



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*Análisis y aplicación del estándar DIFI para la interoperabilidad
en el segmento terrestre satelital*

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa

ALUMNO: Guillermo Torres Cerrato

DIRECTOR: Rubén Nocelo López

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*Análisis y aplicación del estándar DIFI para la interoperabilidad
en el segmento terrestre satelital*

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa
Especialidad de Sistemas y Tecnologías de Telecomunicación

UniversidadeVigo

AGRADECIMIENTOS

A mi hijo Pelayo.

"In your darkest hour, when the demons come, call on me, son, and we will fight them together"

RESUMEN

Con el objetivo de transmitir información y prestar servicios de telecomunicación entre sistemas y usuarios, se utilizan diversos medios de transmisión. Entre ellos, destacan los sistemas que propagan señales a través del espacio libre, como los sistemas satelitales y los radioenlaces, operando en bandas de radiofrecuencia (RF), típicamente en el rango de los gigahercios. Debido a las limitaciones inherentemente asociadas al procesamiento directo de señales en RF, estos sistemas requieren la conversión de frecuencia hacia una Frecuencia Intermedia (IF), permitiendo su posterior procesamiento en banda base (BB) mediante operaciones de *down-conversion* y *up-conversion*.

Tradicionalmente, la IF se ha transportado en formato analógico, lo que impone restricciones significativas en términos de flexibilidad, escalabilidad, distancia y distribución física de los equipos. En este contexto, el estándar Digital Intermediate Frequency Interoperability (DIFI), propone la digitalización de las señales en IF y su transporte sobre redes digitales, facilitando la separación geográfica entre antenas y sistemas de procesamiento, así como la virtualización de infraestructuras.

El presente Trabajo Fin de Máster (TFM) analiza el estándar DIFI, evaluando sus ventajas e inconvenientes respecto a los sistemas tradicionales analógicos y los principales retos para su implementación, centrándonos en los posibles beneficios del uso de esta tecnología en el ámbito de las comunicaciones satelitales en Defensa.

PALABRAS CLAVE

Comunicaciones por satélite, segmento terreno, estaciones de anclaje, RF, IF, interoperabilidad.

ABSTRACT

The main scope of Telecommunication Transport layers is to provide information to several systems and users remotely. High frequency (above GHz) signal transmission within free space is one of the most common used system (as satellite or radio links), also as known as Radio Frequency (RF). These systems include not only transmission media (such as waveguides or coaxial cables) and antennas, but also transmitters/receivers and processing equipment. In such systems, a down-conversion (for reception) or up-conversion (for transmission) to an Intermediate Frequency (IF) is required to transfer the analog signal from the antenna to the processing equipment at baseband (BB). Transporting signals in analog IF over these media imposes significant limitations on flexibility, scalability, and the physical placement of equipment, which must be located close enough to process and route the signals to final hosts via other transport layers, such as optical fiber (OF). Digital Intermediate Frequency Interoperability (DIFI) technology provides us an open standard where analogic signals can be digitalized in IF, therefore it can be transmitted/received with more flexibility and scalability, so transmission and processing equipment can be placed remotely, improving the information and antennas availability within several geographic positions even introducing cloud computing.

This TFM aims to analyse DIFI standard with the purpose of identify the main advantages/disadvantages and challenges for its implementation, focusing on benefits of this technology and use cases in Defense-related satellite communications.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos del TFM	11
1.3 Metodología	11
1.4 Estructura	11
2 Estado del arte	13
2.1 RF en comunicaciones satelitales	13
2.1.1 Justificación de la existencia de comunicaciones satelitales	13
2.1.2 Influencia de la atmósfera en comunicaciones satelitales	14
2.1.3 Balance de enlace satelital	15
2.1.4 Servicios y anchos de banda satelitales	16
2.1.5 Acceso compartido al medio en comunicaciones satelitales	18
2.1.6 Limitaciones de la RF.	21
2.1.7 ¿Por qué se utiliza la IF?.....	24
2.2 Frecuencia Intermedia analógica	25
2.2.1 Arquitectura tradicional	26
2.2.2 Ventajas históricas	30
2.2.3 Limitaciones de la IF analógica y transición hacia IF digital	31
2.3 Transición hacia IF Digital	32
2.3.1 Concepto de IF Digital.....	32
2.3.2 Digitalización de señales	33
2.3.3 Arquitectura de IF Digital. Digital Down Conversion (DDC)	36
2.3.4 Ventajas de IF digital respecto a IF analógica.....	42
2.3.5 Retos de la transición.....	45
2.3.6 Principales estándares de IF Digital.	47
3 Consorcio DIFI y su Estándar	54
3.1 Origen y objetivos.....	54
3.2 Relación con IEEE-ISTO Std 4900-2021	56
3.3 Principales características	58
3.4 Certificación y adopción industrial	70
3.5 Ejemplos de casos de uso.....	73

3.6 Caso de uso práctico en el ámbito de la Defensa	79
3.7 Ventajas respecto a otros estándares	84
4 Conclusiones y Líneas Futuras	86
4.1 Conclusiones	86
4.2 Líneas futuras	88
5 Bibliografía.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Definición de segmento espacial y terrestre [3].	7
Figura 1-2: Composición de alto nivel de una estación de anclaje terrestre [3].	8
Figura 1-3: Concepto de up-conversion y down-conversion en el dominio de la frecuencia [4].	9
Figura 1-4: Ejemplo de conversor de dos frecuencias en transmisión y recepción [5].	10
Figura 2-1: Comunicación radio LOS [6].	14
Figura 2-2: Capas de la atmósfera terrestre [1].	15
Figura 2-3: Atenuación introducida por la atmósfera ($p = 1 \text{ atm}$; temperatura = $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y vapor de agua = $7,5 \text{ g/m}^3$) [1].	15
Figura 2-4: Asignación de bandas de frecuencia en función de aplicaciones de comunicaciones satélite [2].	16
Figura 2-5: Antena satélite UHF en Estación de Anclaje de Torrejón de Ardoz con polarización circular.	18
Figura 2-6: Técnicas de enrutamiento de tráfico. (a) una portadora por enlace estación a estación; (b) una portadora por estación transmisora [5].	19
Figura 2-7: Técnicas de acceso al medio: (a) Múltiple Acceso por División en Frecuencia (FDMA); (b) Múltiple Acceso por División en Tiempo (TDMA); (c) Múltiple Acceso por División de Código (CDMA) [5].	20
Figura 2-8: Acceso al medio aleatorio con Aloha. (a) sin colisiones ; (b) con colisiones.	21
Figura 2-9: Esquema de un receptor de frecuencia variable (TRF) [7].	22
Figura 2-10: Atenuación de cable coaxial en función de la frecuencia. Cable A: 2,5 mm de diámetro; Cable B y C: 7 mm de diámetro; Cable D: 10 milímetros de diámetro [7].	22
Figura 2-11: Atenuación de distintos tipos de guía onda rectangular en función de la frecuencia [8].	23
Figura 2-12: Receptor superheterodino [7].	24
Figura 2-13: LNA en RF previo al paso a IF. (a) conversión de toda la banda; (b) conversión portadora a portadora [5].	25
Figura 2-14: Amplificación de alta potencia en la etapa RF. (a) amplificación de toda la banda ; (b) amplificación para cada portadora [5].	25
Figura 2-15: Tono modulado en FM (modulación analógica) [9].	26
Figura 2-16: Señal digital modulada en OOK, BPSK y FSK (modulaciones digitales) [9].	26
Figura 2-17: Arquitectura tradicional de estación terrena [5].	27
Figura 2-18: Ejemplo de rack satélite instalado en las Islas Chafarinas.	28
Figura 2-19: Ejemplo de combinador.	28
Figura 2-20: Ejemplo de señal RF con 3 portadoras de 20 MHz de ancho de banda en banda X.	29
Figura 2-21: Ejemplo de módulo de antena en banda X en Isla de Alborán (transmisor y receptor).	29
Figura 2-22: Arquitectura de alto nivel para IF Digital [10].	33

Figura 2-23: Señal continua en el tiempo (a) y señal muestreada (b) [11].....	34
Figura 2-24: Conversor ADC. (a) esquema de bloques ; (b) señal analógica de entrada y señal digital a la salida del conversor [12].	35
Figura 2-25: Ejemplo de cuantificador uniforme con toma de decisión de redondeo [12].	35
Figura 2-26: Errores de cuantificación [12].	36
Figura 2-27: Arquitectura de IF digital utilizando IF analógica previa [13].	37
Figura 2-28: Arquitectura de IF completamente digital [14].	37
Figura 2-29: Respuesta al impulso de un filtro implementado con la transformada de Hilbert [15].	38
Figura 2-30: Esquema de bloques de NCO [17].	39
Figura 2-31: Salida del conversor ADC [16].	39
Figura 2-32: Salida en amplitud de la señal en fase o cuadratura [16].	39
Figura 2-33: Filtrado paso bajo [16].	40
Figura 2-34: Señal en frecuencia discreta obtenida tras el filtrado paso bajo [16].	40
Figura 2-35: Salida del diezmador usando un downsampling de orden 7 [16].	40
Figura 2-36: Ejemplo de <i>downsampling</i> . (a) Esquema del <i>diezmador</i> ; (b) Señales de entrada y salida [13].	41
Figura 2-37: Filtro baso bajo. (a) diagrama de bloques. (b) respuesta al impulso del filtro [13].	41
Figura 2-38: Esquema de IF digital en transmisión [17].	42
Figura 2-39: Ejemplo de interpolación por un factor de 8 previo al DUC [17].	42
Figura 2-40: La arquitectura del segmento satélite utilizando IF digital nos permite flexibilizar todos los componentes de las estaciones en tierra y los servicios con los que se integran los datos [10].	44
Figura 2-41: Ejemplo de redundancia de antenas [10].	44
Figura 2-42: Ejemplo de arquitectura para equipos legados analógicos en redes de IF Digital [10].	47
Figura 2-43: Arquitectura radio tradicional con múltiples protocolos [19].	48
Figura 2-44: Arquitectura radio objetivo de estándar VITA [19].	48
Figura 2-45: Arquitectura de radio utilizando formato VITA [20].	49
Figura 2-46: Nuevos tipos de paquetes introducidos en la versión 49.2 del estándar VITA [20].	50
Figura 2-47: Formato de cabecera de paquetes en estándar VITA [21].	51
Figura 2-48: Arquitectura con estándar FAST OSDI [22].	51
Figura 2-49: Encapsulado de paquetes eCPRI sobre pila de protocolos de red estándar [23].	52
Figura 2-50: Arquitectura eCPRI con nodos CPRI [23].	52
Figura 3-1: Logo del consorcio DIFI [24].	55
Figura 3-2: Logo de IEEE-ISTO [25].	56
Figura 3-3: Formato inicial del plano de datos en la versión 1.0 del IEEE-ISTO 4900-2021 [26].	57
Figura 3-4: Evolución del formato de paquetes en el plano de datos en la versión 1.3 del estándar IEEE-ISTO 4900-2021 [27].	58

Figura 3-5: Arquitectura de alto nivel para estaciones terrenas utilizando DIFI [27].	58
Figura 3-6: Pila de protocolos DIFI [27].	59
Figura 3-7: Formato de paquetes DIFI con cabeceras IP, UDP, VITA o Ethernet [27].	59
Figura 3-8: Cabecera del protocolo de capa de transporte UDP [28].	60
Figura 3-9: Datagrama básico en formato IPv4 [28].	60
Figura 3-10: Datagrama básico en formato IPv6 [28].	60
Figura 3-11: Formato de paquete Ethernet [28].	61
Figura 3-12: Formato de paquete Ethernet VLAN [28].	61
Figura 3-13: Ejemplo de flujo de información que engloba los 3 tipos de paquetes del estándar [27].	62
Figura 3-14: Localización del SID en recepción con IF analógica [27].	64
Figura 3-15: Localización del SID en recepción sin IF analógica [27].	64
Figura 3-16: Localización del SID en transmisión con IF analógica [27].	65
Figura 3-17: Localización del SID en transmisión sin IF analógica [27].	65
Figura 3-18: Formato de paquete de Datos en el estándar DIFI [27].	65
Figura 3-19: Uso del <i>Radix Point</i> para separar parte entera y decimal.	65
Figura 3-20: Representación de los puntos de referencia 25, 75 y 100 [27].	66
Figura 3-21: Representación de los puntos de referencia 15 y 75 [27].	67
Figura 3-22: Formato de paquete de Contexto en el estándar DIFI [27].	67
Figura 3-23: Formato de paquete de Comando de control de tiempo	68
Figura 3-24: Códigos de error notificados en los paquetes de <i>Status Report control Packet</i> en DIFI [27].	69
Figura 3-25: Ejemplo de configuración de test de certificación 1 [29].	71
Figura 3-26: Ejemplo de configuración para test desde el dominio de IF digital al de RF analógico [29].	71
Figura 3-27: Entorno de pruebas de dispositivo DIFI a certificar [29].	72
Figura 3-28: Entorno de pruebas para certificación escenario <i>end-to-end</i> [29].	72
Figura 3-29: Caso de uso de redundancia de antenas con modem legados.	74
Figura 3-30: Caso de uso separación de módulo RF y antena de los equipos de procesamiento. ...	74
Figura 3-31: Ejemplo de dispositivos remotos comunicándose con la estación terrena principal desplegando los equipos de procesamiento en la nube [30].	75
Figura 3-32: Esquema de Arquitectura de Referencia de AWS para virtualización de servicios terrestres satelitales en la nube [30].	76
Figura 3-33: Caso de uso implementando DIFI con módulos de cifrado.	77
Figura 3-34: Arquitectura de alto nivel <i>as is</i> con IF analógica	80
Figura 3-35: arquitectura de alto nivel <i>to be</i> del segmento terrestre satelital con DIFI y AWS	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Bandas de RF para comunicaciones por satélite [3].	10
Tabla 2-1: Distancia máxima en función del cableado [7].	23
Tabla 3-1: Resumen de Clases de Información disponibles en DIFI	63
Tabla 3-2: Clases y Tipos de Paquetes en estándar DIFI [27].	63
Tabla 3-3: Estructura de los paquetes DIFI [27].	64
Tabla 3-4: Códigos para los puntos de referencia en DIFI.....	66

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Las comunicaciones satelitales, ya sea en plataformas situadas en órbitas geoestacionarias (GEO), medias (MEO) o bajas (LEO), permiten el intercambio de información bien entre múltiples puntos remotos situados en diferentes regiones geográficas distintas (datos, voz, video o intercambio de datos entre aplicaciones) o proveen de información a múltiples estaciones basados en los propios datos tomados por las plataformas (tales como imágenes tomadas por el propio satélite) [1].

En el ámbito de las telecomunicaciones, éstas son llevadas a cabo a través de una o varias plataformas orbitando en el espacio sobre la Tierra, que actúan como transmisores de la información enviada por estaciones y/o terminales de usuario en su huella de cobertura. Dichas estaciones y terminales, ubicados en la superficie terrestre, constituyen el denominado segmento terreno del sistema.

Las comunicaciones satelitales presentan una serie de ventajas significativas frente a otros sistemas de telecomunicación. Entre ellas destaca su capacidad para proporcionar cobertura sobre amplias extensiones geográficas, que pueden abarcar desde países completos hasta continentes enteros, así como la disponibilidad de elevados anchos de banda. Asimismo, estos sistemas ofrecen una elevada independencia respecto a la infraestructura terrestre, lo que facilita su despliegue en zonas remotas o con escasa conectividad previa. La instalación de estaciones terrenas puede realizarse de forma relativamente rápida y, una vez desplegada la constelación, los costes operativos por servicio tienden a reducirse. Todo ello convierte a las comunicaciones satelitales en una solución eficaz para ofrecer conectividad inalámbrica de alcance global [2]:

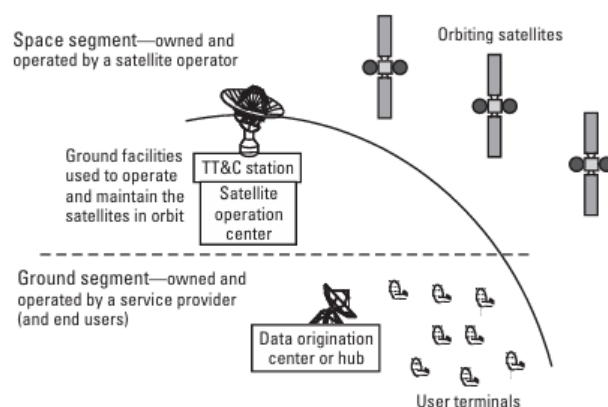


Figura 1-1: Definición de segmento espacial y terrestre [3].

Por otro lado, la información generada por parte de los sistemas y usuarios puede llegar desde éstos hasta las estaciones de anclaje a través de distintos medios de transporte, mayoritariamente por fibra óptica (FO) de terceros o en propiedad de la entidad propietaria de la estación, o bien conectados directamente a un terminal de usuario mediante protocolos de redes locales, principalmente WLAN o ethernet. Una vez integrada en el sistema satelital, las aplicaciones o servicios son entregadas a sus destinos a través de diferentes topologías de red, como redes punto a punto (*mesh*), punto a multipunto (*broadcast*) o multipunto dinámico (VSAT) [2].

Las estaciones de anclaje constituyen un elemento fundamental dentro de los sistemas de comunicaciones por satélite y presentan una gran diversidad en cuanto a su tamaño y complejidad. Estas características dependen de factores como el número de usuarios atendidos, las bandas de frecuencia en las que operan o los servicios que prestan. En términos funcionales, una estación de anclaje puede actuar como pasarela de telecomunicaciones (Gateway), proporcionando acceso a redes públicas o privadas terrestres, incluida Internet; como plataforma de difusión (Broadcast) de contenidos audiovisuales y datos; como nodo central (Hub) en redes con topología en estrella que permiten la conexión de terminales remotos a infraestructuras centralizadas; o como centro de control de red, encargado de la gestión del acceso al medio y de la supervisión global del sistema de comunicaciones satelital (como en las redes de acceso múltiple por división en tiempo, TDMA) [3]:

Para proveer de estas funciones, típicamente las estaciones de anclaje están compuestas, a alto nivel, por diversos subsistemas. Entre ellos, se incluyen los equipos de multiplexación y codificación de las señales provenientes de los usuarios por otros transportes, módem en los que se modula la información en banda base obteniendo la señal en IF que se transmitirá al equipo de RF, así como otros dos componentes importantes de cara al desarrollo del presente trabajo: el up-converter (down-converter en recepción) y el terminal de radiofrecuencia (RF). Adicionalmente, son necesarios otros componentes como son el combinador/divisor de señal o amplificadores (de alta potencia en transmisión y de bajo ruido en recepción), tal y como se muestra en la siguiente figura:

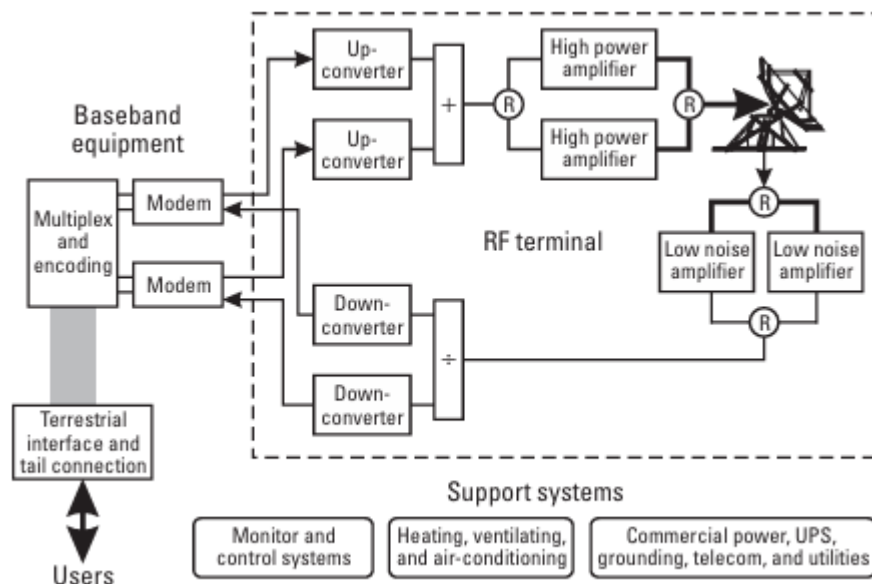


Figura 1-2: Composición de alto nivel de una estación de anclaje terrestre [3].

Los principales motivos de la utilización de la IF a la salida de los módems son la propagación de las señales desde este punto hasta la fase de RF del segmento terreno de la comunicación satélite. La modulación de la señal en la banda de IF, típicamente en el rango de MHz, permite el empleo de líneas de transmisión de bajo coste, tales como cables coaxiales, dado que las pérdidas en este tipo de líneas de transmisión son menores en dicha banda que en frecuencias del orden de GHz. Esta característica

permite implementar una solución de bajo coste y alta eficiencia entre el módem y el módulo de RF próximo a la antena.

Es precisamente en este tramo de la cadena de transmisión donde se plantea el estudio de la aplicación del estándar DIFI, cuya adopción permite incrementar la capacidad y flexibilidad en el transporte de la señal, facilitando su distribución hacia los equipos de procesamiento y enrutamiento con destino a los sistemas y usuarios finales.

En la etapa RF, se realiza la conversión de frecuencias, conocida como *up-conversión* (en transmisión) o *down-conversión* (en recepción). El objetivo de esta operación es el de trasladar la señal desde la banda de IF a la banda de RF y viceversa, siendo la diferencia entre ambas que la señal resultante a la salida de la conversión sea de mayor o menor frecuencia que la de la entrada.

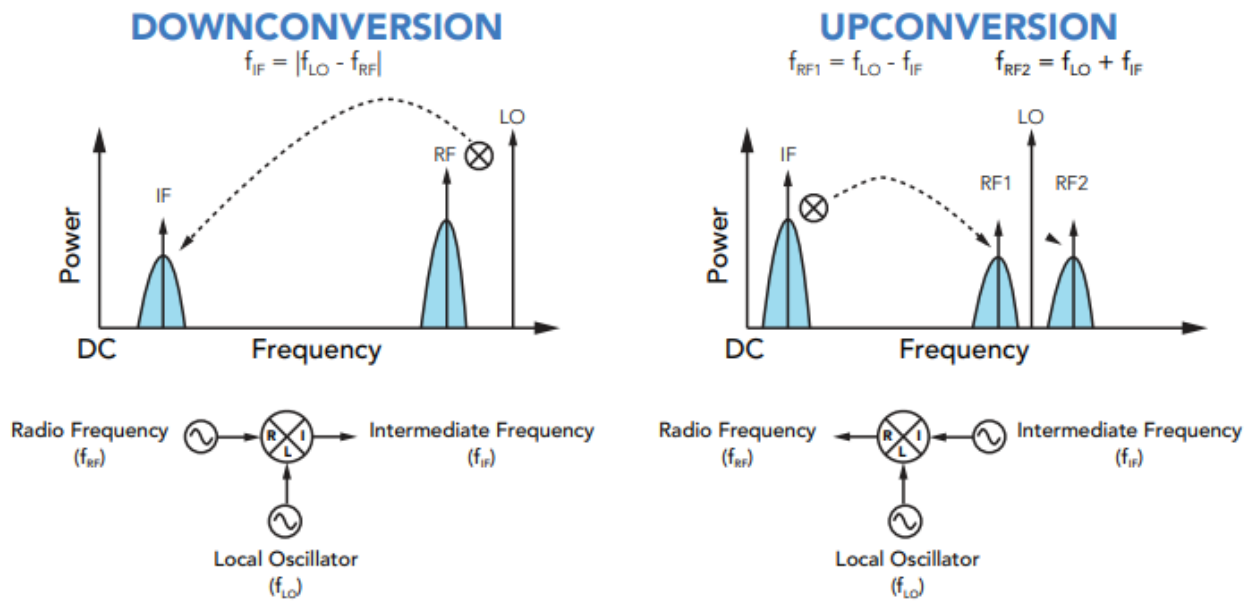


Figura 1-3: Concepto de up-conversion y down-conversion en el dominio de la frecuencia [4].

Esta conversión de frecuencias se lleva a cabo en el mezclador, donde la señal en IF o RF se combina con la señal de un oscilador local de forma que la señal a la salida es el resultado de la conversión en frecuencia. Posteriormente, en la cadena de transmisión, se deben de intercalar una serie de filtros paso banda y amplificadores de alta potencia previo al envío hacia la antena para transmisión. En el caso de la recepción, se deben utilizar Amplificadores de Bajo Ruido (LNA seguidos de etapas de filtrado posteriores al proceso de *down-conversion*. Este procesado se verá en mayor detalle en la siguiente sección del trabajo.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de un conversor de doble frecuencia para *up-conversion* y *down-conversion*, obteniendo la señal en RF tras realizar la conversión en dos etapas sucesivas de IF:

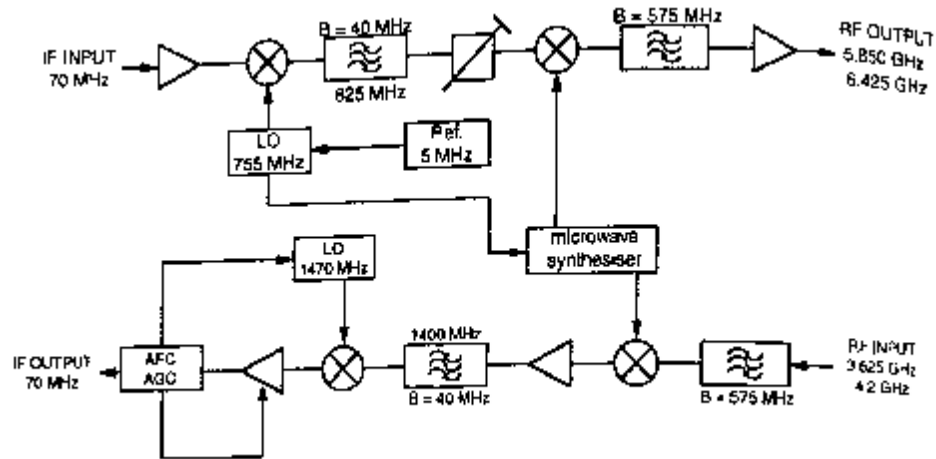


Figura 1-4: Ejemplo de convertidor de dos frecuencias en transmisión y recepción [5].

Las principales características que justifican el uso de la conversión de frecuencias incluyen la posibilidad de operar dentro de rangos de frecuencia adecuados para las entradas y salidas de las líneas de transmisión y los distintos equipos empleados. Asimismo, se requiere que los osciladores locales presenten estabilidad a largo plazo tanto en ganancia como en fase, garantizando la consistencia de la señal a lo largo del tiempo. Otro aspecto relevante es la reducción de componentes espurios en la señal, lo que contribuye a mejorar la pureza espectral y la eficiencia del sistema. Finalmente, la conversión de frecuencia permite aumentar la linealidad de las señales al reducir los niveles de intermodulación, favoreciendo una transmisión más precisa y con menor distorsión de la información [5].

Como resultado, podemos obtener una señal RF comúnmente en las siguientes bandas de frecuencia a transmitir o a ser recibida por el satélite:

Banda	Rango de frecuencia (GHz)
L	1.5-1.65
S	2.4-2.8
C	3.4-7
X	7.9-9
Ku	10.7-15
Ka	18-31
Q	40-50
V	60-80

Tabla 1-1: Bandas de RF para comunicaciones por satélite [3].

Toda esta arquitectura descrita forma parte del segmento terreno, actualmente utilizado de manera predominante en los sistemas satelitales. Sin embargo, con la aceleración de la industria satelital, se está incrementando la capacidad de lanzamiento, a la vez que la carga útil puesta en órbita disminuye. Esto redundando en la necesidad de una mayor capacidad de cómputo en el segmento terreno y en las distintas estaciones de anclaje, creando un cuello de botella en este segmento dada las limitaciones de las

arquitecturas explicadas en el presente apartado, basadas en cableado coaxial que transportan la señal analógica desde los módems físicos en una ubicación cercana hasta las antenas.

La dificultad de escalar y operar este tipo de arquitecturas ha motivado la propuesta del consorcio DIFI, que sustituye el tramo de IF analógica por un flujo de datos digital estandarizado e interoperable para todo el segmento terreno. Esta solución no solo supera las limitaciones físicas del cableado y la señal analógica, sino que también aumenta la capacidad de procesamiento y flexibilidad del sistema.

Por su aplicabilidad en entornos con altos requerimientos de seguridad y eficiencia, incluyendo el ámbito de Defensa, el presente Trabajo Fin de Máster se centra en analizar las ventajas, desventajas y potencial de implementación del estándar DIFI frente a la IF analógica convencional.

1.2 Objetivos del TFM

El presente Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo principal analizar la adopción del estándar DIFI en el segmento terreno de comunicaciones satelitales, con especial atención a su aplicabilidad en el ámbito de la Defensa. Para ello, se persiguen varios objetivos específicos:

- 1) Se realiza un estudio detallado del segmento terreno satelital tradicional, explicando los fundamentos de las señales de RF e de IF y centrándose en la identificación y justificación de las limitaciones asociadas al uso de IF analógica.
- 2) Se aborda la transición hacia IF digital, analizando las ventajas que ofrece, los retos que plantea su implementación y los estándares alternativos al DIFI existentes en el mercado.
- 3) Se estudia en profundidad el estándar DIFI, destacando los motivos técnicos y estratégicos que justifican su adopción prioritaria.
- 4) Se diseñarán casos de uso práctico del estándar DIFI, evaluando su aplicabilidad y beneficios específicos en el ámbito de la Defensa.

1.3 Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados en este Trabajo Fin de Máster, se empleará una metodología basada en la revisión bibliográfica, el análisis comparativo y el estudio de casos de uso prácticos. En primer lugar, se realizará una revisión exhaustiva de la literatura técnica y normativa relacionada con las comunicaciones satelitales, abarcando los fundamentos de RF e IF, la arquitectura tradicional del segmento terreno y los sistemas de transmisión analógica utilizados habitualmente. Esta revisión permitirá establecer un marco teórico sólido que sustente la identificación de las limitaciones de las soluciones convencionales.

En segundo lugar, se analizará la transición hacia la Frecuencia Intermedia Digital, evaluando los estándares existentes y comparando sus ventajas y limitaciones, con especial énfasis en el estándar DIFI. Este análisis incluirá la descripción de sus características técnicas, los procesos de codificación y transporte digital, así como su interoperabilidad y aplicabilidad en entornos de Defensa.

Finalmente, se desarrollará algún caso de uso que ejemplifiquen la implementación práctica de DIFI en el segmento terreno, evaluando su impacto en términos de capacidad, flexibilidad y escalabilidad frente a las soluciones basadas en IF analógica. Este enfoque permitirá combinar la fundamentación teórica con una aproximación práctica, facilitando una comprensión integral de las ventajas y retos asociados a la adopción del estándar DIFI.

1.4 Estructura

El presente Trabajo Fin de Máster se ha estructurado para abordar sistemáticamente los objetivos planteados en la Sección 1.2 y aplicar la metodología descrita en la Sección 1.3. El documento se organiza de la siguiente manera:

En el capítulo 2, Estado del Arte, se abarcarán todos los fundamentos teóricos de la IF analógica con el objetivo de analizar el segmento terreno tradicional, lo cual permite entender sus limitaciones y la necesidad de la implantación de IF digital para eliminar el cuello de botella presente en las estaciones terrenas satélite. A continuación, se presentan en esta misma sección los fundamentos de IF digital que permiten hacer una comparativa respecto a la IF analógica, para justificar y evaluar sus ventajas. Por último, se muestran algunos ejemplos de estándares de IF digital, justificando por qué no han llegado a alcanzar una interoperabilidad real entre componentes de distintos fabricantes e integradores.

En el capítulo 3, Estándar DIFI, se justifica la realización de un consorcio que mejore las deficiencias de otros estándares, como una capa adicional que garantiza la interoperabilidad de los sistemas y la implantación de un estándar desarrollado en conjunto y de fácil implementación para todos los *stakeholders*, cuyo desarrollo está apoyado y supervisado por una entidad objetiva como la IEEE-ISTO. Por último, se presentarán en esta sección algunos casos de uso prácticos para la implementación del estándar DIFI, de forma que se muestre la utilidad y potencial del estándar desarrollado por este consorcio.

Por último, en el capítulo 4, Conclusiones y Líneas Futuras, se concluye con las ideas fuerza reflejadas en todo el documento y el resultado de la evaluación de la implementación de la IF digital para sustituir a la IF analógica mediante el estándar DIFI como solución más adecuada. Se cierra el documento con un conjunto de líneas de investigación sugeridas que pueden desarrollarse a partir de este TFM.

2 ESTADO DEL ARTE

En el presente apartado se realizará un estudio teórico de las características fundamentales que forman parte de una estación en tierra satelital actual. En éste, se pretende contextualizar los fundamentos de RF e IF analógico, especificando sus principales limitaciones de las cuales surge la necesidad de implementar un estándar en IF digital. En ese punto, el estudio continuará con un apartado en el que se justifica y analiza la transición hacia IF digital, finalizando el apartado con las especificaciones del estándar DIFI propuesto en el presente TFM.

2.1 RF en comunicaciones satelitales

2.1.1 Justificación de la existencia de comunicaciones satelitales

Las comunicaciones satelitales constituyen una extensión de las comunicaciones terrestres radio con Línea de Vista (LOS), surgidas de la necesidad de establecer comunicación sin Línea de Vista (BLOS) entre dos áreas separadas geográficamente.

Aunque las comunicaciones cableadas (especialmente mediante FO), ofrecen un mayor ancho de banda y latencias mucho menores (particularmente frente a satélites GEO, situados a unos 36.000 km de distancia, cuya latencia es del orden de 500 ms), y de que el rendimiento de un enlace radio tiene mayores afectaciones por interferencias, ruido, atenuaciones debidas a otras señales o a las condiciones atmosféricas, su uso sigue siendo una opción competitiva y complementaria debido a su flexibilidad y alcance global.

El uso de enlaces satelitales resulta especialmente relevante en aplicaciones donde el despliegue de infraestructura terrestre es inviable, ya sea por obstáculos geográficos, aislamiento marítimo o limitaciones urbanísticas, incluyendo costes y permisos de instalación. Además, el desarrollo de nuevas tecnologías como VSAT o el aumento de constelaciones LEO con cobertura global, hacen de las comunicaciones satelitales una opción cada vez a tener más en cuenta por los usuarios tanto como transporte principal como de respaldo de los servicios que transitan a través de sus sistemas de información.

Conceptualmente, las comunicaciones satelitales en RF se basan en los mismos principios que las comunicaciones LOS terrestres, compartiendo numerosos elementos funcionales en el módulo de RF. La diferencia principal radica en que el satélite actúa como repetidor en el espacio, retransmitiendo la señal hacia una o varias estaciones terrenas o hacia otros satélites, sin que la altura de las antenas limite el alcance de la comunicación, a diferencia de un enlace LOS convencional. De esta forma, la comunicación entre el segmento terreno y el satélite puede interpretarse como una extensión de la comunicación LOS terrestre, con el satélite funcionando como nodo activo en el enlace.

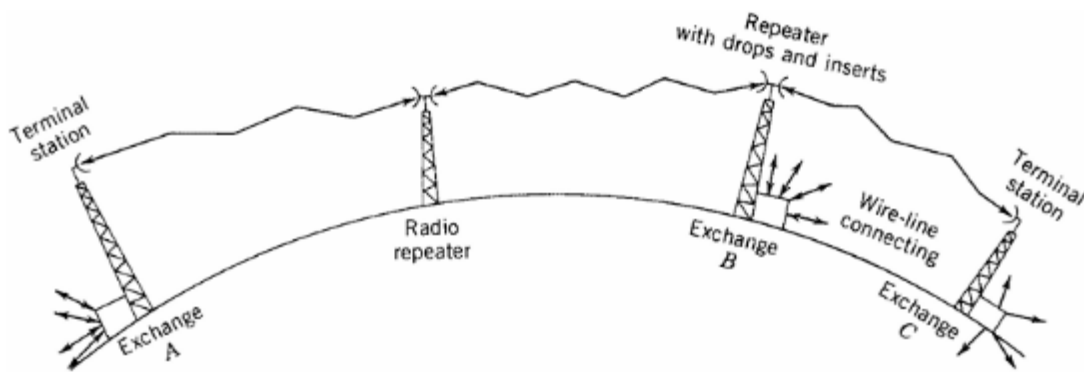


Figura 2-1: Comunicación radio LOS [6].

Por tanto, el uso de RF (frecuencias mayores de 1 GHz), viene justificada y motivada principalmente por dos factores:

- En primer lugar, el repetidor se sitúa en el segmento espacial, lo que implica que la señal transmitida debe atravesar la atmósfera. Para garantizar que la señal no sea reflejada en las capas de la ionosfera, es necesario emplear frecuencias de este orden. Cabe destacar que el repetidor no tiene por qué ser únicamente pasivo; también puede actuar como regenerador de la señal antes de su reenvío a otro satélite o al segmento terrestre.
- En segundo lugar, los servicios que circulan por el segmento terreno, tales como video, voz y datos, requieren un ancho de banda que solo puede proporcionarse mediante frecuencias elevadas. Esta necesidad se ve incrementada por la obligación de compartir el acceso al medio entre múltiples servicios y usuarios, superando ampliamente la demanda típica de un sistema de RF terrestre con LOS.

2.1.2 Influencia de la atmósfera en comunicaciones satelitales

En primer lugar, la ionosfera refracta las microondas del orden de 3-30 MHz, debido a que al interactuar con electrones libres y iones a estas frecuencias se reemite la energía de la señal de vuelta hacia la tierra. La frecuencia crítica a la que ocurre este fenómeno varía en función de la capa de la ionosfera y de las condiciones solares y climatológicas, pero, en general, podemos decir que permiten comunicaciones BLOS a miles de km entre estaciones radio sin necesidad de satélite en aplicaciones tierra a tierra y aire a tierra.

Por tanto, las nubes de electrones viajan a través de la ionosfera, dando lugar a fluctuaciones de la señal que sólo pueden determinarse previamente en base a estudios estadísticos en función de las condiciones meteorológicas y las características de la señal que atraviesa estas capas. Los efectos a los que la señal se ve sometida incluyen: centelleo, absorción, variación en la dirección de llegada, retardo en la propagación, dispersión, cambios de frecuencia y rotación de la polarización [1]. Justificando en primer lugar por el que se utiliza RF en comunicaciones satélite: todos estos efectos disminuyen a medida que la frecuencia de la señal aumenta (muchos de ellos en función del cuadrado de la frecuencia). Por tanto, el centelleo y la rotación de la polarización son los principales efectos sobre nuestra señal en los que debemos poner foco en las comunicaciones satélite y que dependan del canal que atraviesan nuestras señales. También se deben dimensionar otros efectos como la atenuación por la distancia, interferencias de señales provenientes de estaciones terrenas de otros sistemas, condiciones meteorológicas, así como el ruido introducido en el sistema, de igual forma que se hace en enlaces no satelitales.

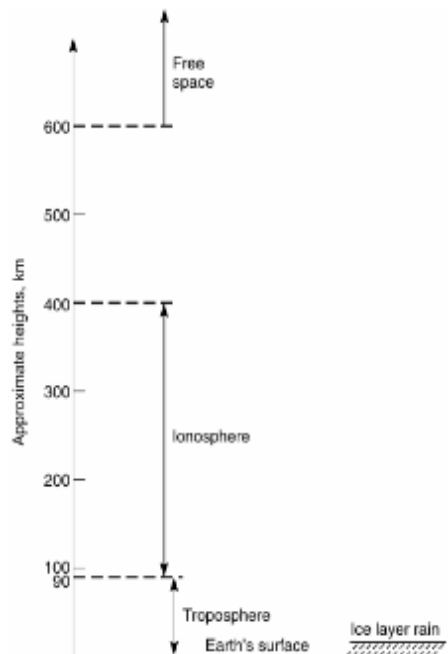


Figura 2-2: Capas de la atmósfera terrestre [1].

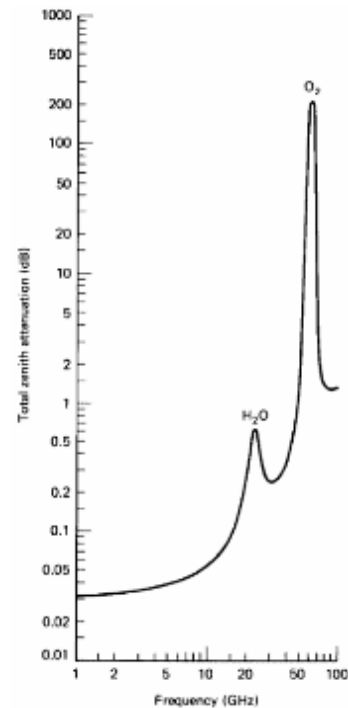


Figura 2-3: Atenuación introducida por la atmósfera ($p = 1 \text{ atm}$; temperatura = $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y vapor de agua = $7,5 \text{ g/m}^3$) [1].

