



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*Las comunicaciones en el espacio profundo. Hacia una Internet
interestelar*

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa

ALUMNO: Mauricio Rodrigo Madrigal

DIRECTOR: José María Núñez Ortuño

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*Las comunicaciones en el espacio profundo. Hacia una Internet
interestelar*

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa

Especialidad de Sistemas y Tecnologías de Telecomunicación

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

En este TFM se aborda en primera instancia el estudio de los sistemas que se utilizan para establecer comunicaciones entre naves espaciales y sondas que navegan por el espacio profundo y la Tierra. Como es lógico, la variedad de sistemas y tecnología que se encuentra desarrollada desde los inicios hacia la década de los 60 del siglo pasado (alguna de la cual todavía se encuentra activa por ser de utilidad) es muy amplia. Por ello, en el marco de este trabajo se desarrollarán las líneas generales de estos enlaces, que son comunes a todas las misiones espaciales y que conforman lo que se conoce como Red del Espacio Profundo (DSN), haciendo hincapié en la tecnología propia de este tipo de sistemas tan específico.

La DSN es el germen que ha dado lugar al estudio de la futura implantación de una Internet interestelar, esto es, la posibilidad de trasladar la Internet terrestre que todos conocemos y utilizamos diariamente al espacio profundo. Por la magnitud de las distancias que hay que considerar, de hasta miles de millones de kilómetros, la Internet interestelar tendrá que luchar contra parámetros que aquí en la Tierra no se plantean como puede ser el de las grandes latencias. Para este fin, se desarrollará un escenario especial de aplicación para una arquitectura destinada a ofrecer su servicio en el espacio, basada en las Redes Tolerantes a Demoras.

En la parte final de este TFM, el autor da un golpe de timón para cambiar radicalmente de escenario volviendo a poner los pies en la Tierra. Se trata de una aplicación de lo anterior a un campo práctico en las Fuerzas Armadas y más en concreto en la Armada: las comunicaciones submarinas. Salvando las distancias conceptuales, el autor ha encontrado una similitud entre los medios espacial y submarino en cuanto a la dificultad que plantean para establecerse comunicaciones en cada uno de ellos; y en base a esto, traslada los estudios y desarrollos de la futura implantación de una Internet interestelar, hacia una futura aplicación en las comunicaciones de los submarinos de la Armada, claro está, con sus correspondientes adaptaciones.

PALABRAS CLAVE

DSN, Internet, latencia, Armada, submarino.

AGRADECIMIENTOS

A mi querida esposa Ana Belén, luz a la que agradezco su incondicional apoyo y comprensión. Su paciencia y aliento me han permitido cumplir esta etapa.

A mis padres, mi hermano y resto de familia que son los grandes héroes de mi historia.

Al Capitán de Navío D. Juan Pablo Díaz-Pache Mackinlay. Mi eterno agradecimiento, entre otras cosas, por haber hecho esto posible.

A mi Director D. José María Núñez Ortuño, por sus directrices y ayuda.

Al conjunto de Profesores de este Máster por su docencia, profesionalidad y dedicación.

Al General de División D. Moisés Manuel Fernández Álvaro, Director de la Estación Espacial de la NASA en Robledo de Chavela (Madrid) y al Ingeniero D. Luis Neira por su atención y apoyo. Muchas gracias a ambos por abrirme las puertas de su casa.

A la Armada, a la que tanto debo.

A San Juan Bosco (Don Bosco), que guía mis pasos.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos	8
1.1 Introducción	8
1.2 Objetivos	9
1.3 Organización de la memoria	9
2 Estado del arte	10
2.1 Algunos conceptos generales de los sistemas de comunicaciones	10
2.1.1 Introducción	10
2.1.2 Ruido térmico y densidad espectral	10
2.1.3 Modulaciones PSK	10
2.1.4 Probabilidad de error y tasa de errores de bits.....	11
2.2 Las antenas reflectoras. Generalidades	12
2.2.1 Introducción	12
2.2.2 Conceptos básicos de las antenas reflectoras.....	12
2.2.3 Ganancia de las antenas reflectoras	15
2.3 Las Comunicaciones en el Espacio Profundo	16
2.3.1 Introducción	16
2.3.2 El diseño del sistema de telecomunicaciones	17
2.3.3 Potencia recibida.....	19
2.3.4 Ganancia y relación señal / ruido.....	20
2.3.5 Fuentes de ruido en DSN	20
2.3.6 Temperatura de ruido de funcionamiento del sistema	21
2.3.7 El máser	22
2.3.8 Sistemas de refrigeración criogénicos	24
2.3.9 Ventajas de utilizar refrigeración criogénica	25
2.3.10 Amplificadores de bajo ruido HEMT	26
2.3.11 Modulaciones en las comunicaciones para el espacio profundo	29
2.3.12 Necesidad de una envolvente constante.....	29
2.3.13 Introducción a las antenas usadas para comunicaciones en el espacio profundo	30
2.3.14 Bandas de frecuencia asignadas.....	33
2.3.15 Las antenas a bordo de las sondas y naves espaciales	33

2.3.16 Un ejemplo real: “Las Voyager”	34
2.3.17 El seguimiento desde la Tierra: las grandes antenas de la DSN de la NASA	38
2.3.18 El concepto Cassegrain.....	41
2.3.19 La antena de alta eficiencia de 34 metros	43
2.3.20 Agrupaciones (arrays) de antenas en la Red del Espacio Profundo	50
2.4 Redes tolerantes a demoras	52
2.4.1 Introducción.....	52
2.4.2 Escenarios	53
2.4.3 RFC 4838.....	54
2.4.4 Transacciones de datos. El protocolo Bundle.....	55
2.4.5 Nodos DTN.....	56
2.4.6 Método de almacenamiento y reenvío	57
2.4.7 Transferencia bajo custodia	58
2.4.8 Una nueva tecnología óptica subacuática aún en desarrollo.....	58
2.4.9 Implantes para controlar las conductas de los peces	60
3 Desarrollo del TFM	61
3.1 Los Complejos para la Red del Espacio Profundo.....	61
3.1.1 Deep Space Network	61
3.2 Desarrollo de una nueva arquitectura de comunicaciones espaciales.....	63
3.2.1 Introducción.....	63
3.2.2 Contemplando los posibles escenarios de acción en el espacio	65
3.2.3 Las comunicaciones actuales	68
3.2.4 Colaboraciones entre agencias. Interoperabilidad	69
3.2.5 Antecedentes.....	69
3.2.6 Definición de la red. Procedimiento utilizado para el reenvío de mensajes sobre un posible caso práctico	72
3.2.7 Definición de la red. Método de enrutado	74
3.2.8 Definición de la red. Dificultades y beneficios	75
3.3 Implementación práctica para el Ministerio de Defensa.....	77
3.3.1 Desarrollo de un prototipo de arquitectura basada en redes DTN para la aplicación en la Armada	77
3.3.2 Las comunicaciones actuales en submarinos de la Armada	78
3.3.3 Análisis de viabilidad del uso de las redes DTN en este escenario	80
3.3.4 La solución Aqua - Fi	81
3.3.5 La red DTN submarina	82
3.3.6 Seguridad del tráfico en la red	85

4 Conclusiones y líneas futuras	87
4.1 Conclusiones	87
4.2 Líneas futuras	87
5 Bibliografía.....	89
Anexo I: Listado de Acrónimos	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Modulaciones M-arias a) BPSK, b) QPSK	11
Figura 2-2 Fase de salida en función del tiempo para un modulador QPSK (extraído de [4])	11
Figura 2-3 Concepto básico de funcionamiento de una antena reflectora (extraído de [6])	13
Figura 2-4 Zona de sombra sobre el reflector (extraído de [7])	13
Figura 2-5 Antena reflectora en configuración offset (extraído de [8])	13
Figura 2-6 Propagación de ondas esféricas (extraído de [9])	14
Figura 2-7 Propagación de ondas planas (extraído de [9])	14
Figura 2-8 Parámetro distancia focal a diámetro de apertura (extraído de [9])	14
Figura 2-9 Diagrama de boques de un sistema DSN típico (extraído de [3])	17
Figura 2-10 Distribución de frecuencias en las bandas usadas para las comunicaciones con las naves espaciales (extraído de [10])	18
Figura 2-11 Sistema receptor (extraído de [2])	22
Figura 2-12 Ubicación del máser y sistema de refrigeración (extraído de [2])	24
Figura 2-13 Fotografía de una operación de transferencia de helio líquido (extraído de [2])	25
Figura 2-14 Semiconductores compuestos III - V	26
Figura 2-15 Alineación de bandas en una heterounión (extraído de [13])	27
Figura 2-16 Estructura de un transistor HEMT (extraído de [15])	28
Figura 2-17 Capa 2DEG de un transistor HEMT (extraído de [15])	28
Figura 2-18 Representación del Espacio Interestelar (extraído de [18])	30
Figura 2-19 Representación de la comunicación entre un satélite y tierra (extraído de [19])	31
Figura 2-20 Fotografía aérea de la estación de Robledo de Chavela en 2014 (extraído de [20])	32
Figura 2-21 Fotomontaje antena DSN de 70 m en un campo deportivo (extraído de [22])	33
Figura 2-22 Imagen de una de las Voyager (extraído de [24])	34
Figura 2-23 Foto del disco de oro que se envió al espacio en ambos Voyagers 1 y 2 (extraído de [25])	35
Figura 2-24 Trayectorias de la Voyager 1 y Voyager 2 (extraído de [26])	36
Figura 2-25 Disposición de la sonda Voyager (extraído de [28])	37
Figura 2-26 Antenas DSN (extraído de [22])	39
Figura 2-27 Pérdidas de ganancia debido a errores en la superficie del reflector de la antena (extraído de [23])	40
Figura 2-28 Geometría básica de una antena Cassegrain (extraído de [8])	41
Figura 2-29 Geometría básica Cassegrain para una antena de la DSN (extraído de [23])	41
Figura 2-30 Placa dielectrica para las bandas X/Ka (extraído de [23])	43
Figura 2-31 Fotografía de una HEF de 34 m. (extraído de [23])	43
Figura 2-32 Detalle de una guía de ondas corrugada (extraído de [23])	44

Figura 2-33 Detalle de un cono de alimentación de cuatro funciones (extraído de [23])	44
Figura 2-34 Diseño de una antena de 34 m. BWG (extraído de [23]).....	45
Figura 2-35 Detalle de las dimensiones de una configuración BWG (extraído de [23])	46
Figura 2-36 Detalle de la estructura básica de una antena de 34 m. con la ubicación de los puntos focales F1 y F2 (extraído de [23]).....	46
Figura 2-37 Eficiencias en F1 y F2 para 8,45 GHz sin atmósfera (extraído de [23])	47
Figura 2-38 Eficiencias en F1 y F2 para 32 GHz sin atmósfera (extraído de [23])	47
Figura 2-39 Eficiencia en F2 para 2,295 GHz sin atmósfera (extraído de [23]).....	47
Figura 2-40 Temperatura de ruido de la antena en función del ángulo de elevación (extraído de [23])	48
Figura 2-41 Descripción gráfica del “velo” (extraído de [23])	48
Figura 2-42 Disposición de antena sin punto de corrección para aberración del haz (extraído de [23])	49
Figura 2-43 Disposición de antena con punto de corrección (moviendo el alimentador de transmisión) para aberración del haz (extraído de [23])	50
Figura 2-44 Diagrama de bloques de la técnica FSC (extraído de [29])	51
Figura 2-45 Escenarios DTN.....	53
Figura 2-46 Comparación entre una transacción de datos típica de Internet y una en DTN (extraído de [31])	55
Figura 2-47 Formato de mensajes del protocolo Bundle (extraído de [32])	55
Figura 2-48 Nodos DTN (extraído de [33])	56
Figura 2-49 Representación del mecanismo de almacenamiento y reenvío (extraído de [33])	57
Figura 2-50 Representación del concepto “transferencia bajo custodia en una red DTN” (extraído de [33]).....	58
Figura 2-51 Detalle de la tecnología óptica subacuática en un buzo (extraído de [35])	59
Figura 2-52 Implementación de la tecnología como un WIFI para buzos (extraído de [35])	59
Figura 2-53 Ubicación del implante (extraído de [36]).....	60
Figura 3-1 Ubicación de los complejos de la DSN (extraído de [22])	61
Figura 3-2 Separación de 120° de los complejos de la DTN (extraído de [22])	62
Figura 3-3 Esquema de trabajo de la DSN de la NASA.....	63
Figura 3-4 Esquema de un enlace espacial punto a punto (extraído de [37]).....	64
Figura 3-5 Escenario una estación terrestre, una nave espacial (extraído de [37])	65
Figura 3-6 Escenario de comunicaciones a través de un orbitador controlado (extraído de [37])	66
Figura 3-7 Escenario de comunicaciones a través de dos orbitadores controlados (extraído de [37])	67
Figura 3-8 Escenario de comunicaciones con existencia de una red aterrizada (extraído de [37])..	68
Figura 3-9 Interoperabilidad de redes en el espacio (extraído de [37]).....	69
Figura 3-10 Gráfico de comunicaciones entre naves operando en Marte (extraído de [30])	70

Figura 3-11 Interfaces de la red correspondiente al gráfico de la figura anterior (3-45) (extraído de [30]).....	71
Figura 3-12 Mecanismo de almacenamiento y reenvío del prototipo propuesto de Internet interestelar	73
Figura 3-13 Gráfico descriptivo del protocolo de enrutamiento “Rap de Burbujas” para redes DTN (extraído de [38])	74
Figura 3-14 Posible escenario a implementar para el desarrollo de una Internet interestelar (extraído de [33]).....	76
Figura 3-15 Representación de comunicación submarina a través de la ER de Guardamar del Segura	79
Figura 3-16 Fotografía de la antena de LF en Guardamar (extraído de [39])	79
Figura 3-17 Prototipo de disposición de transceptores Aqua - Fi en un submarino.....	81
Figura 3-18 Representación gráfica del protocolo Epidemia (extraído de [38]).....	82
Figura 3-19 Prototipo de red propuesta en este TFM para comunicaciones submarinas en la Armada	83
Figura 3-20 Efectos de los tamaños de búfer en la tasa de entrega de mensajes en una DTN con protocolo Epidemia (extraído de [38]).....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Temperatura de ruido del sistema (tomada de [2])	26
Tabla 2-2 Propiedades semiconductores (tomada de [2])	27
Tabla 2-3 Ejemplo de diferentes bandas de frecuencia asignadas en la investigación espacial (tomada de [23]).....	33
Tabla 2-4 Elementos comunicaciones Voyager (tomada de [27])	36

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

¿Qué es el espacio profundo? Se entenderá por espacio profundo aquel que se extiende desde más allá del sistema Tierra-Luna hasta el infinito.

Desde el momento del lanzamiento, la única conexión que existe entre una nave espacial y la Tierra es el sistema de comunicaciones que se establece entre ambos elementos.

En 1977, desde Cabo Cañaveral (Florida, EE. UU.) se lanzaron las sondas espaciales robóticas Voyager 1 y Voyager 2, ambas hermanas e idénticas.

