Protocol Label Switching**) y se orienta a disminuir el retardo de procesamiento de los paquetes en cada nodo de la red y al mismo tiempo, a proveer la capacidad de realizar ingeniería de tráfico en las redes IP. Con esta tecnología, las redes IP no orientadas a conexión, cambian radicalmente este concepto y establecen trayectos fijos desde la fuente hasta el destino basándose en los requerimientos específicos del usuario. El proceso consiste en añadir un encabezado a cada paquete para determinar su próximo salto, así, el trayecto que debe recorrer un paquete se especifica a través de una secuencia de etiquetas que van siendo empleadas una por una en cada nodo de la red. La definición de esta secuencia, se realiza sea bien antes del inicio de la transmisión o por la detección de un flujo de datos. En cualquiera de los casos, la conmutación basada en etiquetas es mucho más rápida que la realizada por medio de las direcciones IP y esto ha permitido que MPLS incursione exitosamente como tecnología de backbone en las redes terrestres.

La Calidad del Servicio (QoS, Quality of Service) se obtiene a través de la construcción de tablas donde se consignan los niveles de calidad de servicio soportados por la red, de manera que la construcción del trayecto se realiza empleando conjuntamente las tablas y la incorporación de políticas de distribución de etiquetas.

3.3.4.4 Multidifusión de Paquetes IP.

La Multidifusión permite a una fuente de red de comunicaciones enviar datos a múltiples destinos simultáneamente mientras transmite una única copia de datos en la red, permitiendo la optimización de la carga que reciben las estaciones transmisora y receptoras, así como el ancho de banda entre los enlaces que las unen. La multidifusión está orientado hacia aplicaciones del tipo “uno para muchos” y “muchos para muchos” entre estas: videoconferencia, aprendizaje a distancia, actualizaciones software, distribución de archivos entre otras.

Este método de transmisión está soportado en el Protocolo de Gestión de Grupos de Internet **IGMP (Internet Group Management Protocol)** y en el Protocolo de Datagramas de Usuario **UDP**. El primero, toma lugar entre los terminales de usuario y los enrutadores locales y se ocupa de informar a los enrutadores cuales de sus grupos o miembros de multidifusión se encuentran activos, para esto, se envían mensajes en datagramas IP donde la dirección de destino es la dirección IP multidifusión de los terminales. UDP por su parte, permite ‘asegurar’ la transmisión de los datagramas hacia la aplicación, y su característica de no ser orientado a conexión, lo hace propicio frente a TCP, de lo contrario, la gran cantidad de reconocimientos colapsaría el emisor.

Ahora bien, trasladar multidifusión IP al segmento espacial enfrenta diferentes dificultades derivadas del comportamiento del protocolo **IGMP**, puesto que fue pensado para redes terrestres con gran ancho de banda y muy bajo retardo. En estos términos, existen problemas de sobrecarga de tráfico en el satélite por los múltiples mensajes de reporte, generados cuando muchos clientes **IGMP** responden al mismo tiempo a una petición de consulta de filiación **IGMP** que debido al retardo de propagación no es posible controlar muy fácilmente.

En orden a resolver estos problemas, la adaptación IGMP está basada en lograr una limitación de la transmisión de reportes recibidos bajo la interfaz aérea. Para tal fin, las modificaciones se han implementado sobre el modo **IGMPv2** por ser la versión más eficiente en términos de tráfico de señalización y por su mínimo requerimiento en ajustes para el uso por satélite comparada con su versión 3. A la versión de IGMP adaptada para tráfico multidifusión por satélite se ha denominado **S-IGMP (Satellite - IGMP)**, una solución orientada a sistemas satelitales geoestacionarios con una topología en estrella donde el concentrador es la única fuente de multidifusión.

S-IGMP ha logrado reconocerse por su gran desempeño y escalabilidad, consistente en el reuso de funciones **IGMP** existentes, referido a que las funciones en el cliente IGMP

permanecen igual y que los paquetes **IGMP** en el enlace satelital son compatibles con su versión 3.

Ofrecer por el medio espacial tráfico a grupos de usuarios antes que una posibilidad es una necesidad que los entornos distribuidos exigen, y los desarrollos al respecto lo aproximan, a pesar del rendimiento del protocolo de gestión de usuarios por satélite **S-IGMP** y de sus modificaciones, aún quedan consideraciones tales como, el enrutamiento del tráfico multidifusión sea bien a bordo del satélite o en el segmento terreno, al igual que unas políticas de seguridad definidas que brinden confiabilidad a los servicios ofrecidos por proveedores y demandados por sus clientes.

3.3.5 Movilidad de Usuarios IP.

En el entorno de las redes de nueva generación, la dirección IP asociada a cada dispositivo es la característica que además de identificarlos como elementos de una red específica, les permite acceder a los servicios que se encuentran disponibles. Normalmente, esta dirección es fija para cada terminal, puesto que están siempre físicamente conectados a la misma red, pero en un entorno inalámbrico donde existen facilidades de movilidad y que en la medida de sus desplazamientos cada terminal se asocia a la red con mejores prestaciones, las direcciones IP deben ser asignadas dinámicamente para permitir la asociación de los terminales a nuevas redes. Cuando un terminal ingresa a una nueva red, se generan procesos de reconocimiento y se asigna una dirección temporal mientras permanece como visitante en el nuevo dominio. Como paso previo a permitirle explotar los recursos de la red, se notifica a la red original que uno de sus dispositivos está siendo temporalmente atendido por una red diferente, para que todo el tráfico que se genere para este terminal en su dominio original sea enrutado a la red a la cual se encuentra asociado. Este esquema no es muy diferente a los que tienen lugar en las redes celulares de telefonía móvil, pues en esencia se trata del mismo concepto, solo que trasladado al entorno de redes IP e indiferente si se trata de servicio de datos, voz o video. Para el logro de la movilidad en el entorno IP, existen mecanismos para controlar todo el proceso de señalización que se genera por la gestión de localización de los terminales, este es el protocolo IP móvil o IP mobile.