Los centelleos ionosféricos son variaciones en amplitud, fase, polarización y/o ángulo de llegada de la señal radio. Son causadas por irregularidades en la ionosfera que cambian en función del tiempo. En resumen, su principal efecto son el debilitamiento de la señal, que puede afectar de forma significativa al enlace. Teniendo en cuenta estos efectos, se debe de contar con un margen en los cálculos del balance del enlace para este parámetro, el cual afecta más o menos significativamente en función de la RF utilizada.

2.1.3 Balance de enlace satelital

El diseño de un enlace ya sea satélite o LOS, debe estar basado en asegurar la recepción de la señal en unos parámetros aceptables. Este parámetro de diseño suele ser, por norma general, la relación Señal-Ruido (Signal-to-Noise, S/N) en sistemas analógicos o, en sistemas digitales, el BER o EbNo (Bit Error Rate o Energía de bit respecto a Energía del ruido). Este valor vendrá dado por el estándar correspondiente, no siendo objeto del presente TFM el diseño de enlaces RF, debiendo tenerse en cuenta el valor del ruido estimado para ajustar la potencia de transmisión en función de la frecuencia utilizada.

Por otro lado, el valor de potencia de la señal que llega al receptor debe ser mayor al de su sensibilidad, de forma que este pueda discernir la señal para su posterior procesado. Es fundamental durante la fase de diseño de un enlace satelital tener en cuenta la potencia de transmisión, ganancia de las antenas, ruido introducido por el sistema y diversas pérdidas, todo ello condicionado por la frecuencia utilizada, de forma que aseguremos que la relación señal a ruido en recepción es suficiente para poder demodular la señal e interpretar los datos que ésta contiene.

Por tanto, entre dos estaciones terrenas tendremos que diseñar dos balances de enlace. Por un lado, el balance de enlace entre la estación de tierra transmisora hasta el satélite (*uplink*), y por otro el balance de enlace desde el satélite hasta la estación en tierra receptora (*downlink*). En ambos casos, cada uno de los balances de enlace será la PIRE (en dBW o dBm, que resulta de sumar la potencia de salida del transmisor y la ganancia de la antena, restando las pérdidas por líneas de transmisión en distancia desde la salida del módem hasta la antena y por otros elementos como los conectores, combinadores en función de la frecuencia), incorporando la figura de mérito G/T del receptor (en dB/K, que es la ganancia de la

antena receptora menos la temperatura de ruido equivalente del sistema, incluyendo pérdidas por líneas de transmisión y LNA). A estas etapas de ganancia se le deben restar otras pérdidas, que incluyen pérdidas por polarización de las antenas transmisora y receptora, pérdidas por apuntamiento de las antenas, las pérdidas por la propagación en el espacio libre (fórmula de Friis) y las pérdidas por la absorción de gases atmosféricos. Además, especialmente en los casos en los que utilicemos frecuencias por encima de los 10 GHz, deberemos tener en cuenta un exceso de pérdidas en caso de lluvias. De modo general podemos obtener la potencia necesaria a la entrada del receptor P_{RX} en función de la PIRE del transmisor para satisfacer la sensibilidad del sistema como:

$$P_{RX} = PIRE + G_{RX} - L + SNR_{min}$$

donde G_{RX} es la ganancia de la antena receptora, L la suma de las pérdidas de propagación en espacio libre, pérdidas de polarización, ... y SNR_{min} la relación Señal-Ruido mínima necesaria para el correcto funcionamiento del sistema.

De esta forma, y calculando la estimación de los balances de enlace *uplink* (utilizando la estación terrena desde donde se originan los datos como transmisora y el satélite como receptor) y *downlink* (utilizando el satélite como transmisor y la estación terrena hacia donde se dirigen los datos como receptora) podremos diseñar nuestros sistemas con los componentes adecuados para asegurar la disponibilidad y fiabilidad del sistema.

2.1.4 Servicios y anchos de banda satelitales

En segundo lugar, en cuanto a la justificación del ancho de banda a utilizar, el factor de dar servicio a un número elevado de usuarios (acceso compartido al canal), unido al tipo de servicios, hace necesario el uso de una banda del orden de GHz. En los últimos años, esta demanda de ancho de banda se ha acentuado, convirtiéndose en una lucha por el uso de las frecuencias en cada banda entre los proveedores de servicios, respaldada de forma gubernamental cuando se traspasan fronteras. Este es otro de los factores a tener en cuenta a la hora de utilizar una banda para determinadas aplicaciones, y es el espacio disponible y la posibilidad de poder tener acceso al canal de los satélites en esa banda.

En la siguiente tabla se muestra una representación del espectro en función de las aplicaciones para cada banda:

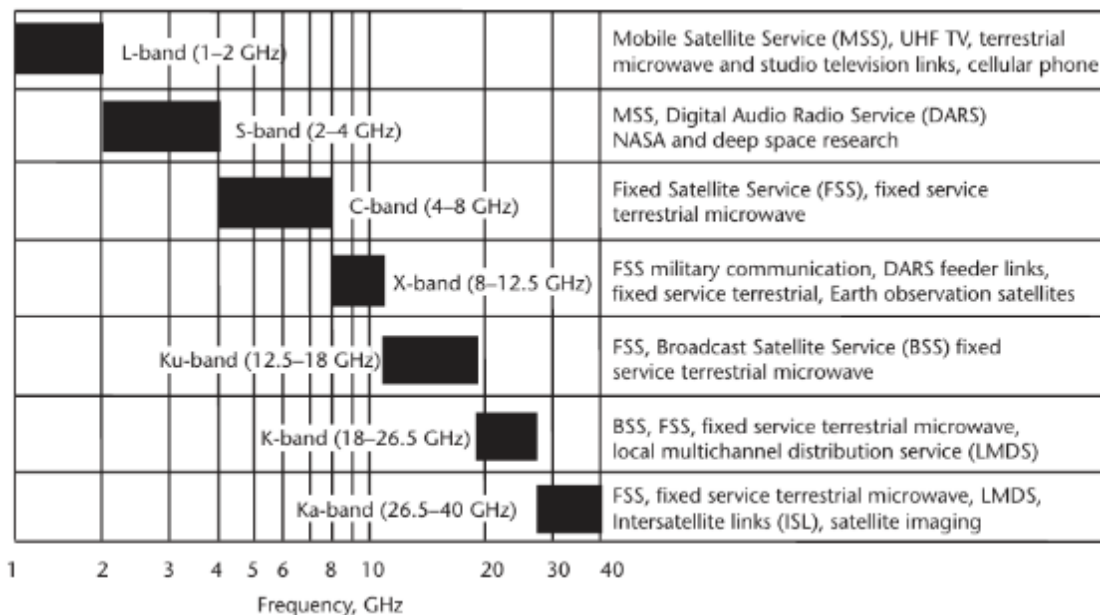


Figura 2-4: Asignación de bandas de frecuencia en función de aplicaciones de comunicaciones satélite [2].

Actualmente, el ancho de banda disponible para aplicaciones incrementa cuanto mayor es la frecuencia, aunque, en función del país, el ancho de banda disponible en cada banda es menor del indicado en la figura.

La selección del ancho de banda también debe ser seleccionada en función de la necesidad de cada servicio y las condiciones para transmisión y recepción, buscando una solución de compromiso entre las características de propagación (más favorables cuanto menor es la frecuencia) y el ancho de banda necesario (mayor cuanto mayor es la frecuencia). Normalmente, los servicios militares y gubernamentales emplean las bandas como S, X y Ka, de forma que se aíslan de las aplicaciones comerciales.

La banda L se aplica para comunicaciones satélite desde 1970, con un ancho de banda para sus servicios de en torno 30 MHz, en función de la aplicación. Las principales ventajas en la actualidad son antenas de usuario de pequeño tamaño y que no requieren ser apuntadas al satélite, además de su prácticamente nula atenuación bajo condiciones de lluvia. Como punto negativo, se refleja gran parte de la señal enviada. En esta banda, los retos son más regulatorios (más usuarios demandando ancho de banda en el espectro del disponible), que técnicos.

La banda S fue adoptada inicialmente por la NASA para comunicaciones espaciales, debido a su bajo nivel de ruido de fondo y a sus favorables condiciones de propagación, especialmente en lo relativo a la penetración a través de la ionosfera. Sus características la hacen adecuada para sistemas de bajo consumo, con valores típicos de Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) moderados, del orden de 38 dBm, siendo empleada tradicionalmente en aplicaciones como *broadcast* de audio digital, telemetría y control. Como principal limitación, la banda S dispone de un ancho de banda reducido en comparación con bandas superiores, lo que restringe las tasas de transmisión alcanzables. Por este motivo, su uso resulta más adecuado en sistemas con requisitos de capacidad moderados, como constelaciones en órbitas LEO y MEO, donde las pérdidas de trayecto son menores y la robustez de la propagación prima frente al ancho de banda disponible.

La banda C continúa siendo una de las más utilizadas en la actualidad en sistemas de comunicaciones satelitales, tanto para enlaces de *uplink* como de *downlink*. Opera típicamente en el rango de frecuencias de 3,4–4,2 GHz en bajada y 5,85–6,425 GHz en subida, disponiendo de un ancho de banda total del orden de 1 GHz por enlace, que puede duplicarse mediante el uso de sistemas de doble polarización. Este espectro puede ser compartido por una región geográfica extensa, como un país completo o incluso áreas oceánicas. La banda C ofrece una solución de compromiso especialmente adecuada entre ancho de banda disponible y condiciones de propagación, presentando una elevada robustez frente a atenuaciones atmosféricas, como la lluvia. Por este motivo, sigue siendo una de las bandas más demandadas, llegando en algunas regiones a presentar limitaciones para satisfacer toda la demanda de usuarios. Como principal desventaja respecto a bandas superiores, requiere el uso de antenas de mayor tamaño, con diámetros típicamente comprendidos entre varios metros, lo que incrementa los costes de instalación y limita su despliegue en determinados entornos.

La banda X está reservada principalmente para aplicaciones gubernamentales y militares en servicios satelitales fijos, debido a su elevada fiabilidad y a la menor congestión del espectro en comparación con otras bandas comerciales. Presenta características de propagación similares a las de la banda C, con buena resistencia a la atenuación atmosférica y una elevada disponibilidad del enlace. No obstante, sus principales desventajas radican en el elevado coste del equipamiento asociado, así como en la complejidad y el coste de las estaciones de anclaje necesarias para la provisión de estos servicios. En este contexto, el presente Trabajo Fin de Máster plantea, en los apartados posteriores, una solución teórica basada en la adopción del estándar DIFI, con el objetivo de mejorar la flexibilidad, escalabilidad y eficiencia del segmento terreno en este tipo de aplicaciones.

La banda Ku provee un ancho de banda similar a la banda C por canal, con la ventaja de proveer el mismo ancho de haz con antenas de mucho menor tamaño. Constelaciones satélite LEO de bajo coste utilizan esta banda, tales como Starlink, proveyendo de cobertura global con amplio ancho de banda. Su

mayor desventaja es su atenuación por condiciones atmosféricas, mitigable mediante el aumento de la potencia de transmisión.

La banda Ka dispone de un ancho de banda de 2 GHz por canal, disponiendo de antenas de menor ancho de haz que permiten a un mayor número de satélites acomodarse a esta banda. Su principal ventaja es un tamaño muy reducido de las antenas (ampliamente utilizadas en aviación), mientras que la huella satelital en tierra que puede generarse ocupa relativamente poca superficie terrestre. Como es lógico, su principal desventaja son las condiciones de propagación frente a malas condiciones atmosféricas, lo cual puede mitigarse (además de aumentando la potencia en transmisión), aplicando un control dinámico de potencia o utilizando enlaces multibanda en condiciones adversas (conmutando con bandas como la X), lo cual está implementado en enlaces actuales. Esta banda es también ampliamente utilizada para aplicaciones militares, siendo el diseño del segmento espacial más complejo que en el resto de bandas anteriores.

Por último, las bandas Q y V, con frecuencias mayores de 30 GHz, se consideran a día de hoy experimentales, con una gran atenuación por lluvia y absorción atmosférica como principales desventajas, suponen un reto para su implementación debido a los altos costes y la baja eficiencia de amplificadores en esta banda. Los principales usos a los que se orienta esta banda es para conexiones intersatelitales entre órbitas GEO, MEO y LEO.

Existen algunas excepciones a los requisitos de ancho de banda expuestos en el presente apartado. La principal es la comunicación UHF a través de satélite, la cual provee de un ancho de 25 kHz por canal, permitiendo servicios de voz, imágenes y mensajería de baja velocidad con una arquitectura VSAT. En esta banda, dado que los efectos de la ionosfera son más adversos para alcanzar el satélite, se emplea una polarización circular para evitar el efecto de Faraday, ya que cualquier polarización lineal sería reflejada. En general, el problema del uso de esta banda (especialmente en el rango de 300 MHz a 1 GHz) reside en la disponibilidad, dado que está ampliamente asignado para aplicaciones terrestres en el ámbito de la aviación, comerciales, civiles y gubernamentales.



Figura 2-5: Antena satélite UHF en Estación de Anclaje de Torrejón de Ardoz con polarización circular.

2.1.5 Acceso compartido al medio en comunicaciones satelitales

Otro de los aspectos que hacen que este tipo de comunicaciones requiera de un elevado ancho de banda y, por tanto, el uso de la banda de RF es el del acceso compartido a los recursos de las estaciones y al propio satélite en el segmento espacial. Se define el acceso compartido como la habilidad de un determinado número portadoras de múltiples estaciones terrenas para interconectar sus enlaces de telecomunicación a través de un satélite en común [6]. En este apartado se expondrán las principales características de las técnicas de acceso múltiple más comúnmente utilizadas:

- Múltiple Acceso por División en Frecuencia (FDMA).

- Múltiple Acceso por División en Tiempo (TDMA).
- Múltiple Acceso por División de Código (CDMA).

Previo a comentar los tipos de técnicas de acceso al medio, es necesario recalcar que existen dos formas de establecer la transmisión de información entre dos estaciones receptoras. A nivel de red, puede realizarse de dos formas:

- Una portadora por enlace estación a estación.
- Una portadora por estación transmisora.

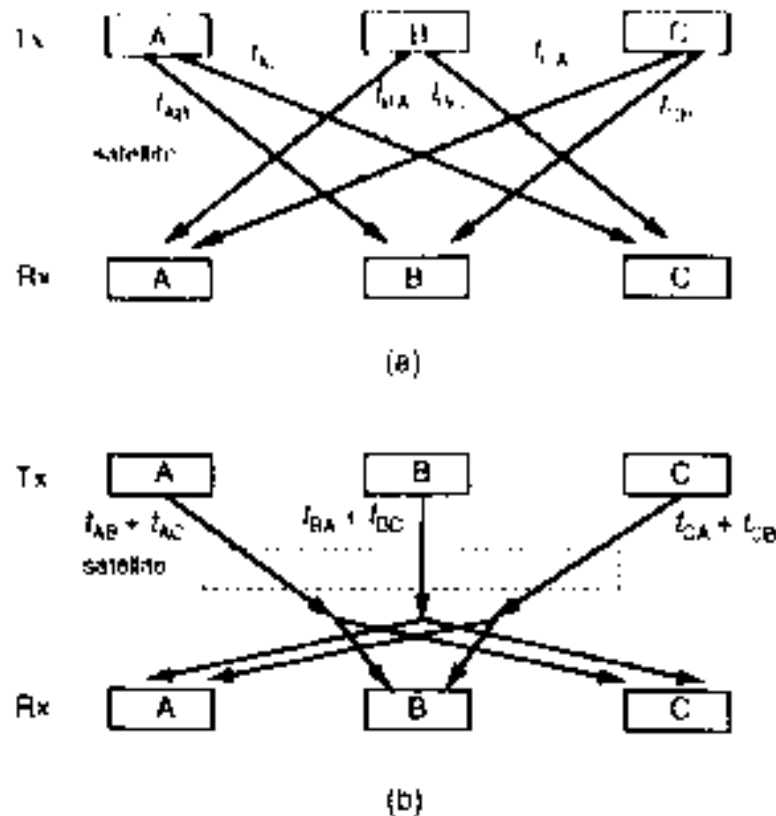


Figura 2-6: Técnicas de enrutamiento de tráfico. (a) una portadora por enlace estación a estación; (b) una portadora por estación transmisora [5].

Como puede observarse en la figura anterior, en el caso (a), cada estación dispone de portadoras de menor capacidad para enviar a cada estación receptora. Sin embargo, cada estación receptora recibe únicamente la portadora que va destinada hacia ella. En el caso (b), la estación receptora debe extraer el tráfico que va dirigido hacia ella. La elección del tipo de enrutamiento, aparte del lado económico, depende del número de canales satélite, su ancho de banda, así como la técnica de acceso utilizada, siendo la más común la opción (b).

En la siguiente figura se muestra las técnicas de acceso múltiple comentadas anteriormente:

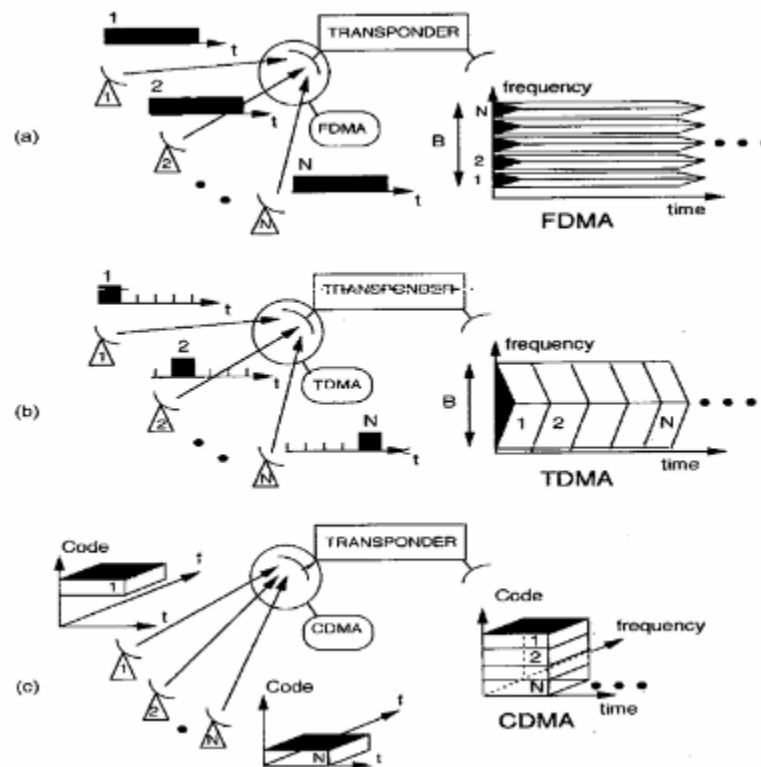


Figura 2-7: Técnicas de acceso al medio: (a) Múltiple Acceso por División en Frecuencia (FDMA); (b) Múltiple Acceso por División en Tiempo (TDMA); (c) Múltiple Acceso por División de Código (CDMA) [5].

El caso de FDMA se caracteriza por un acceso continuo al satélite en una banda de frecuencia dada. Su principal ventaja es su sencillez. No obstante, sus principales desventajas son la falta de flexibilidad, pérdida de capacidad al introducir nuevas portadoras y la necesidad de disponer de un control de la potencia de transmisión desde las estaciones en tierra en tiempo real. A pesar de sus inconvenientes, sigue siendo ampliamente utilizado, especialmente en enlaces dedicados SCPC.

Por otro lado, TDMA, que se caracteriza por el acceso al canal en un intervalo de tiempo, tiene numerosas ventajas:

- Una única portadora en el canal del repetidor satélite para todas las estaciones. Se eliminan los productos de intermodulación.
- Alta eficiencia para un elevado número de accesos.
- No existe la necesidad de controlar en tiempo real la potencia de transmisión en las estaciones.
- Frecuencia de transmisión única para todas las estaciones.

No obstante, TDMA tiene algunas desventajas:

- La necesidad de sincronización, la cual puede ser automatizada.
- La necesidad de incremento de potencia de transmisión y ancho de banda para alcanzar una determinada tasa de transmisión para cada ráfaga de tiempo.

Por último, CDMA opera utilizando el principio de espectro ensanchado. Una secuencia de código identifica la portadora de cada estación receptora. El receptor recupera la información reduciendo el espectro de la portadora al ancho de banda original, apareciendo el resto de los usuarios como ruido de baja potencia espectral. Su principal desventaja es la baja eficiencia del uso del ancho de banda (del orden del 10%), frente a sus ventajas:

- Simplicidad de operación ya que no requiere de sincronización entre estaciones.
- Protección anti-jamming e interferencias.
- Posibilidad de reutilizar frecuencias en satélites multi-haz.

Dadas sus características, su uso es especialmente recomendado para redes con estaciones pequeñas y alto ancho de haz.

Para redes que contienen un amplio número de estaciones, pero cada estación transmite una baja tasa de datos y, por tanto, tienen una baja probabilidad de colisión al intentar de acceder de forma simultánea al medio, existen otros tipos de técnicas de acceso al medio compartido tales como acceso aleatorio con protocolos como ALOHA y sus evoluciones. En las siguientes figuras se muestra a alto nivel el acceso al medio compartido sin y con colisiones, en un Aloha básico en el que los paquetes son transmitidos en un intervalo de tiempo aleatorio:

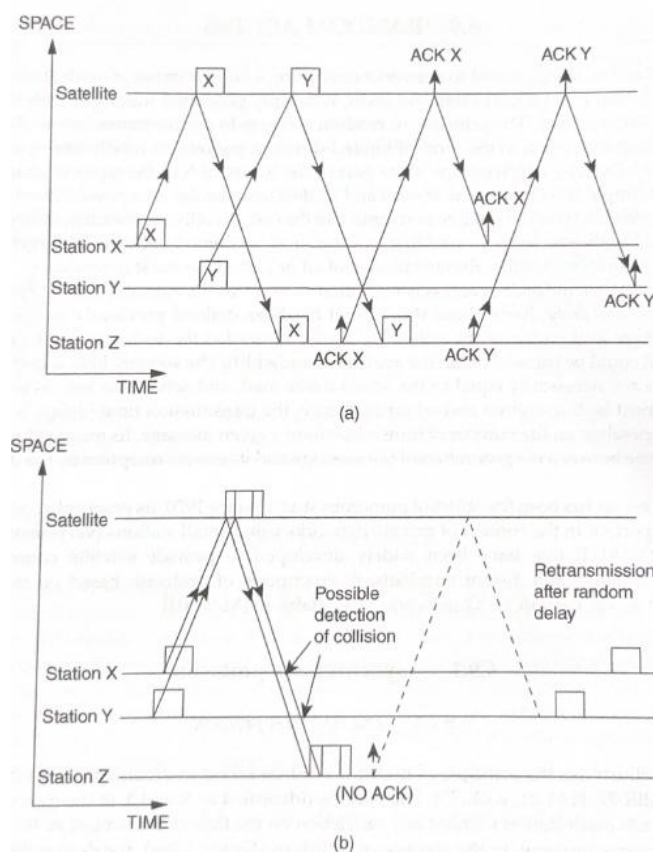


Figura 2-8: Acceso al medio aleatorio con Aloha. (a) sin colisiones ; (b) con colisiones.

2.1.6 Limitaciones de la RF.

Si bien el uso de la banda de radiofrecuencia (RF) se encuentra plenamente justificado para las comunicaciones satelitales, su empleo presenta diversas limitaciones en las etapas de la antena y los filtros LNA en recepción o los filtros de alta potencia en transmisión.

El filtrado y la amplificación en estas frecuencias son procesos complejos, dado que los componentes electrónicos pasivos, como los condensadores y las bobinas, cambian su comportamiento a estas frecuencias, siendo extremadamente complejo entregar al dispositivo demodulador y decodificador en banda base una señal con un nivel de señal a ruido aceptable, además de minimizar las interferencias entre canales, utilizando componentes que amplifiquen y filtren en una banda estrecha situada a frecuencias del orden de GHz.

Para abordar estas limitaciones, los elementos que deben formar estas etapas de filtrado deben ser más complejos y costosos, tales como elementos activos. Parámetros como la amplitud de la banda en función del orden Q del filtro, las pérdidas de inserción y el ratio de frecuencias de roll-off son difíciles de afinar en estas bandas para este tipo de componentes, permitiendo que componentes espectrales fuera de la banda, aunque atenuadas, sigan estando presentes tras el filtrado.

En cuanto a la amplificación, las etapas que operan en RF son costosas y requieren elevados consumos de energía y dimensiones físicas mayores. Además, es necesario incorporar sistemas de disipación térmica para evitar que el calor generado degrade el rendimiento y aumente el ruido aditivo de la señal. La implementación de amplificación y filtrado en múltiples etapas, como en los primeros receptores de frecuencia variable (Tuned Radio Frequency, TRF), tampoco resuelve completamente el problema: aunque la combinación de filtros y amplificadores en cascada permite mejorar la selectividad, las etapas de filtrado siguen presentando un ancho de banda excesivo, elevando costes y complejidad de diseño sin alcanzar una eficiencia óptima.

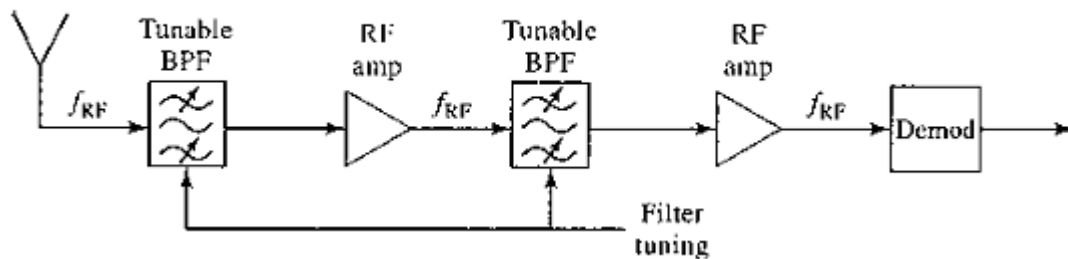


Figura 2-9: Esquema de un receptor de frecuencia variable (TRF) [7].

Como consecuencia de estas limitaciones, las etapas de amplificación y filtrado resultan más costosas, presentan un diseño complejo y ofrecen un rendimiento inferior al deseado.

Adicionalmente, las líneas de transmisión, como los cables coaxiales presentan una atenuación significativa por cada metro recorrido a estas frecuencias, lo que obliga a emplear cables de mayor calidad y coste, además de limitar su longitud efectiva [7]. En estas condiciones, la atenuación en la etapa de transmisión de la señal en banda RF no puede mitigarse de manera suficiente, reforzando la necesidad de considerar soluciones alternativas que permitan transportar la señal de manera más eficiente y escalable.

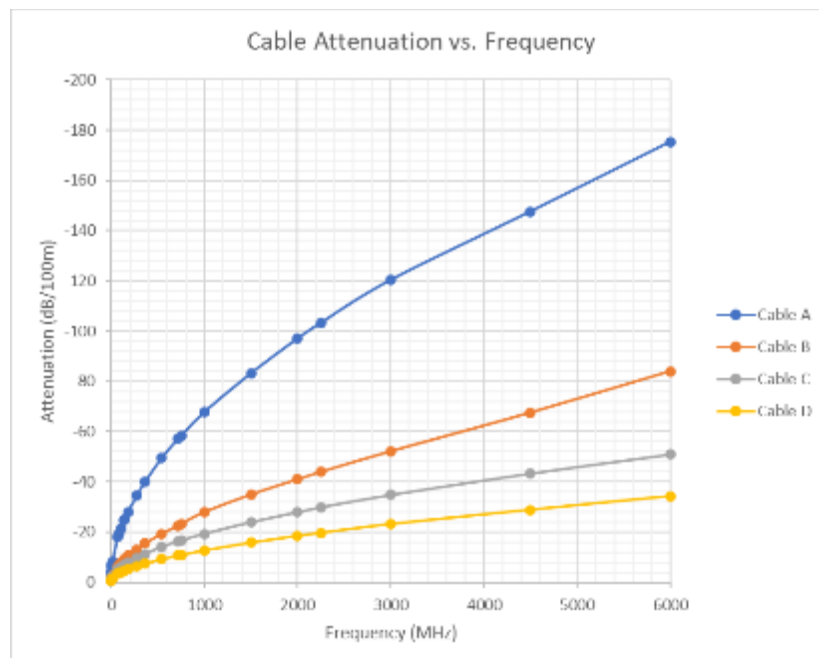


Figura 2-10: Atenuación de cable coaxial en función de la frecuencia. Cable A: 2,5 mm de diámetro; Cable B y C: 7 mm de diámetro; Cable D: 10 milímetros de diámetro [7].

A modo de ejemplo, para una frecuencia de 3 GHz, las longitudes máximas de los cables coaxiales se ven significativamente limitadas, y dicha distancia se reduce aún más al incrementar la frecuencia de operación. Esta restricción refuerza las dificultades asociadas al transporte de señales en banda RF a

través de cables convencionales, haciendo evidente la necesidad de alternativas que permitan un transporte más eficiente y flexible de la señal entre los módems y los equipos de RF:

Cable Distancia máxima (m)

A	14,2
B	32,7
C	48,6
D	73,9

Tabla 2-1: Distancia máxima en función del cableado [7].

Por otro lado, el uso de guías de onda implica un incremento significativo en los costes, además de presentar menor flexibilidad respecto a la banda de frecuencias que pueden transmitir. Cada guía de onda está diseñada para operar dentro de una frecuencia y ancho de banda específico, de manera que, si la señal se desplaza fuera de la banda para la que fue diseñada, no puede propagarse eficientemente a través de la guía. Esta característica limita la adaptabilidad del sistema y refuerza la necesidad de buscar soluciones de transmisión más versátiles, capaces de transportar señales de manera eficiente independientemente de la banda de operación.

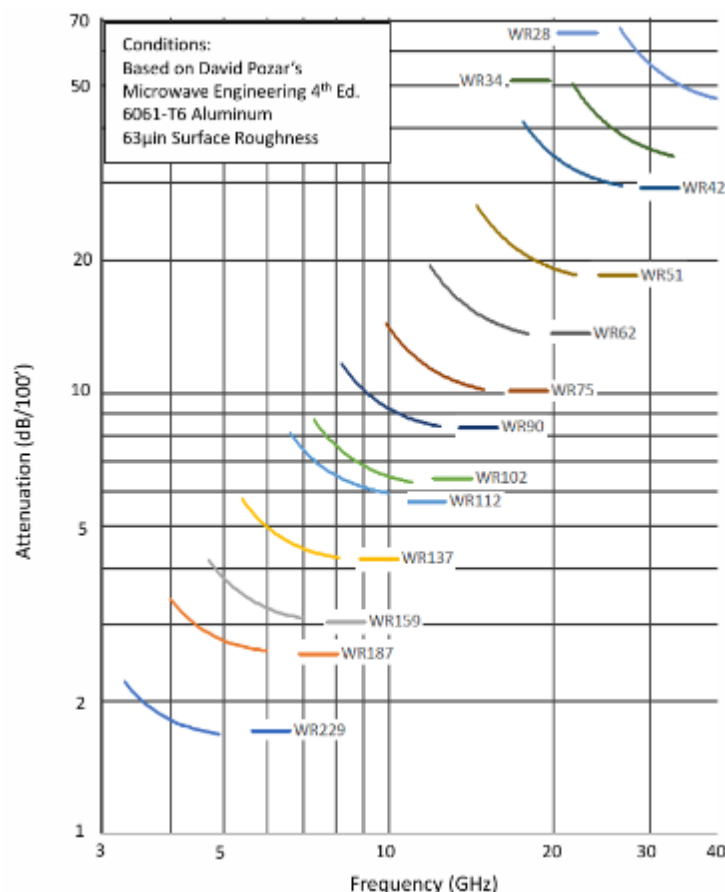


Figura 2-11: Atenuación de distintos tipos de guía onda rectangular en función de la frecuencia [8].

En resumen, el filtrado y la amplificación directamente en la banda de RF presentan múltiples desventajas. En primer lugar, los componentes pasivos como condensadores y bobinas experimentan cambios significativos en su comportamiento a estas frecuencias, lo que dificulta diseñar etapas que entreguen una señal en banda base con una relación señal-ruido adecuada y con mínima interferencia entre canales. Además, los filtros y amplificadores en RF son costosos, requieren un diseño complejo y

suelen demandar mayor consumo de energía y tamaño físico, incluyendo sistemas de disipación térmica para mantener la estabilidad y reducir el ruido aditivo. La selectividad de los filtros es limitada, permitiendo que componentes espectrales fuera de la banda permanezcan presentes, mientras que la propagación a través de cables coaxiales sufre una atenuación elevada que restringe su longitud efectiva. En conjunto, estas limitaciones reducen la eficiencia, la flexibilidad y la escalabilidad del sistema, dificultando su implementación en estaciones terrestres modernas.

2.1.7 ¿Por qué se utiliza la IF?

Dadas las limitaciones expuestas en el anterior apartado de trabajar en la banda de RF en transmisión y recepción, se introduce la Frecuencia Intermedia (IF) como un recurso que permite dividir el proceso de modulación y demodulación en etapas más manejables. La utilización de IF, típicamente en rangos de unas pocas decenas de MHz ó incluso inferiores, permite resolver la mayor parte de problemas y complejidad en los sistemas, dando una mayor flexibilidad y ahorrando costes en el equipamiento.

Los convertidores de frecuencia, *up-converter* y *down-converter*, realizan la transición entre la IF y las frecuencias en RF de transmisión y recepción, respectivamente, asegurando que cada transpondedor opere dentro de las características de frecuencia y ancho de banda deseadas. El objetivo de estos convertidores se puede resumir como [3]:

- Realizan el cambio de frecuencia entre RF e IF para un transpondedor específico con unas determinadas características de frecuencias y anchos de banda.
- Permiten intercambiar los transpondedores, ajustando también el oscilador local o mediante el uso de un sintetizador, lo cual permite seleccionar cualquier transpondedor para el sistema.
- Minimizan el error al realizar el cambio de frecuencia, mediante referencias de señal internas o externas.
- Proveen de la señal resultante de una ganancia uniforme y limitada en ancho de banda.

Una primera aproximación a este tipo de receptores sería el receptor superheterodino, utilizando un oscilador local para realizar un *up-conversion* (transmisión) o *down-conversion* (recepción) desde o hacia una banda intermedia de IF. Esto permite un filtrado más selectivo en esta banda, una amplificación mayor y la eliminación de interferencias. El oscilador local puede adaptar su frecuencia, permitiendo que la etapa IF sea estándar e interoperable a una frecuencia constante. Este tipo de receptor es utilizado en la mayor parte de aplicaciones radio, radar, telefonía y datos de modulaciones analógicas.

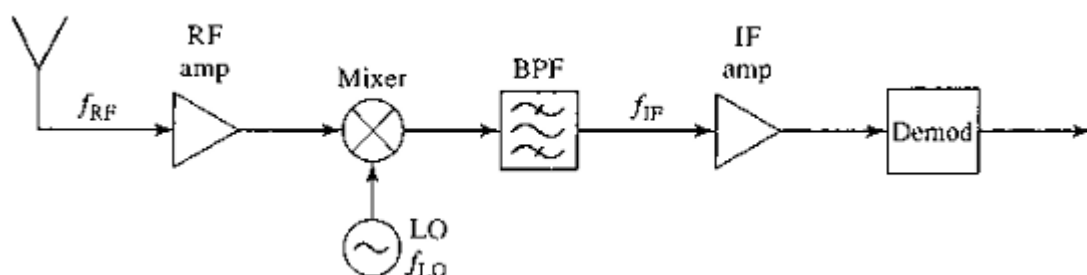


Figura 2-12: Receptor superheterodino [7].

Análogamente en los sistemas satélite, se utiliza el mismo principio de conversión en etapas intermedias con IF. De esta forma, podemos aprovechar las ventajas de un primer filtrado por el LNA en RF para recepción o, en última instancia previo a la transmisión, utilizar un amplificador de alta potencia de una forma más eficiente de la señal proveniente de la etapa de IF. Esto nos permite utilizar una frecuencia fija para la banda IF, una menor atenuación en las líneas de transmisión (ver punto

anterior), así como filtros y amplificadores menos costosos y sencillos, diseñados con elementos pasivos (resistores, condensadores y bobinas) y de un mejor rendimiento.

Posterior al filtrado realizado por el LNA en recepción puede realizarse el paso a IF para toda la banda o para cada una de las portadoras en recepción. Esto depende en gran medida del tipo de comunicación llevada a cabo por el satélite (como SCPC o TDMA).

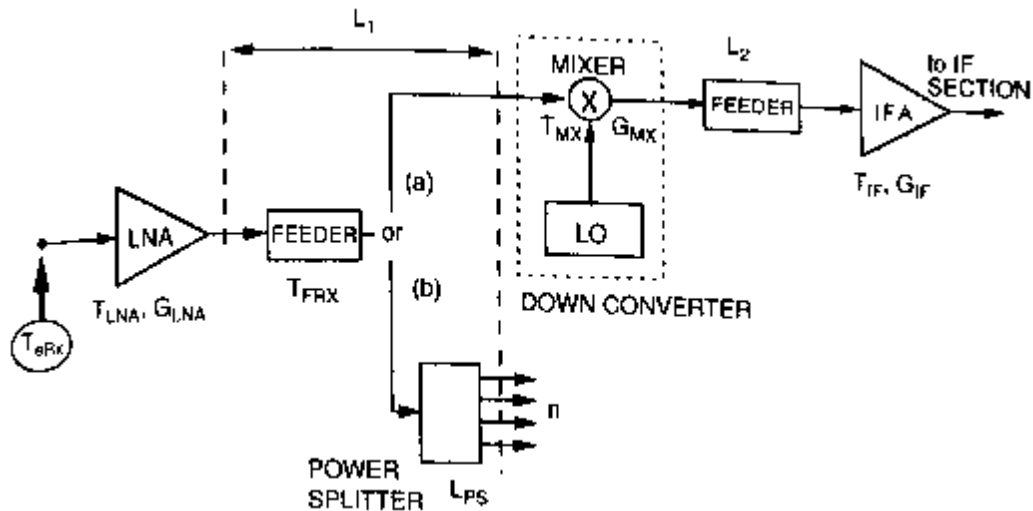


Figura 2-13: LNA en RF previo al paso a IF. (a) conversión de toda la banda; (b) conversión portadora a portadora [5].

Análogamente, previo a la transmisión, el filtrado de alta potencia puede realizarse en RF para cada portadora o para el ancho de banda total del espectro:

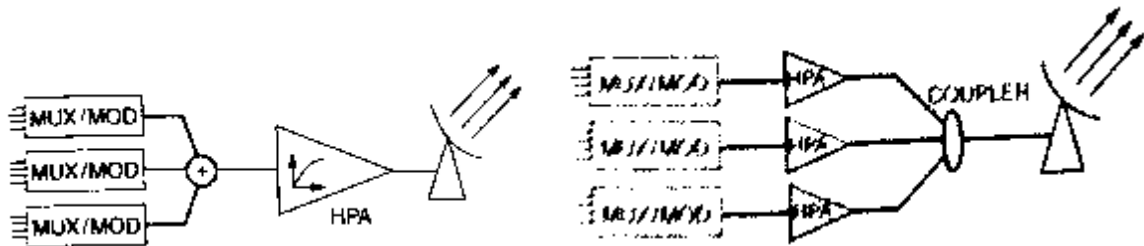


Figura 2-14: Amplificación de alta potencia en la etapa RF. (a) amplificación de toda la banda ; (b) amplificación para cada portadora [5].

Independientemente de que la señal en banda base sea analógica o digital, ampliando el caso del receptor superheterodino, sigue siendo conveniente el uso de una etapa intermedia de IF. En recepción, el amplificador de IF incluye control automático de ganancia a una frecuencia fija, lo que permite una entrada constante a los modem. En transmisión, análogamente, este control automático permite ajustar la entrada de la señal a la etapa RF.

El filtrado paso banda en IF acota el espectro de la portadora y limita el ancho de banda del ruido introducido en la señal modulada. Filtros diseñados con funciones de Butterworth o Chebychev, siendo como se ha dicho más eficientes en el filtrado de la banda y permitiendo aislar esta del ruido de forma más eficiente que en el caso del filtrado RF.

2.2 Frecuencia Intermedia analógica

Se define como Frecuencia Intermedia (IF) analógica a aquella arquitectura empleada en sistemas satelitales en la que la etapa, o etapas, de frecuencia intermedia, situadas entre la salida de los módems y la entrada del oscilador del *up-converter* en transmisión, y entre la salida del oscilador del *down-*

converter y la entrada de los módems en recepción, es atravesada por señales de onda continua en el dominio analógico. Estas señales pueden corresponder tanto a modulaciones originadas a partir de información analógica como a señales digitales previamente moduladas en banda base. En este tipo de arquitecturas, la señal en IF se transporta típicamente mediante cableado coaxial y se caracteriza por mantener su forma analógica a lo largo de todo el tramo intermedio, siendo especialmente sensible a fenómenos como la atenuación, el ruido y la distorsión introducidos por los elementos físicos del sistema. A continuación, se presentan algunos ejemplos representativos de señales habitualmente empleadas en la banda de Frecuencia Intermedia.