La concepción primigenia de estas sondas fue “Mariner”, un programa para el estudio de los límites del sistema solar, sin embargo cuando Voyager 2 alcanzó Saturno, cambió su trayectoria llegando a estar a la menor distancia de Urano y Neptuno en 1986 y 1989, respectivamente.

Ambas sondas, después de más de 45 años de misión aún siguen operativas a día de hoy.

El 10 de noviembre de 2021, la sonda Voyager 1 se encontraba a 155,2827 UA¹ de la Tierra, es decir 23.229.972.863 km [1]. ¿Cómo es posible establecer una comunicación a semejante distancia?

Para superar la enorme distancia de comunicación y la masa y potencia limitadas de las naves espaciales que se encuentran viajando por el espacio, las tecnologías de comunicaciones en el espacio profundo desarrolladas para la NASA han contribuido al establecimiento de nuevos y emocionantes conceptos de misión.

Se hará alusión a lo largo de este TFM a dos entidades de EE.UU punteras y por lo tanto de obligada referencia en la materia que aquí se desarrolla:

- Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA)
- El Laboratorio de Propulsión a Reacción o Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL), ubicado en Pasadena, California que es un centro de investigación y desarrollo financiado por el gobierno federal de los Estados Unidos y gestionado por el Instituto de Tecnología de California para la NASA.

De vuelta a la Tierra, aunque se haya convertido en algo muy cotidiano en nuestras vidas, no hay que pasar por alto la que es nuestro medio de comunicación primordial sin el que ya la vida nos sería muy difícil en nuestro día a día: la red de redes, la todopoderosa Internet.

Pero, ¿cuándo despegará Internet hacia el espacio?, ¿qué inconvenientes hacen que no esté establecida y pueda ser usada por las misiones espaciales?, ¿hay estudios o desarrollos que estén trabajando ya en esa línea? En la parte de este TFM que se ha llamado “hacia una Internet interestelar”, se quiere indagar para contestar las preguntas anteriores y alguna más que sin duda ha de surgir.

Parece claro que el concepto de Internet tal y como se conoce en la Tierra no puede trasladarse tal cual al espacio interestelar. Éste es un medio mucho más hostil y que presenta ya, nada más pensarlo una gran dificultad que hay que salvar: las enormes distancias que se manejan.

¹ 1 UA equivale a 149.597.870,691 kilómetros.

1.2 Objetivos

Como el propio título de este TFM indica, el primer objetivo es el de realizar un prototipo de arquitectura de red de comunicaciones que preste servicio a los integrantes de las misiones espaciales: ya sean humanos, ya sean naves o sondas espaciales o cualquier otro dispositivo o elemento susceptible de intercomunicar o intercomunicarse con el resto sean cuales sean sus posiciones (Tierra, espacio, otros planetas o satélites, etc...).

El entorno del autor, las Fuerzas Armadas y, en concreto la Armada, se plantea, como un escenario muy complicado a la hora de establecer comunicaciones con determinadas unidades que se encuentran desplegadas en la mar, donde a veces es difícil manejar la información debido a las barreras que, por no poder establecer un enlace con un cable desde el puerto base hasta el barco, se tienen que llevar a cabo en mitad del océano. Más aún, los submarinos que trabajan sumergidos como consecuencia de su naturaleza de discreción y vigilancia actualmente sufren las consecuencias de su medio y es bastante frecuente que permanezcan incomunicados durante largos periodos de tiempo, con todo lo que eso pueda conllevar.

La analogía conceptual que nace de la consideración de escenarios hostiles para establecer una red de comunicaciones tanto en el espacio como en el medio submarino, plantean al autor el segundo objetivo que será el de buscar un concepto de solución aplicable al ámbito de las comunicaciones submarinas de la Armada que presente una opción a implementar de manera práctica en un futuro (pero con una base real como punto de partida) con el desarrollo de la tecnología, en aras de una mayor seguridad en el cumplimiento de las misiones.

1.3 Organización de la memoria

En el desarrollo de la memoria de este TFM se pueden considerar en tres partes fundamentales:

En la primera parte se aborda el estudio de las comunicaciones en el espacio profundo. Los equipos que forman este complejo sistema de comunicaciones y sus peculiaridades. Por otro lado también se considera cómo se trata la información que se recibe en la Tierra: dónde se recibe y cómo se encamina hasta hacerla llegar a su destino final que podrá ser un organismo público una empresa de investigación, etc...

Dentro de esta primera parte, el autor se detiene algo más en un elemento primordial tanto por importancia dentro de este sistema de comunicaciones, como por sus dimensiones: las antenas usadas para las comunicaciones espaciales del espacio profundo.

La segunda parte de la memoria consta del estudio acerca de la construcción de una Internet a nivel interestelar. Algo semejante a lo que se está tan acostumbrado a manejar en la Tierra y que sería un enorme paso en las comunicaciones con las naves, sondas y astronautas que viajan por el espacio profundo. ¿Qué ha supuesto la intención del desarrollo de esta nueva red? ¿Qué propiedades le serán inherentes? El autor propondrá una arquitectura modelo a implementar en un caso práctico.

En la tercera y última parte, tomando como base lo ya tratado anteriormente y como aplicación a un caso práctico de las FAS, se produce un cambio radical de escenario puesto que el autor desarrolla una novedosa arquitectura para conseguir la mejora de las comunicaciones submarinas en la Armada que actualmente, son bastante complejas de mantener sobre todo de cara a las condiciones de secretismo que un submarino debe cumplir para no ser detectado.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Algunos conceptos generales de los sistemas de comunicaciones

2.1.1 Introducción

El hilo conductor que se seguirá a la hora de desarrollar este TFM será el de los sistemas de comunicaciones. Éstos tienen sus peculiaridades como es lógico, dependiendo de la arquitectura a la que tengan que prestar servicio. Más aún si cabe, en el caso particular de este Trabajo donde se tratarán modelos pensados para dar servicio en el espacio. Ahí las condiciones son muy particulares y tienen sus propias casuísticas tanto conceptuales, como de equipamiento.

No obstante, hay algunos conceptos que son comunes a todos los sistemas de comunicaciones y que conforman la esencia de los mismos. El autor ha preferido tratar estos conceptos independientemente en puntos previos al abordaje de los sistemas utilizados en las comunicaciones espaciales propiamente dichas.

2.1.2 Ruido térmico y densidad espectral

Los sistemas de comunicaciones se ven afectados por el ruido. El ruido térmico existe en función de la temperatura; y cuanto más alta sea, el ruido será también más elevado porque los portadores de carga tendrán una energía mayor; por el contrario, cuanto más baja sea la temperatura, la energía de los portadores será menor y el ruido térmico más bajo.

W. Mumford [2] define el ruido térmico como: “El movimiento aleatorio de los electrones libres en un conductor causado por la agitación térmica que da lugar a un voltaje en los extremos abiertos del conductor. En la mayoría de los conductores, los componentes de frecuencia de este ruido cubren uniformemente todo el espectro de radio”.

Puesto que este ruido depende de manera principal de la temperatura del sistema es por lo que recibe el nombre de ruido térmico. El ruido térmico no puede eliminarse pero sí puede suavizarse hasta llevarlo a un grado aceptable.

A la hora de tomar en consideración comunicaciones satélite, en el enlace ascendente el ruido presente es predominantemente térmico, pero en el enlace descendente, el ruido térmico es afectado por otros factores como son la radiación aleatoria captada por la antena receptora en tierra. Esta radiación aleatoria incluye la de la atmósfera, los cuerpos calientes que se encuentren en el campo de vista de la atmósfera, los 2,7 K del fondo cósmico y la porción de tierra vista por los lóbulos laterales de la antena.

Se asume que el ruido del sistema receptor tiene una densidad espectral uniforme en toda la banda de frecuencias que contiene la señal.

Se define la densidad espectral del ruido unilateral N_0 (W/Hz) como [3]:

$$N_0 = kT$$

donde:

k = Constante del Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23}$ J/K).

T = Temperatura equivalente de ruido del sistema.

2.1.3 Modulaciones PSK

La modulación por desplazamiento de fase, PSK consiste en variar la fase de una señal alterna portadora mientras que se mantienen constantes la amplitud y la frecuencia. En este tipo de modulación,

por lo tanto, la información no se encuentra ni en la amplitud ni en la frecuencia de la portadora sino en su fase [4].

Las modulaciones BPSK² y QPSK³ son técnicas de codificación M-arias⁴ en las que M = 2 para BPSK y M = 4 para QPSK.

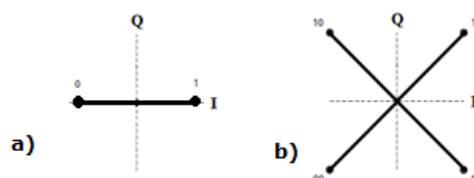


Figura 2-1 Modulaciones M-arias a) BPSK, b) QPSK

En la QPSK, los datos binarios de entrada se combinan en grupos de dos bits (dibits) y cada uno de esos grupos genera una de las cuatro fases posibles de salida.

Obsérvese en la Figura 2-2 la variación de fase de salida en función del tiempo para un modulador QPSK en función de la entrada de dibits.

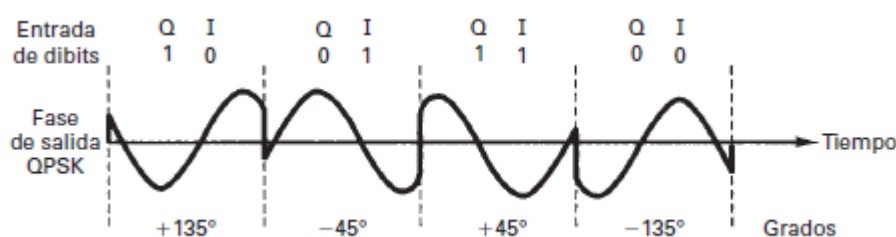


Figura 2-2 Fase de salida en función del tiempo para un modulador QPSK (extraído de [4])

La ventaja de QPSK sobre BPSK está en que con QPSK se transmite el doble de la velocidad de datos en un determinado ancho de banda si lo comparamos con BPSK, usando la misma tasa de error [4].

2.1.4 Probabilidad de error y tasa de errores de bits

Aunque es muy común el uso de ambos términos de forma indistinta, realmente tienen significados distintos. La probabilidad de error P(e) es la expectativa teórica o matemática de que un sistema determinado tenga una tasa de errores mientras que la tasa o frecuencia de errores de bits (BER)⁵ es un registro empírico (histórico) del funcionamiento real de un sistema en cuanto a errores [4].

Una tasa de error de bits se mide y a continuación se compara con la probabilidad esperada de error para así evaluar el desempeño de un sistema.

La probabilidad de error es una función de la relación de potencia de portadora a ruido (o más específicamente, el promedio de la relación de energía por bit entre la densidad de potencia de ruido) y de la cantidad de condiciones posibles de codificación que se usan.

² Binary Phase Shift Keying

³ Quadrature Phase Shift Keying

⁴ "M" indica el número de combinaciones posibles.

⁵ BER = Bit Error Rate.

La relación de potencia de portadora a ruido es la de la potencia promedio de la portadora entre la potencia del ruido térmico.

La relación de energía por bit entre la densidad de potencia de ruido se expresa como: E_b / N_0

La probabilidad de error en una transmisión QPSK se define como [5]:

$$P_{BPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right] = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right)$$

“erfc” es la función error, también conocida como función error de Gauss.

La probabilidad de error es tanto menor cuanto mayor es el argumento de erfc.

Hay que destacar que la E_b / N_0 se mantiene la misma tanto para BPSK como para QPSK. La explicación es porque aunque en QPSK cada canal tiene una potencia total de salida mitad que la de un BPSK, el ancho de banda de ruido efectivo también es la mitad ya que el tiempo de símbolo es doble al dividirse los bits entre el canal I y el Q.

2.2 Las antenas reflectoras. Generalidades

2.2.1 Introducción

Debido a que las necesidades tecnológicas han exigido antenas cada vez más avanzadas, han surgido muchos métodos analíticos, numéricos y experimentales algunos de ellos recientemente desarrollados y también se han construido y examinado una extensa variedad de configuraciones de antenas. Entre ellos se puede hacer referencia a antenas lineales, antenas logarítmicas periódicas, antenas de bocina, antenas reflectoras, etc... Como es lógico, todos estos modelos no pueden estudiarse en este TFM. Las antenas reflectoras son las que se utilizan con mayor frecuencia tanto en las naves espaciales como en los complejos en tierra para las comunicaciones entre el espacio profundo y la Tierra y por este motivo es por el que dirigiremos la atención del presente estudio a este tipo de antenas.

Una característica importante de una antena es comprobar qué capacidad tiene para concentrar la energía en una dirección con referencia a la radiación en otras direcciones. Esta característica se describe más fácilmente utilizando el concepto de vector de Poynting⁶ que puede definirse como el producto vectorial del campo eléctrico y el campo magnético, cuyo módulo es la intensidad de la onda:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{E} \times \vec{B}$$

E representa el campo eléctrico.

H representa la intensidad del campo magnético.

B es el campo de inducción magnética, siendo μ la permeabilidad magnética del medio. Su unidad en el SI es el W/m².

2.2.2 Conceptos básicos de las antenas reflectoras

Las antenas reflectoras han existido desde los días de Hertz

Estas antenas reflectoras se caracterizan por utilizar un espejo reflector metálico para concentrar la radiación poco directiva de un alimentador en un haz colimado de alta directividad:

⁶ https://es.wikipedia.org/wiki/Vector_de_Poynting

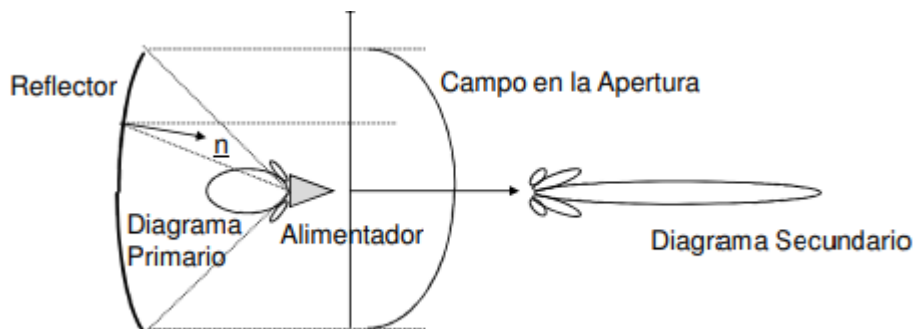


Figura 2-3 Concepto básico de funcionamiento de una antena reflectora (extraído de [6])

Una característica de las antenas parabólicas que tienen el alimentador en el foco es que el propio alimentador obstruye los rayos reflejados lo que genera una región de sombra o de baja intensidad en el centro de la apertura.

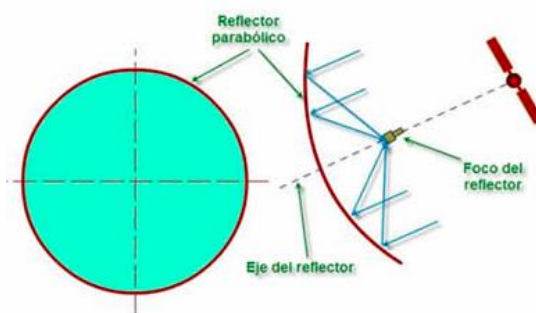


Figura 2-4 Zona de sombra sobre el reflector (extraído de [7])

Cuando el alimentador está en la trayectoria de la onda reflejada es que algo de la energía de ésta regresa al sistema alimentador. Esto tiene como efecto un desacoplamiento de impedancia.