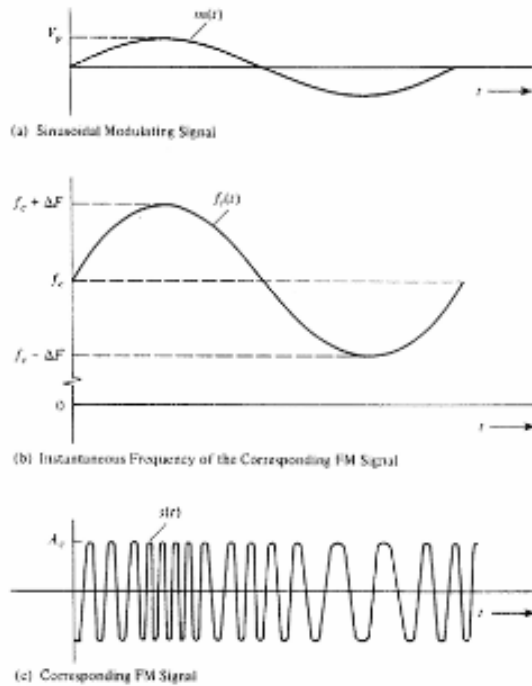


Figura 2-15: Tono modulado en FM (modulación analógica) [9].

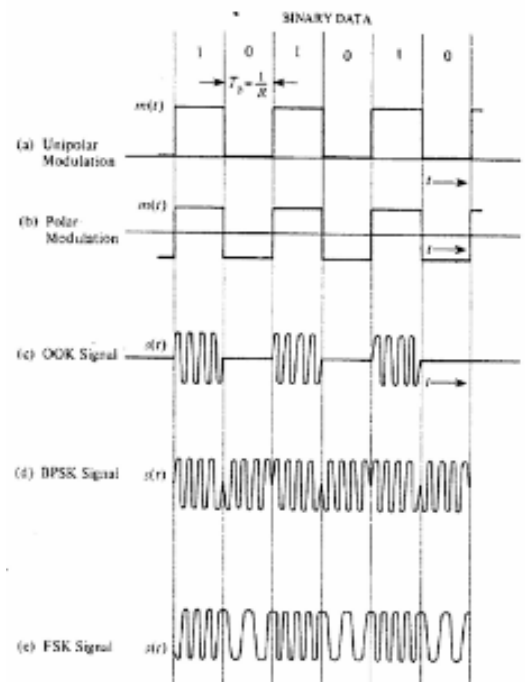


Figura 2-16: Señal digital modulada en OOK, BPSK y FSK (modulaciones digitales) [9].

En el presente apartado se completará la definición de la arquitectura tradicional de IF analógica, así como sus principales ventajas y desventajas.

2.2.1 Arquitectura tradicional

En el apartado 2.1.7 del presente trabajo, se ha justificado el uso de la IF en comunicaciones satélite de RF. En este apartado, se expone la arquitectura más comúnmente utilizada de forma tradicional en IF analógica. En la siguiente figura se representa a alto nivel un esquema de los módulos en los que está compuesta la arquitectura de IF analógica:

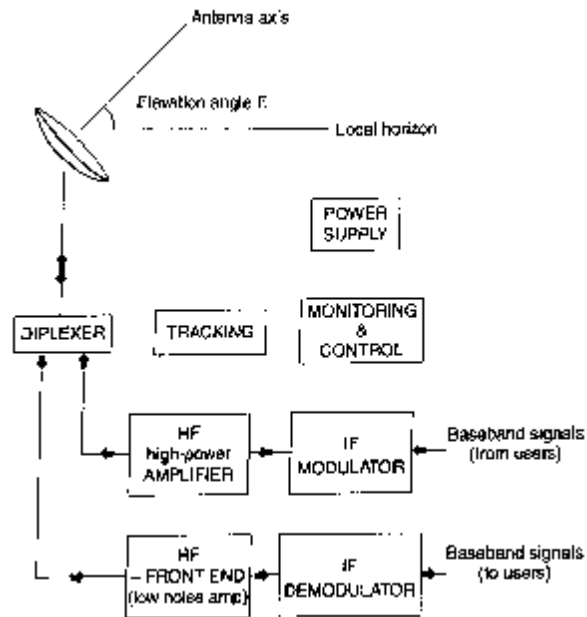


Figura 2-17: Arquitectura tradicional de estación terrena [5].

En primer lugar, a la hora de transmitir la señal, esta proviene de los modem. Previo a los modem, podemos tener host de usuarios o de sistemas conectados, los cuales generan los metadatos de distintos servicios a enviar por el transporte satélite. Como se ha dicho, el origen de estos datos puede ser de naturaleza digital (tales como paquetes de un servicio basado en protocolo TCP/IP o canales de Televisión Digital Terrestre) o analógica (radio FM, servicios de telefonía, televisión analógica). El origen es, en cierto modo, irrelevante para el objeto del apartado, siendo la labor del modem la de modular la señal en banda base a IF y realizar la conversión analógico-digital (en caso de ser la señal de origen analógico).

Una vez realizada la labor de modulación, la señal pasa por el módulo de IF por un proceso de amplificación y filtrado. En este punto, puede haber un combinador que permita que varias topologías de señal (por ejemplo, un modem DAMA y un modem SCPC), se multiplexen (se debe tener en cuenta la pérdida de -3 dB por cada señal agregada al combinador), previo al envío hasta el módulo de RF. Recalcar una vez más los beneficios de utilizar esta etapa de IF, en cuanto a coste y eficiencia se refiere, obteniendo un rendimiento sobresaliente en las etapas de filtrado y amplificación, en términos de calidad, aislamiento espectral y poca adición de ruido por estas etapas. Asimismo, la señal puede enviarse hasta el módulo RF por líneas de transmisión como el cable coaxial, el cual ofrece menor atenuación en esta banda de frecuencias, pudiendo disponer del módulo RF a distancias del orden de pocos cientos de metros de los modem de forma económica.

Por otro lado, tal y como se muestra en la figura 2-17, disponemos en las estaciones de etapas auxiliares para el manejo de la estación. Estas pueden constar de una etapa de monitorización y control. A través de esta etapa, podemos configurar los parámetros de los modem, tales como la modulación, potencia del modem, etc. Es importante seleccionar una modulación que nos provea de una solución de compromiso de un ahorro de ancho de banda aceptable y nos asegure mantener la señal en niveles de señal a ruido (o *Bit Error Rate*, BER) conforme a los parámetros de diseño del enlace. Por otro lado, es importante ajustar el parámetro de potencia de transmisión del módem en términos que permitan, por un lado, no saturar el transmisor y, por otro, que la PIRE en transmisión se ajuste a una potencia suficiente para poder recibir de forma adecuada la señal en el satélite, pero menor que los niveles de saturación de los receptores satélite, de forma que no dañemos sus componentes internos debido a la transmisión de nuestra señal.

Auxiliariamente, podemos disponer del módulo de tracking satélite y control de la antena. Por norma general, los satélites GEO disponen de un *beacon* (baliza), de forma que podemos ajustar el

apuntamiento de la antena hacia el satélite. Este apuntamiento se realiza de forma que moveremos la antena en la dirección en la que la potencia en recepción en la frecuencia de la baliza sea máxima. Este ajuste de la antena se puede hacer de forma manual en la propia antena o a través de servos, si esta dispone de ellos. También, por otro lado, en el caso de disponer la antena de estos servos, la maximización de la potencia de la señal de la baliza puede realizarse por el operador ajustando la posición en azimut y elevación, o de forma automática lo cual suele ser, por norma general, un ajuste de la antena más preciso para alinearse correctamente con el receptor que se sitúa en el segmento espacial del satélite. Las funciones de monitorización y tracking y ajuste de antena pueden realizarse desde un PC (denominado CAC), conectado a la red, desde donde se gestionan estas aplicaciones.

En la siguiente figura puede observarse, a modo de ejemplo, una arquitectura satélite, formada por los módems, el receptor de la baliza y el módulo de apuntamiento de la antena, conectados al CAC desde donde podemos realizar las funciones descritas anteriormente. A la derecha, podemos observar un combinador de dos puertos con salida común y filtro de señales en IF.



Figura 2-18: Ejemplo de rack satélite instalado en las Islas Chafarinas.



Figura 2-19: Ejemplo de combinador.

Otro factor a tener en cuenta es la alimentación eléctrica de los sistemas. Tanto en los casos en los que nuestras estaciones terrenas se encuentren en zonas con acceso a la red eléctrica, como si nos encontramos en zonas aisladas, se debe dimensionar correctamente el cableado de forma que obtengamos tanto la suficiente energía en el rack de comunicaciones como en la zona de la antena, donde se sitúa el módulo RF. En este caso, debemos proveer de energía eléctrica a los transceptores so receptor/transmisor, así como a los correspondientes módulos de climatización, que nos permitirán que nuestros sistemas trabajen en un rango de temperaturas aceptable, especialmente en entornos de alta temperatura y humedad ambiental. En ambos casos, es importante para asegurar la disponibilidad del sistema el contar con medios alternativos de alimentación suficientemente dimensionados, tales como SAIs con baterías o grupos electrógenos redundantes, respecto a nuestra fuente de alimentación eléctrica principal, ya sea otro grupo electrógeno, red eléctrica de terceros o energías renovables como paneles solares o energía eólica. También debemos dimensionar correctamente los cuadros eléctricos, teniendo en cuenta las protecciones en Corriente Continua (CC) y Corriente Alterna (CA), así como magnetotérmicos que nos permitan desconectar los sistemas de la red en los casos que sea preciso para sustituciones o mantenimientos preventivos o correctivos.

Una vez nuestra señal satélite es transmitida desde el módulo de IF hasta el módulo RF, pasa por el oscilador local, en el cual se realiza la modulación en la banda RF (*up-conversion*). Esta operación puede ser realizada en el propio transmisor. El transmisor realiza además un último filtrado y amplificación de alta potencia, de menor calidad en términos de aislamiento espectral, no siendo necesario introducir una gran cantidad de Ganancia en esta etapa ya que degradaría más la señal y ésta ya viene amplificada de la propia etapa de IF. En algunos casos, la multiplexación de los canales se realiza en este punto en lugar de donde se situaba anteriormente el combinador. A modo de ejemplo, se muestra una señal en RF

compuesta por 3 portadoras de 20 MHz previo a su paso por el transmisor y a aplicar la ganancia de la antena:

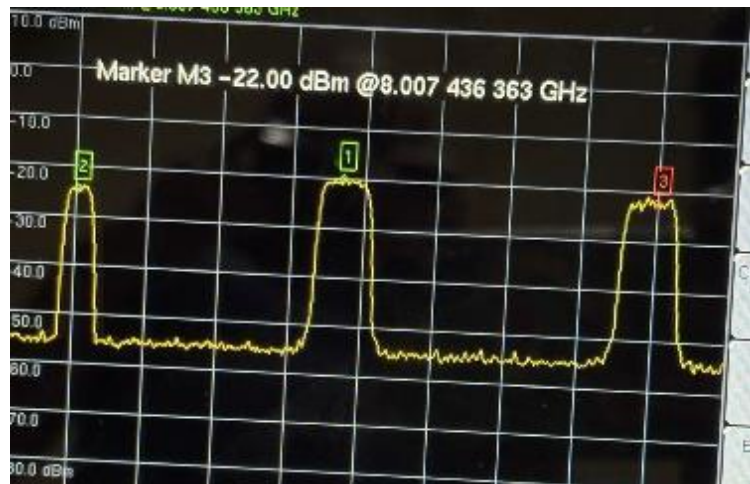


Figura 2-20: Ejemplo de señal RF con 3 portadoras de 20 MHz de ancho de banda en banda X.

Por último, la antena, que debería estar correctamente alineada con la antena del receptor satélite tal con los métodos especificados en el presente apartado, transmite la señal, obteniendo en transmisión una PIRE resultado de aplicar las etapas de ganancia durante todo el enlace menos las pérdidas introducidas por el sistema.



Figura 2-21: Ejemplo de módulo de antena en banda X en Isla de Alborán (transmisor y receptor).

En recepción, se realiza la operación inversa, con la diferencia de que la señal, al ser captada por la antena, pasa por el receptor, realizando este un primer filtrado (de “baja” calidad, ya que el filtrado en la etapa en IF se encargará de afinar la señal resultante y aislarla correctamente del ruido e interferencias) y amplificación inicial. Posteriormente, se realiza la *down-conversion* mediante el oscilador local y se envía al módulo IF, realizando en esta etapa un filtrado del canal correspondiente y amplificación. Por último, los módems demodulan la señal y, en caso de ser necesario, realizan la conversión digital-analógica (en caso de que la naturaleza de la señal que se transmite a los sistemas y usuarios finales sea de esta naturaleza), transmitiendo por último los datos a los usuarios o sistemas que se encuentren en otra localización, o enviando estos a través de otros transportes (usualmente FO).

2.2.2 Ventajas históricas

El uso de una arquitectura satelital que incluya un módulo de IF analógica tiene múltiples ventajas, y es la más extendida para el uso de este transporte.

En primer lugar, la robustez, ya que permite sea cual sea el servicio y la topología a implementar, un diseño eficaz para la distribución de cualquier tipo de servicios por satélite con un ancho de banda aceptable (del orden de entre 2 y 200 Mbps) sin una gran complejidad tecnológica. Como se ha estudiado, estos servicios pueden ser independientemente de naturaleza analógica o digital, para servicios punto a punto, broadcast o de monitorización y control de la red.

Al ser una arquitectura ampliamente implementada, permite una gran rapidez en el diseño y puesta en marcha de las estaciones en tierra, debido a que su madurez tecnológica permite a los diseñadores, en función de los requisitos de los servicios y número de usuarios del sistema a implementar por la estación, encontrar en el mercado y en otras arquitecturas ya implementadas soluciones en poco tiempo, estando estandarizado los protocolos de Factory Acceptance Test (FAT) y On-Site Acceptance Tests (OSAT) para garantizar el correcto funcionamiento de la solución implementada, tanto a nivel individual para cada uno de los módulos (banda base, IF analógico, RF y antena) como cada una de las pruebas del sistema total. Estas pruebas incluyen, entre otras, la comprobación de la correcta transición de las señales por cada módulo (mediante parámetros como la relación S/N y el uso de herramientas como analizador de espectros), la monitorización de la estabilidad de la PIRE, la medición de la energía por bit entre densidad espectral de ruido (E_b/N_0) del enlace o pruebas de otros componentes del sistema como antihielo y fuentes de alimentación.

El uso de los módulos en IF analógica facilitan también el uso y el diseño de las estaciones en tanto en cuanto están ampliamente estandarizados y utilizan una frecuencia fija (como 70 o 140 MHz), pudiendo interconectar a estos cualquier módulo RF aguas arriba (dependiendo la salida hacia este del oscilador) y módulos de banda base aguas abajo, siendo esta etapa interoperable con prácticamente la totalidad de los sistemas del mercado al aplicarse estándares y recomendaciones como los de la ITU-R para todos los componentes del sistema. El uso de las líneas de transmisión también está estandarizado, como el uso de cableado coaxial o distintos tipos de guías de onda hasta la etapa de RF.

Además, la fiabilidad es otra de las ventajas a tener en cuenta. La implementación de los módulos IF y la sencillez de los componentes que lo forman, hacen que aumente su ciclo de vida y disminuyan los fallos que afectan a estos módulos, dando una gran fiabilidad al sistema y disminuyendo las tareas de mantenimiento necesarias a realizar en la etapa IF.

Por último, otra de las ventajas de esta arquitectura es el coste. El módulo IF analógico permite implementar etapas de filtrado y amplificación con componentes pasivos simples sin perjudicar el rendimiento total del sistema. La excelente selectividad, discriminación selectiva de frecuencias y bajo ruido aditivo de los módulos y sencillez de diseño permiten implementar éste a un bajo coste. Además, las líneas de transmisión basadas en cables coaxiales, aún dadas sus limitaciones de atenuación en función de la frecuencia, permiten ahorrar costes transportando la señal desde el módulo IF hasta el módulo RF. En el módulo RF podemos realizar un amplificado y filtrado menos robusto, permitiendo también que las etapas que implementemos en esta banda sean menos costosas que si se implementase únicamente la banda RF. Los costes de mantenimiento, como se ha dicho, así como de energía eléctrica, lo cual redundan en un menor consumo de kWh/mes también son factores a tener en cuenta dentro del ahorro de implementar esta solución. En definitiva, el ratio calidad/precio de la implementación y sostenimiento de una estación en tierra basado en IF analógica, lo hacen otro de los factores para valorar la implementación de este tipo de solución, especialmente en estaciones con poca previsión de crecimiento en su tráfico o que no precisan de un ancho de banda elevado.

En conclusión, la alta disponibilidad de etapas IF analógicas en el mercado, la estandarización de los módulos, la rapidez y facilidad de diseño, los requerimientos de sostenimiento y el ratio

calidad/precio de la solución obtenida para el uso de módulos de IF analógico lo hacen una solución a tener en cuenta para la mayoría de los casos de uso de estaciones terrenas satélite.

Se debe tener en cuenta que algunas de estas ventajas, tales como la disponibilidad de equipos y el mantenimiento, no aplica a las estaciones terrenas en conjunto, sino al módulo IF analógico objeto de este apartado.

2.2.3 Limitaciones de la IF analógica y transición hacia IF digital

No obstante, el uso de módulos de IF analógica en las arquitecturas de las estaciones terrenas de las comunicaciones satelitales, también tiene algunas desventajas. Principalmente, estas limitaciones son la falta de flexibilidad y rigidez en las implementaciones, que redundan en varios inconvenientes asociados a estos.

En cuanto a la falta de flexibilidad, por un lado, las líneas de transmisión hacen que sea imposible disponer de los equipos de banda base alejados geográficamente del módulo RF y de la antena a distancias mayores de cientos de metros. Esto es debido a principalmente la atenuación que se produce en líneas de transmisión tales como los cables coaxiales. A pesar de ser una línea de transmisión barata y eficaz para transmitir las señales hasta la etapa RF, tiene estas limitaciones de distancia. Por otro lado, además de la atenuación, estas líneas de transmisión son sensibles a otros factores como el ruido o las interferencias, por lo que debemos tener en cuenta a la hora de diseñar la localización de la estación terrena y el encaminamiento de distintos cableados este factor de forma que la degradación de la señal en estos tramos se limite lo máximo posible al factor de atenuación en función de la distancia, así como a la atenuación introducida por otros elementos como conectores, mezcladores o acopladores. Esto supone una gran desventaja frente a otros transportes más comúnmente utilizados hoy en día, tales como la FO, la cual es inmune a interferencias electromagnéticas.

Por otro lado, otro de los inconvenientes es que el espacio físico y alimentación energética donde deben alojarse los equipos de procesamiento en banda base debe estar correctamente dimensionado, lo cual es difícil dadas las necesidades cambiantes de la tecnología a lo largo del tiempo. Si tenemos la necesidad de introducir un nuevo servicio en una nueva banda o con un acceso al medio distinto, deberemos dimensionar un nuevo rack de módems en la estación terrena, debido a que todo el procesamiento debe ser llevado a cabo por HW. Esto tiene como consecuencia esta mencionada limitación por el propio espacio físico o por factores tales como la alimentación eléctrica dimensionada inicialmente para la estación. También, la implementación de un nuevo modem implica la formación del personal presente en la estación en tareas de operación y mantenimiento, aumentando más los costes, así como problemas secundarios como la resistencia al cambio del propio personal ante estos nuevos servicios. De igual forma, si queremos ampliar usuarios o nuestra topología satélite es en estrella, deberemos tener en cuenta estos factores a la hora de diseñar las estaciones terrenas, ya que deberemos introducir más módem para dimensionar las nuevas portadoras de las nuevas estaciones terrenas. Por norma general, introducir un nuevo servicio conlleva por este tipo de causas una obra civil para dimensionar estos elementos, lo cual aumenta los costes al escalar las estaciones en tierra y los tiempos de implementación a la hora de satisfacer estas nuevas necesidades, además del coste de los propios nuevos equipos.

La limitación geográfica tiene como consecuencia otro tipo de inconvenientes, entre los que se incluye la falta de redundancia en una estación terrena. Si se requiere de este tipo de requisitos, se debe de redundar la estación terrena completa en otra ubicación, debiendo conectar estas o dividir la prioridad de los servicios entre ambas, conmutando estos en caso de que una de ellas falle. Esto aumenta enormemente los costes de una solución redundante, ya que no podemos separar los equipos de procesamiento de las antenas ni redundar únicamente o antenas o equipos de procesamiento. Si optamos por una solución en la que eliminamos la redundancia por falta de espacio geográfico o por coste, debemos tener en cuenta que el fallo en cualquiera de nuestros componentes de la etapa RF, ya sea por ejemplo por una avería en el BUC, por condiciones meteorológicas o por factores externos como señales

que disminuyen nuestra S/N por técnicas de guerra electrónica como el jamming, suponen que todos los servicios y usuarios que operan a través de esta estación quedarían inoperativos.

Por último, la rigidez es otro de los inconvenientes que afectan a estas implementaciones. Si queremos variar alguno de los módulos, ya sea la banda base o el módulo RF, deberemos comprobar la compatibilidad entre el transmisor/receptor y estos, dando lugar al vendor lock-in en muchas de las ocasiones, debiendo depender de un mismo fabricante o de unas especificaciones de este que limitan el diseño y la escalabilidad del resto de la estación.

De igual forma, la introducción de nuevas constelaciones satélite puede tener como consecuencia el rediseño y sustitución de los componentes de la estación, por otros que se adapten a los nuevos anchos de banda o a órbitas dinámicas como las constelaciones LEO/MEO, cada vez de mayor uso en las comunicaciones satelitales.

Esta rigidez también conlleva que, al tener que ser todos los equipos de procesamiento HW, estos lleven asociado su correspondiente mantenimiento, ya sea preventivo (calibración) o correctivo ante fallos de elementos, especialmente en las etapas de banda base y RF.

Como conclusión de las limitaciones del uso de la banda IF analógica, se destaca las limitaciones geográficas y físicas donde se sitúan las estaciones, los requerimientos de compatibilidad entre etapas de banda base y RF, con la consiguiente dependencia del fabricante para la adquisición, mantenimiento e implementación de nuevos equipos, así como la falta de escalabilidad y redundancia de los servicios que son alojados en estas.

2.3 Transición hacia IF Digital

Las limitaciones expuestas anteriormente, las nuevas necesidades dentro de las comunicaciones satelitales, unido al aumento del requerimiento del ancho de banda de los servicios y el uso de las nuevas constelaciones MEO/GEO, han provocado el aumento del uso de la IF Digital que, en su mayor parte, soluciona los nuevos requerimientos y necesidades de los usuarios, aunque crea nuevos retos e inconvenientes.

Al convertir la señal analógica en datos digitales estandarizados, es posible transportarla mediante enlaces de fibra óptica u otras redes digitales, eliminando las restricciones físicas del cableado coaxial y permitiendo separar geográficamente los equipos de transmisión y procesamiento de la antena. Esta transición incrementa la capacidad de procesamiento, la flexibilidad y la interoperabilidad del sistema, y constituye la base del estándar Digital Intermediate Frequency Interoperability (DIFI), que establece un flujo de datos digital común y compatible en todo el segmento terrestre, facilitando la integración y virtualización de infraestructuras satelitales modernas.

En el presente apartado se tiene como objetivo detallar en qué consiste la IF Digital, así como poner de manifiesto sus principales ventajas, sin dejar de lado el reto de la transición de un mundo en el que mayoritariamente las soluciones satelitales están implementadas basadas en los sistemas analógicos anteriormente descritos hacia esta nueva era digital.

2.3.1 Concepto de IF Digital

El concepto de IF Digital, para el caso de comunicaciones satélite objeto del presente TFM, se basa en digitalizar la señal proveniente de la etapa RF directamente hacia una IF. Como se ha explicado a lo largo de este TFM, la arquitectura tradicional maneja datos de naturaleza analógica y digital provenientes de los distintos sistemas y usuarios. En este caso, la señal, en caso de ser digital, se digitaliza en última instancia a través de los modem, debiendo ser necesario el uso de una etapa IF analógica intermedia previa a la llegada a estos, con las ventajas y limitaciones que ello supone. En el caso de IF digital la

señal, sea de la naturaleza que sea de la misma forma, se digitalizaría lo antes posible tras su llegada a la antena (tras aplicarle a esta un filtrado y amplificación de bajo orden Q en la banda RF).

Este procesado en esta etapa tiene como resultado ser la salvaguarda para las limitaciones de IF analógica expuestas anteriormente, abriendo la posibilidad de enviar la señal a otras ubicaciones geográficas de forma fiable y sencilla e incluso introducir nuevos conceptos en comunicaciones satélite (y otro tipo de comunicaciones que utilicen la banda RF, como Radio Definida por Software, radioenlaces...) tales como el GSaaS (Ground Segment as a Service), virtualización o redundancia geográfica de módulos de antenas y RF o equipos de procesamiento. De esta forma, estaremos aumentando la fiabilidad, flexibilidad, resiliencia y escalabilidad del sistema total de comunicación satélite.

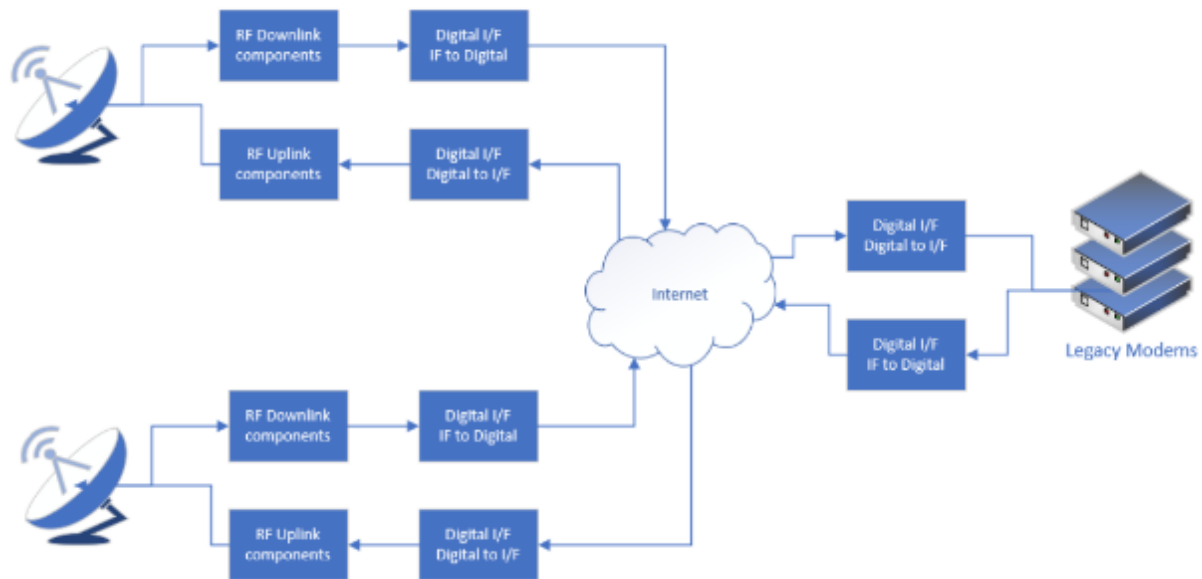


Figura 2-22: Arquitectura de alto nivel para IF Digital [10].

Tal y como se observa en la figura anterior, y a diferencia de la arquitectura tradicional, se digitaliza la señal en primera instancia al ser recibida con un objetivo principal: obtener una cadena de datos digitales (*1s y 0s*) que podamos encapsular en paquetes mediante un protocolo estándar de forma que este pueda ser enviado a ubicaciones remotas sin las limitaciones existentes en las señales analógicas.

En los siguientes apartados se profundizará en los conceptos teóricos que permiten entender la digitalización de señales y cómo debe llevarse a cabo en el caso de las comunicaciones satelitales desde la señal recibida en RF de forma que podamos obtener esta señal digital para su posterior encapsulado en un formato estandarizado para su posterior tratamiento y envío.

2.3.2 Digitalización de señales

Definimos una señal analógica como una señal con resolución teóricamente infinita. El objetivo de la digitalización es obtener una señal que se transmite compuesta por un conjunto finito de señales. Esta función es realizada mediante un conversor Analógico Digital (ADC). Dada una señal analógica limitada en ancho de banda, la digitalización de esta consiste en la obtención de muestras distribuidas uniformemente en el tiempo de esa señal analógica de forma que se preserve el contenido de la información contenido en esta.

Las ventajas principales de la utilización de señales digitales son la facilidad de regeneración de estas (posibilidad de utilización de repetidores regenerativos de la señal), menos efectos de distorsión e interferencias (con posibilidad de detectar y corregir errores durante la transmisión), su alta fiabilidad y

el bajo coste de producción. Por el contrario, requieren la utilización de un mayor ancho de banda y una sincronización entre transmisor y receptor.

La digitalización de una señal analógica pasa principalmente por 3 etapas: muestreo, cuantificación y codificación.

Durante la etapa de muestreo, se utiliza un tren de impulsos (delta de Dirac), de forma que se toman muestras de la señal durante un periodo fijo (periodo o frecuencia de muestreo). La señal muestreada se corresponde con la ecuación [11]:

$$g_{\delta}(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} g(nT_s)\delta(t - nT_s)$$

siendo T_s el periodo de muestreo. En la siguiente figura se muestra la representación de la ecuación anterior en el dominio del tiempo:

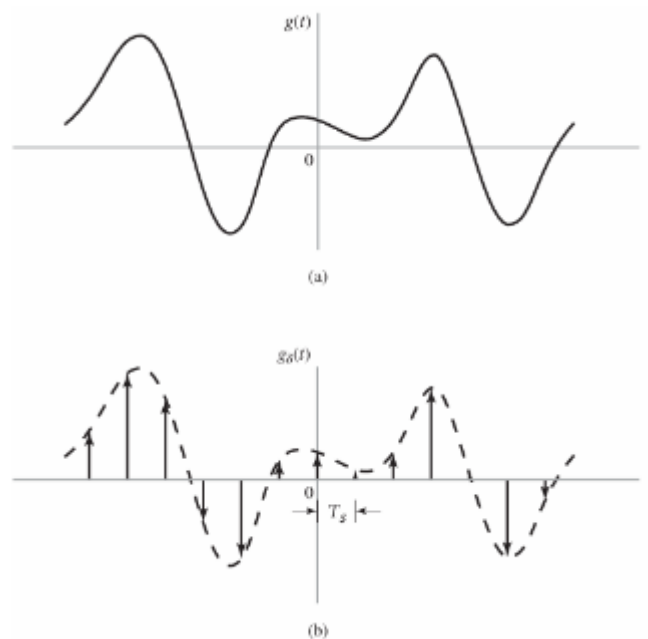


Figura 2-23: Señal continua en el tiempo (a) y señal muestreada (b) [11].

Dado que las señales no son nunca estrictamente limitadas en ancho de banda y tienen componentes espúreos en frecuencias, es importante mitigar a la hora del muestreo el efecto del *aliasing*, muestreando por encima de la frecuencia de muestreo mínima (Teorema de Nyquist, $f_s \geq 2 \cdot W$ siendo W el ancho de banda de la señal a muestrear), y empleando un filtrado de la señal previo al muestreo mediante un filtro *anti-aliasing* que, en el caso de este apartado, será un filtro paso bajo, pero que deberemos adaptar tal y como se explicará en apartados anteriores, para poder digitalizar las señales en la banda RF e IF, refinando la señal digital resultante mediante filtros digitales. Dado que los filtros no tienen una respuesta al impulso ideal, es conveniente dejar una banda de guarda muestreando a frecuencias mayores que la mínima marcada por el Teorema.

En la práctica, esta operación es realizada por un circuito *Sample-and-Hold* (S/H), que toma el valor de la muestra durante el periodo de muestreo (*Sample*) y lo mantiene fijo durante el periodo de muestreo (*Hold*). Este circuito es esencial en la función de la digitalización, especialmente para la obtención de altas resoluciones y menor pérdida de información y para señales con amplios anchos de banda, como las señales objeto de las comunicaciones satélite del presente TFM. El periodo de muestreo debe ser mayor al periodo de la duración del tiempo de *Sample* junto con el tiempo de *Hold* para el conversor poder completar la digitalización de la muestra.

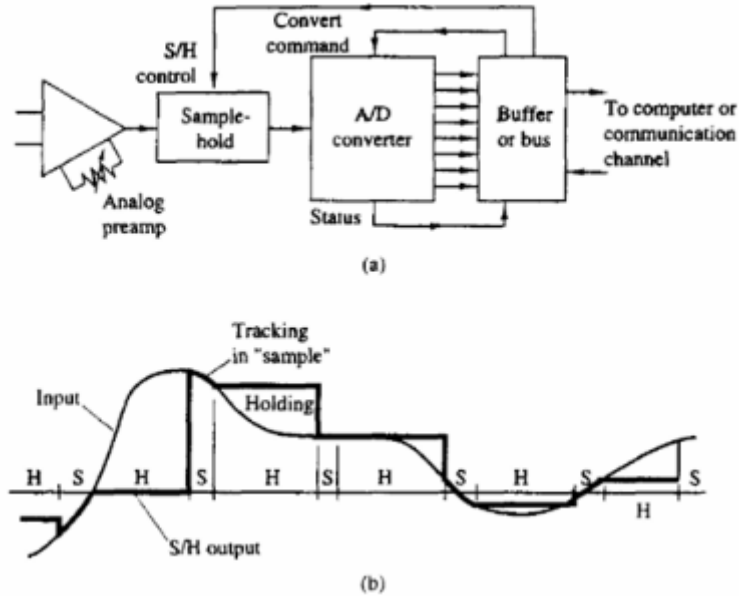


Figura 2-24: Conversor ADC. (a) esquema de bloques ; (b) señal analógica de entrada y señal digital a la salida del conversor [12].

Posteriormente a la fase de muestreo, debemos aplicar una cuantificación, la cual se define como el proceso de transformación de la amplitud de las muestras $m(nT_s)$ de una señal $g(t)$ en el tiempo $t = nT_s$ en un conjunto de amplitudes discretas $v(nT_s)$ tomadas de un conjunto finito de niveles posible (L niveles de decisión) [11]. Este proceso puede realizarse con cuantificadores sin memoria (el valor de la señal cuantificada no depende de los valores de instantes anteriores) o con memoria (dependiendo el valor de las señales anteriores y aplicando la diferencia del valor actual respecto a estos).

Análogamente, los cuantificadores pueden ser uniformes (con pasos o resolución del valor Δ entre valores de decisión, siendo el error máximo de cuantificación $\Delta/2$), o no uniformes, para lo cual se aplica una compresión no lineal a la señal de entrada previo a la aplicación de un cuantificador uniforme, dando como resultado una resolución mayor para ciertas bandas espectrales y menor en bandas de menor interés. Este último tipo de cuantificadores se aplican por ejemplo en servicios de voz para mejorar la calidad de la llamada en el rango de frecuencias típico de la voz humana. A su vez, el valor de decisión de un cuantificador entre niveles puede venir dado por el redondeo del valor de la muestra hacia el valor superior o por el valor inmediatamente inferior al valor de la muestra.

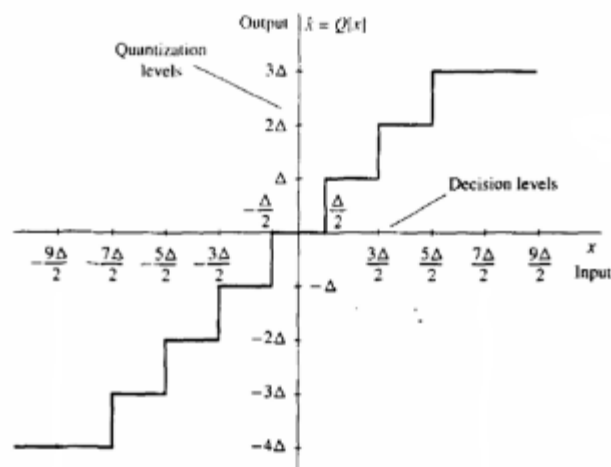


Figura 2-25: Ejemplo de cuantificador uniforme con toma de decisión de redondeo [12].

En la aproximación estadística, asumimos que el error de cuantificación tiene naturaleza aleatoria, modelando este como ruido aditivo de la señal analógica original. Es importante destacar que el preprocesado de la señal (filtrado y amplificación principalmente) debe permitir que el rango de la señal esté dentro del rango del cuantificador, obteniendo ruido de sobrecarga en caso contrario y repercutiendo esto en una distorsión de la señal a la salida del conversor ADC.

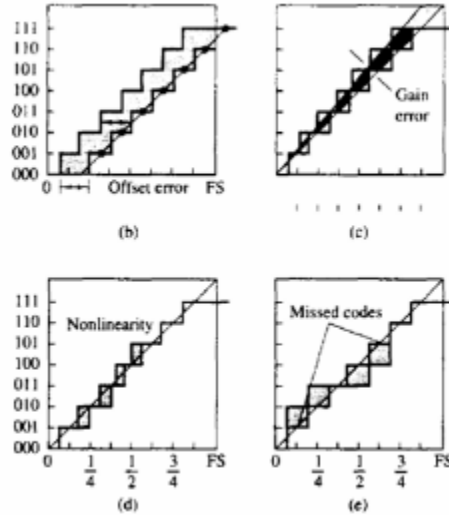


Figura 2-26: Errores de cuantificación [12].

Por último, la conversión a digital se realiza con la codificación, asignando un valor único binario a cada nivel de cuantificación posible. Por tanto, el número de bits b utilizado para cada uno de los niveles en un cuantificador de L niveles totales debe ser:

$$L \leq b + 1$$

siendo el valor de la resolución en función del número de bits el siguiente:

$$\Delta = \frac{R}{2^{b+1}}$$

y obteniendo R como el rango de entrada del cuantificador.

2.3.3 Arquitectura de IF Digital. Digital Down Conversion (DDC)

La modernización y evolución de la tecnología y el aumento de la capacidad de procesamiento de los sistemas han permitido que los sistemas puedan realizar las labores de conversión desde analógico a digital no solo desde una señal en banda base, sino incluso desde la etapa de IF, o en última instancia directamente desde RF.

Por tanto, la arquitectura de un sistema que utiliza IF Digital puede representarse, en función de la tecnología utilizada, de dos formas: manteniendo el uso previo de IF analógica o directamente convirtiendo la señal al dominio digital desde RF.

Por un lado, en el caso en el que se mantenga el uso de IF analógica previo a la conversión al dominio digital, la señal recibida en la antena y procesada en el módulo RF (primer filtrado y amplificación en el LNA) puede pasarse a IF analógica mediante una *down-conversion* tradicional, tal y como se ha explicado a lo largo de este TFM. Posteriormente, esa señal filtrada nuevamente en esta etapa y amplificada, previo a su paso por el ADC para la digitalización. Una vez digitalizada, se realiza mediante osciladores digitales (NCO, Numerical Controlled Oscillator) el DDC, filtrando en última instancia la señal de forma digital en banda base y realizando un *downsampling* de esta, en el cual se reduce la frecuencia de muestreo sin pérdida de información de la señal. En este punto, la señal estaría lista para

ser encapsulada en paquetes y enviarse a través del estándar que se considere oportuno a una ubicación remota. En la siguiente figura se muestra un esquema de alto nivel de esta arquitectura. Nótese que la señal se divide en el NCO en las componentes de fase y cuadratura I/Q, multiplicando por un coseno y un seno, respectivamente, de forma que este esquema puede representar cualquier señal digital en banda base hacia el Procesador de Señal Digital (Digital Signal Processor, DSP):

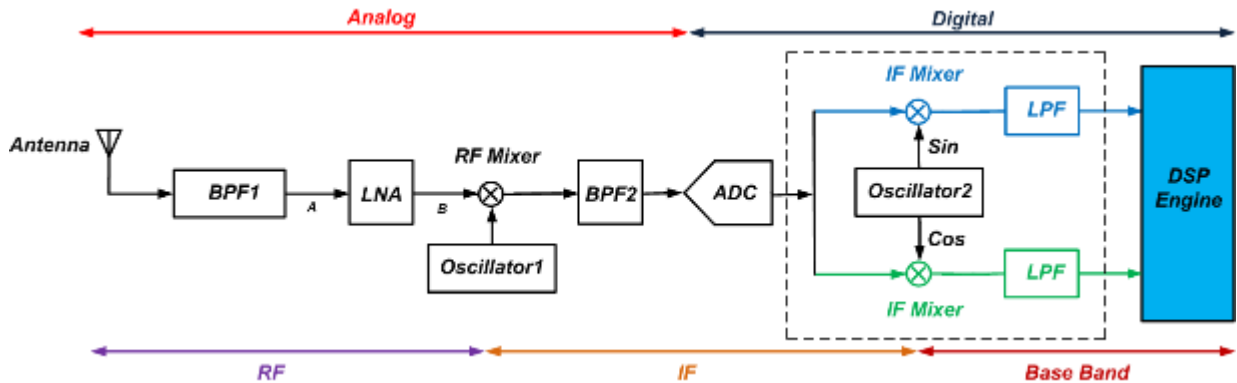


Figura 2-27: Arquitectura de IF digital utilizando IF analógica previa [13].

Por otro lado, en el caso en el que convertimos la señal proveniente de la etapa RF analógica directamente al dominio digital, directamente se realiza todo el procesamiento de esta en tal dominio digital (a excepción del LNA). Como se ha dicho, esto puede realizarse debido a que la evolución de tecnología permite muestrear la señal en RF analógica a tasas muy altas (nótese que una señal en RF analógica de, por ejemplo, 10 GHz, debe muestrearse por el Teorema de Nyquist a tasas de al menos $f_s = 20$ GHz). Esto es posible gracias al uso de ADC de alta resolución, el desarrollo de Circuitos Integrados de Aplicación Específica (ASICs) y el procesamiento en DSPs avanzados. A la salida del ADC, la señal se encuentra aún modulada, pero ya representada en el dominio digital. Por último, de forma análoga al caso anterior, el NCO realiza una DDC hacia la banda base (separando las etapas de fase y cuadratura), realizando posteriormente un filtrado digital BB de la señal y el *downsampling* (no necesariamente de por factor de 2 como en la figura) mediante el *diezmado correspondiente*, tal y como se muestra en la siguiente figura. En este caso, sería necesario añadir un DSP en última instancia para convertir esta señal I/Q la señal compleja a una señal real, obteniendo nuevamente la señal digitalizada en banda base sobre la que podremos aplicar el estándar de empaquetado que deseemos y enviar así la información a la ubicación remota:

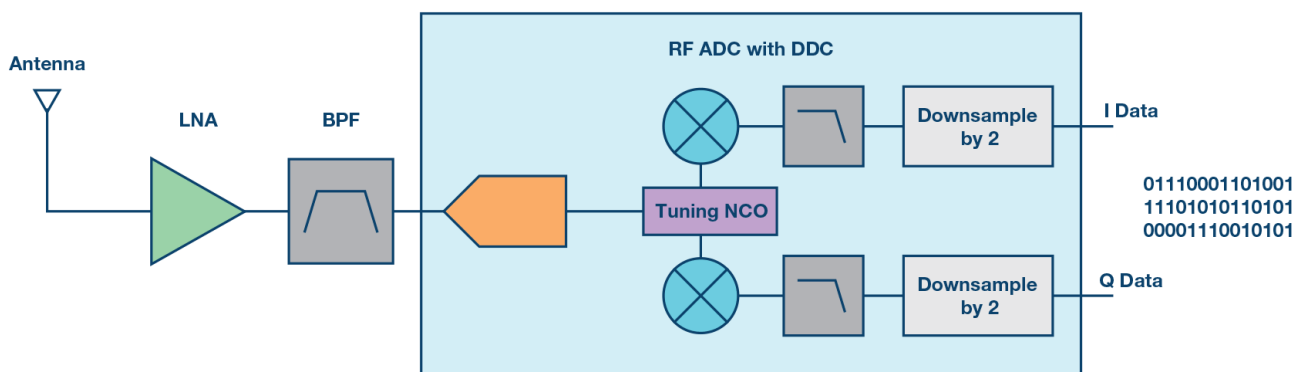


Figura 2-28: Arquitectura de IF completamente digital [14].

La principal diferencia en ambos casos es que en el primero realizamos el filtrado en IF de forma analógica en primera instancia, y en el segundo caso utilizamos únicamente filtrado y todo el procesamiento de forma digital. Los filtros analógicos están formados principalmente por componentes activos y/o pasivos (bobinas, resistencias, condensadores, transistores...), mientras que los filtros digitales están integrados en algoritmos de procesamiento de la señal digital por HW o SW. Esto tiene numerosas ventajas, dado

que los filtros digitales no sufren distorsión de fase o ruido térmico, teniendo menos limitaciones a la hora de procesar señales en altas frecuencias que los componentes analógicos mencionados anteriormente. Además, pueden ajustarse en tiempo real cambiando parámetros del filtro como las frecuencias de corte o el orden del filtro, a diferencia de los filtros analógicos en los que es necesario cambiar los componentes del HW para modificar estos parámetros. Estos permiten también la implementación de algoritmos de reconstrucción de la señal y detección/corrección de errores, dando como resultado una respuesta al impulso notablemente mejor al de un filtro analógico.

El uso de las componentes I/Q nos permite un procesamiento más eficiente de la señal digital, utilizando para ambas el mismo filtro paso bajo y tasa de *downsampling*. Para su envío hacia los modem es necesario disponer de la señal digital real, eliminando la componente imaginaria que se produce al multiplicar por el seno en la señal original en IF digital. Este procesado puede realizarse en el DSP, mediante distintas técnicas como la aplicación de un filtro que implemente digitalmente la transformada de Hilbert o modulaciones que permitan combinar las señales en fase y cuadratura, corrigiendo en ambos casos la señal en última instancia mediante la aplicación de filtros digitales.

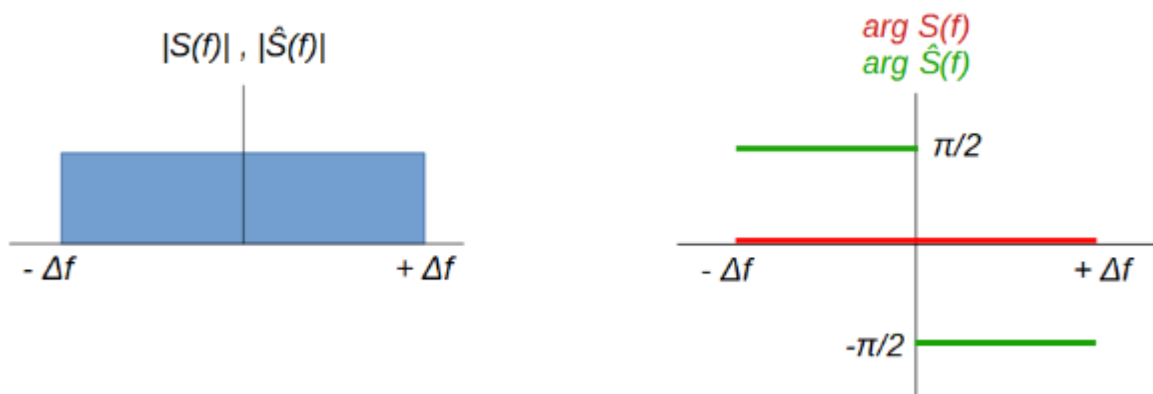


Figura 2-29: Respuesta al impulso de un filtro implementado con la transformada de Hilbert [15].

En la siguiente ecuación se muestra otra de las posibles formas de obtener una señal real al modular las componentes en fase y cuadratura obtenidas durante el DDC:

$$x_{real}[n] = I[n] * \cos(2\pi f_c n) + Q[n] * \sin(2\pi f_c n)$$

En determinados casos de uso, como escenarios de prueba o simulación, este proceso puede simplificarse utilizando únicamente la componente en fase, asumiendo explícitamente la pérdida de la información contenida en la componente en cuadratura. Esta aproximación, si bien válida para análisis preliminares, no representa fielmente el comportamiento de un sistema de modulación compleja en operación real.

En ambos casos, resulta recomendable mantener la señal en una frecuencia intermedia en el dominio digital, en lugar de realizar una conversión directa a banda base. Las arquitecturas de conversión directa (*zero-IF*) introducen típicamente componentes de corriente continua (DC), debidas a imperfecciones del mezclador, desequilibrios entre ramas I/Q y fugas del oscilador local. Estas componentes DC se superponen a la señal útil y son difíciles de eliminar mediante filtrado sin afectar a la información, lo que degrada la relación señal a ruido y aumenta la probabilidad de error en las etapas posteriores de demodulación y decodificación.

Como se puede intuir, el DDC es una parte fundamental en todo este proceso. Nos permite obtener la información de la banda de interés proveniente de la RF o IF digital, permitiendo desplazar la señal en frecuencia a banda base, filtrar esta y reducir la tasa de muestreo (*downsampling*), permitiendo mayor facilidad en el procesado posterior de la información en el DSP.

Para ello, es fundamental el papel del NCO, que actúa como un generador de señal digital que produce las ondas seno y coseno que actúan como el oscilador local que se ha explicado en el caso del *down-conversion* analógico, en base a un oscilador local. Este tiene la ventaja, tal y como ocurre en el caso de filtrado, de ser más preciso y flexible que en el caso analógico, siendo posible reprogramar este en tiempo real sin necesidad de sustituir los componentes HW del sistema, sin distorsión de fase o ruido presentes en los sistemas analógicos.

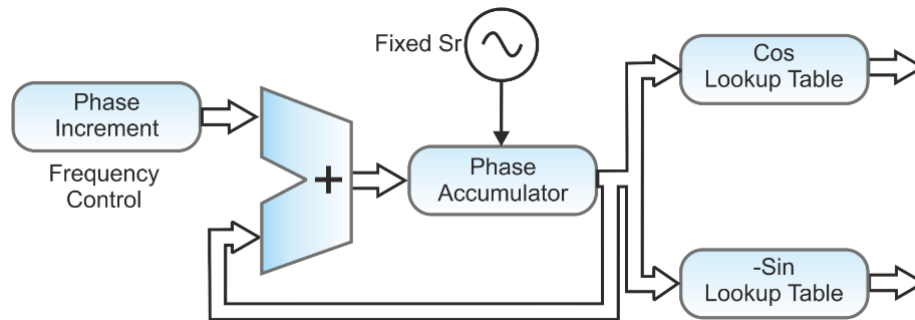


Figura 2-30: Esquema de bloques de NCO [17].

En las siguientes figuras se muestra a modo de ejemplo en el dominio de la frecuencia discreta cómo el DDC se lleva a cabo en cada una de las fases descritas anteriormente: señal proveniente del ADC, obtención de las señales I/Q, *downsampling* y filtrado. Se debe tener en cuenta que, en el dominio de la frecuencia discreta, se obtiene una señal periódica que se repite en el intervalo de la frecuencia de muestreo de $-f_s$ a f_s :

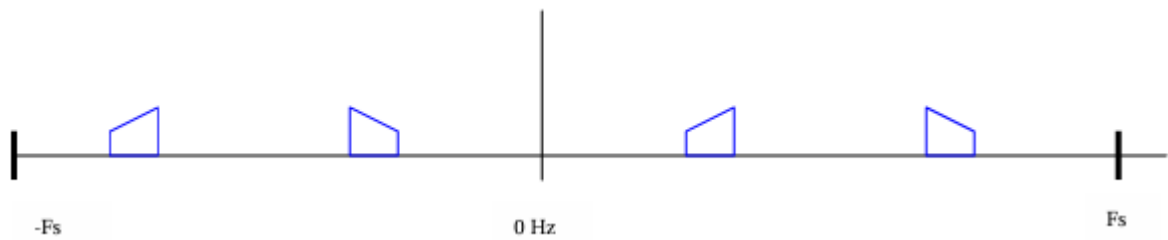


Figura 2-31: Salida del conversor ADC [16].

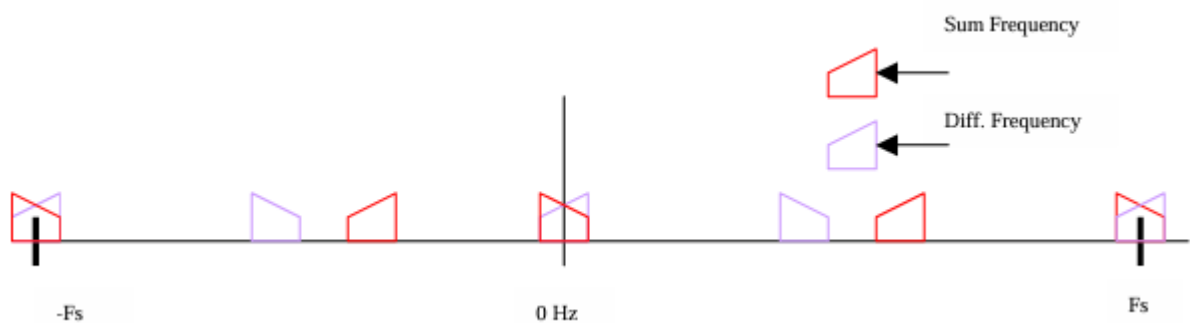


Figura 2-32: Salida en amplitud de la señal en fase o cuadratura [16].

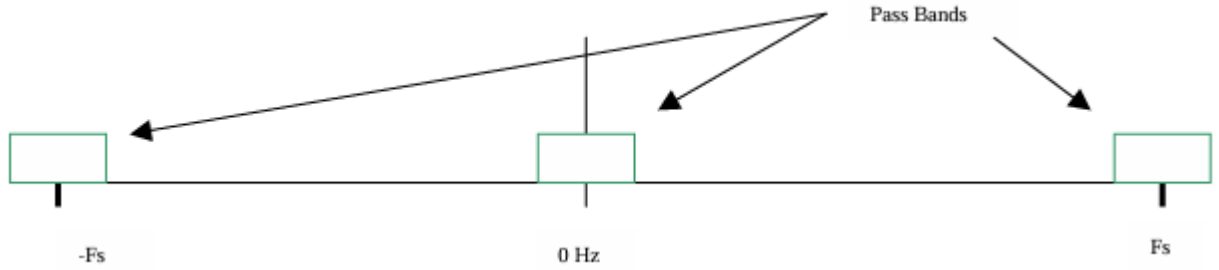


Figura 2-33: Filtrado paso bajo [16].

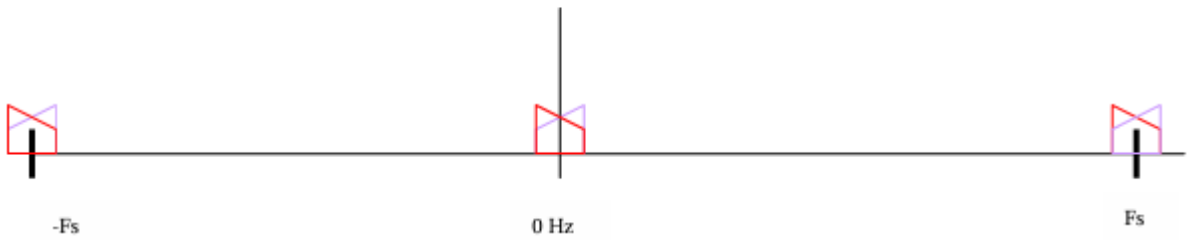


Figura 2-34: Señal en frecuencia discreta obtenida tras el filtrado paso bajo [16].

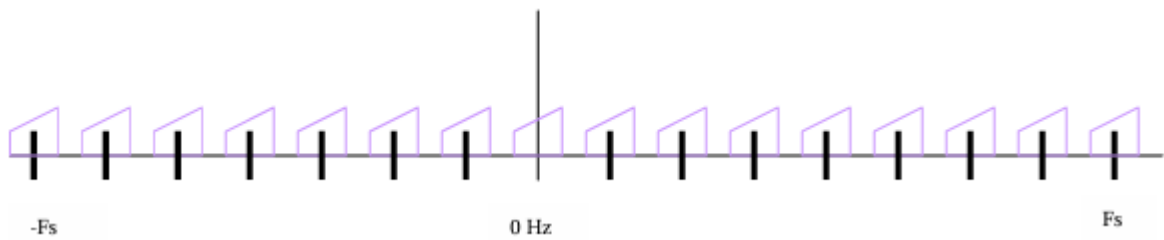


Figura 2-35: Salida del diezmador usando un downsampling de orden 7 [16].

Como se ha dicho, el proceso de *downsampling* en el diezmador tiene como objetivo adaptar la tasa de muestreo a la señal en banda base sin pérdida de información, dado que ya no es necesario tasas de muestreo tan altas como las utilizadas con la señal en RF, teniendo la información en un ancho de banda mucho más reducido. Por tanto, la salida de un diezmador ante una entrada $x[n]$ puede definirse de la siguiente forma:

$$y_d[n] = x[Mn]$$

siendo M el orden de *downsampling*, es decir, usamos solo una muestra de la señal original de cada M muestras consecutivas.

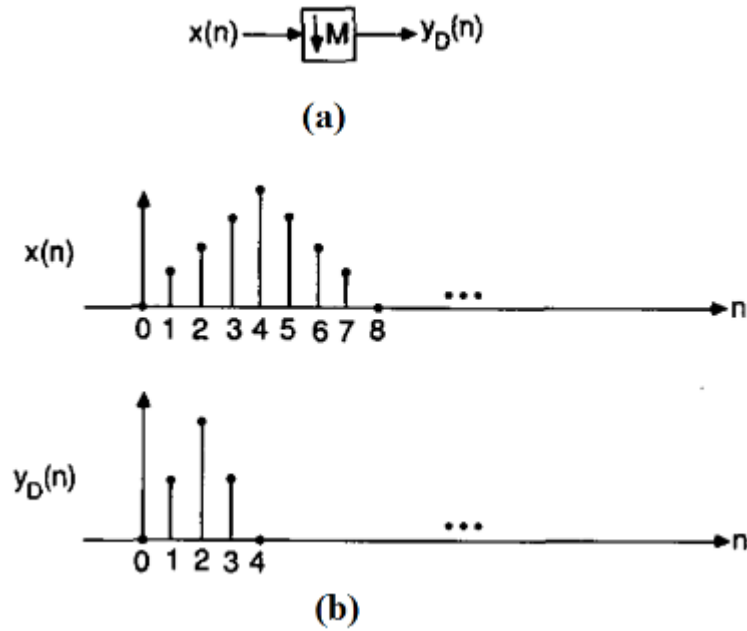


Figura 2-36: Ejemplo de *downsampling*. (a) Esquema del *diezmador* ; (b) Señales de entrada y salida [13].

Obteniendo la nueva frecuencia de muestreo en función de la original como f_s/M , teniendo en cuenta que si la señal tiene componentes en frecuencia por encima del doble de esta frecuencia tendremos aliasing, por lo que se realiza previo al *downsampling* el filtrado paso bajo especificado anteriormente, de la forma especificada en la siguiente figura:

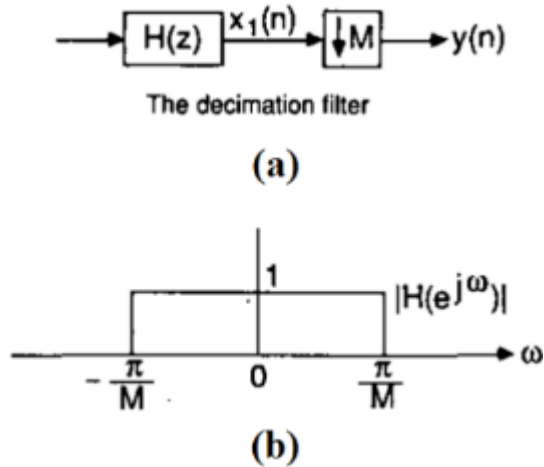


Figura 2-37: Filtro baso bajo. (a) diagrama de bloques. (b) respuesta al impulso del filtro [13].

En este y en el anterior apartado se ha definido el proceso de digitalización de señales analógicas, así como los principales bloques funcionales y las operaciones a alto nivel que componen la digitalización en la banda IF y el procesamiento digital de la señal para obtener la información binaria que podremos empaquetar en el formato estándar que seleccionemos y transmitir a nuestros clientes y servidores a la ubicación geográfica correspondiente. Estas definiciones y descripciones se han realizado desde el punto de vista de la recepción de la señal. De forma análoga, y siendo las comunicaciones satelitales comunicaciones full-dúplex, se realizaría la descripción del sistema en transmisión para la correcta emisión de la señal hacia el segmento espacial.

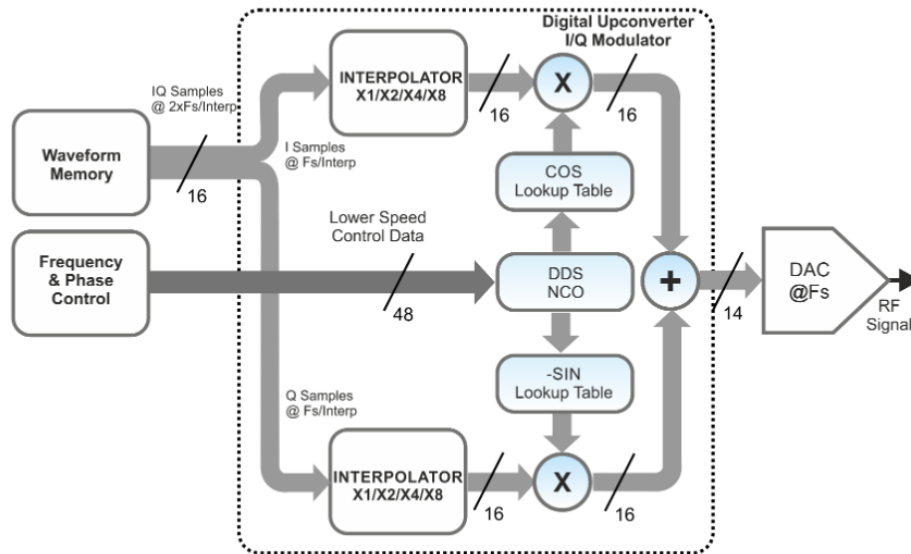


Figura 2-38: Esquema de IF digital en transmisión [17].

A modo descriptivo, se seguirían la siguiente sucesión de bloques para la transmisión: la señal proveniente que contiene la información de nuestros *hosts* o servidores remotos llegaría encapsulada en ese mismo formato estándar a nuestro módulo de IF Digital. Esta señal se desempaquetaría en la pila de protocolos correspondiente, obteniendo la señal digital a transmitir por la antena satélite en banda base. Esta señal entraría al DSP y se dividiría en su componente en fase y en cuadratura, siendo interpolada (debemos adaptar de nuevo la frecuencia/periodo de muestreo a la banda sobre la que vamos a trabajar), filtrada paso bajo previo al NCO que realizaría un Digital Up Conversion (DUC) hacia la banda IF Digital. Por último, se realizaría a través del Conversor Analógico Digital (DAC) su paso hacia el dominio analógico. De forma análoga a como se realiza en recepción, esta salida podrá ser directamente en RF analógica, o bien una salida en IF analógica que filtraremos (paso banda) y sobre la que realizaremos un *up-conversion* con un oscilador local hacia la RF analógica. En lugar del LNA, la señal pasará a través de un módulo de filtrado paso banda RF (de menor calidad que en la banda IF, especialmente si el filtrado en IF no ha sido en el dominio digital) y por último con un HPA, que la dirigirá hacia la antena que enviará esta hasta el satélite.

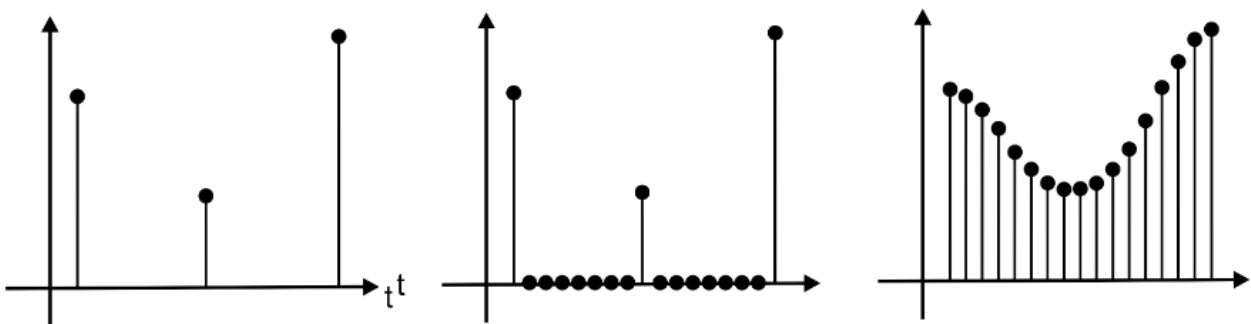


Figura 2-39: Ejemplo de interpolación por un factor de 8 previo al DUC [17].

2.3.4 Ventajas de IF digital respecto a IF analógica

La utilización de IF digital en sistemas satelitales tiene numerosas ventajas. En primer lugar, algunas de las ventajas de las que nos podemos beneficiar son las inherentes de los sistemas digitales frente a los sistemas analógicos. Las tolerancias presentes en los componentes de los circuitos analógicos hacen que estos sean menos precisos, además de introducir sobre la señal componentes indeseados tales como el ruido térmico, causado por el movimiento aleatorio de los electrones por los circuitos electrónicos debido

a la temperatura; o la distorsión de fase, debido al tiempo de propagación de la señal a través de los distintos bloques analógicos cambia respecto a la frecuencia. Además, los dispositivos digitales son menos susceptibles a interferencias, las cuales pueden ser producidas por señales de similar naturaleza a la recibida que introducen componentes espectrales en la señal original. Por otro lado, las señales digitales pueden ser almacenadas en circuitos electrónicos para su posterior procesamiento o análisis sin pérdida de calidad en dispositivos de almacenamiento fijos o portátiles, permitiendo una monitorización e identificación de causas de fallo en los distintos componentes del sistema de forma más sencilla. Otra de las ventajas es la capacidad de reconstrucción de la señal y la posibilidad de introducir códigos de detección y corrección de errores en cada uno de los módulos digitales, permitiendo mantener la calidad de esta en las distintas fases de transmisión y recepción de esta y preservando la información contenida en esta. Por último, por norma general el desarrollo de los sistemas digitales suele ser más económico respecto a los sistemas equivalentes analógicos, siendo de menor coste los componentes utilizados, además de ser reprogramables y reutilizables en diferentes aplicaciones cambiando los parámetros del sistema mediante SW, mientras que en los sistemas analógicos (salvo componentes sencillos como sintonizadores), por norma general debemos modificar el HW a la hora de cambiar la mayor parte de las funcionalidades (como la frecuencia de corte de un filtro analógico). Adicionalmente, el deterioro de los componentes digitales con respecto de los componentes analógicos suele ser menor, ahorrando costes en las tareas de mantenimiento de estos, tanto preventivos como correctivos.

Respecto a las ventajas específicas de la utilización de IF digital frente a la analógica, es posible beneficiarnos también de numerosas de ellas, las cuales emanan de las ventajas intrínsecas de los sistemas digitales sobre los analógicos mencionados anteriormente.

La primera de estas es la implementación de los distintos módulos del sistema, desde que se recibe la señal analógica proveniente de la antena y se convierte al dominio digital, es que podemos implementar los distintos módulos del sistema mediante SW, teniendo un HW estándar sobre el que definimos los parámetros para los distintos módulos mencionados en el apartado anterior (filtros paso bajo, diezmadores, interpoladores, NCOs, ADC...). Esto es aplicable también a los módems en los que procesamos la información que va hacia los distintos usuarios y sistemas, dado que se nos permite virtualizar estos en Centros de Procesamiento de Datos (tanto en propiedad como de terceros), pudiendo en estos componentes del sistema también estandarizar las distintas soluciones a implementar para nuestro sistema de comunicaciones satélite, y abriendo también la posibilidad de utilizar procesamiento y almacenamiento en la nube. Esto redundará en otra de las ventajas mencionadas anteriormente que es el ahorro de costes, dado que el HW estándar es más barato que el HW stand-alone por norma general, además que contratar capacidad de procesamiento y almacenamiento puede ahorrarnos costes respecto a tener nuestra propia infraestructura, además de la necesidad de disponer de personal y *know-how* de conocimientos técnicos ante incidentes y mantenimientos y actualizaciones de los distintos sistemas que albergan nuestros servicios.

Otra de las ventajas que nos da el uso de IF Digital es la enorme flexibilidad a la hora de diseñar e implementar las distintas arquitecturas de las estaciones terrenas. La capacidad de poder transportar un flujo de datos digital en tiempo real sin pérdida ni degradación de la información contenido en estos elimina las restricciones de distancia debidas a la degradación de la señal sufrida en los sistemas analógicos. Las antenas satélite pueden ser instaladas en las ubicaciones más óptimas basándonos en costes, disponibilidad y recepción de la señal, independientemente de los equipos de procesamiento, que también pueden ser ubicados en la localización que se considere más beneficiosa en términos de seguridad, costes y conveniencia, por ejemplo, si se quiere centralizar/descentralizar respecto a otros equipos o CPDs o situarlos en ubicaciones cercanas a la red de transporte de forma que podamos aprovechar infraestructura existente.

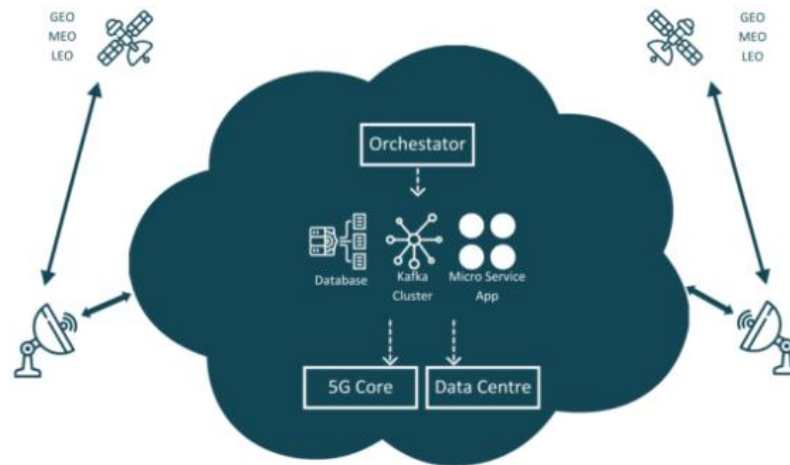


Figura 2-40: La arquitectura del segmento satélite utilizando IF digital nos permite flexibilizar todos los componentes de las estaciones en tierra y los servicios con los que se integran los datos [10].

Como consecuencia de la ventaja mencionada anteriormente, se mejora enormemente la resiliencia de las estaciones terrenas satélite, al permitir el reenrutamiento de las señales digitales a distintos puntos geográficos remotos desde multitud de antenas y centros donde se almacenan los equipos de procesamiento, dando lugar a una disponibilidad total del sistema en caso de fallos en todas las fases donde atraviesa la señal que contiene la información, desde caídas del lugar donde se almacenen los módem, caídas de los distintos transportes o indisponibilidad de antenas o de alguno de los módulos RF. Estas causas pueden ser tanto accidentales (condiciones meteorológicas que afecten negativamente al balance de enlace) como intencionadas (jamming, ciberataques o sabotaje de equipos físicos). De esta forma, ya sea debido a indisponibilidad física o electrónica, los flujos de datos digitalizados pueden ser reencaminados, bien hacia otro lugar remoto para su transmisión o recepción, o bien hacia otro lugar remoto para su procesamiento, a través de distintos transportes redundantes, como por ejemplo varias redes de transporte de FO, de forma que la calidad de la señal y la información no se ve degradada independientemente de las distancias.



Figura 2-41: Ejemplo de redundancia de antenas [10].

Por último, otra de las ventajas o, se podría decir también, condición necesaria para cumplir los requisitos anteriormente mencionados es la mejora en la seguridad. Al estar la señal y la información contenida en esta digitalizada, esta es agnóstica tanto a la hora de aplicar empaquetados de protocolos de comunicación existente, como ya se ha dicho, pero también lo es a la hora de aplicar capas de seguridad, tales como cifrado de los datos o implementación de infraestructura de seguridad tales como Firewalls (FW), VPNs entre orígenes y destinos o IPS, de forma que podamos preservar la

disponibilidad, confidencialidad e integridad del sistemas durante el transporte entre ubicaciones remotas, y asegurándonos de que los datos se descifran en destinos actuando los nodos como repetidores y encaminadores de la información. Además, gracias a no tener limitaciones entre ubicaciones, podemos separar los módulos de transmisión y recepción, las zonas de Baja Clasificación (BC) y de Alta Clasificación (AC) en ubicaciones distintas, y mejorando la seguridad física especialmente en las ubicaciones en las que se trata con información clasificada, limitando el personal que accede a los servidores y equipos que manejan este tipo de información.

En definitiva, el uso de IF Digital abre un nuevo concepto para el diseño e implementación de las estaciones terrenas en comunicaciones satélite, permitiendo eliminar las restricciones de ubicaciones y distancias e introducir nuevas capacidades de redundancia, virtualización, computación en la nube y seguridad tanto mediante el uso de nuevos equipos como aprovechando equipos e infraestructura ya existentes.

2.3.5 Retos de la transición

A pesar de los múltiples beneficios y ventajas que tiene el uso de IF Digital en sistemas de comunicaciones satélite en el segmento terreno, la implementación de estas nuevas tecnologías no es carentes también de ciertos inconvenientes y riesgos, que convierten su implementación y la transición hacia el dominio digital en un conjunto de retos que deben abordarse y sobre los que hay que adoptar medidas de mitigación para explotar correctamente las características de esta tecnología.

El primero de estos es la sincronización. La señal enviada desde la estación en tierra transmisora y que pasa por el satélite sufre durante todo el enlace y en la llegada a la estación en tierra receptora de cambios en la amplitud de la señal, cambios de fase, frecuencia y retardos de tiempo. La alineación entre transmisor y receptor es fundamental para asegurar que no se producen desviaciones a la hora de tomar decisiones en el receptor acerca de las distintas señales que le llegan, evitando errores de bit y disponer de un enlace que aprovecha de la mejor forma posible el ancho de banda disponible, así como de una tasa de BER dentro de los parámetros de diseño, especialmente en enlaces GEO donde los retardos son del orden de 500 ms. Además, el envío de paquetes en un formato estándar tiene como desventaja que estos llegan al receptor desordenados o la pérdida de paquetes especialmente en redes con congestión, lo cual es otro problema a tener en cuenta dado el retardo que introduce adicionalmente tras la digitalización de la señal RF y su salida por el DSP hacia los distintos usuarios o servidores su ordenación y la implementación de protocolos de detección y corrección de errores.

Podemos expresar la señal transmitida en banda base por la expresión [18]:

$$u(t) = \sum_n b[n]g_{tx}(t - nT)$$

siendo la señal en paso banda a la frecuencia de transmisión expresada como:

$$u_p(t) = \text{Re}(u(t)e^{j2\pi f_c t})$$

Esta señal pasa a través del canal (desde estación en tierra transmisora, satélite hasta estación en tierra receptora) siendo la expresión de la señal en recepción de la forma:

$$y_p(t) = Au_p(t - \tau) + n_p(t),$$

representando A el cambio en amplitud en recepción y τ el retardo, así como el ruido paso banda $n_p(t)$ todos desconocidos. El cambio de fase se representa dentro de la señal paso banda u_p como:

$$u_p(t - \tau) = \text{Re}(u(t - \tau)e^{j\theta}e^{j2\pi f_c t})$$

expresando θ como el valor desconocido de la distorsión de fase entre $[0, 2\pi]$.

Estos parámetros en recepción son agravados por atenuaciones producidas por condiciones meteorológicas, *multipaths* o variaciones orbitales.

Como se puede deducir, estas variaciones también afectan tanto en IF analógico como en IF digital. El problema respecto a IF Digital, es que, en el momento de digitalizar la señal en el ADC, podemos introducir retardos como *jitter* o *aliasing*, al no estar sincronizada la frecuencia de muestreo con la señal recibida. Análogamente, estos errores pueden concatenarse a la hora de extraer las componentes en fase y en cuadratura con el NCO, especialmente si utilizamos receptores coherentes donde la sensibilidad ante cambios de fase produce mayores derivas. Esto termina añadiendo más errores a la transmisión y a los bits que serán empaquetados posteriormente a la salida del DSP, a pesar del correcto filtrado paso bajo de la señal y del *downsampling* realizado. Como consecuencia, estos errores más los presentes en la red, como latencia en el empaquetado, congestión, retardo entre el encaminado de paquetes, hacen que los paquetes en destino no puedan ser reordenados y se alcance una tasa de errores en la información por encima del valor que podemos corregir o admisible por el sistema o el servicio que se esté utilizando.

Es fundamental mitigar estos problemas, por un lado, enviando una señal de referencia para la sincronización en una red TDMA o en redes FDMA con salto en frecuencia (*frequency-hopping*), actuando la estación en tierra como orquestador de todos los nodos de la red y detectando errores y colisiones. Por otro lado, en los receptores debemos generar tanto en los ADC y NCO señales de referencia de reloj, lo más precisas posibles, y alineadas con las del transmisor y con las frecuencias utilizadas en RF e IF digital, de forma que podamos detectar las variaciones de retardo, fase y frecuencia y corregirlas previo a la etapa de muestreo para evitar *aliasing* e *InterSymbol Interference* (ISI). Por otro lado, otras de las medidas a adoptar es introducir una señal de *timestamp* en los paquetes desde la infraestructura de red en los encabezados, de forma que podamos reordenarlos en destino en función del orden de salida del transmisor y en cada uno de los nodos que atraviesen de la red.

Por otro lado, otro de los retos para la implementación de IF Digital es el altísimo requerimiento de ancho de banda necesario para su implementación. Este incremento de ancho de banda es necesario tras la necesidad de tener que implementar las medidas a adoptar en la red para un correcto funcionamiento, incluido las mencionadas con el problema de la sincronización, entre las que destacan redundancia para detección de errores, disminución de la latencia, *timestamps* y congestión de las redes, aumentando considerablemente el tamaño de los paquetes a transmitir. Además, se aumenta alto ancho de banda requerido para no producir cuellos de botella tras la digitalización de señales a las frecuencias en la banda RF, debido a las altas tasas de frecuencia de muestreo (del orden de miles de millones de muestras por segundo, GS/s) y a las altas tasas de bits de resolución necesarios para la fase de cuantificación (del orden de 10 a 16 bits por muestra). Por el contrario, un enlace implementado con IF analógica tiene mucho menor requerimiento de ancho de banda, al no haber ni información adicional adherida a la señal, ni necesidad del aumento del ancho de banda para su digitalización temprana.

Esto tiene como consecuencia que la tasa de bps necesaria para un correcto funcionamiento de un enlace en IF Digital es del orden de 20 veces superior a su ancho de banda en Hz. A modo de ejemplo, una señal en RF con un ancho de banda de 40 MHz necesita una tasa de transmisión del orden de 800 Mbps, especialmente si tenemos la necesidad de enviar las señales digitalizadas a múltiples destinos. Por tanto, es esencial asegurarnos que nuestros enlaces de red de transporte soportan tasas del orden de Gbps a la hora de implementar una solución con un ancho de banda aceptable para comunicaciones RF satelitales en nuestras estaciones en tierra, del orden de 100Gbps para infraestructuras de core y de 10 Gbps para los distintos *branches*.

Por último, otro de los retos a superar al implementar tecnología con IF Digital es el del equipamiento legado ya en operación de las estaciones en tierra que utilicemos actualmente. Este equipamiento trabaja en IF analógica y, por norma general, no es realista cambiar todos los modem satélites en operación por unos en IF Digital, al menos si no es de forma progresiva, dado el alto impacto que supondría esto en la operatividad de los servicios actuales y el alto coste dentro de nuestra infraestructura.

Hay varias soluciones que podemos adoptar para que el equipamiento actual no quede obsoleto. Entre ellas, trasladar este equipamiento a la ubicación remota o CPD en el que alojemos nuestros nuevos modem que trabajen en IF Digital. Esto tiene como consecuencia que en el destino deberemos ser capaces de convertir nuevamente la señal a IF analógica, de forma que implementemos esa parte de la arquitectura analógica tradicional para que las entradas de los modem se correspondan con las mismas que tenían en las estaciones en tierra originales. De esta forma, podremos aprovechar el equipamiento sin necesidad de cambiar toda la infraestructura desde un primer momento. En cuanto a los nuevos sistemas que integremos en nuestras nuevas arquitecturas con IF Digital, deberemos integrarlos o bien en nuestro mismo CPD o bien estudiar la posibilidad de contratar servicios de terceros en la nube para albergar la capacidad de procesamiento de los enlaces satélite.

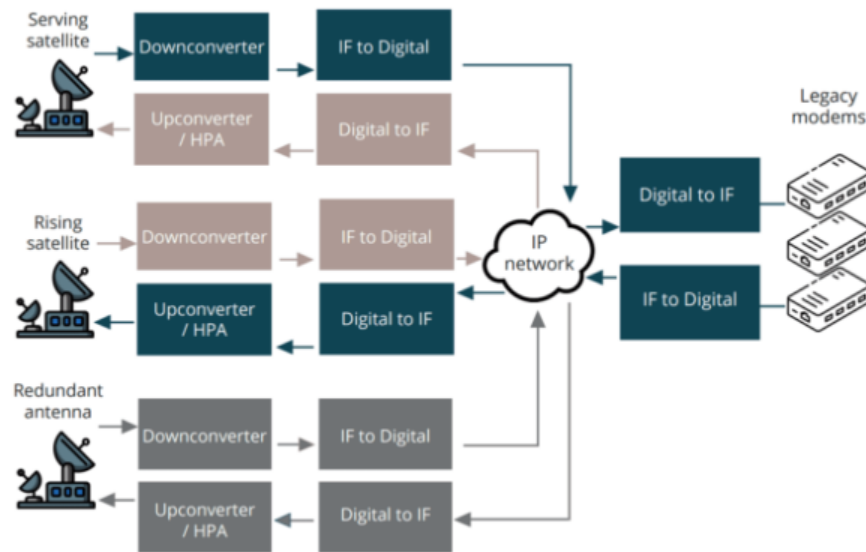


Figura 2-42: Ejemplo de arquitectura para equipos legados analógicos en redes de IF Digital [10].