Para evitar esto, se desplaza el alimentador y así dejarlo fuera de la onda reflejada. Esta antena se conoce como offset.

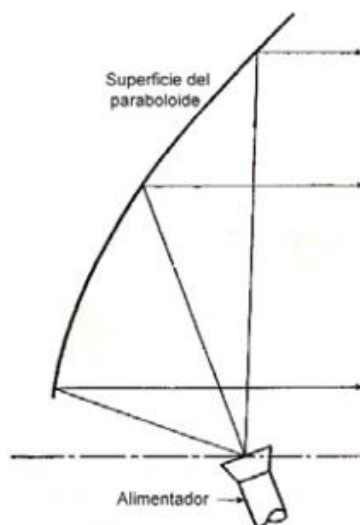


Figura 2-5 Antena reflectora en configuración offset (extraído de [8])

Casi todas las antenas reflectoras de la nave espacial se diseñan y analizan utilizando análisis de óptica física⁷ (PO), pero además se requieren muchas otras técnicas para diseñar y caracterizar completamente el sistema de antena. Se requieren programas precisos para diseñar y analizar la bocina de alimentación y transformar patrones de campo lejano en campo cercano para su uso en el análisis de PO.

Mediante el análisis de óptica física se calculan las corrientes inducidas sobre las superficies metálicas o reflectores iluminadas por el campo incidente.

Los campos radiados por una antena que incluya un reflector dependerán por una parte de las características de dicha antena: ancho de haz, nivel de lóbulo principal a secundario, polarización, etc... y por otra parte de las características geométricas que tenga el reflector: distancia focal y diámetro.

Desde el foco hasta el reflector las ondas se propagan como ondas esféricas [9].

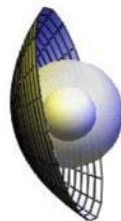


Figura 2-6 Propagación de ondas esféricas (extraído de [9])

Una vez reflejadas en la superficie parabólica se propagan como ondas planas hasta la apertura [9].

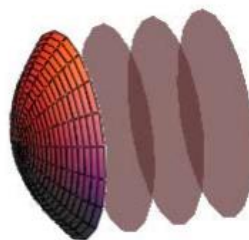


Figura 2-7 Propagación de ondas planas (extraído de [9])

El parámetro distancia focal a diámetro de apertura⁸ determinará las propiedades del reflector. Un reflector con gran curvatura tendrá un valor reducido, mientras que el reflector estará más cerca de un plano con valores superiores a 1.

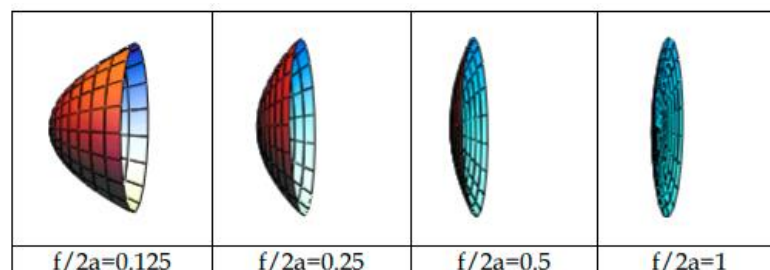


Figura 2-8 Parámetro distancia focal a diámetro de apertura (extraído de [9])

⁷ Calcula los campos de radiación a partir de las corrientes inducidas sobre las superficies reflectoras iluminadas.

⁸ $f / 2a$

Como se puede observar, el valor $f/2a = 1/8$ supone que el foco se encuentra en el interior del volumen limitado por el paraboloide y la superficie de la apertura.

La mayor parte de los reflectores parabólicos utilizados en las comunicaciones satélite utilizan valores de $f/2a$ típicos de 0,4.

2.2.3 Ganancia de las antenas reflectoras

La expresión de la ganancia (G_A) de las antenas reflectoras tiene la siguiente expresión matemática [6]:

$$G_A = 4\pi \frac{A_{apertura}}{\lambda^2} \varepsilon_{total}$$

Donde la Eficiencia total (ε_{total}) es el resultado de varias eficiencias parciales [6]:

- Rendimiento de Radiación (típicamente el del alimentador). Pérdidas de ganancia debidas a la iluminación no uniforme en la apertura.
- Eficiencia de Spillover. Es la pérdida de ganancia como consecuencia de la radiación del alimentador fuera del ángulo que contiene el reflector.
- Eficiencia contrapolar. Es la medida de la pérdida de energía en la componente contrapolar⁹ radiada. En los sistemas centrados que no introducen componente contrapolar, esta eficiencia mide las características del alimentador.
- Eficiencia por error en la superficie. Está relacionada con las desviaciones del frente de fase en la apertura respecto de la onda plana ideal, debidas a las distorsiones de la superficie de los reflectores.
- Eficiencia por bloqueo. Aparece a causa de la porción de apertura bloqueada por:
 - Alimentador o subreflector.
 - Soportes del alimentador o del subreflector.
- Pérdidas por difracción. Se producen cuando la onda reflejada por el subreflector se aparta de una onda esférica presentando rizados de amplitud y fase, que alcanzan la apertura reduciendo la ganancia y producen spillover adicional fuera del receptor principal.
- Pérdidas por desplazamiento axial. La variación en la posición del alimentador a lo largo del eje z, produce un error de fase de orden cuadrático en el campo de apertura que:
 - Rellena los nulos del diagrama de radiación.
 - Disminuye la ganancia.
- Pérdidas por desplazamiento lateral. El desplazamiento lateral de un alimentador causa un apuntamiento del haz en sentido contrario del movimiento del alimentador. Los efectos que se producen son:
 - Caída en la ganancia.
 - Efecto de coma: Incremento asimétrico en el nivel de los lóbulos secundarios hasta juntarse uno de ellos con el lóbulo principal.

⁹ Con polarizaciones lineales, la componente contrapolar de otra es la lineal girada 90°.

2.3 Las Comunicaciones en el Espacio Profundo

2.3.1 Introducción

Las comunicaciones en el espacio profundo se producen entre la nave espacial y la Tierra. Éstas deben realizarse de una manera fiable y extremadamente confiable. Los datos científicos que desde el espacio se envían a la Tierra son insustituibles y en caso de pérdida sólo podrán reemplazarse mediante el lanzamiento de otra misión (con todo lo que ello supone tanto en presupuesto económico, como en tiempo que transcurre en organizarla y aprovisionarla. De la misma forma, errores en comunicaciones destinadas a comandar las naves o recibir información de su estado operativo pueden dar al traste la misión. Es por tanto muy importante como se ha comentado que el DSN¹⁰ se consolide como un sistema robusto, fiable y confiable.

Las comunicaciones en el espacio profundo se ven afectadas por los numerosos efectos a los que se expone una trayectoria de una distancia tan elevada y que atraviesa tantos medios diferentes. Todo esto ha de tenerse en cuenta a la hora de materializar un sistema de comunicaciones de este tipo.

Una vez que la nave espacial se ha lanzado, por lo general los fallos de a bordo no podrán repararse y juega un papel muy importante el uso de sistemas redundantes.

La degradación de los sistemas expuestos a duras condiciones como son las del espacio exterior, las orientaciones imperfectas de las antenas, etc... implican que el diseño de los equipos se adelante a todas estas vicisitudes para tener margen de reacción ante las contingencias.

La necesidad de minimizar el peso de las naves espaciales, el consumo de energía a bordo y sus envergaduras, como son: antenas, dispositivos y elementos de soporte representa un hándicap que hay que tener muy en cuenta en los diseños.

Es una realidad que cada misión espacial ha dado lugar a nuevos diseños de telecomunicaciones cada vez más mejorados y aunque se han logrado avances muy sustanciales en la exploración más allá del sistema solar, las numerosas galaxias y los miles de millones de estrellas por investigar son un indicativo de que los desafíos que quedan por venir son muy emocionantes y requerirán de sistemas de telecomunicaciones cada vez más avanzados para transmitir información hacia y desde el espacio profundo.

¹⁰ DSN son las siglas de Deep Space Network, Red del Espacio Profundo en castellano.

2.3.2 El diseño del sistema de telecomunicaciones

Los sistemas de telecomunicaciones del espacio profundo se utilizan para la transmisión de información entre una sonda, nave o estación espacial y una estación terrestre.

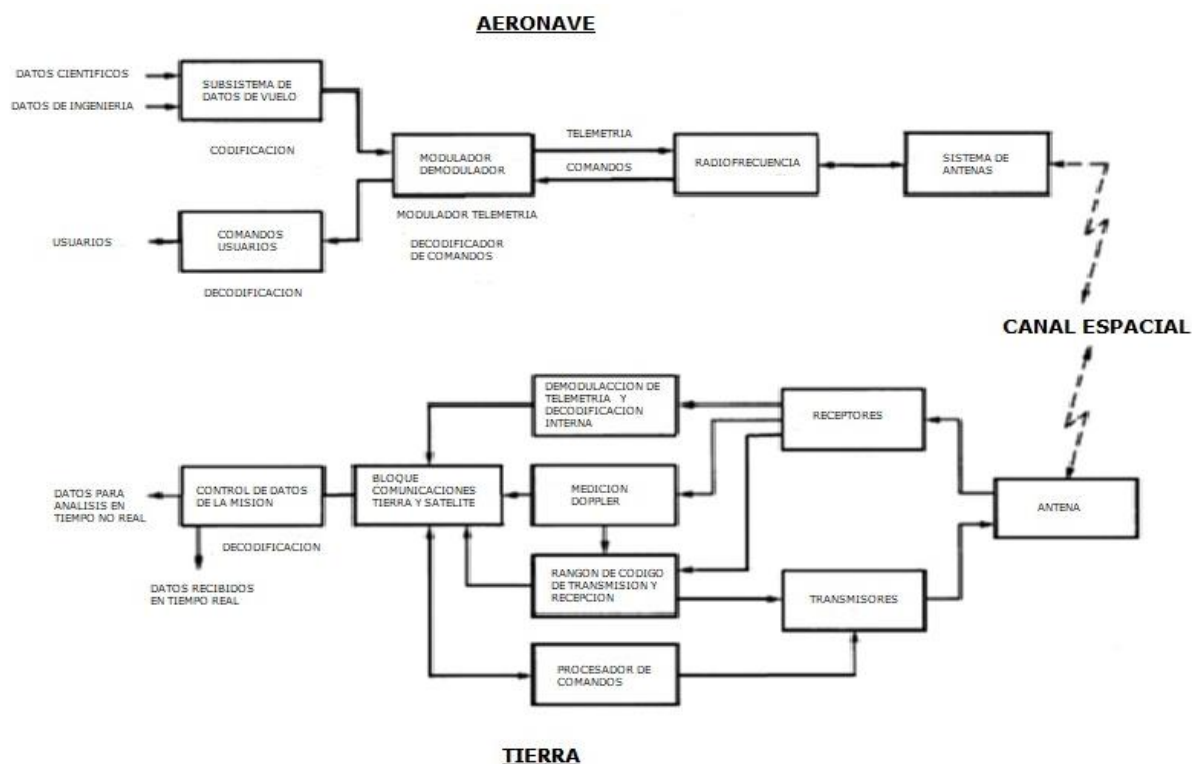


Figura 2-9 Diagrama de bloques de un sistema DSN típico (extraído de [3])

Las funciones que básicamente se realizan son tres: telemetría, mando y seguimiento [3].

- **Telemetría.-** Información relativa a datos científicos, datos de ingeniería e imágenes. Estas transmisiones se realizan desde la nave espacial a la Tierra.
- **Mando.-** Las naves espaciales están diseñadas para conseguir un alto grado de automatización y autonomía, es necesario transmitirles comandos en determinados momentos (como puede ser por ejemplo en el caso que haya que cambiar una ruta de vuelo). En este caso las señales viajan desde la Tierra a la nave espacial.
- **Seguimiento.-** Información sobre la situación y velocidad de la nave, el medio de propagación y las propiedades del sistema solar lo cual permite el seguimiento de la trayectoria y la navegación de la nave espacial. En sentido nave a Tierra.

Las frecuencias que se utilizan para realizar las comunicaciones desde las estaciones de tierra con las naves espaciales pertenecen a la parte de microondas dentro del espectro radio [3]:

- Banda S.
- Banda X.
- Banda K.
- Banda Ka.

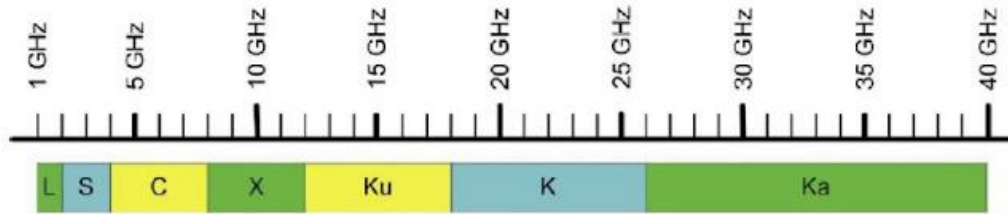


Figura 2-10 Distribución de frecuencias en las bandas usadas para las comunicaciones con las naves espaciales (extraído de [10])

La atmósfera terrestre es, en esencia, completamente transparente a las frecuencias que se utilizan para las comunicaciones en el espacio profundo.

Se ha hablado de las tres funciones o parámetros básicos que manejamos a la hora de trabajar con un sistema DSN. En base a la información que hasta ahora hemos recibido, en la cual estamos viendo que estos sistemas de comunicaciones trabajan con distancias tan grandes, nos preguntamos acerca de cómo se interactúa con la primera magnitud que se nos viene a la cabeza y que es básica: la potencia.

Tenemos dos caminos: desde la Tierra a la nave espacial y desde la nave espacial a la Tierra. Manejar las potencias de las señales que van desde la estación terrena hacia la nave espacial es “relativamente sencillo” porque podemos disminuirla y aumentarla con antenas y alimentaciones que únicamente se encuentran con la barrera de la tecnología existente, sin embargo cuando hablamos de señales que viajan desde la nave espacial hasta la Tierra, nos encontramos con muchos problemas y sobre todo, como ya se ha mencionado, los principales límites que la propia aeronave nos impone que son básicamente los físicos y los de la energía.

Se debe analizar, por tanto, si existe alguna forma de poder aumentar la potencia de la señal que la nave espacial envía y que respete en la medida de lo posible las barreras físicas y energéticas.

En este análisis, estudiaremos el circuito de telemetría, cuya información se realiza desde la nave espacial hasta la Tierra.

Concretamente, en el enlace descendente¹¹, las frecuencias utilizadas en DSN son¹²:

- Banda S (2,20 - 2,30 GHz).
- Banda X (8,40 – 8,50 GHz).
- Banda K (25,5 – 27 GHz).
- Banda Ka (31,8 – 32.3 GHz).

Sea P_T la potencia transmitida por la nave espacial a una distancia r de la estación receptora en la Tierra. Suponiendo que la potencia fuera radiada isotrópicamente¹³, la densidad de flujo de potencia “ ρ ” sería [3]:

$$\rho = \frac{P_T G_T}{4\pi r^2}$$

Donde $4\pi r^2$ es el área de una esfera de radio “ r ”.

El nivel de señal recibida P_R se obtiene multiplicando la densidad de flujo en el receptor por el área de la antena receptora “ A_r ” multiplicado a su vez por la eficiencia “ μ ”[3]:

$$P_R = \rho \mu A_r$$

¹¹ Es el enlace de comunicaciones que se establece en el sentido desde la nave espacial hacia la Tierra.

¹² Fuente Complejo de comunicaciones del Espacio Profundo de Madrid.

¹³ Isotrópico significa igual en todas las direcciones del espacio

La potencia recibida se puede incrementar mediante 3 acciones distintas [3]:

1. Aumentando la potencia transmitida, lo cual como se ha comentado anteriormente tiene repercusiones en el sistema espacial puesto que el generar ese aumento de potencia representa consumir una fracción sustancial de la potencia total disponible en la nave espacial.
2. Puede aumentarse la ganancia de la antena transmisora para concentrar la potencia transmitida con mayor intensidad en la antena receptora. Lograr este mayor enfoque requiere que la antena de la nave espacial sea más grande, lo cual afecta al tamaño y peso de la nave espacial aparte de que hay que conseguir tener la capacidad suficiente como para apuntar el estrecho haz resultante.
3. Aumentar el área de la antena receptora para así, recoger la mayor cantidad posible de potencia de la señal de entrada.

El proceso de recepción introduce la mayor parte del ruido que afecta a la señal recibida. Todos los objetos irradian energía en el espectro correspondiente a las frecuencias radio. El fondo térmico omnipresente del universo cuya temperatura es de 2,7 Kelvin, produce un ruido radio que representa una fracción importante de la potencia de la señal que llega a la antena receptora en la Tierra.

En definitiva, lo que se saca en claro es que la capacidad de establecer una comunicación en el marco de la DSN, no depende sólo de la potencia de la señal emitida por la nave espacial, sino que también lo hace de la relación señal / ruido y de la eficiencia de esta relación señal / ruido.

Conclusión: el rendimiento de estas tres funciones básicas descritas (telemetría, mando y seguimiento) en un sistema de comunicaciones de espacio profundo, dependen de la cantidad de señal que se encuentre presente en relación al ruido en el que esté envuelta. Nos estamos refiriendo como es lógico a la relación señal / ruido.

En la DSN se emplean amplificadores que tienen la particularidad de poder aumentar varios miles de veces la señal que se recibe sin introducir ruido en este proceso. Para ello usan la criogenia, llevando los equipos a trabajar a temperaturas próximas al cero absoluto. Existen varios tipos, pero en este trabajo se verá el usado por la NASA en DSN que es el tipo “maser”.

2.3.3 Potencia recibida

En todos los sistemas de comunicaciones es muy importante el concepto de potencia recibida. Cuando se habla del espacio profundo donde las distancias son tan grandes y hay tantos factores que contribuyen a que haya pérdidas, es necesario conocer cuál será el valor de la potencia recibida en el enlace. Este cálculo, será por tanto el primer paso que deberá dars en el análisis de un enlace de Comunicaciones.

La potencia de la señal recibida se encuentra condicionada por numerosos factores que le influyen desde que se transmitió.

La ecuación que define la potencia recibida es la siguiente [11]:

$$P_R = P_T L_T G_T L_{TP} L_S L_A L_P L_{RP} G_R L_R$$

P_R = Potencia de la señal recibida a la entrada del receptor o preamplificador.

P_T = Potencia total transmitida.

L_T = Pérdida del circuito de transmisión debido al cableado.

G_T = Ganancia de la antena transmisora.

L_{TP} = Pérdida de puntería de la antena transmisora.

L_S = Pérdida en el espacio.

L_A = Atenuación atmosférica.

L_P = Pérdidas de polarización entre antenas transmisora y receptora por desajuste en los patrones de polarización.

L_{RP} = Pérdida de puntería de la antena receptora.

G_R = Ganancia de la antena receptora.

L_R = Pérdida del circuito de recepción debido al cableado.

2.3.4 Ganancia y relación señal / ruido

Cuando se está usando una antena en una nave espacial para transmitir datos a la Tierra, el interés se centra en saber con qué eficiencia la antena transforma su potencia de entrada en potencia radiada. Es lógico, que debido a las pérdidas resistivas, la potencia radiada siempre es menor que la potencia de entrada total.

Los enlaces de comunicación con el espacio profundo son asimétricos, fluyen muchos más datos en el enlace descendente que en el enlace ascendente puesto que el enlace descendente contiene “la ciencia” y los datos de telemetría y el enlace ascendente se utiliza principalmente para comandar la nave espacial.

El elemento clave del rendimiento del enlace de telecomunicaciones es la relación señal / ruido (SNR) de la potencia recibida en tierra cuya expresión es [12]:

$$S/N = \frac{P_T G_T G_R}{4\pi R^2 N} = \frac{4\pi P_T A_T A_R}{\lambda^2 R^2 k B T_S}$$

Donde:

P_T = Potencia de transmisión de la nave espacial.

G_T = Ganancia de transmisión.

G_R = Ganancia de recepción.

R = Distancia a la nave espacial.

N = Ruido total.

A_T = Área efectiva de la antena transmisora (nave espacial).

A_R = Área efectiva de la antena terrestre receptora.

T_S = Temperatura de ruido del sistema receptor.

λ = Longitud de onda.

k = Constante de Boltzman.

B = Ancho de banda.

2.3.5 Fuentes de ruido en DSN

Las comunicaciones entre la Tierra y una nave espacial, presentan problemas únicos y especiales. Un elemento esencial a utilizar en la red de espacio profundo es el preamplificador de ruido ultrabajo. Se tratará en este apartado sobre el sistema de microondas de bajo ruido que forman el “front end” de

todas las estaciones terrestres del DSN. El front end de microondas¹⁴ de cada antena es una pieza fundamental para establecer la sensibilidad, la diversidad de frecuencias, la polarización y las capacidades de la cadena receptora y por ende de la estación terrestre. La sensibilidad y la capacidad del sistema de recepción se definen por G/T donde G es la ganancia de la antena y T es la temperatura de ruido de toda la cadena receptora en general, normalmente conocida como temperatura de ruido de funcionamiento del sistema, T_{op} . Para poder mejorar el rendimiento de recepción en la estación, habrá que mejorar G/T lo cual puede hacerse aumentando la ganancia de la antena, disminuyendo T_{op} o haciendo ambas cosas a la vez. Antes se hacían las dos cosas a la vez y resultaba más fácil y rentable disminuir T_{op} que aumentar la ganancia de la antena.

El costo de recibir datos de naves espaciales en el espacio profundo si lo medimos en euros por bit es proporcional a la temperatura de ruido del sistema de recepción. Al reducir a la mitad la temperatura de ruido del sistema receptor, la velocidad máxima de datos transferibles se duplica y el costo por bit se reduce a la mitad.

Las fuentes de ruido se pueden separar en internas y externas. Las fuentes de ruido externas incluyen fuentes galácticas, fuentes solares, lunares y planetarias, fuentes atmosféricas (incluyendo aquí los relámpagos), absorciones atmosféricas y captaciones no deseadas por parte de la antena.

Las fuentes de ruido internas incluyen ruido térmico de disparo¹⁵ y de Barkhausen¹⁶. El ruido térmico es la fuente mínima de ruido interno para los sistemas receptores de microondas.

2.3.6 Temperatura de ruido de funcionamiento del sistema

La temperatura de ruido de funcionamiento del sistema es importante para la red del espacio profundo (y para otros sistemas operativos también) a fin de determinar la calidad de funcionamiento del sistema de comunicaciones entre la nave espacial y las antenas terrestres.

Se presentarán y analizarán cuáles son las contribuciones de la temperatura de ruido del sistema en la DSN. Las antenas utilizadas en la DSN constan básicamente de un amplificador de bajo ruido (LNA) y el sistema receptor. La temperatura de ruido de funcionamiento del sistema, T_{op} en K, es el resultado de varias contribuciones [2]:

$$T_{op} = T_{cielo} + T_{antena} + T_{alimentación} + T_{LNA} + T_f$$

$T_{cielo} = T_{atmósfera} + T_{radiación\ residual} / Pérdidas\ atmosféricas.$

$T_{antena} =$ Temperatura de ruido debida a la antena, K.

$T_{alimentación} =$ Temperatura de ruido de los componentes de alimentación, K.

$T_{LNA} =$ Temperatura de ruido del LNA, K.

$T_f =$ Temperatura de ruido del amplificador de seguimiento, K.

Supongamos este sencillo ejemplo:

En la Figura 2-11 se representa el esquema simplificado de un receptor:

¹⁴ Paquete que contiene la bocina y la guía de ondas.

¹⁵ El ruido de disparo son aleatorias variaciones de la corriente eléctrica cuando atraviesan un conductor.

¹⁶ El ruido de Barkhausen se da en materiales ferromagnéticos cuando aparecen "saltos" discretos originados por cambios en su magnetización.

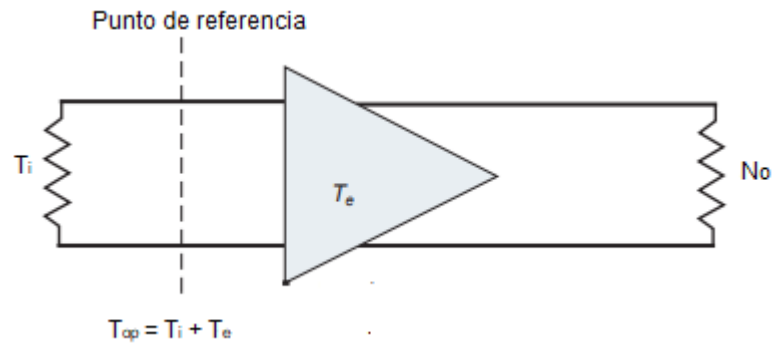


Figura 2-11 Sistema receptor (extraído de [2])

Tenemos una entrada, en nuestro caso una antena y además en el esquema se representa un amplificador. Se define un punto de referencia con respecto al cual establecer la temperatura de ruido del sistema.

T_i = Fuente de entrada de temperatura de ruido, K.

T_e = Temperatura de ruido efectiva de entrada del amplificador, K.

En base a todo lo anterior, la expresión de la temperatura de ruido de funcionamiento de este sistema será [2]:

$$T_{op} = \frac{P_o}{kBG}$$

P_o = Potencia de ruido de salida del receptor, W.

k = Constante de Boltzmann, J/K.

B = Ancho de banda del ruido, Hz.

G = Ganancia de potencia.

Las temperaturas de ruido del sistema de un receptor, tal y como hemos visto en el ejemplo, se definen para una ubicación o punto de referencia específico. Por lo general las contribuciones individuales de la temperatura de ruido se determinan en otras ubicaciones de referencia y deben trasladarse a la ubicación de referencia común.

Una vez obtenida esta temperatura de ruido del sistema (T_{op}), se podrá calcular la densidad espectral del ruido (N_0) conforme a la expresión indicada en el apartado 2.1.2.

2.3.7 El máser

Un máser es un sistema amplificador inicialmente concebido para el campo de las microondas pero que luego se extendió al campo del infrarrojo y del visible.

“La palabra maser viene de “Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation”. El principio de un máser es similar al de un láser pero dentro del campo de las microondas y están basados en el fenómeno de emisión estimulada de radiación que fue estudiada por Einstein en 1916 y establece que cuando una molécula se halla en un estado de energía excitado E_2 mayor que la de su estado fundamental E_1 , puede producirse la transición espontánea desde el nivel excitado al fundamental emitiendo un fotón cuya frecuencia corresponde al salto energético $\Delta E = E_2 - E_1$ entre los dos niveles.

Pero si un fotón de esa misma frecuencia incide sobre una molécula en estado excitado, se puede inducir o estimular la transición al fundamental, resultando dos fotones de la misma frecuencia: el incidente más el emitido.

Cuando este fenómeno ocurre dentro de una cavidad de paredes reflectoras, se desencadena una cascada de emisiones estimuladas y se amplifica la radiación inicial siempre que dentro de la cavidad se mantenga de alguna forma la población de moléculas excitadas. Un orificio en la cavidad resonante, deja salir parte de la radiación (microondas) en forma de un haz estable de una frecuencia bien determinada. Todos los fotones son monocromáticos, en fase, con la misma polaridad y viajan en la misma dirección. Es un rayo con las mismas características que un rayo láser pero en lugar de ser luz visible, son microondas.”¹⁷

Actualmente los máser existentes necesitan operar a temperaturas en torno a 4 K, cercanas al cero absoluto¹⁸. Es por este motivo por el que, como se introdujo anteriormente en este trabajo, los máser dependen de la criogenia y su utilización se restringe a determinados nichos como es el caso de este estudio: la DSN.

Concretamente se utilizan máser de rubí como preamplificadores de muy bajo ruido en los sistemas de la Red de Espacio Profundo. Los máser de rubí se enfrían criogénicamente a temperaturas inferiores a 5 K con el objetivo de lograr niveles de ruido extremadamente bajos y se utilizan cerca de un punto focal de grandes antenas para recibir señales de naves espaciales que exploran el Sistema Solar.

Los máser de rubí son los amplificadores de microondas más sensibles y de menor ruido, además son resistentes y no son susceptibles a las fallas microscópicas que a veces ocurren en los dispositivos de unión submicrónica. Pueden soportar niveles de potencia de la señal de entrada de muchos vatios sin sufrir daños y no están sujetos a desgastes ni daños por transitorios de tensión.

El primer máser de cavidad instalado cerca del punto focal principal de una antena en una estación espacial profunda se realizó en el año 1960 y fue desarrollado por JPL. Se enfrió con helio líquido a 4,2 K.

Como ya se ha comentado, una clara ventaja del máser de rubí es su baja temperatura de ruido de entrada efectiva. También es una ventaja que la temperatura de ruido del máser pueda calcularse con precisión y fiabilidad a partir de las características de ganancia y pérdida del máser.

La temperatura de ruido de entrada efectiva del máser determina la temperatura de ruido de funcionamiento total del sistema receptor (T_e) puesto que T_e es la suma de la temperatura de ruido del máser y la contribución de ruido del receptor de seguimiento.

La alta ganancia del máser empleado en DSN que típicamente es de 45 dB, reduce la contribución del ruido del receptor de seguimiento.