La implementación de todas las medidas mencionadas anteriormente tienen como consecuencia también un aumento de costes, al menos inicialmente para poner en marcha estaciones en tierra que implementen IF Digital, dados los exigentes requerimientos de equipamiento en recepción para sincronización y ancho de banda, especialmente si ubicamos la estación en una zona geográfica que no esté cercana a una red de transporte en propiedad o de terceros, dado que será necesaria para transportar los paquetes hasta los equipos de procesamiento ubicados en localizaciones remotas. Si bien es cierto, tal y como se ha demostrado a lo largo de apartados anteriores, que una vez implementados los equipos y red los costes de mantenimiento y de personal se reducen significativamente respecto una red implementada con IF analógica.

2.3.6 Principales estándares de IF Digital.

A lo largo de los apartados anteriores de esta sección, se ha explicado las arquitecturas que implementan IF Digital, sus principales ventajas y los retos a superar para la implementación de estas arquitecturas en el segmento terreno satelital. Como se ha dicho, el principal objetivo de la implementación de esta digitalización es obtener un flujo de bits que podamos encapsular en las zonas de transmisión y recepción en un formato estándar, de forma que tengamos la flexibilidad de llevar ese flujo de bits a los equipos de procesamiento dondequiera que estén.

Existen en el mercado varios estándares que tienen como objetivo mejorar la estandarización de los productos que sacan al mercado los distintos fabricantes. En este apartado se enumerarán los principales, así como sus características y aplicaciones en el ámbito de la IF Digital.

En primer lugar, el principal estándar a destacar es el estándar ANSI/VITA 49, desarrollado por la VME International Trade Association (VITA). Explicaremos este estándar en detalle dado que es el cual en el que el estándar de interoperabilidad DIFI está basado. Éste tiene como objetivo principal establecer un formato estandarizado para el intercambio de datos RF digitales en sistemas de radio definida por software (SDR). Este estándar define estructuras de paquetes que incluyen metadatos, muestras de señal y control de flujo. En la arquitectura radio tradicional, existen múltiples bloques ADC y DAC que proveen los flujos de IF Digital en las SDR, requiriendo varios bloques en función del estándar utilizado y del proveedor para llevar la señal hasta los equipos de procesamiento, con distintos niveles de señal, tasa de datos, anchos de bits y protocolos. Esto dificulta enormemente la fiabilidad y el mantenimiento de la red, además de requerir la dependencia de ciertos fabricantes. Con el objetivo de solucionar estos problemas, se diseña este estándar de forma que se mejore la compatibilidad entre distribuidores, y pueda ser reutilizada la infraestructura HW para diferentes formas de onda y aplicaciones.

Con esta idea, se comenzó la transición hacia IF digital, manteniendo el módulo RF en una arquitectura tal y como la que se ha explicado en los capítulos anteriores de este documento. Por tanto, desde el módulo de recepción se envían ahora flujos de bits estandarizados a las ubicaciones remotas donde se encuentran los equipos de procesamiento.

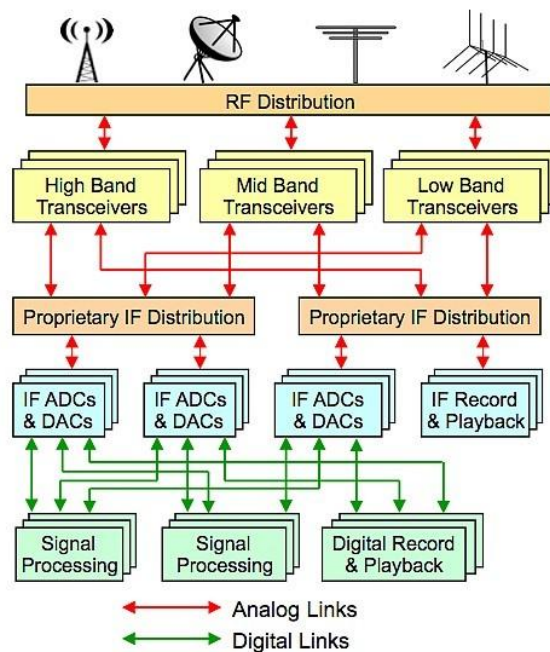


Figura 2-43: Arquitectura radio tradicional con múltiples protocolos [19].

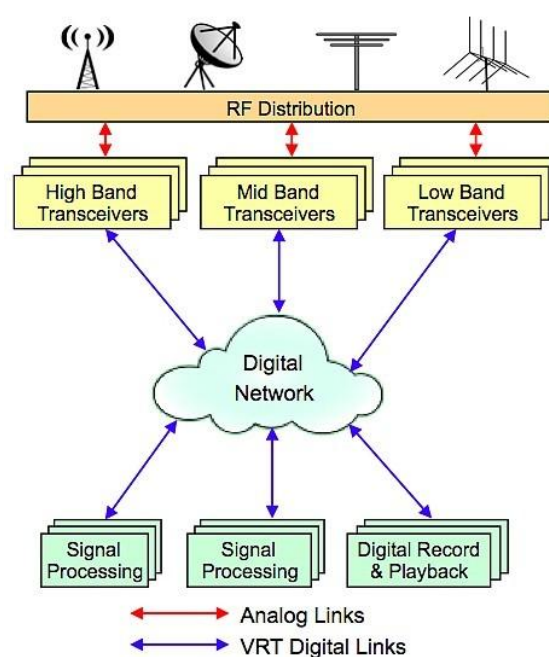


Figura 2-44: Arquitectura radio objetivo de estándar VITA [19].

Estos enlaces VRT se encaminan a través de conmutadores de red Commercial Of The Shelf (COTS) hacia los bloques de procesamiento de señal apropiados, proporcionando interconexiones flexibles capaces de adaptarse fácilmente ante cambios funcionales, actualizaciones y nuevas tecnologías. El protocolo VRT no especifica una capa física o de enlace (capas 2 y 3 de la pila de protocolos) específica, por lo que puede entregarse a través de prácticamente cualquier enlace que soporte un formato estandarizado de paquetes. Como se verá en los sucesivos capítulos de este documento, esta flexibilidad otorga diversas ventajas, pero también muchos inconvenientes que redundan en que, aunque el objetivo del estándar es que todos los fabricantes puedan interconectar sus sistemas, en la práctica esta flexibilidad termina por desestandarizar este protocolo, dando como resultado una alta probabilidad de que al conectar sistemas de distintos fabricantes no puedan comunicarse entre sí. Por tanto, un producto “VITA Compliance” no tiene que ser necesariamente compatible con otro, por lo que surge la necesidad de limitar esta flexibilidad dando lugar a nuevos estándares en los que se asegure que dos dispositivos

de distintos fabricantes puedan comunicarse entre sí sin configuraciones ni equipos adicionales. DIFI es este estándar que elimina esta flexibilidad, basándose en este estándar VITA 42.

En la siguiente figura se muestra la arquitectura utilizada en las radios implementadas con VITA, la cual resultará al lector familiar respecto a capítulos anteriores de este documento. En esta puede observarse el módulo RF analógico, la conversión mediante el ADC a IF Digital y por último, la salida del flujo de bits digitalizado hacia los equipos de procesamiento, la cual debe encapsularse en paquetes mediante un protocolo estándar para su envío el cual, como se ha dicho, se deja a elección en función de la aplicación del sistema, si bien es cierto que estos paquetes deben introducir campos conteniendo datos como el ID del flujo o *timestamps*, además de un formato estandarizado para los paquetes de datos IF VRT y los paquetes de Contexto (en la versión inicial del estándar 49.0). El receptor VRT realiza las operaciones inversas eliminando los encabezados y es capaz así de extraer la información. Otro de los módulos que llama la atención es el uso opcional del DDC, lo cual nos da más motivos para pensar que esta flexibilidad puede redundar en una falta de compatibilidad en última instancia en función de las decisiones que tome cada uno de los fabricantes durante el diseño de sus productos.

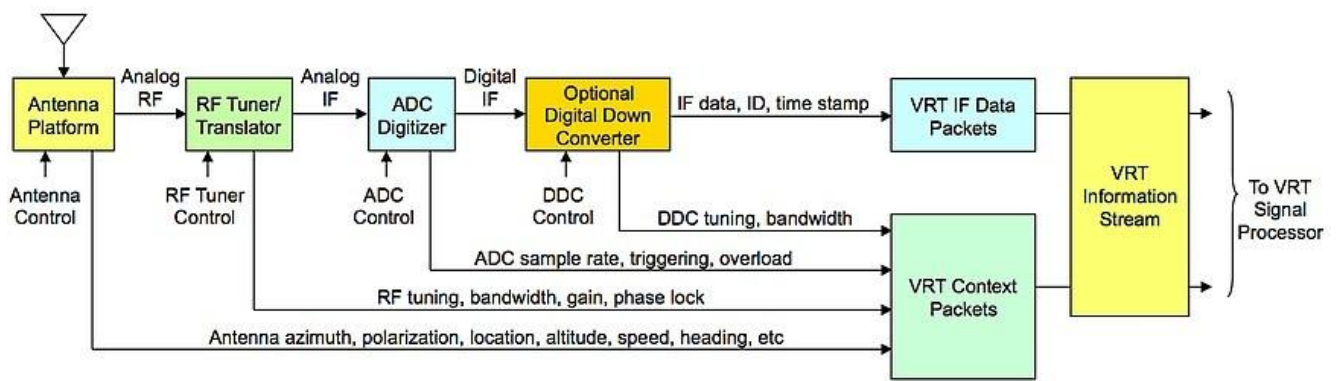


Figura 2-45: Arquitectura de radio utilizando formato VITA [20].

Son diversas las aplicaciones para las que se ha desarrollado este estándar. Entre ellas, entre las que destacan aplicaciones de Guerra Electrónica (EW) para reconocimiento de Señales de Inteligencia (SIGINT) e Inteligencia de Comunicaciones (COMINT), con el objetivo de identificar, localizar y monitorizar amplios rangos de señales y sistemas desconocidos y extraer sus principales características. Estas características incluyen azimut y elevación de una antena direccional, la potencia de la señal RF, ancho de banda y rangos del ADC (frecuencias de muestreo, rango dinámico del cuantificador) así como frecuencias de trabajo del DDC, *timestamps* o frecuencia de ciclos de reloj utilizados. Especialmente, la precisión respecto del *timestamp* puede darnos como resultado en las aplicaciones la obtención de la localización de las fuentes remotas, pudiendo maximizar los parámetros en recepción de nuestro sistema en una dirección en particular mediante el uso de *beamforming*. En sistemas de comunicaciones, y apoyándonos de las señales GPS, se utiliza en aplicaciones de *tracking* de señales satélite pudiendo sincronizar nuestros distintos receptores desplegados en zonas remotas para capturar señales de forma simultánea.

En el ámbito radar, ya sea de onda continua o pulsado, estático o multi-estático, el estándar VITA 49 es utilizado tanto para el transporte de la información procesada en radares de detección como para aplicaciones de Contramedidas Electromagnéticas (ECM).

Por último, otra de las aplicaciones en las que destaca el uso de este estándar es en el ámbito de las comunicaciones de radio SDR, proporcionando un protocolo estandarizado para compartir recursos de antenas en el módulo RF y procesamiento, reduciendo así el peso y la energía necesaria para alimentar los equipos del conjunto de la malla, y aumentando la eficiencia de los sistemas embarcados tanto a pie como en vehículos.

El estándar ANSI/VITA 49 fue aprobado en 2007, definiendo únicamente para el receptor el distinto encapsulamiento para los paquetes de Datos y los paquetes de Contexto. El problema en esta primera versión es que no se tuvo en cuenta parámetros del estándar para los transmisores, en cuanto a control y estado. Para subsanar esto, se desarrollaron varias versiones, entrando la 49.1 en vigor en 2011 e incluyendo mejoras como metadatos extendidos, corrección de redes y estandarización con distintas redes.

En 2017 (y su última actualización de 2020, en la que se añaden mejoras especialmente en el ámbito de la seguridad) entra en vigor la versión 49.2 en la que se definen los protocolos y operaciones de señal/espectro para su observación y las capacidades soportadas por los dispositivos RF. El objetivo una vez más era independizar el estándar respecto a cualquier fabricante o el tipo de equipo y su aplicación en cualquier tipo de arquitectura implementada. En definitiva, el objetivo del protocolo VRT es permitir que los sistemas RF migren de arquitecturas propietarias aisladas a arquitecturas multifuncionales interoperables.

Para conseguir sobreponerse a los inconvenientes de las versiones anteriores, se introdujeron en el espectro nuevo tipos de paquetes del estándar. El paquete de Datos IF original es reemplazado por el paquete de Datos de Señal, incluyendo datos de la señal en Banda Base, ancho de banda y datos espectrales, siendo compatible el nuevo estándar y formato de paquetes con las versiones anteriores

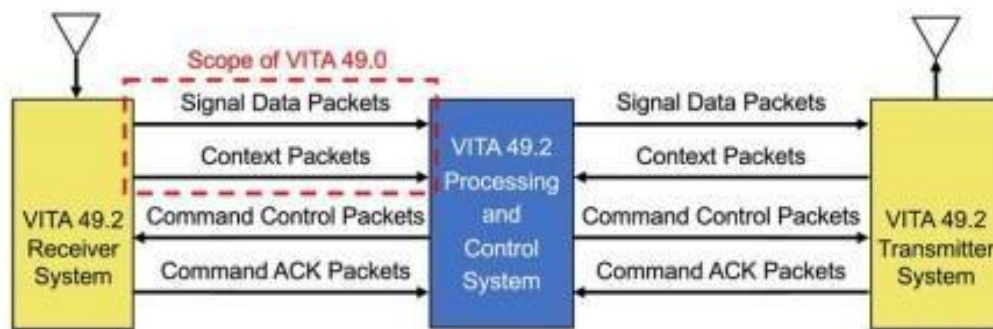


Figura 2-46: Nuevos tipos de paquetes introducidos en la versión 49.2 del estándar VITA [20].

De esta forma, la versión 49.2 asegura que en las distintas aplicaciones mencionadas anteriormente se transmite toda la información necesaria sin pérdida de datos para el correcto funcionamiento de los servicios.

Otra de las novedades son los paquetes de Control, los cuales tienen como objetivo que el Procesador VRT envía parámetros de operación a cada elemento de forma estandarizada, estableciendo una interfaz de control para distintos dispositivos unificada e unívoca, desde antenas de posicionamiento hasta amplificadores.

Por último, el paquete de Contexto de la versión anterior se mejoró en la versión 49.2, informando además de los parámetros operativos del sistema también de cualquier error o discrepancia que se produzca en éste. Esto permite a los usuarios de las aplicaciones mencionadas anteriormente disponer de un espectro completo del estado y control del sistema.

En general, cada paquete viene precedido de una cabecera que especifica parámetros como los distintos *timestamp* (TSI y TSF) así como el tipo de paquete (*Signal Data Packet*, *Context Packet* o *Command and Control Packet*):

Packet Header

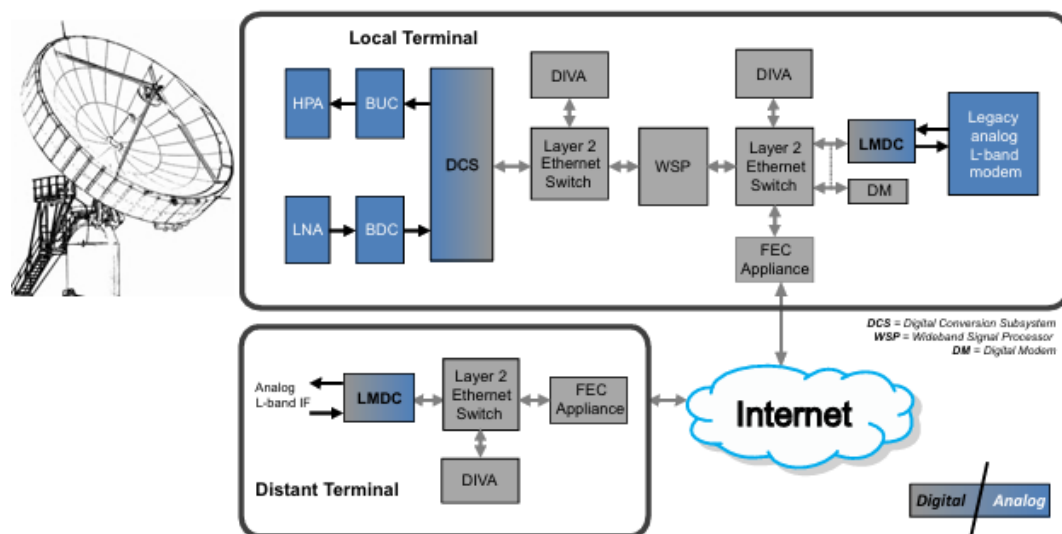
31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Packet Type				C	Indicators			TSI		TSF		Packet Count				Packet Size															

Figura 2-47: Formato de cabecera de paquetes en estándar VITA [21]

Existen otros estándares aparte de VITA 49 en el mercado. En concreto, nos centraremos en dos de los más utilizados en el ámbito de IF Digital: FAST Open Standard Digital IF (OSDI) ANSI/TIA-5041 y evolved Common Public Radio Interface (eCPRI).

El estándar FAST OSDI ANSI/TIA-5041 está enfocado en la transmisión de los paquetes digitalizados de IF digital bajo diversos transportes, especialmente redes ethernet o fibra óptica, estandarizando todos los interfaces para la compatibilidad de los sistemas y la extracción de la información de IF Digital en los distintos destinos en los modem. Incluye especificaciones para formatos de paquetes, sincronización de tiempo y control de flujo, lo que facilita la transmisión de señales IF digitales con baja latencia y alta fiabilidad. Además, incluye funcionalidades para corrección de errores y de seguridad, mejorando la disponibilidad, confidencialidad e integridad de la información.

En la siguiente figura se muestra a modo de ejemplo una arquitectura implementada con este estándar:

**Figura 2-48: Arquitectura con estándar FAST OSDI [22].**

La arquitectura eCPRI es otro de los estándares a detallar en este documento y cuyo objetivo es estandarizar el intercambio de datos en comunicaciones RF utilizando IF Digital a través de distintos transportes, siendo las principales estaciones en tierra (aunque podría implementarse también en el caso de comunicaciones satélite) RF o FO. Desarrollado por un consorcio de empresas, incluyendo Ericsson, Huawei y Nokia, está enfocado en estandarizar un interfaz digital para transportar la información muestreada y digitalizada desde los equipos de radio (RE) y de control (REC) mediante su procesamiento digital. Este estándar se centra, inicialmente, para ser implementado en redes 4G (CPRI). No obstante, el desarrollo de redes 5G y la necesidad de disponer de un mayor ancho de banda, así como la mejora de la interoperabilidad de sistemas (incluyendo y un uso de redes IP y Ethernet), más eficiencia en el uso de los recursos dieron lugar a una evolución del estándar en la última versión actual, eCPRI 2.0. Esta versión es compatible con la anterior, utilizando Internetworking Function (IWF) como pasarela entre ambas.

Al igual que el resto de estándares, eCPRI define también cómo deben encapsularse los datos en paquetes en función del tipo de mensaje a transmitir, los cuales pueden ser transportados a través de diferentes protocolos de comunicación en las capas de enlace y red de la pila, así como el resto de características que debe cumplir la red para el correcto intercambio de información. Esto incluye un acceso al medio TDMA, la secuencia de transmisión de paquetes que debe seguirse, con tasas de envío del orden de Gbps, sincronización en tiempo entre transmisores y receptores, máxima latencia soportada por la red, control de pérdida de paquetes y precisión en el ancho de banda.

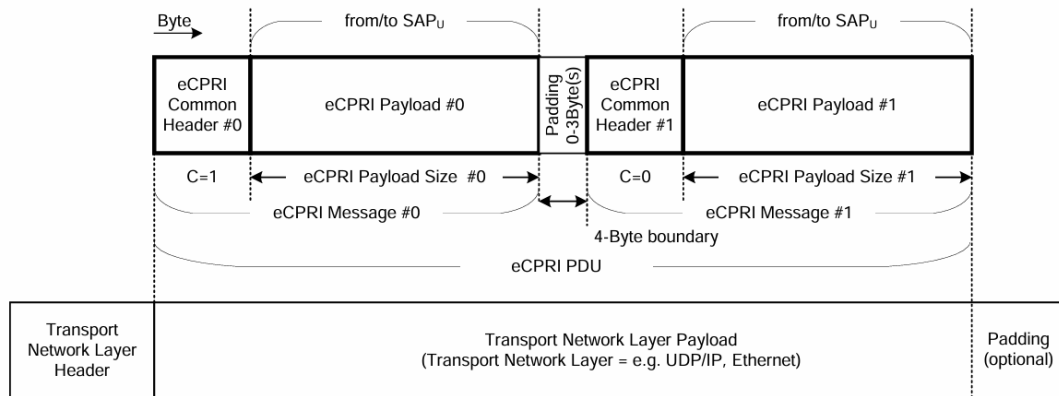


Figura 2-49: Encapsulado de paquetes eCPRI sobre pila de protocolos de red estándar [23].

En la siguiente figura se muestra a modo de ejemplo de implementación de arquitectura mediante el estándar eCPRI, en el que se integran módulos IWF de forma que las estaciones CPRI pueden interoperar con el nuevo estándar desde los Puntos de Acceso al Servicio (SAPs):

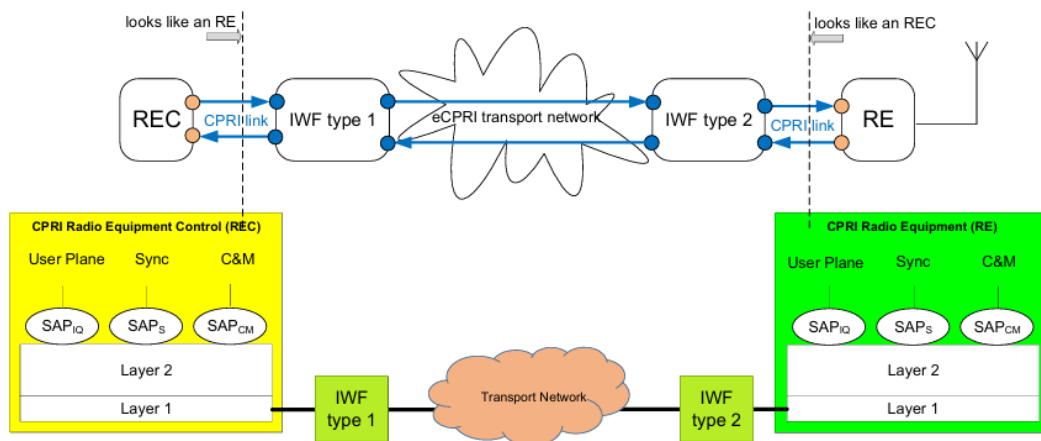


Figura 2-50: Arquitectura eCPRI con nodos CPRI [23].

No obstante, a pesar de que el espíritu con el que se crearon los estándares especificados en este apartado, fueron con el objetivo de intercambiar datos empaquetados provenientes de señales IF digitalizadas en comunicaciones RF de forma agnóstica al fabricante utilizado durante los diseños e implementaciones de las arquitecturas, el uso de estos sigue sin ser 100% compatible. Estos problemas vienen generados por los diferentes protocolos e interfaces que estos permiten utilizar, lo cual complica su integración debiendo finalmente tener que hacer soluciones ad-hoc personalizadas a pesar de utilizar COTS en las implementaciones y arquitecturas a desplegar.

Respecto VITA 49, su gran flexibilidad hace que se acentúe aún más esta falta de compatibilidad entre dispositivos de distintos fabricantes, por errores causados especialmente durante la sincronización o el procesamiento de paquetes en recepción, al no integrarse perfectamente dispositivos de varios fabricantes con protocolos de red como IP o Ethernet. Además, los equipos “legacy” analógicos son tremendamente

complicados de integrar con este estándar. Esto afecta a equipos de la infraestructura de IF Digital como el DDC o el DSP, teniendo una vez más que hacer una solución personalizada para cada implementación de la red con este estándar en lugar de disponer de una interoperabilidad completa sin necesidad de adaptaciones extra en las arquitecturas.

De forma similar con el estándar FAST OSDI, dado que está especializado para redes de FO, limita enormemente la escalabilidad con otros protocolos de red, teniendo problemas al igual que en el caso anterior para la sincronización entre transmisor y receptor y durante el procesamiento de los datos en la etapa de IF Digital, aumentando la tasa de errores y teniendo, una vez más, que buscar soluciones personalizadas para cada arquitectura en la que se implementa este protocolo.

En el caso eCPRI nos enfrentamos a problemas similares, dado que está limitada su compatibilidad en redes híbridas (por ejemplo, FO + radio) generando variaciones en la sincronización, aumentando la tasa de errores y dificultando el procesamiento digital en tiempo real. Por tanto, este estándar sigue necesitando, al igual que con los estándares anteriores, implementar cambios sobre el estándar para personalizar la solución en la arquitectura que implementemos. Además, sus limitaciones en cuanto a latencia hacen que su implementación para comunicaciones satelitales sea un reto más a afrontar en su implementación.

En conclusión, estos problemas de interoperabilidad resaltan la necesidad de pruebas exhaustivas, soluciones personalizadas para cada diseño e implementación de los sistemas llevados a cabo, así como herramientas complementarias. De estas deficiencias surge la necesidad de disponer de un protocolo estándar que aborde éstas y encuentre como solución un estándar que mejore la interoperabilidad de los sistemas independientemente del fabricante y de quien sea el integrador que diseñe la solución.

En el siguiente capítulo de este TFM se estudiará si el consorcio Digital Intermediate Frequency Interoperability (DIFI) satisface estos requerimientos.

3 CONSORCIO DIFI Y SU ESTÁNDAR

En esta sección del TFM se definirán en detalle el origen del desarrollo e implementación del consorcio de Digital Intermediate Frequency Interoperability (DIFI), así como sus principales características en la formación de paquetes y los requisitos que deben cumplir los sistemas y los transportes de telecomunicación asociados para una correcta interoperabilidad entre estos.

En los apartados anteriores, se ha contextualizado el *background* previo a la necesidad de desarrollar este estándar, y se han definido las arquitecturas de IF analógicas y digitales, poniendo especial hincapié en las ventajas de utilizar una digitalización en las señales RF en comunicaciones satélite para abordar las necesidades de flexibilidad y requerimientos de procesamiento futuros en las estaciones de anclaje satélite.

También se han mencionado otros estándares y las deficiencias encontradas en estos especialmente al tratar de interoperar entre componentes de distintos fabricantes. El consorcio DIFI surge para tratar de eliminar estas deficiencias, basado en el estándar VITA 49, siendo el objetivo de esta sección demostrar por qué es preferible su uso frente al resto y cómo mejora la Interoperabilidad de los sistemas durante todo su ciclo de vida respecto a éstos.

3.1 Origen y objetivos

El consorcio DIFI surge bajo el paraguas de la IEEE Industry Standards and Technology Organization (ISTO) 2019, una federación internacional de grupos y consorcios líderes del sector tecnológico dedicados al avance de tecnologías estandarizadas en beneficio de la industria. Así, con el principal objetivo de cubrir la necesidad de disponer de un estándar abierto y transparente para sistemas de comunicaciones en RF de forma que este sea directamente desarrollado y adoptado por usuarios, fabricantes e integradores de la forma más amplia y estandarizada posible, y tratando en todo momento de ser lo más eficiente posible en términos de complejidad técnica respecto al coste de su implementación en los distintos sistemas de comunicaciones, surge la iniciativa para crear este consorcio.

La necesidad de disponer de un estándar extendido para el mayor número de usuarios y compañías posible viene dada por la transformación digital que se está llevando a cabo en el segmento espacial, en el que las estaciones en tierra se han convertido en un cuello de botella debido al uso de la IF analógica que limita su flexibilidad, escalabilidad, ahorro de costes y resiliencia de los sistemas en comunicaciones satélite. En el anterior capítulo de este TFM se abordaron estas limitaciones en detalle, así como los beneficios de disponer de una digitalización de la banda IF en este tipo de sistemas de telecomunicación. Recordemos que la dependencia de disponer de líneas de transmisión basadas en IF analógica que comunican las antenas y los módulos de RF con los distintos módems era una de estas limitaciones, no

permitiendo separar estos dos segmentos y aumentando los costes en HW y tareas de mantenimiento de los sistemas.



Figura 3-1: Logo del consorcio DIFI [24].

A día de hoy, la industria satélite está alineada en el objetivo de digitalizar toda la infraestructura del segmento terreno, incluyendo esta digitalización en la IF que se explicó en detalle también en el capítulo anterior. De esta forma, la cadena de bits resultante de la digitalización pueda ser procesada y encapsulada en un estándar unificado para todos los usuarios y fabricantes, la cual no está siendo en la actualidad llevado a cabo como una interoperabilidad real al depender de soluciones distintas entre fabricantes con los estándares como VITA 49, lo cual limita enormemente las implementaciones prácticas de esta estandarización y la transformación digital del segmento terreno satelital. No obstante, el estándar VITA 49 es el más ampliamente aceptado y utilizado en la industria a pesar de sus deficiencias en cuanto a interoperabilidad, por lo que se decidió basarse en este estándar a la hora de implementar el estándar DIFI corrigiendo estas deficiencias explicadas anteriormente, y tratando de que sea lo más ampliamente difundido por toda la industria y usuarios de las comunicaciones satélite en el segmento terreno.

Otros estándares explicados en este TFM en el que podía estar basado el estándar DIFI como eCPRI fueron desechados a pesar de ser similares, principalmente al estar basados para cubrir las necesidades en el ámbito de las comunicaciones 4G/5G, mientras que el estándar VITA 49 se adapta mejor a los requerimientos de las comunicaciones satelitales. Por otro lado, el estándar FAST OSDI ha sido menos utilizado y aceptado por la industria, por lo que, respecto a este, se decidió también optar por el estándar VITA 49.

El propio consorcio invita a involucrarse en este proyecto a cualquiera que considere oportuno dentro de la industria, ayudando a definir requisitos o incorporar DIFI en sus distintos proyectos de forma que pueda dar *feedback* sobre la implementación de este estándar o sobre las herramientas ya existentes que integran esta solución. De esta forma, se crea una comunidad formada por empresas y entidades gubernamentales dentro del consorcio en el que todas las partes que lo integran están alineadas en la misma dirección y en el que las soluciones satisfacen a todas las partes siendo las más ampliamente utilizadas, aumentando la probabilidad de alcanzar el objetivo de la interoperabilidad total en el ámbito de la transformación digital del segmento terrestre, y solucionando también los problemas inherentes a la estandarización del *vendor lock-in* y las economías de escala. Para facilitar aún más esta integración, el consorcio proporciona un proceso de certificación en el que se facilitan las herramientas para la validación de los sistemas desarrollados, así como simplificando el proceso para que sea lo más ágil posible.

La estructura del consorcio se basa por un lado en un equipo directivo formado por representantes de cada compañía seleccionados por elección, los cuales son los encargados de aprobar los cambios el estándar y en el consorcio, así como de dirigir los procesos de certificación. Por otro lado, debajo en la estructura están los Grupos de Trabajo (GT), divididos entre GT Estándar y GT de certificación. El primero de los GT es el encargado de sugerir, evaluar y realizar recomendaciones de cambios o mejoras sobre el estándar a la dirección, y está formado por al menos un miembro de cada compañía o entidad gubernamental que forma parte del consorcio. El GT de certificación es el encargado de desarrollar y mantener el SW de certificación, así como los distintos procesos para llevar a cabo para las implementaciones dentro del estándar tanto de miembros propios del consorcio como de terceros, y está

también formado por al menos un miembro de cada compañía o entidad gubernamental que forma parte del consorcio. Por último, en la estructura se sitúan los usuarios de la industria espacial no miembros del consorcio, los cuales tienen a su disposición las herramientas y las especificaciones para la certificación de sus productos, y son autorizados una vez certificados a utilizar y divulgar la compatibilidad de éstos con el estándar DIFI.

Por tanto, el resumen de los objetivos del consorcio DIFI se resumen en alcanzar un estándar para IF Digital que sea equivalente al que existe actualmente para IF analógica, logrando esto a través de un estándar evolucionado del VITA 49 que facilite el intercambio de datos digitalizados desde la banda RF que sea lo más fácil posible de adoptar e implementar para la industria. Para ello, se fomenta la participación y certificación publicando toda la documentación y herramientas de forma gratuita, estableciendo unos procesos y requisitos claros para cualquiera interesado en la integración del estándar, de forma que se trata de reducir las barreras de entrada en el consorcio lo máximo posible. Esta interoperabilidad se alcanza también resolviendo desafíos como la sincronización y el procesamiento en los módulos digitales al proporcionar un marco (*framework*) estandarizado que integra todos los componentes de los sistemas dentro del paraguas del estándar difundido por el consorcio.

La consecución de estos objetivos impactará positivamente de gran forma tanto en el segmento terrestre satelital como en el segmento espacial, ya que ésta facilitará también el desarrollo e integración en la infraestructura de la nueva generación de satélites definidos por SW, los cuales podrán reconfigurar su SW en tiempo real para manejar las variaciones sobre los parámetros de comunicación con las estaciones en tierra. Además, el impacto de sustituir las líneas de transmisión actuales, como cables coaxiales y guías de onda, difíciles de instalar y cuyas limitaciones ya se han expuesto en este TFM, hará que las señales digitales puedan ser transportadas sobre redes IP estándar lo cual elimina las limitaciones de distancia sin pérdidas de la calidad de la información contenida en la señal. En los siguientes apartados se concretarán en mayor detalle como mejora esto la flexibilidad, escalabilidad, redundancia y resiliencia de los segmentos terreno, separando los equipos de procesamiento respecto de la antena y el módulo RF, así como pudiendo virtualizar estos equipos y abriendo la posibilidad del uso de la computación en nube pública o privada, siempre pudiendo interoperar distintos sistemas de distintos fabricantes sin necesidad de realizar soluciones personalizadas para cada caso de uso.

3.2 Relación con IEEE-ISTO Std 4900-2021

El *IEEE Industry Standards and Technology Organization* (IEEE-ISTO) proporciona a distintos consorcios industriales y asociaciones comerciales actuales un apoyo jurídico y operativo llave en mano. Esto es posible gracias a que poseen una infraestructura jurídica para las organizaciones incipientes y proporciona una gestión operativa basada en buenas prácticas. Como federación internacional de programas miembros, su misión es facilitar el ciclo de vida del desarrollo y certificación de estándares industriales a través de distintos servicios que incluyen apoyo al inicio del desarrollo del negocio, guía estratégica, asesoría legal y apoyo a la operación.



Figura 3-2: Logo de IEEE-ISTO [25].

Por tanto, IEEE-ISTO proporciona al consorcio DIFI un paraguas legal y certifica los estándares para el intercambio de paquetes de IF digital, dando una mayor visibilidad al consorcio y asegurando la neutralidad entre las distintas compañías y asociaciones gubernamentales que lo forman en beneficio de su objetivo estratégico, reduciendo además las complejidades para su implementación. Esto hace que DIFI sea más escalable, permitiendo a consorcios similares aprovechar sus recursos y facilitar la innovación.

Además, el desarrollo de los estándares DIFI bajo este paraguas, permite a este alinearse con otros estándares, como es el caso de VITA 49, asegurando que proporciona un *framework* sobre esta normativa que asegura la interoperabilidad independientemente de quién sea el desarrollador, integrador o fabricante del sistema. El respaldo de IEEE-ISTO a DIFI le permite a este consorcio delegar tareas administrativas, asegurando que el estándar sea mantenido de manera eficiente y neutral. Esto incluye la simplificación de procesos como la certificación de dispositivos compatibles, lo que facilita la adopción al hacer que DIFI sea un estándar de acceso gratuito y fácil de implementar.

En concreto, el consorcio DIFI se apoya en el IEE-ISTO en tareas estratégicas de la organización (estructura legal, seguros, contabilidad, pago de tasas, desarrollo de página web...) y en operaciones del día a día (asignación de jefes de proyecto, mantenimiento de sitio web y seguimiento de proyectos), así como proveyendo de la experiencia contrastada a toda la organización y al desarrollo del estándar 4900-2021. Por otro lado, el grupo VITA también da soporte al desarrollo de este estándar alineándose con los objetivos del consorcio DIFI además de permitir el uso de toda su información para el desarrollo del estándar DIFI de forma legal.

Así, Como resultado de esta colaboración entre el consorcio DIFI y el IEEE-ISTO surgen las diferentes versiones del estándar IEE-ISTO 4900-2021. La primera versión se desarrolla en agosto de 2021, estableciendo los primeros requisitos de las interfaces del plano de datos DIFI, es decir, el formato en el que los datos son empaquetados para transmitir los datos de IF digitalizados y sus correspondientes metadatos asociados a través de redes IP estándar. Esta interfaz, como se ha dicho, es compatible (con algunas variaciones) con el estándar VITA 49.2 y el formato de paquetes está basado en éste.

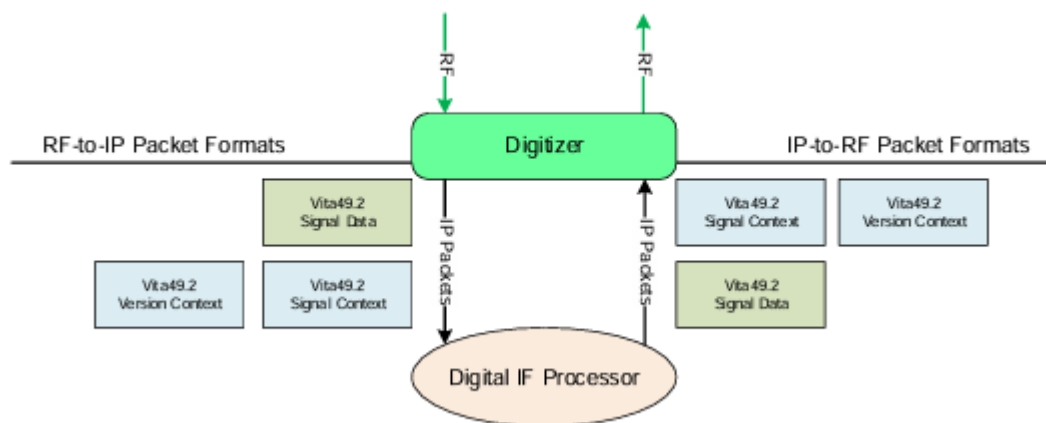


Figura 3-3: Formato inicial del plano de datos en la versión 1.0 del IEEE-ISTO 4900-2021 [26].

A partir de aquí, el IEEE-ISTO en colaboración con el consorcio ha ido actualizando el estándar a lo largo de sucesivas versiones, hasta llegar a la versión actual de julio de 2025. En la versión lanzada en agosto de 2022 (1.1), en la que su principal añadido es la inclusión de IPv6 en el estándar para el direccionamiento de red de los paquetes estandarizados, así como aclaraciones dentro del protocolo UDP. Posteriormente, se lanza la versión 1.2 en agosto de 2023, en la cual se reestructura el documento y se definen las principales desviaciones entre este estándar y el estándar VITA 49.2. Además, se añaden nuevas clases dentro de los paquetes de información y nuevas clases de paquetes, surgidos de la necesidad respecto las versiones anteriores en los respectivos Grupos de Trabajo para contextualizar elementos que no se habían tenido en cuenta. Por último, en esta segunda versión se añaden apéndices en los que se especifican casos de uso DIFI y un breve manual en el que se enumeran recomendaciones y buenas prácticas. Como se puede observar, entre la primera y la segunda versión se lleva a cabo una gran evolución, la mayor entre versiones, en un periodo de tan solo un año en el que se demuestra que la simplicidad y facilidades a la hora de implementar este estándar por parte de los usuarios y miembros del consorcio es una realidad. Esta segunda versión se actualiza en febrero de 2025, casi dos años después, con cambios menores en los que se refina el documento y se solucionan algunas erratas,

introduciendo en los apéndices lecciones aprendidas y actualizando esto según la evolución del estándar a lo largo de este periodo.

Por último, se lanza la versión 1.3, en vigor actualmente, en el que sus principales novedades es la introducción de la información de la capacidad del enlace en los paquetes, así como nuevas clases de paquetes y de tipos de información a encapsular, al igual que se hizo entre las versiones 1.1 y 1.2, de forma que se cubren necesidades de intercambio de datos dentro del estándar que surgen a lo largo de su uso.

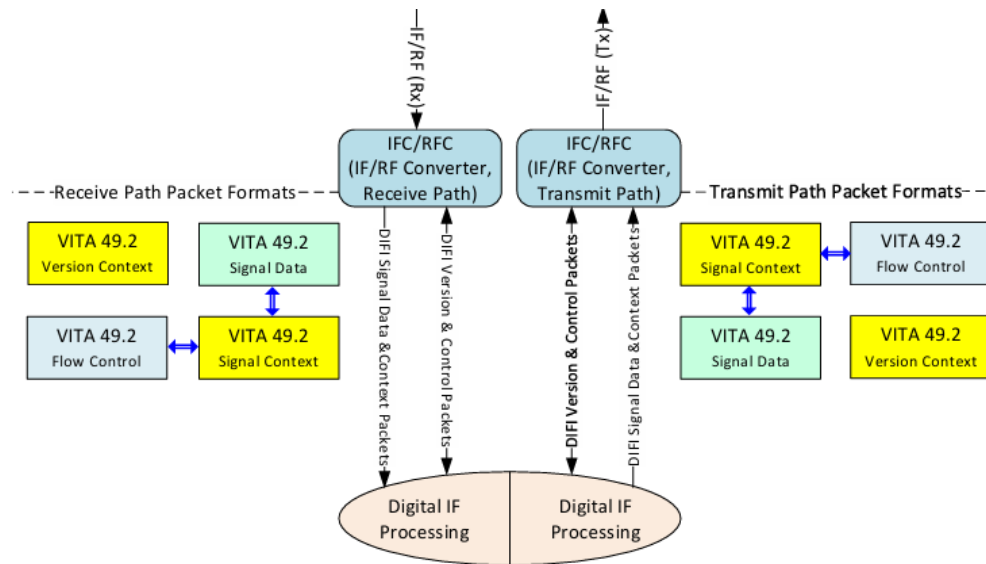


Figura 3-4: Evolución del formato de paquetes en el plano de datos en la versión 1.3 del estándar IEEE-ISTO 4900-2021 [27].

A lo largo de las siguientes secciones se especifican en mayor detalle las características que engloban este estándar de interoperabilidad, los tipos de paquetes y el encapsulado de cada uno para el intercambio de datos de IF Digital.

3.3 Principales características

Como se ha dicho en este apartado del TFM, el estándar DIFI tiene como objetivo alcanzar la interoperabilidad para las señales en IF Digital encapsulando esta información en paquetes en un formato común que puedan ser transmitidos a través de cualquier transporte a ubicaciones remotas hacia los equipos de procesamiento, y desde ahí hasta los distintos usuarios o servidores que generan, consumen y almacenan, en caso de ser necesario, la información. El esquema general de alto nivel para una arquitectura DIFI utilizada en el segmento terreno satelital es el siguiente:

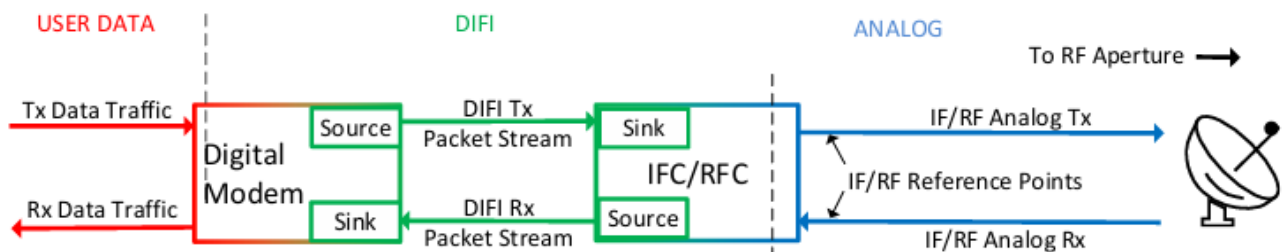


Figura 3-5: Arquitectura de alto nivel para estaciones terrenas utilizando DIFI [27].

El estándar define dos flujos de datos independientes para el intercambio de paquetes: por un lado, el plano RF/IF a IP (recepción) y por otro de IP a RF/IF (transmisión). Para soportar aplicaciones en formato DIFI, se utiliza la siguiente pila de protocolos, dividido en los siguientes tipos de paquetes:

- Paquetes de Contexto (*Context Packets*): paquetes de 150 bytes que definen los parámetros fundamentales de la señal IF Digital (frecuencia, ancho de banda, periodo de muestreo...).
- Paquetes de Señalización de Datos (*Signal Data Packets*): portan los datos de las componentes en fase y en cuadratura (I/Q) y sus correspondientes *payloads*. Tiene una longitud variable entre 64 y 9000 bytes.
- Paquetes de Comandos (*Command y Acknowledge Packets*): utilizados para el control y la configuración del sistema, incluida la sincronización.

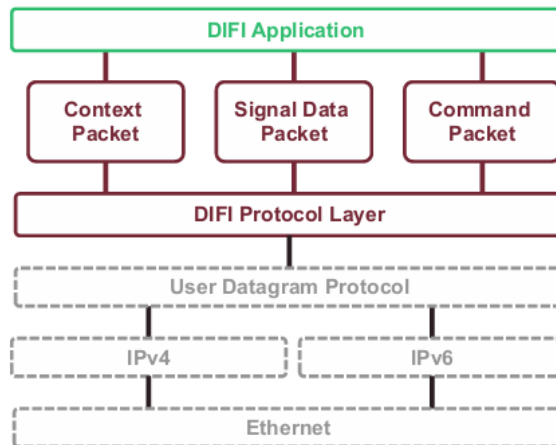


Figura 3-6: Pila de protocolos DIFI [27].

Como puede observarse, esta pila está diseñada para utilizar el protocolo User Datagram Protocol (UDP) en capa 4 de transporte, Internet Protocol (IP) v4 o v6 para capa 3 de red y protocolo Ethernet 802.3 para la capa 2 de enlace. Recordemos que la capa 1 será la capa física que transmita la información entre un origen y un destino, ambos *DIFI compliance*.

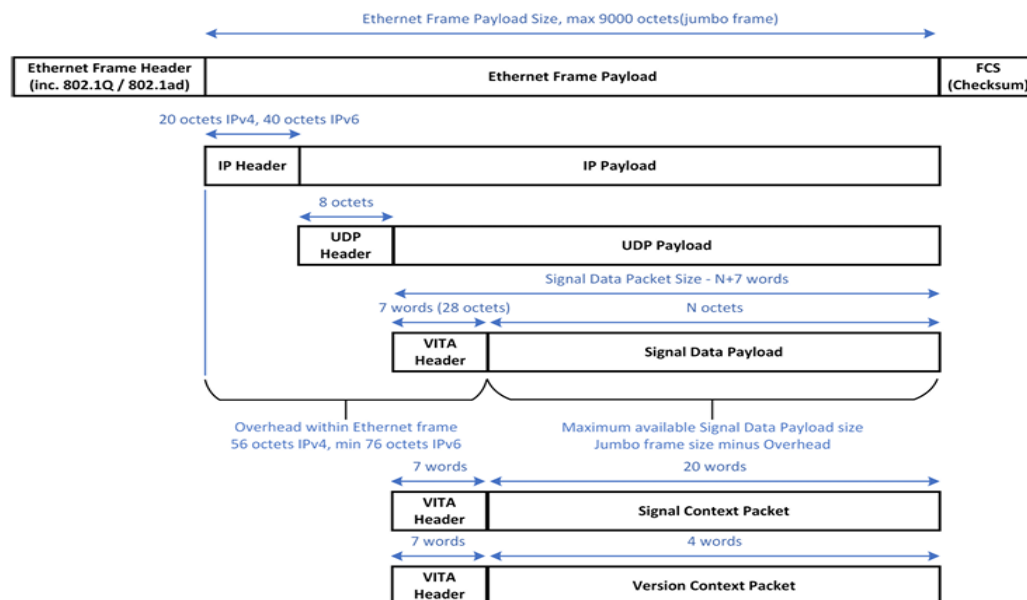


Figura 3-7: Formato de paquetes DIFI con cabeceras IP, UDP, VITA o Ethernet [27].

El protocolo UDP proporciona un servicio de entrega no fiable (sin garantía de entrega, sin garantía de ordenamiento de paquetes y sin control del ratio de mensajes por unidad de tiempo que hay entre dos *hosts*), sin conexión y *best-effort* para transportar mensajes IP entre máquinas. Este añade la capacidad de distinguir entre múltiples orígenes y destinos dentro de un mismo *host* [28]. Por tanto, tiene la ventaja de ser un protocolo rápido y eficiente y que añade poco requerimiento de ancho de banda para su implementación, necesario en el caso de comunicaciones satélite dada la alta latencia que puede darse

entre origen y destino, a la cual hay que sumar aparte de la distancia el tiempo requerido por los equipos de procesamiento. Para mitigar estas deficiencias, el propio estándar DIFI incluye en sus metadatos *checksums*, códigos de corrección de errores, *timestamps* y secuencias de paquetes para su reordenamiento, así como protocolos para facilitar el reenvío de paquetes en caso de que se detecte que se han perdido dentro de la cadena, ya sea por acumulación de errores detectados en recepción como por la congestión de la red. Esto permite solucionar las deficiencias del protocolo UDP y entregar al DDC y DSP en recepción una cadena digitalizada que permita la reconstrucción de la señal RF, mejorando la fiabilidad en los entornos degradados de comunicaciones satelitales.

La cabecera UDP es ligera y está formada por el puerto de origen y destino, la longitud del mensaje y el *checksum* (requerido para IPv6 y recomendable en IPv4 en el caso del estándar DIFI). El objetivo de este campo es el de comprobar en destino que los datos han llegado intactos, es decir, es un código de detección (no corrección) de errores. El *payload DATA* de la siguiente figura debe contener en el estándar DIFI alguno de sus tipos de paquete, ya sea de Contexto, Control o Datos.

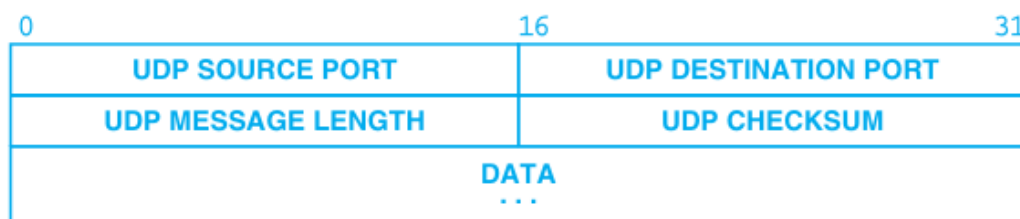


Figura 3-8: Cabecera del protocolo de capa de transporte UDP [28].

Respecto a Internet Protocol (IP) es el protocolo principal de la capa de red, encargado de dar direccionamiento con el objetivo de encaminar y entregar paquetes de datos entre *hosts* ubicados en distintas redes. Para ello, maneja direccionamiento, encaminamiento y fragmentación de los paquetes que transitan estas redes.

En primer lugar, IP define la unidad básica de transferencia de datos utilizada en toda una red. Por lo tanto, especifica el formato exacto de los paquetes utilizados por todos los datos a medida que estos pasan por Internet. En segundo lugar, el software IP realiza la función de reenvío, eligiendo la ruta por la que se enviará un paquete. Las normas especifican cómo se realiza el reenvío. En tercer lugar, además de la especificación precisa y formal de los formatos de datos y el reenvío, el IP incluye un conjunto de reglas que constituyen la base de la entrega no fiable. Las reglas caracterizan cómo deben procesar los paquetes los *hosts* y los routers, cómo y cuándo deben generarse los mensajes de error y las condiciones en las que se pueden descartar los paquetes.

Este protocolo es fundamental en el estándar DIFI y permite que los segmentos antena y RF se comuniquen con los equipos de procesamiento mediante el encaminamiento a través de los distintos transportes físicos. DIFI permite direcciones IPv4 (32 bits) o IPv6 (128 bits). La dirección de origen debe ser la misma para los paquetes de Contexto y de Datos.

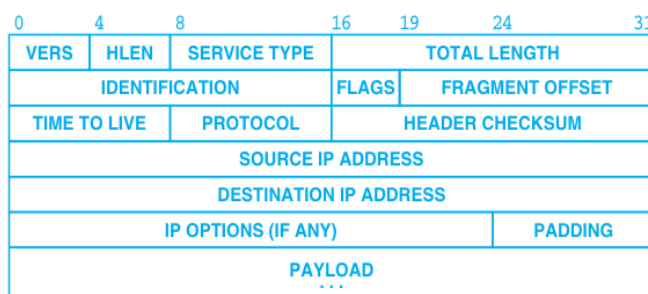


Figura 3-9: Datagrama básico en formato IPv4 [28].

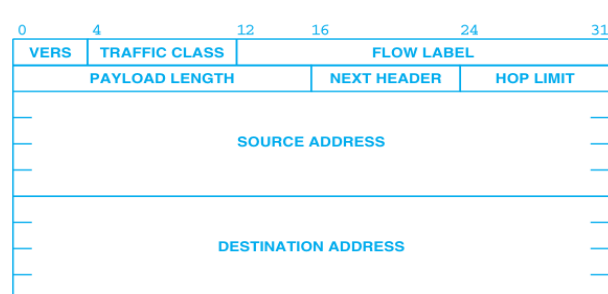


Figura 3-10: Datagrama básico en formato IPv6 [28].

Por tanto, la capa IP es la responsable de transferir los paquetes DIFI entre dos *hosts* a lo largo de la red mientras que la capa UDP es la responsable de diferenciar entre múltiples fuentes y destinos dentro de un mismo *host*.

Respecto al protocolo Ethernet 802.3, es el estándar utilizado por DIFI el cual se utiliza para redes LAN cableadas, transmitiendo los datos a través del medio físico por cables como par trenzado o fibra óptica, incluyendo redes virtuales VLAN con los protocolos en los encabezados 802.1Q y 802.1ad. Este tiene la ventaja de adaptar la capacidad de la comunicación a la máxima tasa de bits permitida entre dos extremos, soportando tasas de hasta 10 Gbps en el caso del par trenzado y del orden de 100 Gbps en el caso de fibra óptica. Además, incluye códigos de detección de errores *Cycling Redundancy Check* (CRC) y control de acceso al medio, manejando direcciones de origen y destino MAC de 48 bits, por lo que un *endpoint* basado en el estándar DIFI debe tener, al menos, una dirección MAC válida para el correcto funcionamiento del sistema. Este protocolo, unido a los dos anteriores para las capas de red y transporte proporcionan al estándar DIFI una base robusta y completamente interoperable con la mayor parte de las redes implementadas actualmente.

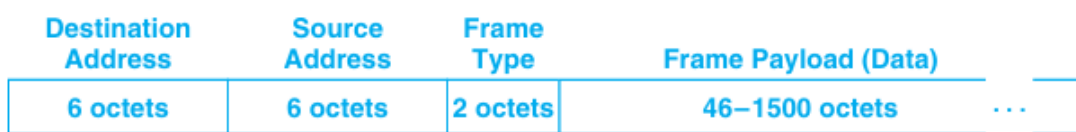


Figura 3-11: Formato de paquete Ethernet [28].



Figura 3-12: Formato de paquete Ethernet VLAN [28].

En el estándar DIFI, la estructura que agrupa conjuntos de distintos tipos de paquetes se denomina Clases de Información (*Information Classes*). Un único flujo (*Stream*) en concreto formado por una Clase de Información se denomina así Flujo de Información (*Information Stream*), y puede contener distintos paquetes de distintas fuentes agrupados todos en un único Identificador (ID) desde un sistema hasta otro, estandarizados con la pila de protocolos y formato de paquetes explicados anteriormente. Cada caso de uso dentro del estándar configura sus propias Clases de Información de forma que agrupa los datos y los elementos con las herramientas que provee el estándar, englobando alguno de las Clases de Paquetes, o bien varios o todos ellos, y cuyo conjunto de datos proveen los metadatos necesarios para comprender el contenido global del flujo.

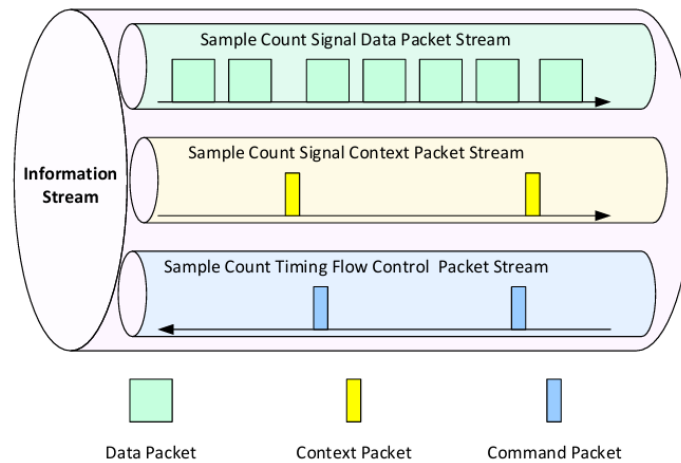


Figura 3-13: Ejemplo de flujo de información que engloba los 3 tipos de paquetes del estándar [27].

Además de los tipos de paquetes contenidos en una Clase de Información, se deben especificar otros detalles sobre estos dentro de cada Flujo de Información enviado, tales como el código de la Clase de Información, el propósito de éste, los nombres de cada flujo de paquetes que contiene, así como también el propósito de estos, los tipos de paquetes y el detalle de cada uno de estos, puntos de referencia y, por último, las asociaciones entre los flujos de paquetes de cada tipo. Por supuesto, los tipos de Clase de Información están estandarizados dentro de un conjunto, cada uno con un propósito dentro de cada caso de uso, definiendo el estándar el valor que debe tener cada uno de los parámetros anteriores para su configuración. En la siguiente tabla se hace un resumen de los distintos tipos disponibles:

<i>Information Class</i>	<i>Descripción</i>	<i>Propósito</i>
0x0000	<i>Basic Data Plane</i>	Clase estándar para transportar los datos de la señal y sus correspondientes metadatos
0x0001	<i>Version Flow</i>	Para transportar información de la versión de DIFI utilizada o información de <i>timestamp</i> desde un destino de información hacia el origen
0x0002	<i>Data Plane + Upstream Flow Control</i>	Utilizado para sincronizar el periodo de muestreo y el <i>timestamp</i> más allá de lo provisto en la clase 0x0000 entre destino y origen
0x0003	<i>Data Plane + Upstream Flow Control Real Time TSF</i>	Idem que 0x0002 pero utilizando tiempo real (picosegundos) en lugar de cuenta de ciclos de muestras.
0x0004	<i>Basic Data Plane Sample Count TSF</i>	Idem que 0x0000 pero utilizando tiempo real (picosegundos) en lugar de cuenta de ciclos de muestras.
0x0005	<i>Data Plane + Downstream Flow Control, Sample Count</i>	Para transportar información de sincronización y <i>timestamp</i> más allá de la provista por la clase 0x0001
0x0006	<i>Data Plane + Downstream Flow Control, Real Time TSF</i>	Idem que 0x0005 pero utilizando tiempo real (picosegundos) en lugar de cuenta de ciclos de muestras

0x01XX (0x0100, 0x0102, 0x0103, 0x0104, 0x0105, 0x0106)	<i>Classes using Lnk Establishment Query And Response</i>	Se utilizan en paralelo a las Clases 0x00XX añadiendo los paquetes de establecimiento del enlace. Sus principales funciones incluyen la comunicación de las capacidades desde destino a origen, caracterización del retardo/ <i>jitter</i> del enlace y notificación de errores/ <i>warnings</i>
0x0101	<i>Link Stablished Query and Response</i>	Para proveer la información de destino a origen de las capacidades del enlace en los casos que no utilicen las clases anteriores 0x01XX

Tabla 3-1: Resumen de Clases de Información disponibles en DIFI

Como se ha especificado, las Clases de Información contienen Clases de Paquetes. Las Clases de Paquetes (*Packet Classes*) definen la estructura y la función de un conjunto de paquetes que pertenecen a los tipos de paquetes del estándar (Datos, Contexto o Comando, estos últimos incluyen a su vez dos tipos). Un Flujo de Paquetes (*Packet Stream*) es una secuencia de paquetes para un determinado propósito descrito en la Clase de Información que lo incorpora e identificado por un único ID. En la siguiente tabla se muestran las distintas Clases de Paquetes en función del tipo de paquete asociado:

Código del Tipo de Paquete	Descripción	Código de Clase de Paquete	Descripción de la Clase de Paquete
0x1	Paquete de Datos con ID	0x0000	Flujo estándar de señal de Datos
		0x0002	Contador de muestras de la señal de Datos
0x4	Paquete de Contexto con ID	0x0001	Flujo estándar de la señal de Contexto
		0x0003	Contador de muestras de la señal de Contexto
		0x0004	Flujo de versiones de la señal de Contexto
0x6	Paquete de Comandos con ID	0x0005	Sincronizador del contador de muestras del flujo de Control
		0x0006	Sincronizador de tiempo real TSF del flujo de Control
0x7	Paquete de Comandos extendido con ID	0x0007	Consulta de capacidad de destino de Control
		0x0008	Respuesta de capacidad de destino de ACK
		0x0009	Informe de estado de Control

Tabla 3-2: Clases y Tipos de Paquetes en estándar DIFI [27].

Todos los paquetes en el estándar DIFI contienen un prólogo, prácticamente idéntico independientemente del tipo de paquete, y una carga de pago, la cual varía significativamente en función de los paquetes de Datos, Contexto o Comando.

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	Word #	
Packet Type				1	0	0	0	TSI		TSF		Packet Count				Packet Size (Number of Words)																1	Packet Header
Stream Identifier																																2	Stream Identifier
Pad Bit Count				0	0	0	24-Bit DIFI Organizationally Unique Identifier (0x6A621E)																									3	Class Identifier
Information Class																Packet Class																4	
Integer Second Timestamp																																5	Integer Second Timestamp
Fractional Second Timestamp																																6	Fractional Second Timestamp
Payload																																7	
																																8	
																																:	
																																N	

Tabla 3-3: Estructura de los paquetes DIFI [27].

El prólogo de cada paquete contiene las cabeceras (*Packet Header*), y una serie más de campos en los que se incluyen: Identificador de flujo al que corresponde el paquete (*Stream Identifier*), Identificador de la clase a la que pertenece (*Class Identifier*), y los *timestamps*, que se componen de la parte entera, expresado en valores UTC, POSIX o GPS; y fraccional, expresado en picosegundos (*Integer Second Timestamp* e *Fractional Second Timestamp*). Estos valores varían en función del Tipo de Paquete y las especificaciones de su Clase.

El *Stream Identifier* (SID) es un campo obligatorio que tiene varias funciones relevantes en el estándar, entre las que destacan indicar que secuencia de paquetes corresponde un tipo de paquete concreto, asociar los paquetes de Contexto y Comando a los paquetes de Datos y, por último, estar definido en una ubicación que actúa como punto en el que se toma el valor de referencia del *timestamp*. Como norma general, la localización del SID debe colocarse en el punto en el que se realiza el muestreo, en el caso de situarnos en el lado de la recepción de la señal RF recibida, e ir hacia el módulo ADC, ya sea utilizando una etapa IF analógica intermedia o digitalizando hacia IF Digital directamente desde la banda RF analógica. En el caso de querer transmitir una señal hacia el módulo RF y encontrarnos previo al DAC, el SID debe situarse en el punto en el que se consumen las muestras (previo a la interpolación de la señal) y, análogamente al caso anterior, independientemente si tras la reconstrucción de la señal esta reconstrucción es realizada en IF analógica, previo al LO para realizar el *upconversion* a RF o directamente la salida del DAC es en RF analógica. Las siguientes figuras muestran el punto en el que debe situarse el SID en todos estos casos:

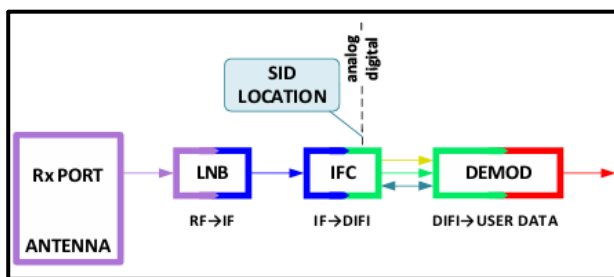


Figura 3-14: Localización del SID en recepción con IF analógica [27].

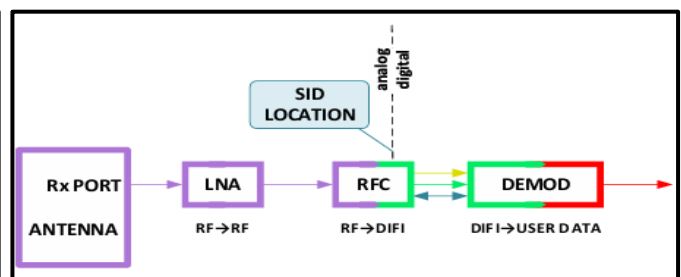


Figura 3-15: Localización del SID en recepción sin IF analógica [27].

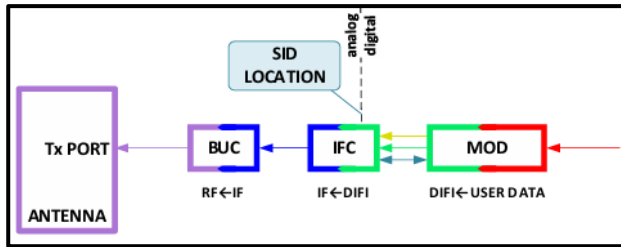


Figura 3-16: Localización del SID en transmisión con IF analógica [27].

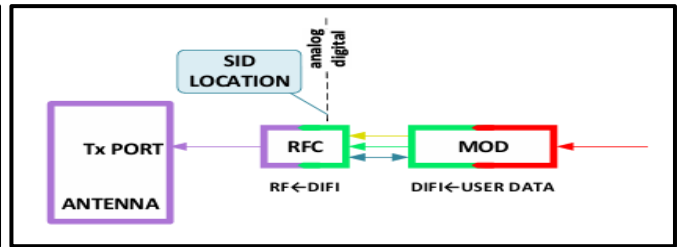


Figura 3-17: Localización del SID en transmisión sin IF analógica [27].

Conocido que cada paquete DIFI tiene un prólogo en común, a continuación, se explican las principales diferencias entre los *payload* de cada tipo de paquete, habiendo variaciones significativas entre estos.

En primer lugar, para los paquetes de Datos, los cuales recordemos tienen como función transportar los datos de la señal RF (o IF) analógica tanto en transmisión como recepción en I/Q. Cada par de muestras consiste en una muestra en fase I seguido de una muestra en cuadratura Q. El tamaño de la muestra es especificado previamente en el *payload* del paquete (siendo el tamaño un valor dado entre 4 y 16 bits), y no se agregan bits de *padding* intermedios, sino al final para completar palabras de 32 bits. El formato de los paquetes de Datos es el siguiente, teniendo en común la cabecera descrita anteriormente para todos los paquetes DIFI independientemente de su formato. Los datos de esta cabecera variarán en función del tipo de paquete que describe, en este caso, de Datos:

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	Word #
0	0	0	1	1	0	0	0	TSI	TSF	Seq Num	Packet Size = N+7 words																1					
Stream Identifier (assigned at run time)																																2
0	0	0	0	0	0	0	0	24-Bit DIFI CID (0x6A621E)																3								
Information Class Code																Packet Class Code																4
Integer Timestamp (per TSI field)																																5
Fractional Timestamp (per TSF field)																																6
																																7
																																8

Figura 3-18: Formato de paquete de Datos en el estándar DIFI [27].

Por otro lado, los paquetes de Contexto proveen los metadatos que permiten interpretar los datos encapsulados en el *payload* de los paquetes de Datos. En el caso de que estos metadatos cambien por parte de la fuente de origen DIFI, también lo harán sus paquetes de Contexto correspondientes, debiendo iniciarse un nuevo flujo de paquetes cuyo *timestamp* del paquete de Contexto corresponderá con los paquetes de Datos enviados tras el cambio. En el caso de los metadatos que deben expresar una parte entera y una parte decimal, se utiliza el *Radix Point*, el cual se coloca en un bit imaginario fijo dentro del campo, interpretando los bits a su izquierda como la parte entera y los bits a su derecha como la parte decimal.

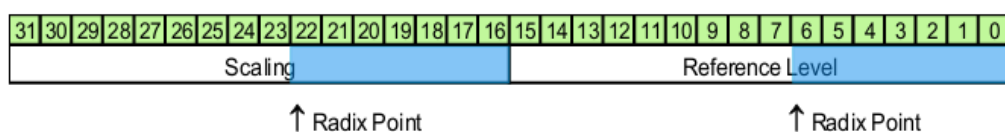


Figura 3-19: Uso del *Radix Point* para separar parte entera y decimal.

Los paquetes de contexto transportan diversos metadatos esenciales para que el receptor pueda interpretar las muestras recibidas en los paquetes de Datos. Los más relevantes son, por un lado, el *timestamp* para la sincronización, obteniendo el modo en el campo *Timestamp Mode*. El campo *Context Indicator Field* provee la información de que características están representadas en ese paquete, y si ha habido cambio, y en caso de haberlos cuales han sido estos y a qué parámetros del paquete afectan respecto al anterior paquete de Contexto enviado.

Además, los paquetes de contexto especifican el punto de referencia (*Reference Point Field*) desde donde se toman los datos, ya sea la referencia IF/RF para transmisión o recepción o la alimentación de la antenna. Estas localizaciones son distintas a las del SID, y además de referencias IF/RF, se toman otros puntos de referencia para ajustes de *timestamps* y niveles de señal. Estos campos son obligatorios en el estándar DIFI y se referencian mediante códigos hexadecimales:

Punto de Referencia	Código
IF analógica (en caso de haberla)	0x0064 (100)
RF analógica	0x004B (75)
Alimentación de la antena	0x0019 (25)
Interfaz de la antena (en caso de no utilizarse la Alimentación de la antena)	0x000F (15)

Tabla 3-4: Códigos para los puntos de referencia en DIFI

En la siguiente figura se muestra a modo de ejemplo el punto de referencia para un sistema que utiliza IF analógica y alimentación de la antena:

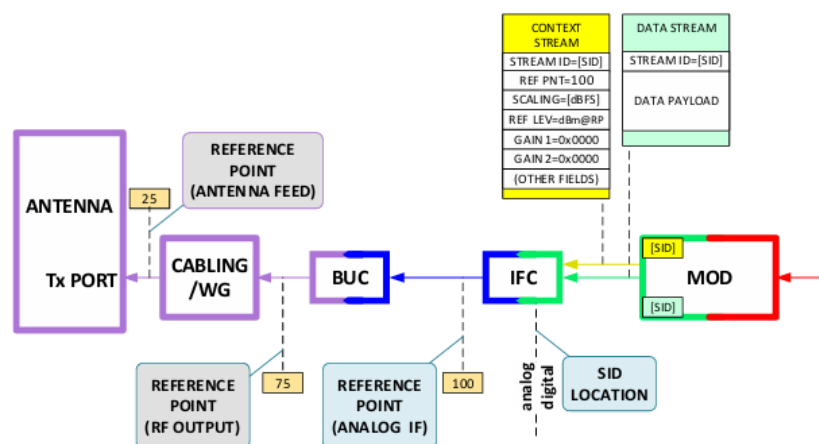


Figura 3-20: Representación de los puntos de referencia 25, 75 y 100 [27].

Y en la siguiente figura se muestra un ejemplo utilizando los puntos de referencia 15 y 75, al no aplicar el resto de referencias en el diseño del sistema dado que no utiliza IF analógica ni punto de alimentación de la antena concreto al utilizar un array antenas electrónicas:

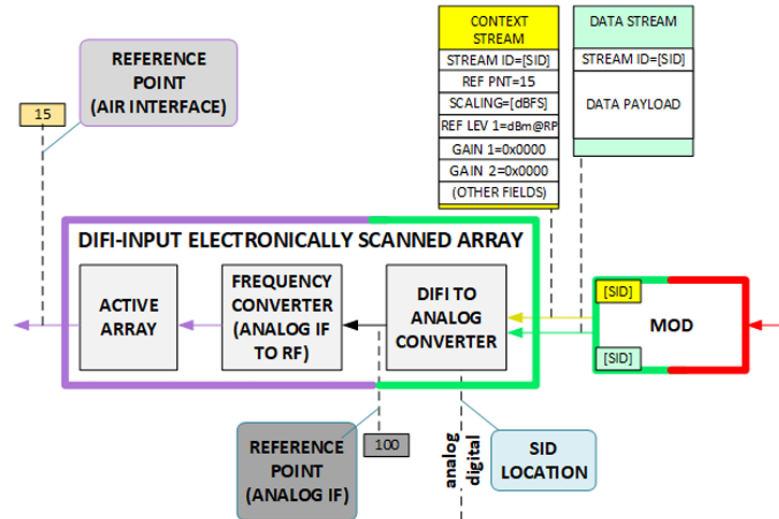


Figura 3-21: Representación de los puntos de referencia 15 y 75 [27].

Por otro lado, otros de los parámetros que se especifica es el ancho de banda (*Bandwidth*), así como la frecuencia de referencia, ya sea IF si se está utilizando IF analógica previo a la conversión a digital (*IF Reference Frequency*) o, en caso de digitalizarse directamente desde la banda RF, este campo estaría a cero y se utilizaría la frecuencia de referencia RF (*RF Reference Frequency*). Además, se especifica el rango de amplitud de la señal analógica (*Reference Level*) así como el tamaño de las muestras (*Scaling Level*, entre 4 y 16 bits). El resto de los elementos son parámetros de referencia de ajuste de sincronización y *timestamps*, además de un campo especificando el formato de *payload*. En el caso de DIFI, este campo es fijo dado que no se permite flexibilidad como en el estándar VITA a la hora de cambiar el formato a uno distinto a las muestras de la señal en fase y cuadratura.

En la siguiente figura se muestra el formato de los paquetes de Contexto en DIFI.

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	Word#
0	1	0	0	1	0	0	TSM	TSI	TSF	Seq Num						Packet Size = 27 words														1		
Stream Identifier (assigned at run time)																														2		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24-Bit DIFI CID (0x6A621E)																	3					
Information Class Code										Packet Class Code																		4				
Integer Seconds Timestamp (per TSI field)																														5		
Fractional Timestamp (per TSF field)																														6		
Context Indicator Field (0xFB898000 -> context change or 0x7BB98000 -> no change)																														7		
Reference Point																														8		
Bandwidth																														9		
IF Reference Frequency																														10		
RF Reference Frequency																														11		
IF Band Offset																														12		
Scaling										Reference Level																		13				
Gain 2										Gain 1																		14				
Sample Rate																														15		
Timestamp Adjustment																														16		
Timestamp Calibration Time																														17		
State and Event Indicators																														18		
Data Packet Payload Format																														19		
																														20		
																														21		
																														22		
																														23		
																														24		
																														25		
																														26		
																														27		

Figura 3-22: Formato de paquete de Contexto en el estándar DIFI [27].

Por último, los paquetes de Comandos son los encargados de transportar la información de control, estado de los sistemas y el enlace durante el intercambio de datos en el estándar DIFI, además de proveer la sincronización de los relojes entre orígenes y destinos. En el caso de los paquetes de Comandos, su

[illegible]

Figura 3-24: Códigos de error notificados en los paquetes de *Status Report control Packet* en DIFI [27].

Por último, el estándar DIFI estipula un protocolo, en forma de máquina de estados, en el que se especifica cómo se establece el enlace entre dos dispositivos DIFI, intercambiando entre estos los datos de capacidades y quién asume el rol de maestro y de esclavo. Estos roles deben configurarse como parámetros de diseño, especificando cuál de los sistemas DIFI asume cada uno, independientemente de su identificador ID, de forma que pueda automatizarse este protocolo previo y durante el inicio del intercambio de los datos estandarizados, así como el manejo de errores y la caída/activación de los enlaces durante estos, dado que se asume que no todos los sistemas conectados a una misma red DIFI tienen las mismas capacidades. De esta forma, la transmisión entre orígenes y destinos se ajusta a las capacidades de cada uno (especialmente, los más limitantes en cuanto a parámetros de transmisión como el ancho de banda), pudiendo así establecer dinámicamente el reparto de capacidades y mejorando la eficiencia y flexibilidad de la red.

De esta forma, un nodo DIFI puede encontrarse en varios estados: reposo en primer lugar, pasando a notificar sus capacidades cuando un maestro se lo solicite, y de ahí al estado de activo en el momento en el que se intercambien los datos de capacidad del enlace. En el caso de detectar un error en los paquetes de Contexto, el estado del enlace cambia al de error, pudiendo caerse el enlace si no se notifica correctamente el error o si el destino no recibe paquetes más allá del tiempo asumido establecido (parámetro *Link Active Timeout*), y de ahí volviendo al punto de partida de reposo hasta una nueva solicitud de capacidades del enlace por parte de un nodo maestro. De esta forma, con una sencilla máquina de estados, podemos configurar y prever como se va a comportar nuestro sistema de una forma estandarizada.

En esta sección se han especificado las principales características del estándar DIFI. Se puede observar que, desde el diseño de las arquitecturas que implementan dispositivos DIFI, la pila de protocolos en todas las capas, así como la estructuras de las Clases y cada uno de los paquetes que se envían y el protocolo de establecimiento de enlaces entre nodos, se define perfectamente un estándar en el que cumpliendo los requisitos podemos interoperar con distintos sistemas, intercambiando datos en IF/RF Digitales entre distintas ubicaciones de forma agnóstica al fabricante o integrador que haya diseñado el sistema. La disponibilidad del estándar en abierto, así como el estar bajo el paraguas de una entidad neutral como el IEEE-ISTO son catalizadores de esta interoperabilidad, permitiendo a cualquiera implementar y validar, como se verá en las posteriores secciones, los parámetros del estándar en sus implementaciones.

3.4 Certificación y adopción industrial

Como se ha dicho, la certificación del estándar DIFI está diseñada de la forma que sea más sencillo, intuitivo, y con unos pasos a seguir y pruebas claras para la integración y certificación de nuevos sistemas como DIFI *compliance* por parte de cualquier entidad que se asocie al consorcio. Este proceso de certificación comienza con test que las entidades deben realizar por su cuenta con herramientas facilitadas por el consorcio, de forma que la propia entidad sea capaz de identificar en qué estado se encuentra su producto y si este está listo para lanzar al mercado y solicitar la certificación DIFI *compliance*. Una vez la entidad encuentra su producto suficientemente maduro a través de estas pruebas, las características de su sistema, así como los resultados de las pruebas son enviados al Grupo de Trabajo de Certificación, en el cual se validan que los resultados entran dentro de los parámetros aceptables y que el sistema está listo para su certificación como DIFI *compliance*.

Además, esta certificación puede realizarse a través de entidades que hayan sido acreditadas por parte del consorcio como certificadoras, de forma que agiliza aún más este proceso y elimina posibles cuellos de botella al no depender únicamente del Grupo de Trabajo oficial para validar los resultados obtenidos.

El proceso de certificación está limitado al propio sistema DIFI en sí, no estando dentro del alcance de la certificación las validaciones dentro de una red en concreto. No obstante, el consorcio comparte consejos y recomendaciones de cómo afrontar los distintos retos que suelen darse dentro de la implementación de los sistemas DIFI en cada tipo de red, también recomendando productos a integrar que solucionan estos problemas. Si entra dentro del alcance de la certificación los posibles test que se hagan dentro de un sistema virtualizado desplegado en la nube, al igual forma que un sistema desplegado en un CPD físico.

Las herramientas facilitadas por el consorcio incluyen un validador desarrollado en Python DIFI, el cual genera paquetes estandarizados de Datos y Contexto para la comprobación del correcto procesamiento en los sistemas a desplegar, compartido en abierto por la empresa Kratos. También incluye la herramienta *gr-difi*, la cual permite a los usuarios comunicarse con dispositivos DIFI realizando la transmisión y recepción de paquetes de datos en un entorno de radio GNU, la cual permite crear y simular sistemas de comunicaciones de Radio Definida por Software, compartida por parte de Microsoft en abierto. Por último, la herramienta DIFI *Wireshark Disector* permite una solución personalizada sobre la herramienta *Wireshark* para analizar los distintos paquetes a lo largo de la red en formato DIFI, creado por la desarrolladora Johanna Rivera. Todas estas herramientas están disponibles en abierto, y en un repositorio de *github* que engloba todas ellas para la implementación de las pruebas en el entorno que se desee por parte de los integradores que quieran iniciar el proceso de certificación sobre los distintos desarrollos de sistemas DIFI.

Por último, la herramienta DIFI *plus SigMF* está también a disposición para realizar grabaciones de transferencia de datos, así como compartir estas y analizarlas posteriormente con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de los intercambios de datos sobre los sistemas.

Los test que son necesarios superar para asegurar la certificación por parte de las distintas entidades son varios, debiendo tener todos ellos unos parámetros objetivos que validen que se cumplen todos los parámetros del estándar durante el intercambio de los datos digitalizados entre componentes. A modo de ejemplo, se muestran algunos test con los parámetros a verificar por los fabricantes.

Los primeros test englobarían la comprobación de la calidad de los datos digitalizados desde RF hasta la banda de IF digital en el ADC, siguiendo un esquema de componentes en el que utilizemos un generador de señales en la banda RF, nuestro sistema DIFI a certificar y un SW para el análisis de los parámetros en el espectro de la señal, similar al siguiente:

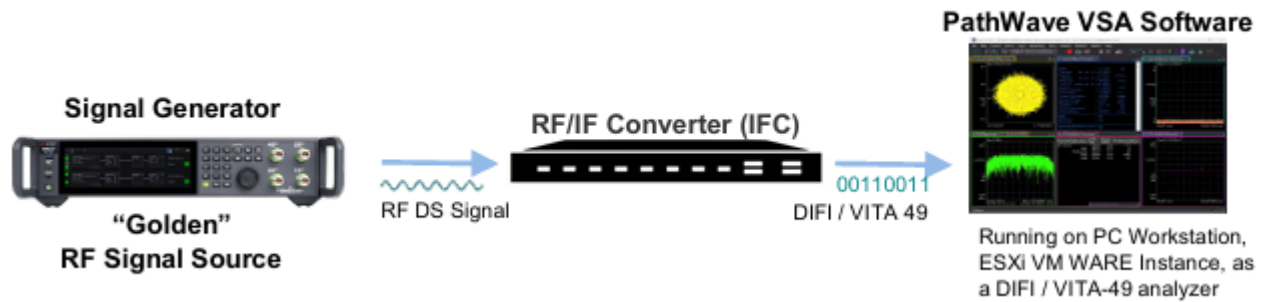


Figura 3-25: Ejemplo de configuración de test de certificación 1 [29].