¹⁷ <https://rsef.es/images/Problemas/OEF2015/P3-OEF-2015.pdf>

¹⁸ -273,15 °C

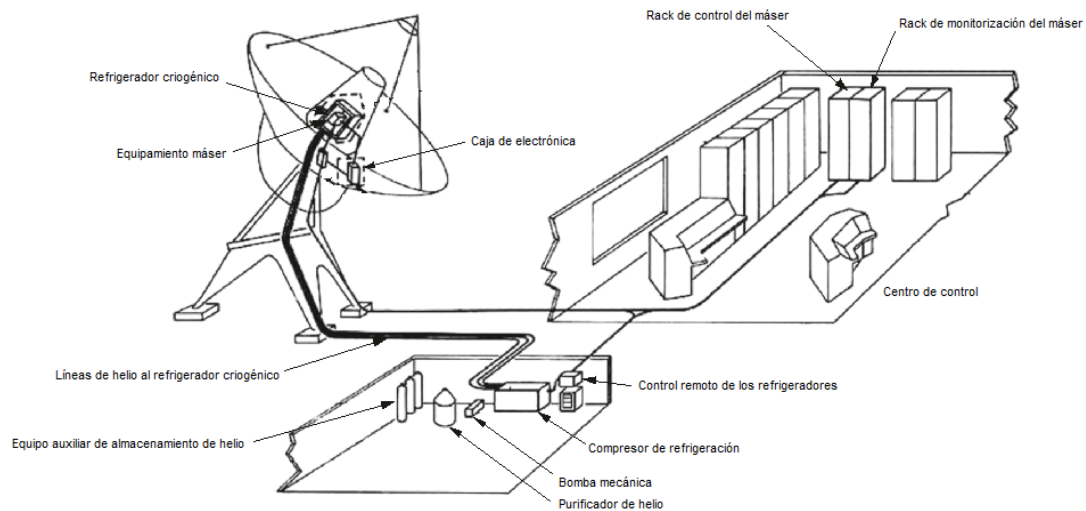


Figura 2-12 Ubicación del máser y sistema de refrigeración (extraído de [2])

2.3.8 Sistemas de refrigeración criogénicos

La Red de Espacio Profundo (DSN) utiliza el enfriamiento criogénico y alcanza temperaturas que van desde 1,5 K hasta 80 K aproximadamente dependiendo del sistema utilizado. Hay dos sistemas [2]:

- Sistema de refrigeración de ciclo abierto (OCR).
- Sistema de refrigeración de ciclo cerrado (CCR).

Los sistemas criogénicos se utilizan para enfriar preamplificadores de bajo ruido (como ya se ha mencionado anteriormente) y también algunos de los componentes del sistema de alimentación de la antena utilizada en los receptores de DSN.

El concepto refrigeración criogénica puede asociarse a aquel proceso de componentes y equipos a temperaturas inferiores a 150 K.

Los sistemas de refrigeración criogénica son diferentes de los equipos de refrigeración que nos encontramos o podemos encontrarlos en nuestro entorno. Comúnmente suelen utilizarse helio, hidrógeno o nitrógeno como refrigerantes de sistemas de refrigeración criogénica y se utilizan técnicas de aislamiento para prevenir las fugas de calor en partes refrigeradas del circuito. Los sistemas dependen generalmente del uso de tecnología de alto vacío, blindajes y materiales con baja conductividad térmica.

Los sistemas que utilizan helio líquido, hidrógeno líquido o nitrógeno líquido lo almacenan en un contenedor que ha de ser rellenado periódicamente.

Las técnicas y los materiales necesarios para transferir eficientemente señales de microondas desde un entorno que se encuentra a temperatura ambiente a un entorno criogénico no suelen ser compatibles con las técnicas utilizadas para proporcionar aislamientos técnicos. El desarrollo de líneas de transmisión de muy baja pérdida para microondas así como de guías de onda con alto aislamiento térmico supuso todo un reto porque, entre otras cosas los sellados de vacío o las ventanas en las líneas de transmisión o las guías de onda podrían degradarse debido a la acumulación de condensación en aquellas superficies que se enfriaron por conducción o radiación. Estos y otros problemas debían ser resueltos durante los primeros años del desarrollo del amplificador de bajo ruido (LNA) refrigerado criogénicamente para la DSN.

En los sistemas de refrigeración de ciclo abierto, transferir helio líquido al contenedor implicaba que, un aislamiento inadecuado en la línea de transferencia (por pequeño que este fuese), provocaría una

costosa falla y se desperdiciaría el helio líquido que era costoso. Se utilizaban alrededor de 6 l de helio líquido diarios para cada máser que estaba montado en una antena. Esto junto con otras dificultades encontradas, proporcionaron incentivos para buscar un enfoque alternativo como son los sistemas de refrigeración de ciclo cerrado.

En la Figura 2-13 se puede observar cómo se hizo una transferencia de helio al máser de una antena de 26 m en los primeros tiempos de uso de este tipo de tecnología allá por la década de los 60 del siglo pasado.



Figura 2-13 Fotografía de una operación de transferencia de helio líquido (extraído de [2])

Cierto es que los primeros sistemas de refrigeradores de helio de ciclo cerrado tampoco estuvieron exentos de problemas: tenían fallas en los engranajes de las unidades de accionamiento del refrigerador, los compresores que suministraban gas helio a alta presión a menudo contaminaban el helio con el lubricante utilizado en el compresor, los intercambiadores de calor se tapaban con lubricante que se solidificaba...

En principio, los costos y las dificultades experimentadas en el desarrollo y uso de los primeros másers enfriados criogénicamente parecían altos, pero el resultado de los másers de bajo ruido resultó compensar los esfuerzos. Hoy en día los avances en la tecnología de refrigeración criogénica han permitido maximizar el rendimiento de las comunicaciones en las misiones en el espacio profundo.

2.3.9 Ventajas de utilizar refrigeración criogénica

El enfriamiento de componentes de microondas y LNA a temperaturas criogénicas permite reducciones significativas en la temperatura de ruido de funcionamiento (T_{op}) de los sistemas receptores [2]

La sensibilidad de un sistema receptor es directamente proporcional a A / T_{op} donde A es el área efectiva de la antena receptora [2].

El rendimiento de un máser trabajando en frecuencias DSN (por debajo de 40 GHz) mejora a medida que se reduce la temperatura del baño. El término de temperatura del baño (T_b) se suele usar para

referirse a la temperatura termodinámica de un máser, ya sea que esté sumergido en un baño de helio líquido o enfriado por conducción con un refrigerador de ciclo cerrado [2].

La temperatura de ruido del máser es proporcional a la temperatura del baño y la ganancia del máser en dB varía inversamente con su temperatura.

En la Tabla 2-1 se pueden observar los valores de temperatura de ruido del sistema (Top) correspondientes a una antena de 70 m de la DSN funcionando en banda X a 8.420 MHz con un grado de elevación de 30 ° y en condiciones de clima seco y despejado.

Temperatura de los componentes del sistema de alimentación (K)	Pérdidas en componentes del sistema de alimentación (dB)	Temperatura de ruido del sistema (K)
300	0,24	32.729
80	0,12	17.800
40	0,10	16.475
20	0,08	15.902
4	0,08	15.603

Tabla 2-1 Temperatura de ruido del sistema (tomada de [2])

2.3.10 Amplificadores de bajo ruido HEMT

La inmensa mayoría de dispositivos electrónicos se basan en las propiedades de los semiconductores. Los semiconductores son dispositivos de estado sólido cuya conductividad eléctrica es más alta que la de un aislante pero más baja que la de un metal. A pesar de que la mayoría de los semiconductores son aislantes en el cero absoluto, son las impurezas y las imperfecciones las que permiten la manipulación de las propiedades del dispositivo semiconductor. De hecho, es la capacidad de diseñar con precisión y ajustar con precisión la conductividad de un semiconductor a nivel de capa atómica, lo que es esencial para la producción de dispositivos de transistores de alta movilidad de electrones (HEMT).

Aunque el silicio es el material comúnmente usado para la fabricación de transistores y además es la tecnología más madura, los semiconductores compuestos binarios III-V tienen propiedades de transporte muy superiores especialmente a altas frecuencias y bajas temperaturas.

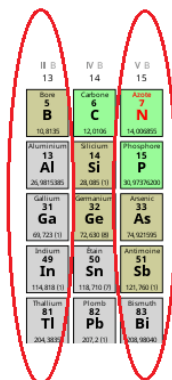


Figura 2-14 Semiconductores compuestos III - V

De hecho, la masa efectiva del GaAs e InP es menos de un orden de magnitud menor que el Si y la movilidad de sus electrones son más de dos órdenes de magnitud mayores que el del Si a temperatura del nitrógeno líquido (77 K), también hay que considerar que la frecuencia intrínseca máxima de operación de un dispositivo HEMT es directamente proporcional a la velocidad del electron [2].

En la Tabla 2-2 y a modo de ejemplo, se puede ver una comparativa de algunos datos relativos a: energía de banda prohibida (E_g) y movilidad de electrones (μ_e) para algunos semiconductores importantes con relación al tema que se está tratando.

Semiconductor	E_g (eV)	μ_e (cm ² / Vs)
Ge	0,66	3.900
Si	1,12	1.500
GaAs	1,42	8.500
InP	1,35	4.600
InAs	0,36	33.000
InSb	0,17	80.000

Tabla 2-2 Propiedades semiconductores (tomada de [2])

Un transistor de alta movilidad de electrones (HEMT) es una forma de FET¹⁹ que utiliza una característica inusual de un canal muy estrecho que le permite trabajar y obtener rendimientos excelentes para frecuencias extremadamente altas. Los HEMT son heterouniones, esto quiere decir que los semiconductores utilizados tienen espacios de banda diferentes, tal y como se puede ver en la Figura 3-10:

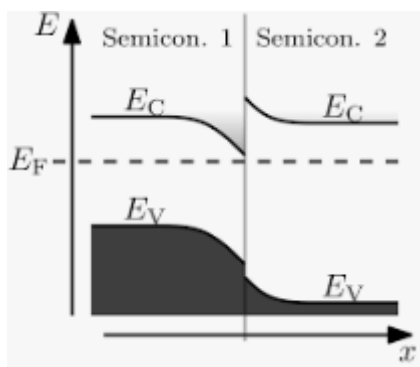


Figura 2-15 Alineación de bandas en una heterounión (extraído de [13])

Por ejemplo, el silicio tiene una banda prohibida de 1,1 eV, mientras que el germanio tiene una banda prohibida de 0,67 eV.

Entonces como se ha dicho anteriormente, un HEMT tiene como canal una unión (heterounión) entre dos materiales semiconductores (heteroestructura) con diferentes intervalos de banda, en lugar de una región dopada como ocurre con los FET. El efecto de esta unión es crear una capa muy delgada de electrones conductores con una concentración bastante alta, lo cual le confiere al canal una resistividad muy baja y le permite una alta movilidad o flujo de electrones [14], pero ¿cómo ocurre este fenómeno?

¹⁹ Transistor de Efecto de Campo.

Cuando se dopa un semiconductor, los electrones chocan con las impurezas dopantes. En el caso de los transistores HEMT se usan electrones de alta movilidad generados por la heterounión de una capa donadora de tipo N con una banda prohibida ancha y altamente dopada, por ejemplo AlGaAs y una capa canal de banda prohibida estrecha y que no está dopada, como puede ser GaAs. De esta forma se logra evitar el problema de los choques [15].

Supongamos, por tanto, para seguir con los datos del párrafo anterior, que tenemos una heteroestructura formada por AlGaAs (arseniuro de aluminio y galio) y GaAs (arseniuro de galio). Al juntar estos dos elementos en equilibrio el gráfico de sus bandas quedará según la Figura 2-16:

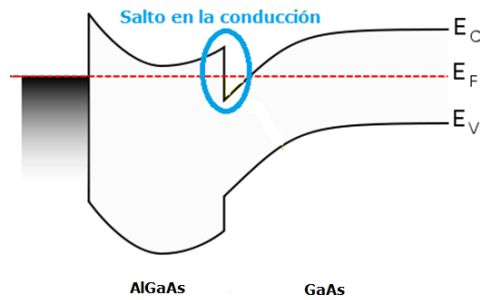


Figura 2-16 Estructura de un transistor HEMT (extraído de [15])

Se puede observar cómo se produce un salto en la conducción.

Los electrones generados en la delgada capa de tipo N de AlGaAs caen todos en la capa de GaAs dejando completamente vacía la capa anterior debido a que la heterounión creada por dos materiales de diferente ancho de banda prohibida forma un pozo cuántico en la banda de conducción del lado del GaAs donde los electrones se pueden mover rápidamente sin colisionar con ninguna impureza puesto que esta capa no está dopada. Además los electrones no pueden escapar de aquí.

El resultado es la creación de una capa muy fina, con mucha concentración de electrones conductores de muy alta movilidad que dan al canal una resistividad muy baja. La denominación que se le da a esta capa es la de “gas de electrones bidimensionales”: 2DEG [15].

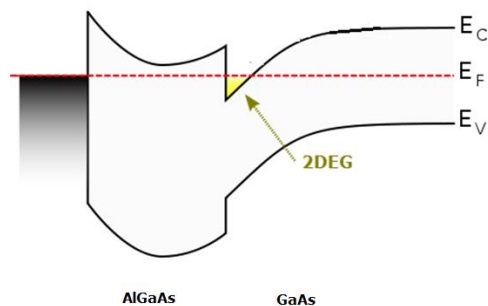


Figura 2-17 Capa 2DEG de un transistor HEMT (extraído de [15])

Si se recuerda, se dijo que un HEMT es una forma de FET y como tal, la tensión “gate” del transistor modifica la conductividad de la capa 2DEG.

Los materiales utilizados para el diseño pueden ser varios, por ejemplo en un principio se empezaron a desarrollar sobre sustratos de GaAs con AlGaAs (que son los que hemos utilizado para ilustrar el ejemplo de funcionamiento de un HEMT). El GaAs se usa para proporcionar un alto rendimiento lo cual no ocurriría si utilizásemos silicio con el que tendríamos una movilidad de electrones muy inferior. Posteriormente, los HEMT usaron sustratos de InP.

Las principales ventajas de los HEMT son:

- Alta ganancia, lo cual los hace útiles como amplificadores.
- Valores de ruido extremadamente bajos.
- Altas velocidades de conmutación.

Ya se ha mencionado con anterioridad, que uno de los grandes retos a los que se enfrenta la Red de Espacio Profundo es el de recibir señales de naves espaciales que se encuentran a miles de millones de kilómetros de la Tierra y como la potencia transmitida es limitada y fija, la “mayor responsabilidad del sistema” recae en los sistemas de recepción de las antenas terrestres que tienen que ser capaces de detectar una señal extremadamente débil que se encuentra en presencia de una cantidad abrumadora de ruido. La relación entre la ganancia de la antena y la temperatura de ruido de funcionamiento del Sistema [2] ($\frac{G}{T_{op}}$) será un KPI que nos indicará el mérito en el enlace de telecomunicaciones que se establezca.

Los receptores de DSN para el espacio lejano, son amplificadores criogénicos que tienen un nivel de ruido muy bajo (LNAs) por lo que el objetivo es mantener la temperatura de ruido operativo tan bajo como la tecnología nos lo permita.

Históricamente, como LNAs se han empleado másers que están compuestos de un cristal sintético de rubí situado dentro de un fuerte campo magnético y enfriados con helio líquido hasta alcanzar una temperatura cercana al cero absoluto. Aún cuando los másers siguen siendo utilizados a día de hoy, la fabricación y mantenimiento de éstos es bastante costoso. Los avances técnicos en el campo de los transistores de electrones de alta movilidad (HEMTs) con enfriamiento criogénico, han posicionado esta tecnología como comparable a la tecnología de los másers [16].