Este test mide en el dominio de la IF Digital parámetros como la variación de frecuencia (en las muestras dentro de los paquetes en fase y cuadratura), el ruido de fase, los niveles de potencia a la salida del dispositivo, así como los niveles de ruido, señales espurias y armónicos. También se debe medir la Magnitud del Vector de Error (EVM) así como la integridad de la señal a la salida del dispositivo DIFI en el dominio del tiempo.

De forma análoga, podemos realizar tests en el sentido contrario, es decir, para comprobar el correcto funcionamiento desde el dominio digital al analógico en nuestro sistema. Para estos test, podemos utilizar un generador de paquetes DIFI, convirtiendo estos mediante nuestro dispositivo DIFI de nuevo al dominio de la RF, y utilizando un analizador de espectros para comprobar la correcta conversión, con un esquema similar al mostrado a continuación:

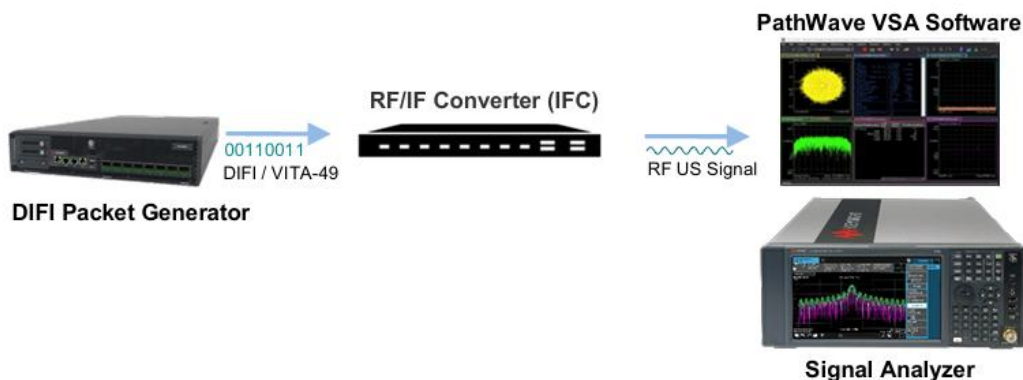


Figura 3-26: Ejemplo de configuración para test desde el dominio de IF digital al de RF analógico [29].

Al igual que en el caso anterior, se comprueba que las características de la señal entran dentro de los parámetros del estándar con parámetros como el nivel de ruido y elementos espurios, presencia de armónicos o variación de la frecuencia y fase de la señal analógica.

Como tercer escenario de pruebas, se puede configurar este de forma que utilicemos una configuración de ida y vuelta entre la generación de datos en la banda RF digitalizando estos en IF Digital y comprobando la salida del dispositivo DIFI, como en el otro sentido generando paquetes DIFI y comprobando que en transmisión la señal RF se genera correctamente en el dispositivo, siguiendo un esquema similar al siguiente:

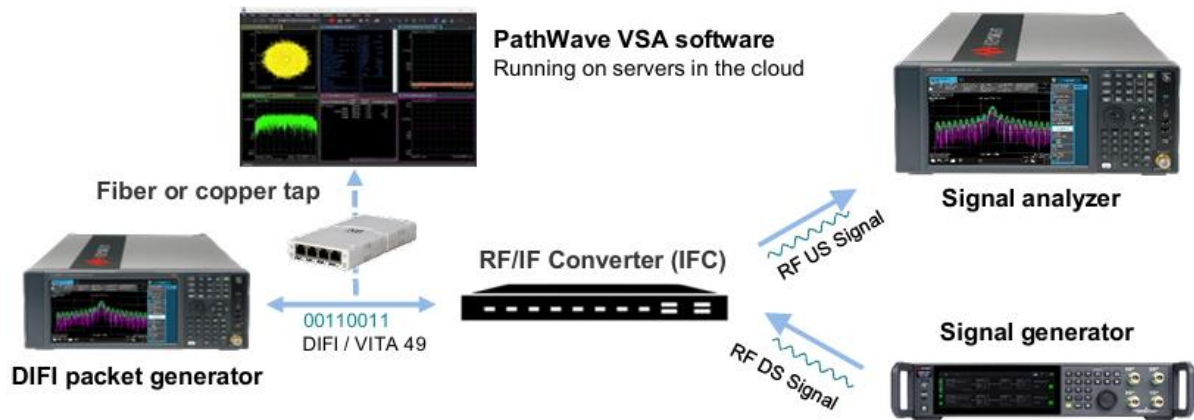


Figura 3-27: Entorno de pruebas de dispositivo DIFI a certificar [29].

En estas pruebas se realizarán mediciones especialmente en cuanto al aislamiento entre la señal de subida y de bajada y viceversa, verificando los niveles de potencia de las señales y que no se ven degradadas en un entorno de transmisión y recepción simultáneo, así como otros parámetros como la pérdida de paquetes.

Otros de los escenarios a generar son los de rendimiento del sistema en un entorno en el que se utilice un combinador/divisor, generando distintos flujos de paquetes independientes y comprobando que se realiza un correcto procesamiento en la Clase generada por el dispositivo. Al igual que en el caso anterior, la salida de nuestro divisor o combinador será analizada para comprobar que la señal se encuentre dentro de los parámetros aceptables en cuanto frecuencia, nivel de señal, fase, ruidos y componentes espurios.

Por último, otro de los test a realizar para la certificación es el comportamiento del sistema *end-to-end*, mediante el cual se genera un entorno en el que utilizando modem satélite DIFI separados por un generador de paquetes DIFI en el que se comprueba la correcta sincronización del sistema, el correcto nivel de BER durante el envío y recepción de paquetes, generando un entorno de pruebas con la arquitectura mostrada a continuación:

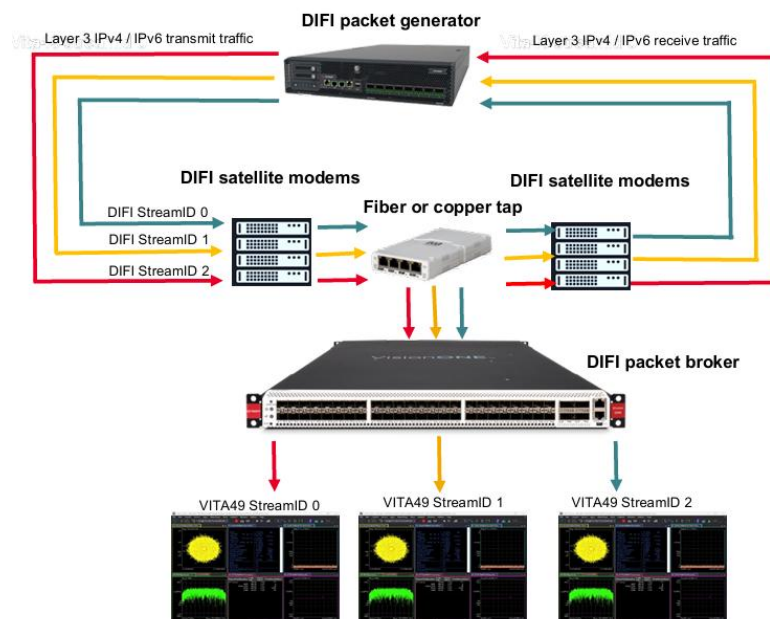


Figura 3-28: Entorno de pruebas para certificación escenario *end-to-end* [29].

Por tanto, como se ha explicado en este apartado, el proceso de certificación estandarizado en el consorcio DIFI pretende facilitar a cualquiera que quiera certificar su dispositivo todo el proceso, facilitando herramientas para la realización de las pruebas así como un proceso claro en el que se detalla el alcance y los pasos a seguir para la certificación, desde pruebas internas hasta la validación y verificación de los entornos de pruebas y los resultados obtenidos por parte de los sistemas a certificar.

3.5 Ejemplos de casos de uso

Tanto en este como en capítulos anteriores de este TFM se ha detallado por qué el uso de IF Digital, y en concreto el estándar desarrollado por el consorcio DIFI, mejoran la interoperabilidad de los sistemas y aumentan la flexibilidad, resiliencia y escalabilidad del segmento terreno en las comunicaciones satelitales. En esta sección se enumeran algunos de los casos de uso prácticos que pueden implementarse utilizando DIFI aprovechando los beneficios justificados anteriormente.

En primer lugar, el caso de uso 1 de entre los que se puede aplicar esta tecnología, se utilizará para añadir redundancia en las antenas, añadiendo nuevas antenas en ubicaciones geográficas distantes respecto a las desplegadas actualmente. El intercambio de datos IF digitales desde la ubicación remota de la antena permite tener varios puntos de acceso al satélite que se complementen entre sí y aumenten la resiliencia de nuestro segmento terreno al mantener la disponibilidad del enlace en caso de que una de las antenas falle. Además, no solo nos da redundancia en caso de fallo, sino que, en los casos en los que las condiciones atmosféricas no permitan la comunicación, especialmente en el caso de las bandas RF utilizadas a mayor frecuencia, como es el caso de la banda Ka, tampoco perderemos el enlace si en nuestro diseño situamos una de las antenas en un lugar con mejores condiciones climatológicas la mayor parte del año. Esto aumenta la disponibilidad del sistema enormemente, incluyendo también los casos en los que se debe de realizar una parada en la transmisión de una antena determinada para realizar tareas de mantenimiento o de reconfiguración de equipos del módulo RF ubicado al lado de la antena.

Para implementar este caso de uso, deberemos en primer lugar seleccionar la ubicación de la nueva antena asegurándonos que está en una zona con buenas condiciones climatológicas y dentro de la huella de transmisión y recepción del satélite al que tenga que apuntar. Otros factores se deben tener en cuenta como el asegurarnos de poder proveer de alimentación eléctrica a los equipos, así como de poder llevar hasta ese punto la red de transporte de comunicación, por lo que será otro factor a tener en cuenta situar la antena donde haya ya una red de FO desplegada para no aumentar el coste y la complejidad de la solución, teniendo que llevar el cableado de fibra desde el equipo DIFI hasta el punto de acceso lo más cercano posible. Así, la nueva antena redundante recibirá la señal satélite, y el dispositivo DIFI digitalizará la entrada de la señal (ya sea en RF o IF analógica, en función de los parámetros de diseño que consideremos oportunos) obteniendo a la salida un flujo de paquetes que podremos introducir a nuestra red. De esta forma, podremos comunicar esta antena alejada geográficamente con nuestros equipos de procesamiento en nuestra estación terrena original, donde deberemos situar otro equipo DIFI el cual realice de nuevo la conversión a IF analógica, la cual será la entrada de nuestros modem legados. En este caso, podemos utilizar en la estación terrena un conmutador, el cual se active en caso de fallo de la antena principal y permitiendo que la entrada a los módems sean los datos provenientes de la antena redundante, asegurando así la disponibilidad del enlace.

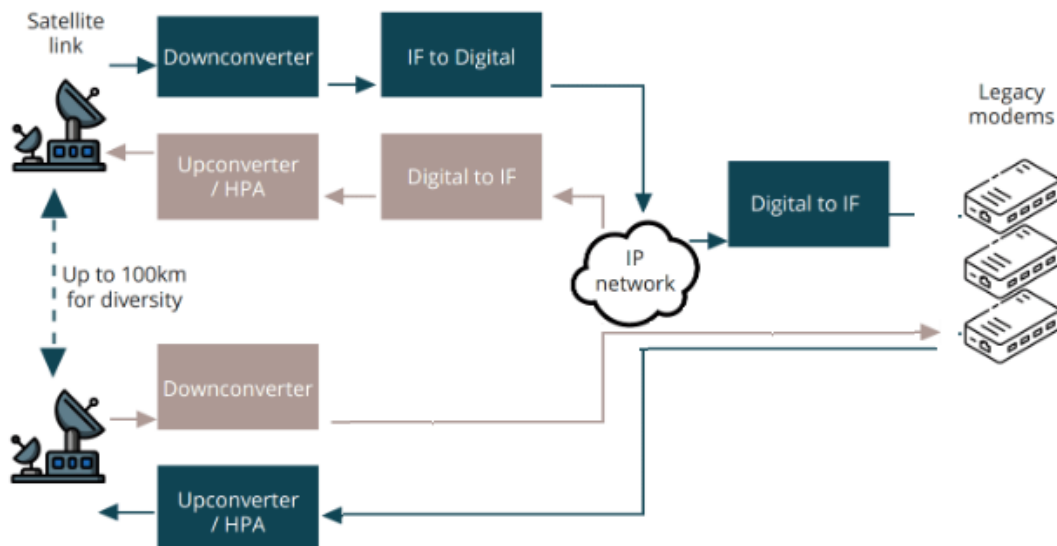


Figura 3-29: Caso de uso de redundancia de antenas con modem legados.

En segundo lugar, y aprovechando que DIFI nos habilita a separar físicamente los equipos de procesamiento de los módulos de Antena y de RF, se diseña el caso de uso 2 en el que podemos desplegar estos equipos en ubicaciones geográficas distintas de donde se encuentren actualmente, como CPDs en ubicaciones que nos sean de mayor conveniencia por ejemplo porque estén más protegidas geográficamente y ante posibles desastres, ya sea a causa de ciberataques o sabotaje o desastres naturales, aumentando la disponibilidad del sistema.

En este caso, la arquitectura estaría compuesta por un módulo DIFI instalado a la salida del módulo RF analógico (o IF analógica), en el que se realizará la digitalización de la señal a IF Digital, así como su posterior procesamiento en el DDC y su encapsulamiento en paquetes que contienen los valores de las muestras I/Q para ser enviados a través de la red. Una vez más, deberemos proveer de un transporte de red como FO a la ubicación de la antena y el módulo DIFI, así como el correspondiente dispositivo frontera en la red para encaminar los datos desde el origen hasta el CPD en el que se sitúan los equipos de procesamiento. Llegados al CPD, deberemos tener en cuenta conectar correctamente el punto de acceso de la red de transporte con la isla y los equipos que situemos en los distintos racks donde ubiquemos los modem de procesamiento del segmento terreno satelital. En este caso de uso, la arquitectura varía si utilizamos módem DIFI compliance virtualizados en un HW COTS o si utilizamos módem legados analógicos. En el caso de los modem DIFI, será tan sencillo como conectar la salida y estos tendrán la capacidad de extraer los metadatos contenidos en los paquetes que llegan desde el módulo RF y reenviarlos a los usuarios o servidores donde se alojen los servicios. En el caso de que utilicemos módems legados, será algo más complejo, ya que deberemos instalar un módulo de conversión desde los paquetes DIFI a IF analógica, realizando la operación inversa y conectando la salida de este módulo a los módems mediante, por norma general, un cable coaxial.



Figura 3-30: Caso de uso separación de módulo RF y antena de los equipos de procesamiento.

Otro de los casos de uso a implementar como caso de uso 3 es el de la computación en la nube. Nuestras antenas o antenas de terceros pueden proveer los datos a una nube pública o privada, delegando el despliegue de la infraestructura de los equipos de procesamiento y de las tareas de sostenimiento y operación asociados a estos. De esta forma, nuestros datos Digitalizados en nuestra estación terrestre satelital desde la banda RF a paquetes DIFI pueden ser enviados a servicios en la nube de terceros (como, por ejemplo, de *Amazon Web Services*, AWS), delegando la capacidad de procesamiento, el despliegue y el mantenimiento de la infraestructura en terceros. La implementación de este caso de uso reduciría enormemente el coste y los tiempos de despliegue, tanto en el aumento de usuarios de la red como en la implementación de nuevas formas de onda en nuestras infraestructuras del segmento terreno. Por otro lado, se debe tener en cuenta y analizar la seguridad que nos provean estos terceros, además de establecer contractualmente unos acuerdos de disponibilidad del servicio y respuesta ante incidentes que satisfagan nuestras necesidades de disponibilidad de los servicios además de asegurarnos la integridad y confidencialidad de la información que pueda transitar por la infraestructura de terceros. Por tanto, en el caso de implementar este caso de uso, se recomienda para el caso de información clasificada utilizarlo como medida de respaldo, teniendo siempre infraestructura propia correctamente ubicada y configurada para este tipo de servicios. En el caso de datos de Baja Clasificación, este caso de uso puede ser una herramienta que nos dé un aumento significativo de capacidades, sencillez y ahorro de coste en nuestros despliegues de servicios satelitales.

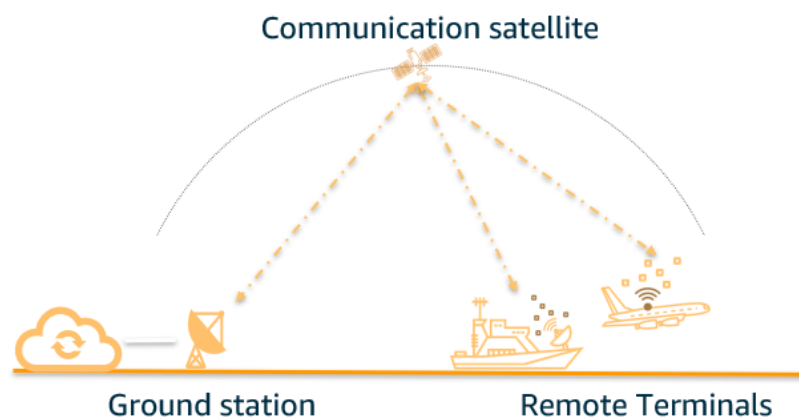


Figura 3-31: Ejemplo de dispositivos remotos comunicándose con la estación terrena principal desplegando los equipos de procesamiento en la nube [30].

Como ejemplo de arquitectura a implementar podemos tomar la facilitada por AWS. En esta, se especifican los servicios que podemos delegar en terceros de nuestra organización. Nos centraremos en los que afectan a este caso de uso concreto dado que en este no se plantea delegar en terceros las partes del segmento terrestre de la antena ni del dispositivo DIFI. Por tanto, obviaremos los elementos 1, 2 y 3 del esquema (satélite y estación terrena, que incluye el módulo de antena, el módulo en banda RF analógica y el módulo DIFI para digitalización de los datos y la infraestructura de red). Por tanto, nuestra infraestructura terrena podrá utilizar los servicios del módulo 4 del esquema, de forma que en estos se extraigan los datos de los paquetes DIFI, extrayendo las cabeceras de cada capa de la pila de protocolos, para su posterior procesamiento y/o almacenamiento en el módulo 5 del esquema. Este módulo sería el equivalente a nuestro modem legado, en el cual realizaremos la extracción de los metadatos de los servicios enviando estos a través de la infraestructura de red a los usuarios o servidores finales. Estos servidores finales también pueden alojarse en la nube (punto 6 del esquema de arquitectura mostrado), así como los propios servicios de los usuarios los cuales pueden consultarse desde cualquier ubicación a la misma infraestructura de nube privada (punto 7 del esquema).

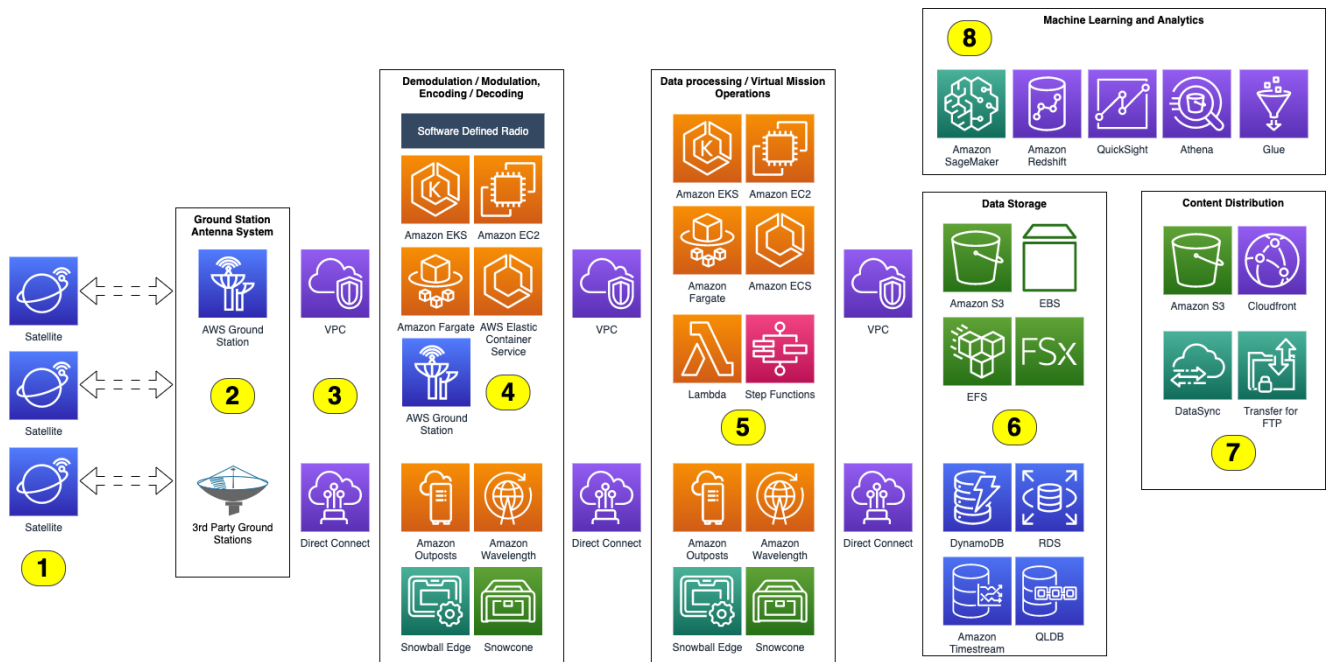


Figura 3-32: Esquema de Arquitectura de Referencia de AWS para virtualización de servicios terrestres satelitales en la nube [30].

Como siguiente caso de uso, al que denominaremos caso de uso 4, podemos aprovechar la digitalización de los datos recibidos en el módulo RF en paquetes DIFI para aplicar sobre estos paquetes un cifrado que proteja la información que contienen los metadatos. La instalación de un módulo de cifrado a la salida del módulo DIFI nos garantizará la confidencialidad de la información de origen a destino, al encapsular las capas de TCP/UDP sobre los datos cifrados. Este caso de uso puede aplicarse a las estaciones terrenas tradicionales, aplicando el módulo DIFI en el punto mencionado anteriormente y desplazando la señal hasta los equipos de procesamiento. En este punto, y al igual que se ha mencionado en los casos de uso anteriores, deberemos reconvertir la señal a IF analógica si queremos procesar estos datos en los modem analógicos legados. Por tanto, deberemos situar otro cifrador previo al módulo DIFI que realiza la conversión ADC, pudiendo la salida llegar al módem dentro de los parámetros de entrada de este. En el caso en que se decida aplicar este caso de uso sobre modem digitales DIFI *compliance*, es aún más flexible, al poder virtualizar en un HW COTS tanto el módem de procesamiento de datos como el propio cifrador, y asociando estos de forma lógica para que los paquetes recibidos sean descifrados previo al paso por el equipo de procesamiento, dando como resultado un producto más flexible y escalable.

Este caso de uso puede aplicarse tanto para cifrar la información tanto en el tramo desde que llega a la antena RF, se digitaliza, cifra y se envía a los equipos de procesamiento, donde se descifra; tanto entre usuarios *end-to-end*. Pongamos como ejemplo, una estación terrena satélite remota situada en un *branch* quiere transmitir información cifrada a la estación terrena principal de anclaje. En este caso, un usuario tiene un terminal que transmite datos vía transporte satélite, sitúa un módulo de cifrado a la salida de módem DIFI (o lo instala de forma virtualizada en caso de ser posible en el mismo HW físico), cifrando los paquetes DIFI. Estos paquetes se transmiten hasta el módulo de transmisión. En este otro dispositivo DIFI desencapsula los paquetes, obteniendo las muestras en fase y en cuadratura (cifradas), y mediante el DUC y el DAC obtiene la señal analógica a enviar por la antena en la banda RF. La señal es reenviada por el satélite hacia la estación terrestre central, en el que se producen las operaciones inversas. Es decir, la señal recibida en RF se digitaliza y se obtienen las muestras en fase y cuadratura mediante el ADC y el DDC, obteniendo de nuevo los paquetes DIFI recibidos (con la información cifrada), que se envían hasta los equipos de procesamiento situados en el destino. En ese punto, la señal se descifra y se introduce en el modem DIFI digital, que a la salida envía los metadatos del servicio o bien a los usuarios correspondientes o a los usuarios de destino para su procesamiento o almacenamiento. De esta forma,

se obtiene un caso de uso en el que la información va cifrada durante todo su trayecto, preservando correctamente los datos de la señal y aumentando la confidencialidad de la información. En la siguiente figura se muestra a modo de ejemplo este caso de uso, en el que el usuario se encuentra en otra red separada de los equipos de procesamiento de la estación terrena satélite, y a su vez esta está separada del módulo de la antena y RF. A su vez, en la estación terrena principal tiene en ubicaciones geográficas diferentes el módulo RF y de digitalización de los equipos de procesado, ubicado en el mismo CPD donde se consumen los servicios a los que accede el usuario.

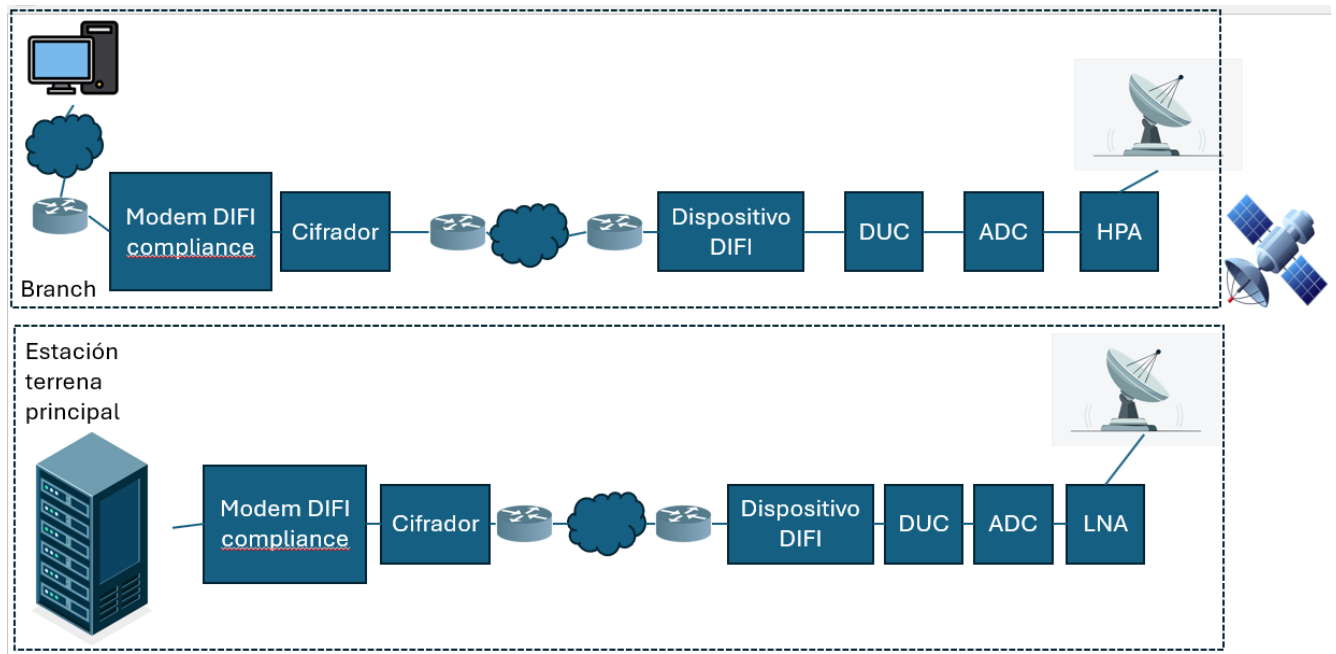


Figura 3-33: Caso de uso implementando DIFI con módulos de cifrado.

Por último, el uso del estándar DIFI nos permite separar los propios equipos de procesamiento en función de la clasificación que manejen, mencionando así el caso de uso 5 para el estándar. Esto nos permite segmentar y proteger los equipos que manejen datos de Alta Clasificación respecto a los que manejen datos de Baja Clasificación tanto de forma lógica como física. De esta forma, podemos por ejemplo disponer de unos modem a través de los que se conecten los usuarios de la red de Alta Clasificación, ubicados en el mismo lugar físico en el que se alojan los servidores que consumen este tipo de servicios. De esta forma, nos aseguraremos de que la información a lo largo de todo su trayecto cumple los estándares necesarios para poder utilizar nuestra infraestructura y arquitecturas diseñadas. Por otro lado, podemos separar los servicios de BC y AC, siendo menos estrictos con estos primeros e incluso procesándolos de distinta manera o situándolos en zonas donde podemos aprovechar o bien nuestros equipos legados o son más accesibles para el personal, lo cual facilita la operación diaria y los mantenimientos.

En todos estos casos de uso debe tenerse en cuenta otros factores además de aplicar el estándar DIFI, como el disponer de redes UDP/IP con la capacidad suficiente dado el alto requerimiento de ancho de banda de la IF Digital, además de una correcta sincronización aplicando las herramientas de los distintos protocolos, como códigos de detección de errores o un correcto parametrizado del *timestamp* incluido en los propios paquetes DIFI. Además, deberemos tener en cuenta, especialmente si los datos que transitan por la red son clasificados, aplicar a esta una correcta securización. Esto incluye la segmentación de la red en VLAN, de forma que podamos priorizar el tráfico que proviene de aplicaciones DIFI y minimizar así la pérdida de paquetes en la red, aplicación de túneles cifrados (*IPSec+GRE*, VPN) y otros elementos para la gestión de este tunelizado, dado que necesitaremos aún más ancho de banda para su implementación, lo que puede implicar añadir a nuestra red más elementos tales como un concentrador de túneles. La correcta securización de la red incluirá también añadir en

origen y destinos otros elementos como FWs o Sistemas de Detección/Prevención de Inclusiones (IDS/IPS), así como los correspondientes equipos de encaminamiento (*routers*) que hagan la función de equipo frontera con la red a la que estén conectados para llegar al destino de los equipos de procesamiento y viceversa, desde los equipos de procesamiento hasta el dispositivo DIFI conectado al módulo RF y la antena. Esto aumenta el coste de la implementación de cada caso de uso tanto en elementos como HW físicos como en licenciamiento, además de necesitar el conocimiento para su configuración y mantenimiento o el coste adicional de subcontratar este tipo de servicios a los diferentes proveedores.

Se debe tener en cuenta durante el estudio en cualquiera de los casos de uso a implementar la toma de decisión de si mantener los módems legados analógicos o sustituir estos por módems digitales DIFI *compliance*. Esta decisión no es fácil, ya que por un lado si mantenemos los módems legados tiene la desventaja de que deberemos realizar la operación inversa al tener que convertir siempre en el destino previo a la conexión al modem los datos de nuevo desde el dominio de IF Digital al dominio de IF analógica. Esto introducirá retardos, además de aumentar el coste de la solución y el espacio necesario al tener que ubicar siempre un conversor para uno o varios modem a la salida, además de las limitaciones de las líneas de transmisión mencionadas a lo largo de este TFM, ya que deberemos conectar la salida en IF analógica al módem analógico mediante cables como coaxiales, de forma general. El mantener los modem legados analógicos limita también la escalabilidad, ya que el aumento de usuarios en una red satelital supone la instalación de más módems, o de igual forma si se quiere implementar una nueva forma de onda también implica la instalación de más HW físico para los usuarios que vayan a consumir ese servicio.

En la otra cara de la moneda, la sustitución de los módems legados analógicos por módem digitales tiene la gran ventaja de que nos provee de una gran flexibilidad y escalabilidad en nuestros sistemas, pudiendo virtualizar las soluciones en HW COTS y adaptar este a un creciente uso por parte de nuevos usuarios o la implementación de nuevas formas de onda, lo cual, una vez implementado, agilizará enormemente su implementación y no estaremos limitados por el espacio físico. Además, una vez las señales sean digitalizadas tras ser recibidas por la antena en el módulo RF, se mantendrán en el dominio digital ya que al llegar desde el módulo en el que se convierta la señal al formato DIFI se enviarán los paquetes a los equipos de procesamiento, pudiendo estos procesar los metadatos y enviarlos a los usuarios o servidores en los que se consuman los servicios de forma directa, unificando todo el segmento terreno *end-to-end*. Mediante esta virtualización de los equipos de procesamiento tendremos la capacidad de desplegar equipos estándar en los que se virtualice el equipo de procesamiento o módem, aumentando la eficiencia en el uso computacional y permitiendo una escalabilidad de las capacidades de las estaciones en tierra sin necesidad de disponer de tanto espacio físico como el requerido para los módems analógicos. Además, la virtualización de los equipos de procesamiento nos permite disponer de otra ventaja adicional, la cual es poder monitorizar su estado para su operación y mantenimiento de forma remota y unificando todos los datos de procesamiento en una herramienta tipo dashboard que puede utilizarse de forma remota y en el que se nos provea de una imagen situacional de nuestros equipos desde donde la consultemos de forma remota.

Por otro lado, el cambio de los modem analógicos legados por los nuevos modem DIFI *compliance* tiene la desventaja de que deberemos sustituir nuestros modem analógicos tanto en las estaciones terrenas como en todos los usuarios remotos que estén conectados a nuestros servicios dentro de nuestra red satelital. Esto tiene un impacto enorme en cuanto a costes y disponibilidad del servicio durante la transición, además de las configuraciones que deberán hacerse y adaptar a todo el personal a las nuevas tecnologías, con los riesgos de la disponibilidad de los sistemas y de la resistencia y adaptabilidad al cambio que esto conlleva.

Como conclusión, en este apartado se han expuesto algunos de los casos de uso que pueden implementarse adoptando el estándar DIFI en los segmentos terrenos satelitales, y como mejora la infraestructura respecto a los sistemas legados. Nótese que estos casos de uso no tienen por qué ser implementados de forma aislada, sino que pueden crearse nuevos casos de uso que sean el resultado de

la combinación de varios de los mencionados. Por ejemplo, podemos utilizar redundancia de antenas satélite y a su vez desplazar los equipos de procesamiento o bien a un CPD en propiedad o bien segmentar algunos de estos en procesamiento en nube privada. El caso de uso de encriptación de la información también puede combinarse con algunos o varios de los casos de uso anteriores, por ejemplo, encriptando la información previa a su envío desde una antena remota hasta los equipos de procesamiento. Esto aumenta aún más la flexibilidad del estándar, y actúa como catalizador de las ventajas en su implementación al poder aprovechar de forma simultánea las ventajas de varios casos de uso en una sola implementación.

3.6 Caso de uso práctico en el ámbito de la Defensa

La aplicación de IF Digital mediante el estándar DIFI en las estaciones terrenas desplegadas en las arquitecturas actuales en el ámbito de la Defensa podría suponer una herramienta clave para implementación de nuevas capacidades y tecnologías que permitan mejorar la flexibilidad, escalabilidad, seguridad y disponibilidad de los enlaces satelitales con respecto a los tradicionales en IF analógica, beneficiándose de las ventajas detalladas en las secciones anteriores de este TFM.

En esta sección se detallan algunos casos de uso propuestos aplicados tanto en sistemas de armas desplegables como helicópteros o vehículos de ruedas blindados, así como su implementación respecto a la infraestructura de red actual para su correcta integración de forma que los usuarios puedan consumir servicios de la I3D de C2 y comunicaciones de video, voz y datos desplegados actualmente en Defensa. Estos casos propuestos ilustran cómo DIFI puede optimizar las operaciones en todo tipo de entornos, integrando elementos de virtualización, redundancia y procesamiento dinámico de los recursos.

Las arquitecturas actuales implementadas en las estaciones de anclaje, que actúan como nodos centrales de la infraestructura satélite con topología en estrella, están soportadas por tecnologías basadas en IF analógica. De esta forma, las señales que provienen de satélites como el XTAR o el SPAINSAT-NGI, enviadas previamente por los terminales de usuario desplegados remotamente, son recibidas en banda X, Ka o UHF, y sobre estas se aplica una arquitectura similar a la descrita en este TFM, entre la que se incluye un LNA para filtrado y amplificación de la señal en la banda RF, y una conversión mediante el oscilador local a IF. Esta señal en la banda IF analógica viaja a través de cables coaxiales a los equipos de procesamiento ubicados a unos metros en las mismas estaciones de anclaje. Esta ubicación viene limitada por las características definidas de atenuación y degradación de la señal en las líneas de transmisión. Una vez en los equipos de procesamiento, se demodula la señal (ya sea desde FSK hasta 64-QAM la modulación utilizada) y es desde donde la información contenida por los servicios es de los distintos usuarios y servidores, es empaquetada en formato digital y enviada, pasando por el Nodo de Interconexión a la I3D (NI) a través de otros transportes como MPLS en propiedad o fibra oscura, progresando hasta los CPD de Arturo Soria o Pozuelo de Alarcón, donde se consumen los servicios desplegados en procesado y almacenamiento en infraestructura propia tanto por los *host* de las sedes remotas conectadas a la I3D como por los usuarios del segmento satélite.

De forma similar, se realizaría el camino inverso, desde el CPD hasta el terminal satélite remoto, utilizando un HPA previo a la salida de la antena en la banda RF hacia el terminal del *branch* remoto, pasando la señal por el satélite y reenviándola hasta a éste y utilizando un LNA en recepción previo a su paso por los equipos de procesamiento que llevan la información hasta los usuarios.

En la siguiente figura se muestra un esquema a alto nivel de la arquitectura *as is*, implementada actualmente. En este esquema no se representan otros equipos necesarios para el encaminamiento y la seguridad de la red, como *router* MPLS intermedios o equipos Firewall, switches de conexión de terminales o cifradores para las zonas de Alta y Baja Clasificación, centrándose en la infraestructura satélite y los módulos que forman su arquitectura.

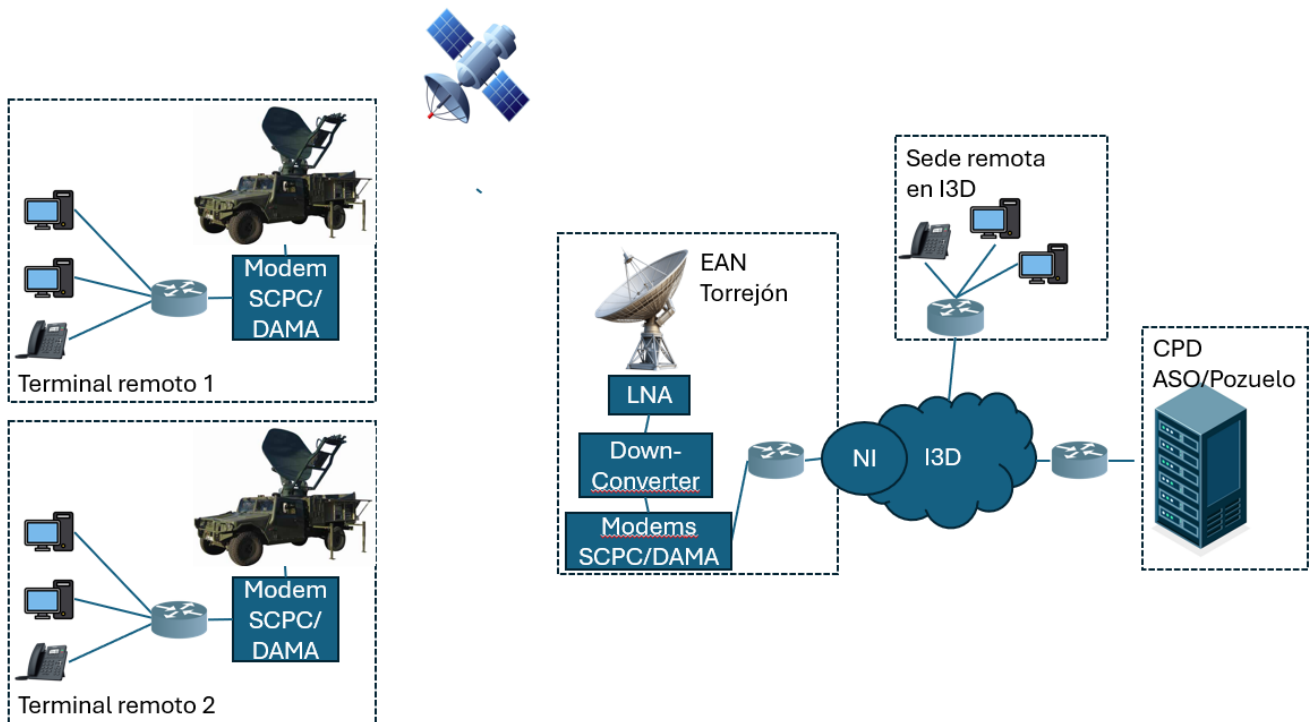


Figura 3-34: Arquitectura de alto nivel *as is* con IF analógica

La implementación de DIFI en este caso de uso propuesto implica varios cambios en esta arquitectura, y la inclusión en ésta de nuevos servicios de virtualización en la nube, así como nuevos componentes físicos. La foto final del segmento satélite cumpliría los siguientes objetivos: separación de las antenas de los equipos de procesamiento, implementación de redundancia de antenas e implantación de capacidad satélite con módem digitales en COTS instalados en los sistemas de armas desplegables, conectados a un servicio de procesamiento en la nube segmentado para Defensa. El mapa de situación de alto nivel propuesto, englobaría sistemas de armas desplegados en ZO, la ubicación de los sistemas de computación en la nube (*AWS*, ubicado en Aragón), así como la ubicación del CPD principal en Arturo Soria. La interconexión de sistemas en Territorio Nacional vendrá dada tanto por la Red de Transporte en propiedad (MPLS) como por la fibra oscura desplegada en infraestructura de terceros.

Para la consecución de estos objetivos, en primer lugar, en las antenas de las estaciones terrenas de Torrejón y Bermeja, se implementaría un módulo DIFI *compliance* tras la salida del LNA en la banda RF, próximo a la antena. La salida de este módulo, formado por un ADC/DAC, DDC, diezmador y DSP, estará compuesta por las componentes en señal y en cuadratura encapsuladas en paquetes DIFI, los cuales, a través de la RTP enviarán los paquetes, al igual que en el caso anterior, por la I3D progresando hasta el CPD. Se deben implementar, para mitigar los requerimientos de la IF Digital, medidas para el procesamiento de los paquetes, debiendo etiquetar el tráfico DIFI implementando, por ejemplo, la Calidad de Servicio (QoS) de la red MPLS en propiedad para asegurar la reserva de un alto ancho de banda y un retardo mínimo. Además, es fundamental la ubicación del punto de toma de referencia de los *timestamp* para la sincronización entre origen (antena de la estación terrena) y destino (CPD). Esto tiene como ventaja que podremos implementar en el destino protocolos de corrección de errores y de reordenamiento de paquetes. Por otro lado, se propone la instalación de los equipos de procesamiento legados en los CPD de Arturo Soria y Pozuelo, de forma que deberemos en el CPD implementar otro módulo DIFI que permita la conversión a el dominio de IF analógica, para asegurar que la señal de entrada a los modem está dentro de sus parámetros de entrada una vez reconstruida por el DSP.

Por otro lado, en segundo lugar, se propone la instalación de una antena remota en la zona sur de la península. En este caso de uso, se propone su instalación en Córdoba, zona en la que se prevé la

implantación de nuevas bases del Ejército de Tierra (BLET) y que dispone de buenas condiciones climatológicas que permiten aumentar la disponibilidad de los enlaces respecto a las condiciones meteorológicas de la zona de Madrid, además de aumentar la diversidad geográfica del segmento terrestre satelital. Esta antena digitalizaría la señal en el módulo DIFI instalado en esta, enviando a través de fibra oscura de la red de transporte de terceros los datos hasta el NI. Una vez ahí, los datos progresarán a través de la I3D hasta el CPD de igual forma que se propone en las estaciones terrenas actuales. Es importante disponer, al igual que en el caso anterior, de un protocolo de sincronización mediante la correcta toma de *timestamps* e incluir módulos de conmutación para recibir los datos desde la antena redundante en casos de indisponibilidad, ya sea por condiciones climatológicas, mantenimiento de las estaciones de anclaje o degradación del intencionada del entorno.

En tercer lugar, para la integración de los terminales remotos instalados en los distintos sistemas de armas, como vehículos terrestres, buques o aeronaves, se propone la implementación de una arquitectura compuesta por módem digitalizados en dispositivos COTS. Este HW implementaría, de forma virtualizada, todos los componentes de red necesarios para el encaminamiento de los datos provenientes de los usuarios, así como la virtualización de los modem para la obtención de los paquetes DIFI, los cuales tendrían una salida a la antena en la banda RF (preferiblemente Ka en sistemas con espacio reducido como un vehículo terrestre o una aeronave), la cual se transmitiría a través de la antena desde la ubicación remota en ZO hasta las estaciones de anclaje, configuradas con la arquitectura mencionada anteriormente y donde se digitalizaría de nuevo en el módulo DIFI instalado en estas.

La implementación de estos módems digitales nos permite implementar la capacidad, en caso de que se considere oportuno, de desplegar sistemas de procesamiento en la nube, para lo cual se propone el uso de la plataforma AWS ubicada físicamente en Aragón. En caso contrario, o que quiera segmentarse los equipos de procesamiento con sistemas en propiedad, se desplegarían modem digitales en los CPD. Además, nos permite aplicar una asignación dinámica del total del ancho de banda disponible en el satélite, al poder aplicar una capa adicional de orquestación, mediante la cual podemos levantar en los módems de forma dinámica contenedores en función de la necesidad operativa que necesitemos en cada momento en los sistemas de armas desplegados con las capacidades disponibles en cada uno de estos. Por ejemplo, si es necesario en un momento dado una mayor capacidad de ancho de banda en los sistemas satelitales desplegados en los buques respecto a los terrestres, el sistema escala este recurso de forma automática.

El uso de este tipo de módem nos otorgaría una gran flexibilidad y escalabilidad a la hora de integrar nuevas formas de onda y usuarios en la red del segmento satelital, como las necesarias para la implementación de capacidad satélite en helicópteros, las cuales deben tener una frecuencia de transmisión adaptada a la frecuencia de rotación de las palas, ya que las antenas tienen que ser ubicadas en el techo del fuselaje justo debajo de estas. Por otro lado, la integración de capacidad satélite en nuevos sistemas o en sistemas que aún no dispongan de estas también sería más rápida, flexible e inmediata, al no tener que instalar nuevos módem ni hardware en la ubicación donde se ubiquen los equipos de procesamiento, sino únicamente integrando los nuevos servicios o formas de onda mediante SW. Además, estos módems nos permitirían en estos sistemas de armas implementar la capacidad satélite en espacios más reducidos (del orden de 2-5 U) y requerirían menor consumo eléctrico, recurso limitado especialmente en el caso de las aeronaves. Estos equipos tienen también la ventaja de que son menos sensibles a vibraciones que el HW analógico, además de requerir menores equipos para disipar el calor que generan, mejorando su desempeño en estos sistemas de armas que se encuentran en movimiento y su desempeño en la operación. Por otro lado, una vez demodulados los paquetes DIFI en los equipos de procesamiento virtuales, podremos encapsularla para transitar a través de la I3D por los transportes mencionados anteriormente.

Además del ahorro de consumo eléctrico, de espacio, resistencia ante vibraciones y disipación de calor, en el caso particular de las aeronaves, está el reto adicional de la modernización de sus tecnologías de comunicaciones al mismo ritmo que el resto de los sistemas de armas. En éstas, el proceso para certificar nuevos equipos instalados es más estricto su aprobación requiere de procesos adicionales,

como la integración de modificaciones en el proceso del diseño con pruebas adicionales para la emisión de un nuevo Certificado de Tipo o Certificado de Tipo Suplementario (demostración de cumplimiento, compatibilidad electromagnética, pruebas en tierra y en vuelo, separación entre modificación mayor/menor) la implementación de modem digitales facilitaría este proceso al ser sistemas estándar, especialmente si se utilizan COTS ya calificados para la aeronavegabilidad. Los módems analógicos actuales no disponen de este tipo de calificación, aumentando tiempo y costes en la integración de estos en el segmento satelital para los sistemas aéreos. Otros detalles deben tenerse en cuenta, como si se implementan las comunicaciones satélite como sistema *stand-alone* al que se conectan los usuarios o si los datos que van a transmitirse deben ser tomados de la aeronave integrándose los equipos de comunicación en los equipos de aviónica (sería necesario adicionalmente un conversor de datos de bus ARINC-429/MIL-1553 a ETH), además de si es posible evitar agujerear físicamente el fuselaje para instalar la antena sustituyendo la de algún otro equipo en la configuración de la aeronave, con el objetivo de limitar el alcance de la modificación y poder integrar las comunicaciones satélite de forma más sencilla.

La implementación en los sistemas de armas de la banda Ka en lugar de la banda X no merma las capacidades de los sistemas, al disponer los satélites de capacidad *Cross-band*, pudiendo recibir la señal en una de las bandas y retransmitirla en otra distinta dentro de su rango de operación, y pudiendo así convertir la banda en función del sistema de arma y de dónde dispongamos cobertura satélite de cada una de estas, manteniendo la operatividad de los sistemas.

Por último, el uso del estándar DIFI nos permite implementar parte o todos los equipos de procesamiento digitales en la nube. Para este caso de uso, se propone el uso de la infraestructura AWS, mejorando la eficiencia computacional y la capacidad de monitorización remota de los recursos de la red. De esta forma, las señales recibidas en las estaciones de anclaje de Torrejón, Bermeja o la antena redundante instalada en Córdoba podrán ser encaminadas a través de la red a los equipos de procesamiento desplegados en la nube. Este encaminamiento de los paquetes DIFI recibidos debe realizarse a través de *Direct Connect* de AWS, estableciendo una conexión física de fibra óptica dedicada de alto ancho de banda y baja latencia aislada del resto de internet, de forma que los paquetes DIFI estén segmentados de forma lógica y física del resto de tráfico de las redes que llegan hasta la nube de AWS. Una vez alcanzados los equipos de procesamiento en la nube AWS, las instancias (denominadas en AWS EC2) de los modem digitales desplegadas en estos reciben el flujo de paquetes DIFI, demodulándolo y obteniendo la información de los servicios. Una vez extraídos los datos de la señal radio digitalizada, estos deben encaminarse hasta el NI de la I3D y, posteriormente, hasta el CPD para consumir los distintos servicios (mando y control, mensajería militar, bases de datos...), a través del enlace dedicado de *Direct Connect*, para progresar hasta el servicio requerido. En el CPD, los datos requeridos pueden ir de vuelta al operador a través del camino inverso o ser enviados a otros terminales de la red situados en sedes remotas a través de la I3D. A efectos prácticos, el sistema de armas que se comunica con el CPD se encuentra, de forma lógica, en la misma red que el CPD, estando éste y el *Virtual Private Cloud* de AWS en la misma red.

A modo de ejemplo, se describe en este caso de uso una operación práctica con los cambios en la infraestructura original introduciendo IF Digital con el estándar DIFI. Un operador sanitario que se encuentra desplegado Letonia, necesita establecer una consulta de telemedicina a través de un terminal remoto sanitario con un especialista que se encuentra en el Hospital Central de la Defensa (HCD) Gómez Ulla para atender a un herido, de forma que el especialista pueda verle a través de la cámara, recibir los datos enviados por los sensores médicos y guiar al operador sanitario con procedimientos médicos complejos. El operador conecta el terminal remoto a la red y envía la petición de teleconsulta. Esta petición viaja a través de la red local hasta el switch/router, el cual tiene como único transporte conectado un terminal satélite en banda Ka a un vehículo RG-31. Los paquetes de datos llegan al módem digital, que da como salida una señal en la banda RF modulada que se transmite a través de la antena hasta el satélite SpainSat NGI. Una vez en el satélite, este realiza un *cross-banding*, retransmitiendo la señal hasta la huella de cobertura establecida en la península en banda X. Tenemos la *mala suerte* de que, en

este momento, las antenas en banda X de las estaciones terrenas de Torrejón y Bermeja se encuentran inoperativas debido a las condiciones climatológicas del día, no pudiendo recibir la señal. La señal se recibe en la antena redundante, y, en el momento de la recepción, digitaliza la señal en la banda RF mediante su módulo DIFI, obteniendo a la salida los paquetes que contienen los datos en fase y en cuadratura de la señal RF. Estos paquetes se encaminan a través de la conexión *Direct Connect* hasta los vModem desplegados en la VPC de Defensa, que demodulan la señal digital y extraen los datos de solicitud de teleasistencia requeridos por el operador. Estos datos son encapsulados de nuevo para transitar, a través de la conexión *Direct Connect* hasta el CPD de Arturo Soria, donde está desplegado el nodo de gestión que contiene los aplicativos del servicio de telemedicina. En este módulo, se lanza una petición a través de la I3D que llega al terminal de referencia desplegado en el Gómez-Ulla, donde el médico especialista acepta la llamada de teleasistencia. Esta petición viaja de vuelta hasta el nodo de gestión, que ahora necesita establecer un túnel entre el terminal donde se encuentra el paciente y el HCD. Estos datos viajan a través de la red *Direct Connect* de nuevo hacia la nube AWS, donde el vModem convierte los datos a tramas DIFI, que envía hasta la antena redundante situada en Córdoba. Una vez ahí, estos son convertidos mediante el ADC a la banda RF, que se transmite a través de la antena en banda X hasta el satélite. Este realiza de nuevo *cross-banding*, retransmitiendo la señal hasta el terminal situado en Letonia en banda Ka, donde se recibe, se digitaliza en el DAC y, en el módem digital, se extraen los datos y dirigen a través de la red local al terminal de telemedicina, donde llega la notificación de aceptación de la teleconsulta y se establece el túnel para enviar, de forma análoga a este ejemplo, los datos de vídeo y de las pruebas realizadas al herido.

En la siguiente figura se muestra cómo sería la arquitectura de red en el segmento terrestre satelital, *to be*, tras implementar los cambios sugeridos en la arquitectura:

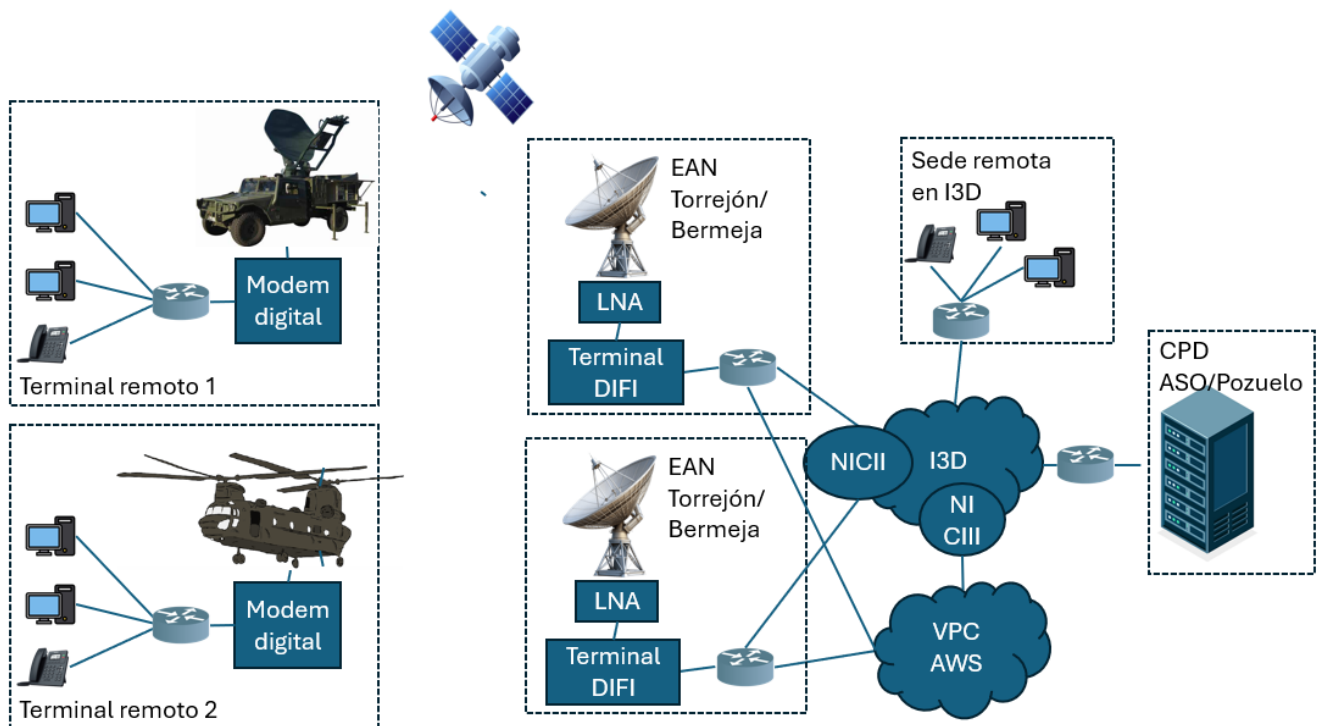


Figura 3-35: arquitectura de alto nivel *to be* del segmento terrestre satelital con DIFI y AWS

En este apartado se ha explorado cómo DIFI transforma el segmento terrestre satelital en aplicaciones de Defensa, mejorando la resiliencia, disponibilidad, flexibilidad y seguridad frente a las limitaciones de las arquitecturas basadas en IF analógica. Los casos de uso presentados, como la implementación de redundancia geográfica de las antenas en las estaciones terrenas, la implementación de módem digitales en los distintos sistemas de armas desplegados o el uso de virtualización y computación en la nube con capacidades como la orquestación para la asignación dinámica de recursos,

demuestran que DIFI puede estandarizar la implementación de la IF Digital en el ámbito de Defensa de forma que se exploten los beneficios de la IF Digital independientemente del sistema en el que se implemente, de los fabricantes asociados a distintos tipos de sistemas (aéreos, terrestres o navales) e integrando los sistemas legados durante la transición hacia este dominio, asegurando la escalabilidad e integración de nuevos servicios que puedan ser requeridos.

3.7 Ventajas respecto a otros estándares

En el capítulo 2 de este TFM se han enumerado las diversas ventajas que tiene el uso de incluir en las arquitecturas la IF Digital frente a las arquitecturas tradicionales con una etapa intermedia de IF analógica. La posibilidad de eliminar las limitaciones del dominio analógico abre un abanico de posibilidades de forma que podamos eliminar el cuello de botella existente en el segmento terreno satelital, dado que poder transformar las señales en la banda RF hacia el dominio digital nos permite implementar soluciones basadas en SW así como la separación física de la antena y el módulo RF de los equipos de procesamiento, permitiendo una mayor escalabilidad, flexibilidad y resiliencia de los sistemas satelitales y eliminar el *vendor lock-in*, pudiendo adaptarnos a los nuevos requerimientos de incremento de capacidad de procesamiento y nuevas constelaciones LEO que se están implementando actualmente. Además, se ha visto también que la adopción de la IF Digital puede reducir costes, así como facilitar el mantenimiento de las estaciones terrenas frente la IF Analógica.

Ante esta necesidad, no sólo debíamos utilizar el dominio IF Digital, sino que también surge el requisito de unificar los criterios al transformar las señales al dominio digital en el mismo formato de forma que esta transformación permita a todos los equipos comunicarse entre sí. Así, surgen el desarrollo de varios estándares de los cuales se han visto también sus principales características, como eCPRI, VITA 49 o FAST OSDI.

El estándar DIFI tiene ventajas clave en el contexto de la IF digital para comunicaciones satelitales, al proporcionar una interoperabilidad real entre equipos de distintos fabricantes, un aspecto donde estándares como FAST OSDI, eCPRI y VITA 49 suelen requerir soluciones personalizadas para lograr una interoperabilidad real en la práctica. Mientras VITA 49 se centra en formatos de paquetes para datos RF, eCPRI optimiza interfaces para redes 5G, y FAST OSDI enfatiza enlaces de fibra óptica, estos estándares a menudo demandan adaptaciones específicas que incrementan complejidad y costes, limitando su flexibilidad y adaptabilidad a la hora de utilizarse de manera práctica.

Una de las principales ventajas de DIFI es su disponibilidad, en el sentido de que cualquier *stakeholder* de la industria satélite puede implementar sus características y certificar sus equipos sin coste adicional. Además, éste estándar invita a cualquiera que implemente sus soluciones a compartir sus aportaciones, así como a participar en el desarrollo del estándar uniéndose al consorcio y participando en los distintos grupos de trabajo. De esta forma, DIFI es un estándar que se difunde abiertamente y facilita su adopción involucrando a cada una de las partes implicadas en el segmento satelital, fomentando la innovación y adaptándose a los escenarios requeridos por las nuevas necesidades operativas, como la virtualización en la nube.

El estándar DIFI proporciona además un estándar lo suficientemente flexible para ser adoptado, pero también con una pila de protocolos y distribución de la información en Clases y paquetes clara que elimina las variaciones que permiten el resto de estándares, haciendo que dos soluciones implementadas por fabricantes o integradores distintos no puedan comunicarse entre sí sin añadir elementos intermedios como, por ejemplo, un *Gateway* entre los flujos de información de sus equipos. En el caso de DIFI, se puede garantizar que dos equipos certificados DIFI *compliance* correctamente configurados, pueden comunicarse entre sí a pesar de provenir de distintos fabricantes o integradores, facilitando la escalabilidad de los sistemas y la interconexión de segmentos entre sí, ya sean desde el punto de la antena o módulo RF o integrando estos con equipos de procesamiento de terceros o desplegados en la nube, tal y como se ha visto a lo largo del desarrollo de los casos de uso, y haciendo que este estándar sea más robusto en cualquiera de las implementaciones prácticas que el resto.

Por último, el desarrollo de los estándares DIFI bajo el paraguas de una entidad neutral y objetiva como la IEEE-ISTO, permite eliminar aún más las barreras entre las distintas partes implicadas en el proceso del desarrollo e implementación del estándar, asegurándose de que éste se basa en criterios objetivos y beneficiándose el consorcio de la experiencia y consultoría de su personal tanto en las labores diarias como en las de certificación de las distintas versiones del estándar. De esta forma, se asegura aún más que se desarrolle un estándar interoperable entre todas las partes implicadas.

En conclusión, el consorcio DIFI ha desarrollado un estándar como una capa superior a los estándares iniciales en los que se aplicaba IF Digital, eliminando o mitigando las deficiencias presentes en estos y adaptándose a los requerimientos de las comunicaciones satelitales. Se proporciona así un nivel de interoperabilidad fácil de adoptar y práctico que cubre las necesidades del sector satélite en el desarrollo e implementación de estaciones en el segmento terreno, permitiendo a este dejar de ser el cuello de botella en la evolución de las comunicaciones satélite y mejorando sus características de escalabilidad, capacidad de cómputo, flexibilidad, resiliencia y seguridad.

4 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

4.1 Conclusiones

En el presente TFM se ha abordado el análisis exhaustivo del estándar Digital Intermediate Frequency Interoperability (DIFI) y su aplicabilidad general en el segmento terrestre de las comunicaciones satelitales, con un enfoque en los casos de uso del estándar aplicados al ámbito de la Defensa.

Se han desarrollado los fundamentos teóricos que abarcan las arquitecturas tradicionales basadas en señales analógicas. En estas arquitecturas, aunque actualmente operan de forma robusta y es una tecnología completamente madura, facilitando las labores de diseño, implementación y resolución de problemas en la operación, existen limitaciones inherentes, dado que la transmisión de señales analógicas provenientes de los módems a través de líneas de transmisión como cables coaxiales o guías de ondas tienen hace que no sea posible separar los equipos de procesamiento de los módulos de RF y de antena. Por otro lado, se justifica la implementación en estas arquitecturas de la IF analógica dado que las etapas de filtrado y amplificación en RF suponen una complejidad mayor en su implementación y en coste dado los componentes activos que componen estas, además de una limitación adicional para la transmisión de los datos desde los equipos de procesamiento a las antenas. La IF analógica soluciona en parte estos inconvenientes, permitiendo un procesamiento de las señales analógicas de un mayor rendimiento y su envío a distancias mayores, del orden de cientos de metros. No obstante, persisten las limitaciones en cuanto a la escalabilidad de las capacidades en los equipos de procesamiento ante los cambios de demanda y la introducción de nuevos servicios, la susceptibilidad ante factores externos como el ruido, la atenuación e interferencias, así como para la ubicación de los equipos físicos en zonas geográficas diferentes.

La rigidez operativa y los altos costes de mantenimiento por la dependencia del HW de la IF analógica, unido a la creciente demanda de capacidad de procesamiento y a las nuevas implementaciones de servicios y tecnologías satélite, como las constelaciones LEO, el desarrollo de la computación en la nube y los equipos COTS definidos por software, hacen que las estaciones terrenas de las comunicaciones satélite se hayan convertido en un cuello de botella en el ámbito de las comunicaciones satélite. Por tanto, la transición en las estaciones terrenas hacia la IF Digital supone un cambio en el paradigma tradicional, y un aumento de capacidades que eliminan estas limitaciones de las arquitecturas. Esta modernización implica una gran cantidad de ventajas, al poder digitalizar las señales en las etapas RF/IF y transmitir las a través de redes con protocolos estándar como TCP/IP, dado que el desarrollo de DSP y DDC de los últimos años permiten aplicar a las señales unas altas tasas de periodo de muestreo y un filtrado digital directamente a las señales recibidas en el módulo de la antena, obteniendo un conjunto de datos binarios que podemos enviar de forma fiable hasta los equipos de procesamiento independientemente de donde estos estén ubicados.

Por tanto, se elimina la dependencia física entre antenas y equipos de RF y equipos de procesamiento, permitiendo una mayor flexibilidad y su distribución a ubicaciones ópticas y remotas, como CPDs en propiedad, y favoreciendo la implementación de servicios GSaaS o virtualización. Por otro lado, se mejora la escalabilidad al disponer de la capacidad de gestionar y procesar señales digitalmente sobre hardware COTS, lo que permite una escalabilidad más sencilla y económica, adaptándose rápidamente a nuevas demandas y tecnologías satelitales (GEO, MEO, LEO). La posibilidad de aplicar redundancia tanto a los módulos de antena como a los equipos de procesamiento, permite redirigir flujos de datos digitalizados a través de múltiples rutas y centros de procesamiento remotos, lo cual incrementa drásticamente la resiliencia del sistema frente a fallos en los componentes, condiciones meteorológicas adversas, especialmente en las bandas superiores a 10 GHz, así como una mayor resistencia a ciberataques o sabotajes de los equipos físicos. Además, el uso de HW estandarizado definidos reduce los costes de adquisición, operación y mantenimiento, optimizando los gastos y permitiendo una mejor implementación de monitorización y control de los segmentos terrestres de forma

remota por parte del personal operador de las estaciones. Por último, la digitalización facilita la implementación de robustas capas de seguridad, como el cifrado de extremo a extremo y el uso de firewalls/VPNs, garantizando la confidencialidad e integridad tanto de la información de las señales en banda RF digitalizadas como los metadatos de los usuarios y sistemas contenidos en estas.

La modernización y transición hacia la IF Digital tiene también limitaciones, principalmente ligadas a la sincronización de los equipos, esencial para poder reconstruir la señal en recepción de forma correcta y acentuada respecto a otros sistemas digitales dadas las altas latencias, interferencias y ruido presentes en recepción desde la estación transmisora, pasando por el satélite hasta llegar a la estación receptora. Introducir valores de referencia en los paquetes como *timestamps* y una correcta sincronización entre los NCO y tasas de muestreo de los equipos en transmisión y recepción es fundamental para la reordenación de paquetes, reconstrucción de la señal y la demodulación de los metadatos contenidos en esta. Por otro lado, existe para la IF Digital una elevada demanda de ancho de banda, del orden de 20 veces superior a la requerida por una señal equivalente de IF analógica, por lo que deberemos asegurarnos que nuestras redes de transporte soportan tasas de transmisión del orden de Gbps, dada la alta redundancia de datos que se debe introducir para aumentar la robustez de la red, incluido el problema de la sincronización y la implementación de protocolos de corrección de errores, el gran número de bits necesarios por símbolo así como para no suponer un cuello de botella ante la gran tasa de muestreo de los ADCs. Por otro lado, deberemos adaptar estas implementaciones de IF Digital a nuestros equipos legados, de forma que deberemos dimensionar DACs previos a los modem tradicionales de forma que puedan procesar la señal analógica que tienen como parámetro de entrada, aumentando aún más la complejidad de implementar estas tecnologías, así como los costes.

La implementación de la IF Digital requiere abordar estas limitaciones desde un estándar que unifique criterios y la implementación de soluciones ante estas limitaciones, de forma que pueda alcanzar el nivel de madurez que tienen actualmente las estaciones terrenas implementadas con IF analógica. Los estándares como VITA 49, FAST OSDI o eCPRI proporcionan una primera aproximación para la implementación de IF Digital, pero la falta de criterios unificados durante el desarrollo e implementación de estos hace que tengan una flexibilidad que no permita, en la mayor parte de los casos, disponer de una conectividad *plug and play* entre equipos de distintos fabricantes e integradores. Esto hace que para implementar estos estándares se deba desarrollar una solución *ad-hoc* para cada caso de uso y en función del modelo del equipo que se vaya a implementar, limitando completamente la escalabilidad de los sistemas y aumentando la complejidad y limitaciones de la transición hacia la IF Digital.

El estándar desarrollado por el consorcio DIFI surge, así como una solución para unificar estos criterios y establecer unas *reglas del juego* sencillas y desarrolladas para alcanzar una interoperabilidad total entre los segmentos terrestres satelitales implementados con IF Digital, independientemente del caso de uso y del fabricante o integrador del sistema que se integre. El sello de DIFI *compliance*, obtenido mediante un sencillo proceso de certificación garantiza que los equipos han sido aptos en una serie de pruebas que garantiza su interoperabilidad.

Esto se consigue, en primer lugar, respaldando al consorcio durante el desarrollo del estándar por la entidad IEEE-ISTO, que proporciona un marco objetivo y apoyo en los procesos de cambios e implementación de mejoras durante el desarrollo del estándar. Esto da como resultado un estándar de uso extendido, en el que se invita a participar para su desarrollo y pruebas a cualquiera que estime oportuno, en el que se ofrece una pila de protocolos, una estructura de paquetes y unas directrices y guía de buenas prácticas clara que garantiza la compatibilidad entre sistemas, eliminando la necesidad de *gateways* intermedios o adaptaciones específicas. Por otro lado, se mitigan las limitaciones inherentes a la IF Digital incorporando mecanismos avanzados de sincronización, detección y corrección de errores (*checksums*, *timestamps*, secuencias de paquetes), de forma que se abordan los retos asociados al transporte de datos digitales a través de redes con latencia variable y posibles congestiones desde un punto de vista común. La disponibilidad gratuita del estándar y sus herramientas de certificación fomenta una adopción amplia y una validación rigurosa por parte de la industria, promoviendo la innovación colaborativa, frente a los estándares mencionados anteriormente, los cuales disponen de mayores

barreras para su implementación y son carentes de una certificación unificada que garantice su correcta puesta en marcha a nivel práctico.

Por último, los casos de uso prácticos desarrollados han ilustrado el valor estratégico de DIFI, especialmente en el ámbito de la Defensa. La capacidad de implementar redundancia de antenas en ubicaciones geográficamente diversas y usar VLAN para manejar la conmutación y priorización del tráfico, separar físicamente el hardware RF de los equipos de procesamiento en entornos seguros, migrar funciones a la nube para una mayor agilidad y proteger la información con cifrado extremo a extremo, son ejemplos claros de cómo DIFI mejora la capacidad operativa, la seguridad y la eficiencia de las comunicaciones satelitales militares. La segmentación de equipos basada en la clasificación de la información (Baja Clasificación vs. Alta Clasificación) optimiza además la gestión de recursos y la seguridad física. Esto garantiza la interoperabilidad y la modernización de las comunicaciones satélite tanto en cualquiera de los sistemas de armas en los que sean implementados como la transición de las estaciones de anclaje terrenas hacia un estándar de interoperabilidad basado en IF Digital, así el aumento de capacidades de las comunicaciones satélite en cualquier tipo de entorno.

Por tanto, este TFM concluye que el estándar DIFI no solo es una solución prioritaria ante las limitaciones de las arquitecturas analógicas, sino que su implementación acelera y facilita la transición hacia la transformación digital del segmento terrestre satelital y su adaptabilidad, preparando el camino para integraciones con nuevas tecnologías y requerimientos de capacidades y servicios. Su adopción promete un futuro de comunicaciones más robustas, flexibles, seguras y económicamente viables, fundamental para las operaciones de Defensa y para el avance de la industria espacial en su conjunto.

4.2 Líneas futuras

Este TFM sienta las bases teóricas y los principales casos de uso que pueden implementarse mediante el estándar de interoperabilidad DIFI. Sin embargo, éste puede ampliarse con nuevas líneas que cubran el estudio de nuevas áreas y amplíen de forma práctica su uso aprovechando sus beneficios. Algunas de las líneas futuras sugeridas son las siguientes:

- Implementación de un entorno de simulación DIFI: creación de un entorno de simulación con herramientas de código abierto, como GNU radio, que evalúen el rendimiento del estándar en entornos reales, con la obtención de parámetros como pérdidas de paquetes y rendimiento de distintos protocolos de corrección de errores, conmutación de tráfico y sincronización, obteniendo datos de pérdidas de paquetes y la validación de distintas configuraciones a implementar en las arquitecturas.
- Estudio y evaluación de la mejora de la sostenibilidad al implementar el estándar DIFI: para parametrizar el rendimiento energético de la implementación del estándar respecto a los sistemas tradicionales de IF analógica, así como la reducción de huella logística al implementar equipos COTS definidos por SW y el ahorro en costes y recursos del sostenimiento de los sistemas implementados en las estaciones terrenas satelitales.
- Ampliación de los casos de uso: ampliar los casos de uso para la Defensa, implementando en mayor detalle las arquitecturas y realizando una evaluación del rendimiento con parámetros esperados como la latencia o el BER en entornos degradados.
- Implementación del estándar DIFI con otras tecnologías innovadoras: estudio de su implementación con otras redes de transporte, como las implementadas en SD-WAN, o tecnologías emergentes como redes cuánticas, o la implementación de IA para el apoyo de la gestión de los enlaces.
- Optimización de la sincronización: estudio de la implementación de distintos algoritmos para mitigar la limitación de la sincronización en redes en las que se implemente el estándar DIFI, como Precision Time Protocol (PTP) o algoritmos basados en la señal recibida como los de autocorrelación o correlación con secuencias de pseudo-ruido estadísticas, y su implementación y beneficios de implementar estos mediante SW en entornos virtualizados.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Roddy, Satellite Communications third edition, McGraw-Hill, 2006.
- [2] B. R. Elbert, Satellite Communication Applications Handbook second edition, Artech House Inc., 2004.
- [3] The Satellite Communication Ground Segment and Earth Station Handbook, Artech House Inc., 2001.
- [4] F. Marki y C. Marki, «Mixer Basics Primer. A tutorial for RF & Microwave Mixers,» Marki Microwave, 2010.
- [5] G. Maral, B. Michel y Z. Sun, SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEMS. Systems, techniques and technology sixth edition, Wiley, 2020.
- [6] R. L. Freeman, Fundamentals of Telecommunications, John Wiley and Sons Inc, 1999.
- [7] D. M. Pozar, Microwave Engineering Fourth Edition, John Wiley & Sons Inc., 2012.
- [8] Euresys, «Coaxial cables: attenuation vs frequency,» [En línea]. Available: https://documentation.euresys.com/Products/eGrabber/eGrabber/en-us/Content/40_App_Notes/CXP_Cable_Length/Coaxial_Cables_Attenuation.htm.
- [9] L. W. I. Couch, Digital and analog communication systems, Prentice-Hall International Inc., 1997.
- [10] ELT Systems, «What is Digital IF?,» [En línea]. Available: <https://www.etlsystems.com/what-is-digital-if/>.
- [11] S. Haykin y M. Moher, Introduction to Analog & Digital Communications Second Edition, John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [12] J. G. Proakis y D. G. Manolakis, Digital Signal Processing principles Algorithms and Applications Third Edition, 1996.
- [13] S. Arar, «All About Circuits,» [En línea]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/dsp-basics-of-digital-down-conversion-digital-signal-processing/>.

- [14] J. Harris, «ADI Analog Dialogue,» [En línea]. Available: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/whats-up-with-digital-downconverters-part-1.html>.
- [15] «ElectroAgenda,» [En línea]. Available: <https://electroagenda.com/es/transformada-de-hilbert/>.
- [16] J. Mercade, «Tabor Electronics,» [En línea]. Available: <https://www.taborelec.com/RF-Signal-Generation-with-Digital-Up-Converters-in-AWGs-White-Paper>.
- [17] C. Court y B. Row, «The theory of digital down conversion».
- [18] M. Upamanyu, Fundamentals of digital communication, Cambridge, 2011.
- [19] R. Hosking, «Military Embedded Systems,» [En línea]. Available: <https://militaryembedded.com/comms/sdr/vita-radio-software-radio-protocol>.
- [20] V. Marketing, «VITA,» [En línea]. Available: <https://www.vita.com/VPX-News-Portal/7135730>.
- [21] «Keysight,» [En línea]. Available: https://helpfiles.keysight.com/csg/89600B/Webhelp/Subsystems/sharing/content/vita49_file_for_mat.htm.
- [22] «Welking Sciences,» [En línea]. Available: <https://www.welkinsciences.com/wp-content/uploads/2021/02/WS-SYS-DCS-125M-200.pdf>.
- [23] CPRI, «CPRI info,» [En línea]. Available: <https://www.cpri.info/>.
- [24] «Web del Consorcio DIFI,» [En línea]. Available: <https://dificonsortium.org/>.
- [25] I. I. S. a. T. Organization, «Web de ISTO,» [En línea]. Available: <https://isto.org/>.
- [26] DIFI Consortium, IEE-ISTO Std 4900-2021: Digital IF Interoperability Standard Consortium Introduction, 2021.
- [27] DIFI Consortium, IEE-ISTO Std 4900-2021: Digital IF Interoperability Standard, 2025.
- [28] D. E. Comer, Internetworking with TCP/IP. Principles, protocol and architecture Sixth Edition, Pearson, 2014.
- [29] KeySight, «DIFI: Satellite Ground Station Digital Modernization Initiative, Advancing interoperability in digital ground technology with the industry's most powerful RF, application and cybersecurity test platforms,» 2025.
- [30] Amazon Web Services, «Virtualizing the satellite ground segment with AWS,» 2022. [En línea]. Available: <https://aws.amazon.com/es/blogs/publicsector/virtualizing-satellite-ground-segment-aws/>.
- [31] T. Stone, «Introduction to satellite communications technology for NREN,» CSC, 2004.
- [32] C. E. Evans y L. Lundgren, «A history of Satellite Communications Infrastructure,» *The MIT Press*, 2023.
- [33] P. Swetha y K. Ajay, Analog Communications, sin editorial.

- [34] A. Gannon, C. Gemelas, S. Paulus, D. Schrage, L. Vincent y C. Roberts, An argueded Ground Station Architecture for Spacecraft-Initiated Communications Service Requests, International Astronautical Federation, 2021.
- [35] C. A. Balanis, Antenna Theory analysis and design third edition, John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [36] B. Sklar, Digital Communications fundamentals and applications second edition, Prentice Hall PTR, 2001.
- [37] M. K. Simon y M.-S. Alouini, Digital Communications over Fading Channels. A unified approach to performance analysis, John wiley & Sons Inc., 2000.
- [38] L. J. Ippolito, R. Kaul y R. Wallace, Propagation Effects Handbook for Satellite Systems Design, NASA Reference Publication, 1983.
- [39] ITU-R, «Multi-carrier based transmission techniques for satellite systems,» International Telecommunication Union (ITU-R), 2011.
- [40] A. Dileep y P. Sakthivel, «Satellite Communications IV B. Tech II Semester,» Malla Reddy College of Engineering and Technology, 2023.
- [41] R. Uppal, «Electronics For U,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.electronicsforu.com/news/efficient-wearable-device-processing>.
- [42] «The Benefits of an Intermediate Frequency in RF Systems,» [En línea]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/radio-frequency-analysis-design/selected-topics/the-benefits-of-an-intermediate-frequency-in-rf-systems/>.
- [43] «Virtualizing the satellite ground segment with AWS,» 2022. [En línea]. Available: <https://aws.amazon.com/es/blogs/publicsector/virtualizing-satellite-ground-segment-aws/>.
- [44] Amazon Web Services, «AWS joins the Digital IF Interoperability (DIFI) Consortium,» 2022. [En línea]. Available: <https://aws.amazon.com/es/blogs/publicsector/aws-joins-the-digital-if-interoperability-difi-consortium/>.
- [45] E. J. Knoblock, «Interoperability and Concepts of Operation Assessment for Space Relay Services and Partnerships,» *NASA publications*, 2020.
- [46] KeySight, «The Ins and Outs of Satellite Communications, Understand the natural phenomena, physics, modulation standards, and LEO to GEO technology developments impacting satellites and non-terrestrial networks,» 2024.
- [47] Geon Technologies LLC, «VITA 49.2 Subsystem 0.0.1 Product Guide».
- [48] VITA Standards, «VITA Radio Transport (VRT) VITA 49.0 DRAFT,» 2006.
- [49] C. Rodriguez, J. De La Cruz, M. Lichtman, J. Rivera y D. Dozier, «DIFI: The Universal Language for Streaming Digitized RF,» *DIFI Consortium*.
- [50] D. K. Misra, Radio-Frequency and Microwave Communication Circuits. Analysis and Design. Second Edition., Wiley, 2004.
- [51] S. Arar, «All About Circuits,» [En línea]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/dsp-basics-of-digital-down-conversion-digital-signal-processing/>.

[52] S. Criley, «A Game Charger: Crossing the "RF over IP" Chasm».