2.3.11 Modulaciones en las comunicaciones para el espacio profundo

Los métodos de modulación adoptados tradicionalmente en este tipo de comunicaciones, han incorporado subportadoras como un método sencillo para separar diferentes tipos de datos y garantizar que no se superpongan la portadora de RF y el espectro de frecuencias de los datos modulados. Este método tiene una serie de desventajas como son:

1. Incrementa la complejidad de la nave espacial.
2. Se sufren pérdidas adicionales en el proceso de modulación/demodulación.
3. Ocupan un gran ancho de banda.

La realidad es que en los primeros años de la comunicación digital (aproximadamente en la década de 1970), el ancho de banda no representaba un problema ya que las velocidades de datos eran muy bajas y sólo existían unos pocos canales de datos (subportadoras). Pero a medida que las misiones espaciales se volvieron más complejas, el espectro de RF empezó a ocuparse y congestionarse, las tasas de datos continuaron creciendo y se necesitó un aumento en las frecuencias de subportadora que como es lógico conllevó una mayor susceptibilidad a las interferencias en las aeronaves, hasta que llegó un punto en el que ya no resultaba rentable utilizar métodos de modulación basados en subportadoras.

Se mejoraron los métodos de modulación eficientes en ancho de banda que trabajaban modulando directamente la portadora utilizada y además se trabajó con métodos mejorados de para manejar el problema de separación de múltiples canales y eliminar la necesidad de subportadoras.

2.3.12 Necesidad de una envolvente constante

Las modulaciones digitales ofrecen una mayor capacidad de información, compatibilidad con los servicios digitales de datos, mayor seguridad en los datos y mejora la calidad de la comunicación.

Existen dos categorías de clasificación para las técnicas de modulación digital: envolvente constante y envolvente no constante.

Tanto en FM como en PM, la amplitud de la portadora no varía y esta es la razón por la que a estos tipos de modulación se les llama también como de “envolvente constante”.

Sin embargo, este requisito introduce conversiones de modulación de amplitud – modulación de amplitud (AM – AM) y modulación de amplitud – modulación de fase (AM – PM) en la señal transmitida que en definitiva son distorsiones no lineales en los amplificadores de potencia, debidas a cambios de temperatura, variaciones de la fuente de alimentación, desvanecimientos en el camino de la señal de RF, etc... Este tipo de distorsión es más común en señales de amplitud modulada como QAM que necesitan una característica de amplificación lineal y por lo tanto no son adecuadas para su uso en canales de comunicación operados siguiendo el requisito de eficiencia de potencia máxima indicado anteriormente.

En base a las indicaciones anteriores relativas a la necesidad de una alta eficiencia de potencia del transmisor, para DSN no se consideran operativas las modulaciones de amplitud.

Una vez llegados a este punto, se recopila que para las comunicaciones en la red de espacio profundo se usará modulación digital de envolvente constante con modulación de fase (BPSK y QPSK).²⁰

2.3.13 Introducción a las antenas usadas para comunicaciones en el espacio profundo

Se ha visto cómo el ingenio humano y los desarrollos en tecnología han permitido crear una “infraestructura” capaz de comunicarse con los elementos que se encuentran navegando por el espacio sea cual sea la distancia que los separa de la Tierra, incluso en el caso de las naves que en la actualidad están más allá de los límites de nuestro sistema solar y se encuentran por tanto en el espacio interestelar.

El espacio interestelar se define como el lugar donde el flujo constante de materia y el campo magnético del Sol dejan de afectar a su entorno. Este lugar se llama heliopausa y marca el final de una región creada por nuestro Sol que se llama heliosfera [17].

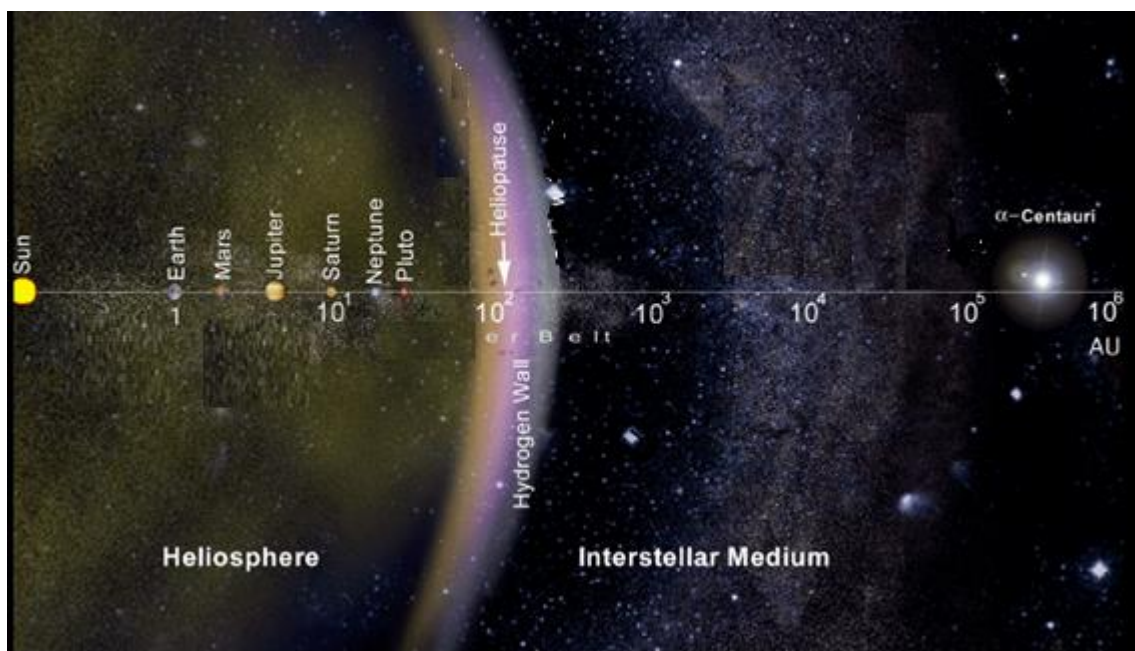


Figura 2-18 Representación del Espacio Interestelar (extraído de [18])

²⁰ Fuente: Complejo de comunicaciones del Espacio Profundo de Madrid.

Esta compleja infraestructura de telecomunicaciones que es la Red del Espacio Profundo, cuenta con elementos críticos sin los cuales no sería posible cumplir los objetivos para los que fue diseñada, pero se quiere destacar uno de estos elementos que, aún siendo perfectamente visibles al llegar a un complejo de la NASA y además verdaderamente impresionantes por sus enormes tamaños y la precisión con la que trabajan, representan ser absolutamente imprescindibles y va a ser objeto de un estudio algo más pormenorizado en este Trabajo Fin de Máster ocupando así un espacio privilegiado: las antenas de la DSN.

Como ya se ha visto anteriormente, las comunicaciones en el espacio profundo se realizan entre la nave espacial y la Tierra. En ambos puntos de esta comunicación lógicamente es imprescindible la existencia de antenas.

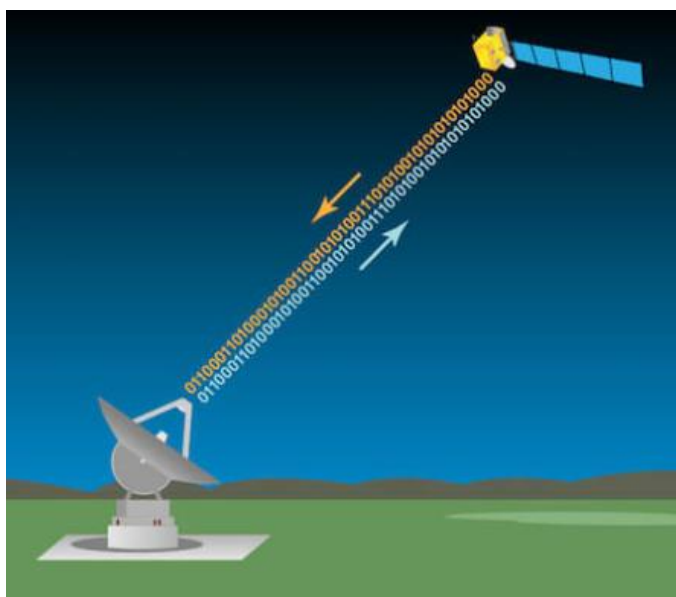


Figura 2-19 Representación de la comunicación entre un satélite y tierra (extraído de [19])

Las antenas a bordo de la nave espacial se utilizan para telecomunicaciones, para instrumentos científicos o ambos. En los instrumentos se utiliza una tecnología que dictan los objetivos científicos en sí de esos instrumentos y suelen ser específicos para cada misión para la que son concebidos y/o utilizados.

Por otro lado están las antenas en tierra, las que se ubican en los complejos de comunicaciones y que configuran la DSN. Estas son más universales y se aplican a todas las misiones espaciales.

Cada complejo cuenta con diferentes tipos de antenas parabólicas de diferentes diámetros: 26, 34 y 70 metros. Cada “pack” formado por una antena y los equipos que a ella están asociados, forman una Estación Espacial de Comunicaciones que se identificará por sus siglas en inglés: DSS (Deep Space Station) seguida de un código numérico

A través de las distintas DSS se reciben los datos de telemetría que envían las naves y los vehículos espaciales, se efectúa el seguimiento o tracking de las naves que permitirá conocer su posición y velocidad con precisión. A partir del tiempo que transcurre desde que un código determinado es enviado y recibido, se puede determinar la distancia de las naves y gracias al análisis Doppler²¹ de las señales recibidas, se puede calcular la velocidad radial de las naves.

²¹ El efecto Doppler es el cambio en la frecuencia de una onda periódica con respecto a un observador que se mueve en relación con la fuente de onda pudiendo estar una o ambas en movimiento. Al emplear el efecto Doppler y su desplazamiento Doppler asociado, es posible determinar el movimiento relativo (velocidad y aceleración) del objeto detectado tal y como lo percibe el observador.

Otra de las funciones que se llevan a cabo a través de las estaciones DSN es la de telemando y gracias a ella se transmiten órdenes (de ejecución directa o retardada) a la nave o incluso actuar en el software de la computadora de a bordo.

A mayores, indicar también que las antenas de la DSN pueden ser usadas a modo de radiotelescopios en observaciones de radioastronomía y astronomía radar a objetos astronómicos próximos como pueden ser asteroides y cometas. Estas funciones se llevan a cabo a través del envío de señales de microondas a estos cuerpos y del consiguiente análisis de los ecos reflejados.

Los equipos de comunicaciones a bordo de las sondas espaciales transmiten con potencias bajas; Voyager 1 a más de 23.000.000.000 Km de la Tierra emite con 13 W de potencia. Hay que tener en cuenta que la intensidad de las señales que se reciben en la Tierra y que provienen de las sondas espaciales es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separan de nosotros por lo que la potencia de esas señales en la Tierra puede ser hasta billones de billones de veces menor que la que se transmitió desde la sonda.

Las antenas de la DSN tienen que ser capaces de recibir esas señales y entregarlas al resto del sistema de comunicaciones para su procesamiento. Es por esto que poseen grandes superficies parabólicas reflectoras para concentrar de una manera eficiente la potencia de las señales recibidas. Además es necesario que tengan una gran precisión de apuntamiento debido a que estas antenas poseen una gran directividad para aumentar la ganancia en la dirección máxima de radiación. Esto quiere decir que solamente podrán recibir y transmitir con la mayor eficiencia en una región espacial muy pequeña.

Como se verá, las antenas de la DSN pueden usarse “en equipo”, en lo que se denomina array de antenas con lo que conseguimos aumentar la intensidad de la señal recibida al “aunar fuerzas” entre varias antenas.



Figura 2-20 Fotografía aérea de la estación de Robledo de Chavela en 2014 (extraído de [20])

En los centros de la Red del Espacio Profundo de la NASA, existían antenas de 26 m. (hoy fuera de servicio) que se usaban prioritariamente para hacer el seguimiento de naves espaciales relativamente cercanas a la Tierra y su origen fue apoyar a las misiones Apollo. También hay antenas de 34 m. cuyo uso es el más normalizado. En cada centro (Madrid, Goldstone y Canberra) hay también una antena de 70 m. Éstas son las más sensibles de la red y las que permiten establecer comunicación con las sondas espaciales situadas a las mayores distancias de la Tierra. El desarrollo de la Red del Espacio Profundo en cuanto a antenas se refiere, camina hacia aprovechar la capacidad de un grupo de antenas de 34 metros para suplantar a una única antena de 70 m cuando las necesidades así lo establezcan [21].

El peso de este tipo de antenas de 70 m. está en torno a las 8.500 toneladas de las cuales 3.500 pertenecen a la parte móvil la cual permite apuntamientos con precisiones de hasta 5 milésimas de grado

y cuya superficie reflectora no debe presentar deformaciones superiores a 1/40 de la longitud de onda con la que opere la antena. Por poner un ejemplo esto significa que para frecuencias de hasta 30 GHz la superficie reflectora no puede tener deformaciones superiores a 0,25 mm.

En el Figura 2-21 se puede apreciar el tamaño de una antena de 70 m. en comparación con un estadio deportivo:

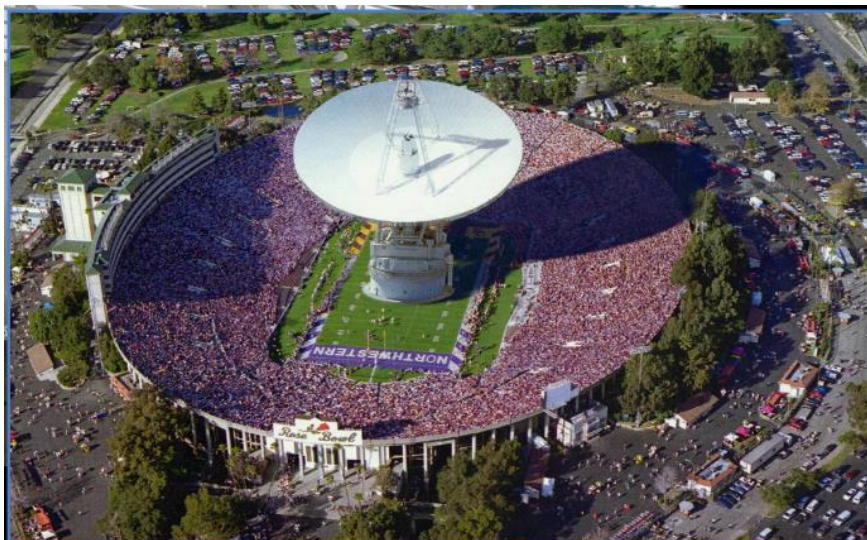


Figura 2-21 Fotomontaje antena DSN de 70 m en un campo deportivo (extraído de [22])

2.3.14 Bandas de frecuencia asignadas

La UIT²² ha asignado rangos de frecuencias para su uso tanto en la investigación del espacio profundo como en el cercano a la Tierra.

Banda	Bandas de espacio profundo para naves espaciales más allá de 2 millones de Km de la Tierra		Bandas cercanas a la Tierra para naves espaciales más cercanas que 2 millones de Km de la Tierra	
	Uplink	Downlink	Uplink	Downlink
S	2.110 - 2.120	2.290 – 2.300	2.025 – 2.110	2.200 – 2.290
X	7.145 – 7.190	8.400 – 8.450	7.190 7.235	8.450 – 8.500
Ka	34.200 – 34.700	31.800 – 32.300	No aplicable	No aplicable

Tabla 2-3 Ejemplo de diferentes bandas de frecuencia asignadas en la investigación espacial (tomada de [23])

2.3.15 Las antenas a bordo de las sondas y naves espaciales

Los transmisores de alta potencia de las naves espaciales y las antenas de gran apertura, son una prioridad para aumentar el rendimiento de las comunicaciones a la Tierra. Es por esto por lo que se busca un diseño de alta eficiencia que aproveche al máximo el área de la antena de transmisión. Las antenas

²² Unión Internacional de Telecomunicaciones.

reflectoras representan una de las mejores soluciones a bordo para sistemas de antena de alta ganancia, ligeros y fáciles de “guardar”.

Además de tener una alta ganancia, es muy importante que la antena apunte en la dirección correcta. El apuntamiento del haz principal puede lograrse electrónicamente o mecánicamente, pero el método utilizado por el JPL²³ es el de orientación mecánica del haz, ya sea mediante el cardan de la antena o, en el caso de una antena fija montada en el cuerpo, mediante la orientación de toda la nave espacial.

Las superficies reflectoras pueden ser planas, parabólicas, hiperbólicas y elípticas y las naves espaciales tienen varias antenas que funcionan literalmente como sus oídos y proporcionan enlaces de comunicación con la Tierra. La más importante de ellas es una antena parabólica de hasta 3 m. de diámetro que puede transmitir y recibir un gran volumen de datos e información.

La necesidad de apuntar una antena de alta ganancia en la dirección correcta origina otra necesidad que es la de la existencia de antenas que funcionen cuando no sea posible apuntar la antena con precisión. Estas antenas serán de tipo omnidireccional²⁴ y se utilizarán en momentos en los que la orientación puede ser completamente desconocida, situaciones de emergencia, o para ganancia media (ancho de haz más amplio) cuando la orientación precisa puede no estar disponible.

También hay que tener en cuenta una serie de factores físicos y ambientales a la hora de diseñar antenas para naves espaciales:

La antena debe operar en el vacío del espacio y soportará amplios rangos de temperatura.

La antena debe sobrevivir al lanzamiento (cargas de lanzamiento, vibraciones, impactos, condiciones acústicas...) sin sufrir daños.

Los materiales de construcción de estas antenas deben ser ligeros puesto que el peso y consumo de energía son muy importantes.

El tamaño, puesto que la antena debe caber dentro de la cubierta del vehículo de lanzamiento. Para aquellos casos en los que las antenas son demasiado grandes, se hace necesario doblar y guardar la antena para el lanzamiento y desplegarla cuando deba usarse.

2.3.16 Un ejemplo real: “Las Voyager”



Figura 2-22 Imagen de una de las Voyager (extraído de [24])

Las naves espaciales Voyager 1 y Voyager 2 fueron lanzadas desde la Tierra en 1977. La misión que tenían encomendada era explorar Júpiter y Saturno así como planetas que se encuentran más allá de

²³ Jet Propulsion Laboratory

²⁴ Irradian potencia al espacio de manera uniforme y en todas las direcciones

nuestro sistema solar. Ningún objeto construido en el pasado por el ser humano había intentado hacer un viaje como este, lo cual suponía un reto de grandes dimensiones [25].

Realizaron una gran cantidad de imágenes de Júpiter y Saturno. Estas naves espaciales continúan su viaje alejándose de la Tierra y ahora tanto Voyager 1 como Voyager 2 están tan lejos que han llegado al espacio interestelar que es la región entre las estrellas; ninguna otra nave ha viajado tan lejos [25].

Ambas naves continúan enviando información a la Tierra y estos datos nos ayudarán a entender las condiciones en el distante sistema solar y el espacio interestelar.

Las Voyager tienen suficiente combustible y energía para operar hasta el 2025 y más allá. Pasado este tiempo, ya no podrán comunicarse con la Tierra y a menos que algo las detenga, continuarán pasando por nuevas estrellas para muchos miles de años.

Cada Voyager contiene un mensaje: un disco de oro con imágenes de la Tierra, música y saludos en diferentes idiomas. La idea es que si alguna vida inteligente encuentra alguna vez estas naves espaciales, puedan tener información de nuestra civilización²⁵.

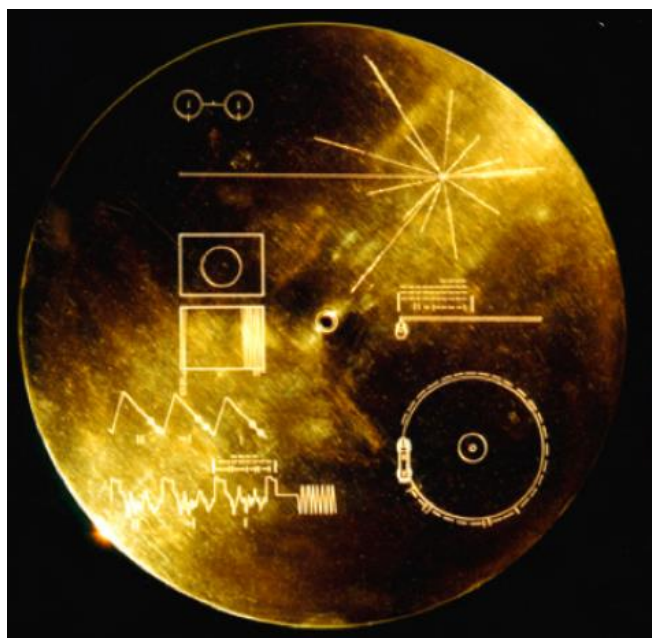


Figura 2-23 Foto del disco de oro que se envió al espacio en ambos Voyagers 1 y 2 (extraído de [25])

Se dio la casualidad de que los planetas del Sistema Solar se alinearon a finales de los años 70 para permitir que una nave espacial pudiera visitarlos en pocos años mediante maniobras de asistencia gravitatoria²⁶ sin necesidad de consumir combustible. La última vez que los planetas se habían alineado de forma parecida fue en 1801. Una misión sin asistencia gravitatoria y que tuviera que hacer uso de métodos de propulsión de la propia nave espacial tardaría treinta años en llegar a Neptuno y sin embargo aprovechando estas técnicas de asistencia gravitatoria lo haría en doce años.

²⁵ Esta decisión fue creó gran controversia puesto que había un elevado número de personas que pensaban que no era buena idea dar a conocer detalles de nuestra humanidad a inteligencias alienígenas en caso de que las hubiera.

²⁶ Método utilizado para cambiar la ruta y velocidad, pasando (previo cálculo) a cierta distancia de algún planeta para aprovechar que gracias a su gravedad, ésta proporcione impulso a la nave.

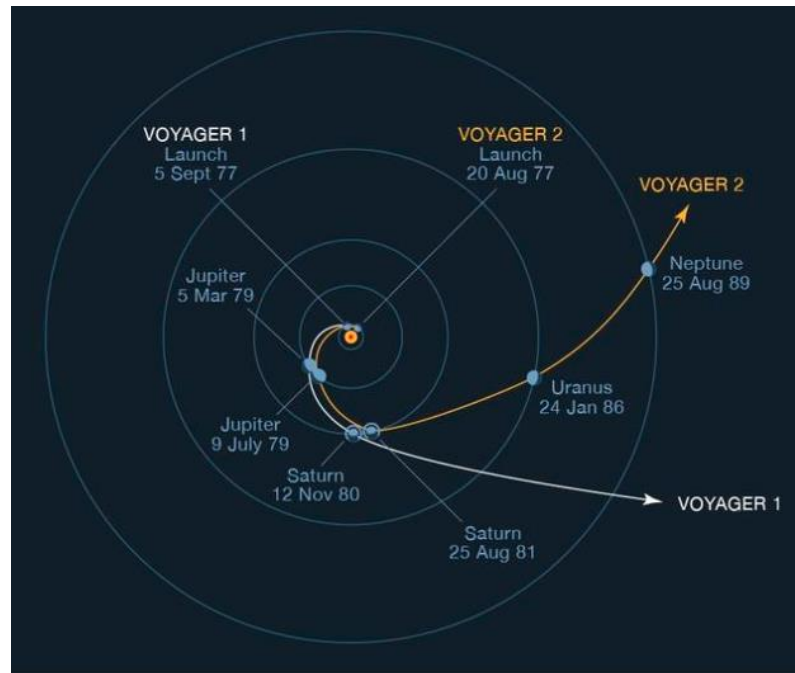


Figura 2-24 Trayectorias de la Voyager 1 y Voyager 2 (extraído de [26])

En la Tabla 2-4, se expondrán a modo ilustrativo, los componentes básicos de telecomunicaciones a bordo de la nave espacial Voyager.

COMPONENTES TELECOMUNICACIONES VOYAGER

COMPONENTE	CANTIDAD
Antena de alta ganancia	1
Antena de baja ganancia	1
Unidad detectora de comandos	2
Unidad de modulación de telemetría	1
Transmisor banda X	2
Transmisor banda S	2
Receptor banda S	2
Amplificador banda S	1

Tabla 2-4 Elementos comunicaciones Voyager (tomada de [27])

En la Tabla 2-4 los componentes duplicados, como por ejemplo el transmisor banda X, son idénticos entre sí lo cual proporciona redundancia para la función que desempeñan. En cada uno de los casos, a pesar de existir duplicidad de componente, uno y sólo uno de los componentes duales está encendido y nunca los dos a la vez.

Cada Voyager es básicamente una gran antena de alta ganancia de 3,66 m de diámetro unida a un cuerpo decagonal con unas dimensiones de 1,88 m de diámetro y 47 cm de alto donde se encuentran la mayor parte de los sistemas electrónicos, un tanque de combustible (hidrazina) y el sistema de propulsión. La masa al lanzamiento era de 826 Kg [28].

La Figura 2-25 muestra la disposición de la sonda Voyager:

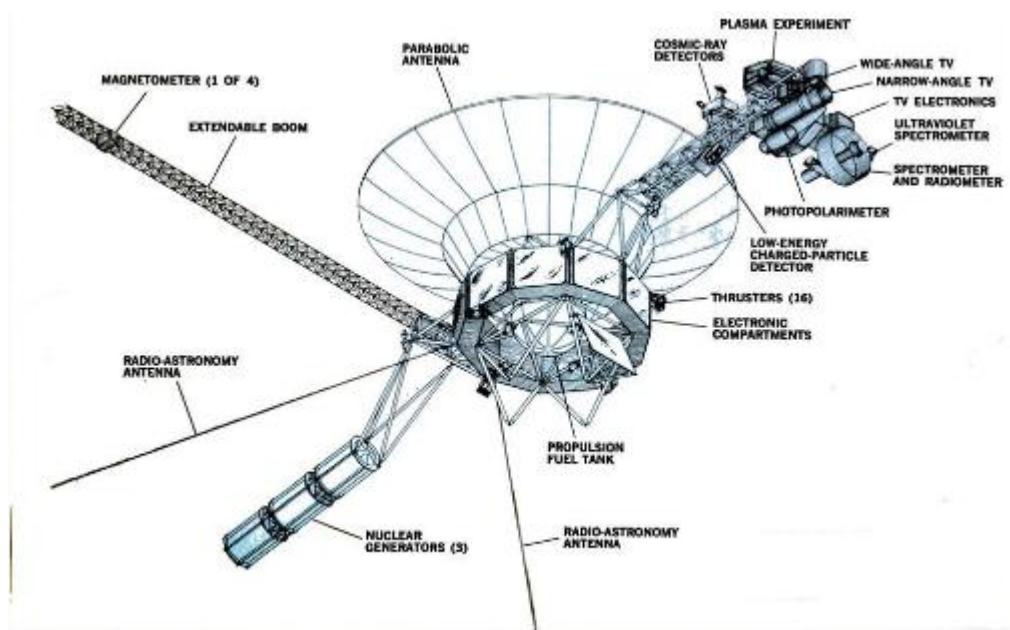


Figura 2-25 Disposición de la sonda Voyager (extraído de [28])

Sobresaliendo del cuerpo principal, varios brazos y antenas desplegadas dan a las sondas un aspecto de frágil insecto cósmico. Las Voyager fueron diseñadas de tal forma que la potencia máxima consumida con todos los sistemas e instrumentos funcionando a la vez fuese de unos 400 W aproximadamente [28].

Cada sonda dispone de cuatro transmisores redundantes capaces de enviar señales en banda S (2,3 GHz) y en banda X (8,4 GHz), así como receptores en banda S para captar las órdenes procedentes de la Tierra [28].

Las Voyager transmitían datos a una velocidad de 115,2 Kbps a la distancia de Júpiter, pero a la distancia de Neptuno la velocidad bajaba hasta los 14,4 Kbps [28].

El canal en banda S se usó hasta el encuentro con Neptuno para mandar órdenes a 40 bps, pero actualmente sólo se usa la banda X [28].

Antena Voyager de alta ganancia [27]

En la Misión Interestelar Voyager, la comunicación hacia y desde la nave espacial se hace a través de la antena de alta ganancia que consiste en alimentadores de banda S y X respaldadas por un reflector parabólico circular. Dado que un reflector de 3,66 m era el diámetro de reflector sólido más grande que podía llevar la sonda por cuestiones estructurales, se buscaba tener la mayor eficiencia de apertura posible.

La ganancia de banda S es de aproximadamente 36 dBi y la ganancia de banda X es de aproximadamente 48 dBi

Antena Voyager de baja ganancia [27]

La nave espacial también lleva una antena de baja ganancia sólo para la banda S. La antena de baja ganancia consta de un radiador polarizado circularmente a la derecha. El patrón de radiación es aproximadamente un cardioide de revolución.

La ganancia de esta antena es de aproximadamente 7 dBi.

La antena de baja ganancia se utilizó inmediatamente después del lanzamiento de la nave espacial y posteriormente también estuvo disponible para comunicaciones de emergencia hasta que el margen para los enlaces con esta antena se agotó en la década de 1980.

2.3.17 El seguimiento desde la Tierra: las grandes antenas de la DSN de la NASA

A lo largo de este TFM, ya se ha comentado en varias ocasiones la importancia que el seguimiento desde la Tierra de una misión espacial (tripulada o no) tiene para lograr el éxito de ésta.

El seguimiento desde la Tierra ya se prepara y empieza con previsiones que se llevan a cabo en la fase de preparación de la misión y se extiende durante todas las fases de la misión.

La Red del Espacio Profundo (DSN) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de los Estados Unidos de América es actualmente la red científica de telecomunicaciones y radionavegación más grande y sensible del mundo. Sus responsabilidades principales son apoyar las observaciones astronómicas de radio y radar en la exploración del sistema solar y del universo.

Como no podría ser de otro modo, son las estaciones de seguimiento (tres como vimos anteriormente en el caso de la NASA) que se encuentran repartidas estratégicamente en diferentes puntos del globo terráqueo²⁷ las encargadas de llevar a cabo esta misión de seguimiento. Cada una de estas estaciones está equipada con grandes antenas que envían y reciben información de cada una de las misiones espaciales en marcha.

Lo que en primera instancia puede parecer un terreno ideal para ubicar una estación de seguimiento como por ejemplo un terreno llano y despejado, a la hora de la verdad el que existan obstáculos puede reportar beneficios como por ejemplo protección frente a fuentes electromagnéticas terrestres. Un lugar idóneo sería un lugar que esté lejos de cualquier fuente radio como puede ser una ciudad, que en las principales direcciones de observación no haya obstáculos como por ejemplo montañas y si hubiese posibilidad, una pequeña hondonada que haga de parapeto antes radiaciones electromagnéticas terrestres.

En las misiones del espacio profundo, representaría un coste demasiado alto dedicar medios técnicos y humanos en el seguimiento constante de un determinado vehículo por lo que en la realidad, observaciones espaciadas en intervalos de tiempo son suficientes para corregir errores surgidos en las últimas horas, transmitir las órdenes oportunas y recibir la información almacenada en los sistemas de la nave espacial.

Por lo tanto, la NASA reparte su tiempo en el seguimiento de varias misiones simultáneamente de tal forma que el tiempo dedicado a cada una de ellas dependerá del interés y características de cada misión en cada momento determinado. Se utilizan grandes antenas parabólicas de varias decenas de metros de diámetro apuntadas al objetivo en cuestión. Estas antenas son de alta ganancia.

Cada antena se selecciona en función de la lejanía en el espacio a la que se encuentre la nave, la cantidad de información que tenga que transmitir por unidad de tiempo y la frecuencia de transmisión entre otros...

La Red de Espacio Profundo cuenta con antenas de hasta 70 m de diámetro (representa la altura de un edificio de 26 pisos y pesa más de 8.000 toneladas). La precisión en el apuntado entre antenas (Tierra/sonda) debe ser extrema [20].

Ya se ha comentado también anteriormente el hecho de que además de la precisión en el apuntado de antenas, la nave espacial tiene la gran limitación de la potencia de emisión.

²⁷ Goldstone en California (EEUU), Madrid en España y Canberra en Australia.

Mientras la nave espacial sólo puede utilizar una antena relativamente pequeña para recibir la señal que desde la Tierra se envía con potencia elevada, en la Tierra se necesitan antenas muchísimo mayores para recibir la débil señal que envía la nave espacial o la sonda desde distancias en algunos casos de miles de millones de kilómetros. Para reducir el ruido generado por los equipos receptores en Tierra, se utiliza tecnología puntera y de máxima calidad y además se sumergen los equipos en helio líquido con lo cual se consigue reducir al máximo el ruido electrónico del propio equipo.

En algunas ocasiones, ni siquiera estas enormes antenas de la DSN son suficientes para conseguir comunicarse con alguna sonda por lo que se hace necesario disponer de la máxima capacidad de recepción posible, para lo cual se conectan en serie varias antenas para así poder amplificar al máximo la débil señal que nos envía a la Tierra una nave averiada o demasiado lejana.

En cuestión de potencias, cuando se hace referencia a comunicaciones interplanetarias las diferencias entre emisión y recepción son muy altas.



Figura 2-26 Antenas DSN (extraído de [22])

Bien, pues como se ha dicho con anterioridad, las principales características de cada uno de los tres complejos con los que cuenta la NASA en la DSN, son las grandes antenas parabólicas y sus estructuras de soporte. Aunque sus diámetros y montajes difieren, todas las antenas emplean un sistema de alimentación tipo Cassegrain que básicamente es el mismo que el de un telescopio Cassegrain utilizado en astronomía óptica. La superficie de cada plato de antena está construida con paneles de aluminio perforado asegurados a un marco de acero abierto. Estas grandes antenas parabólicas han evolucionado desde las primeras operaciones con diámetros de 26 m. en el año 1958 hasta la gigantesca antena de 70 m.

En el año 1982, se introdujo en la DSN un nuevo diseño para una antena de 34 m con una bocina de alimentación de apertura común y una óptica de forma dual diseñada para una ganancia óptima sobre la temperatura de ruido (G/T) y se denominó “antena de alta eficiencia” (HEF).

Una vez más se hace hincapié en la idea de que la principal misión de la DSN es recibir señales extremadamente débiles a través de grandes distancias interplanetarias y un elemento clave del rendimiento de los enlaces de telecomunicaciones es la relación señal/ruido (SNR) de la potencia recibida (apartado 2.3.4).

El sistema de antena en tierra debe maximizar la relación entre la señal recibida y la potencia de ruido del sistema receptor que se mide mediante una figura de mérito (FM) de la antena, definida como la relación del área efectiva de la antena (o ganancia equivalente) a la temperatura de ruido del sistema.

La temperatura de recepción consiste principalmente en el sistema de alimentación de la antena y las contribuciones del amplificador. Para evaluar la FM de la antena, es conveniente trazar un plano de referencia imaginario entre el sistema receptor y el sistema de antena, colocando así todas las contribuciones de ruido en una de estas categorías. Si la contribución del receptor (incluidas las pérdidas del sistema de alimentación) está dada por T_R y la contribución del ruido de la antena por T_A , entonces se define FM como [23]:

$$FM = \frac{G_R}{T_R + T_A}$$

Donde: G_R = Ganancia de recepción.

Es evidente que para maximizar la FM para unos determinados tamaños de antena y frecuencia de operación es necesario maximizar la ganancia de la antena y minimizar la temperatura de ruido total del sistema. Como las contribuciones individuales a la temperatura de ruido son aditivas y esencialmente independientes entre sí, es necesario minimizar individualmente cada contribución. Mediante el uso de amplificadores criogénicos, la contribución de la temperatura de ruido del receptor puede ser pequeña. También es obligado minimizar las contribuciones de la antena y del sistema de alimentación en este sentido.

Las técnicas para maximizar la ganancia de la antena y la eficiencia de apertura de las antenas reflectoras implican el control de la función de iluminación.

Muchos principios de diseño para antenas reflectoras grandes se toman prestados de los que se utilizan con éxito en el diseño de telescopios ópticos.

Un parámetro muy importante y que por lo tanto hay que tener en cuenta es la precisión de la superficie de las antenas. Los errores en la superficie de los reflectores de las antenas del DSN provocan grandes reducciones de la ganancia tal y como podemos observar en la Figura 2-27:

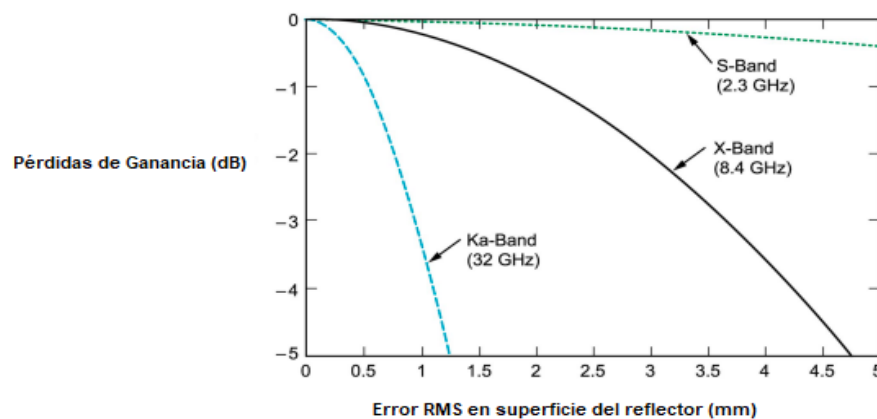


Figura 2-27 Pérdidas de ganancia debido a errores en la superficie del reflector de la antena (extraído de [23])

El error RMS se obtiene al elevar al cuadrado las diferencias entre puntos conocidos y desconocidos, sumarlos juntos, dividir el resultado entre el número de puntos de prueba y, por último, realizar la raíz cuadrada de ese resultado.

Los errores en la superficie de los reflectores pueden ser errores mecánicos de fabricación de panel invariantes en el tiempo y errores de ajuste del panel en el ángulo de montaje o errores variables en el tiempo inducidos por la gravedad, el viento y los efectos térmicos.

2.3.18 El concepto Cassegrain

Las antenas con doble reflector están constituidas por dos reflectores, un principal parabólico y otro secundario. En las antenas Cassegrain, el subreflector suele ser hiperbólico, presentando el hiperboloide la parte convexa hacia el reflector principal [8].

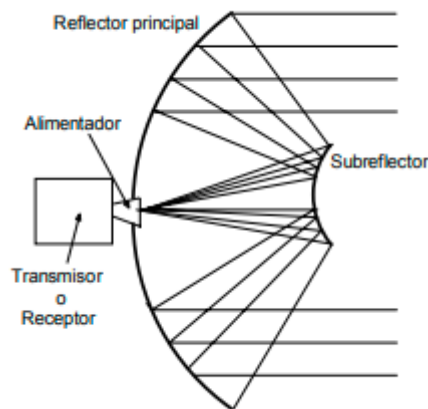


Figura 2-28 Geometría básica de una antena Cassegrain (extraído de [8])

El sistema de dos reflectores inventado por Nicholas Cassegrain se ha utilizado ampliamente en telescopios ópticos y a finales de la década de 1950, se desarrolló un interés generalizado en el uso de este tipo de sistema para frecuencias de microondas.

La geometría básica utilizada en las antenas de la DSN sigue el modelo Cassegrain y podemos verla en la Figura 2-29:

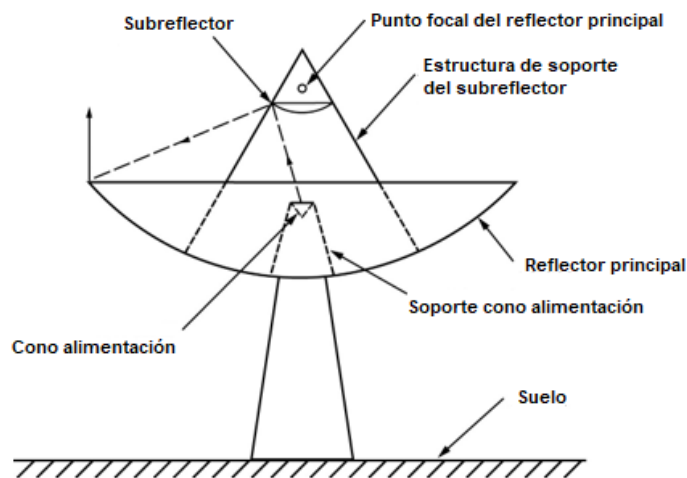


Figura 2-29 Geometría básica Cassegrain para una antena de la DSN (extraído de [23])

Un subreflector hiperboloidal se interpone entre el punto focal del reflector principal y la superficie del reflector principal y proporciona una longitud de trayectoria constante para los rayos desde el plano de alimentación hasta el de la apertura [23].

Una vez vista la disposición física y los elementos básicos que conforman una antena Cassegrain, se describe su funcionamiento básico:

- En el modo de recepción, suponiendo que la energía en forma de rayos paralelos incide sobre el sistema de doble reflector, la energía interceptada por el reflector principal que tiene una superficie cóncava grande es reflejada hacia el subreflector. La superficie convexa del subreflector recoge esta energía y concentrándola en un solo punto la refleja de forma dirigida hacia el receptor a través del alimentador.
- En el modo de transmisión el procedimiento es similar. El alimentador se coloca en el punto de enfoque y es suficientemente pequeño como para que el subreflector se encuentre en su región de campo lejano. Por otra parte, el subreflector es lo suficientemente grande como para interceptar la mayor parte de la radiación del alimentador. Gracias a la disposición geométrica del hiperboloide y el paraboloide, los rayos reflejados por el “reflector” serán paralelos [8].

En términos generales, para iluminar el reflector de manera eficiente, el subreflector debe iluminarse de manera más o menos uniforme y por otro lado, con el fin de evitar la pérdida indebida de energía de desbordamiento hacia adelante, la bocina de alimentación debe tener una ganancia suficientemente alta para contener del 70% al 90% de su energía dentro del área subtendida por el subreflector. Un compromiso típico entre estas dos consideraciones da como resultado una iluminación del borde del subreflector unos 10 dB por debajo de la iluminación central [12].

Entonces, como se ha visto, la DSN utiliza para sus antenas en tierra el sistema reflector Cassegrain en el que hay un reflector principal parabólico y un subreflector hiperbólico. La eficiencia de estos reflectores está determinada de manera principal:

- a. Por la capacidad del sistema de alimentación para iluminar sólo los reflectores mientras se minimiza la energía que irradia en otros lugares (eficiencia de desbordamiento).
- b. La capacidad de la alimentación para iluminar uniformemente la parábola (eficiencia de iluminación).

Un requisito importante para la DSN es la capacidad de transmitir y recibir simultáneamente en múltiples bandas de frecuencia. Esto se materializa usando una bocina de alimentación de doble banda o bocinas de alimentación separadas y una superficie de frecuencia selectiva (FSS) denominada placa dicroica.

Una estructura dicroica es una superficie periódica que es transparente para una banda de frecuencias y opaca para otras.

La primera vez que se utilizó una placa dicroica fue como parte del sistema de alimentación del que se compuso la primera antena de 64 m²⁸ de la DSN. Esta placa consistía en agujeros circulares en una placa metálica de media longitud de onda de espesor. Posteriormente, todas las placas dicroicas que se han utilizado en la DSN también han sido placas gruesas con agujeros y aunque de forma general el análisis de una placa dicroica gruesa puede hacerse con agujeros de forma arbitraria en ángulos de incidencia arbitrarios, la inmensa mayoría de las placas dicroicas que actualmente están en uso en la DSN se diseñaron con programas que sólo analizaban geometrías simples como agujeros circulares o rectangulares.

²⁸ La antena de 64 m evolucionó a la actual antena de 70 m gracias a la ampliación que se hizo del diámetro de su reflector principal.

En la Figura 2-30 se puede observar una muestra de prueba de fabricación para una placa dicroica de banda X/Ka.

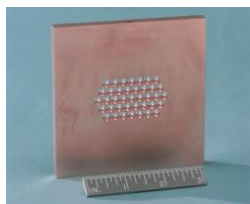


Figura 2-30 Placa dicroica para las bandas X/Ka (extraído de [23])

Esta placa se diseñó para permitir el paso de las frecuencias de recepción de la banda Ka (31,7 – 32,2 GHz) y reflejar tanto la transmisión de la banda X (7,145 – 7,190 GHz) como la recepción (8,4 – 8,5 GHz).

2.3.19 La antena de alta eficiencia de 34 metros

Hacia la mitad de la década de 1980 la DSN de la NASA introdujo una nueva antena reflectora de alta eficiencia de apertura con un plato de 34 m de diámetro. Lo que se pretendía en aquella época era proporcionar una capacidad sólo de recepción simultánea en las bandas X (8,4 – 8,5 GHz) y S (2,2 – 2,3 GHz) para utilizarlas en apoyo del encuentro de la nave Voyager 2 con Urano a más de 3 mil millones de kilómetros de distancia [23].

Esta antena era una integrante más de una matriz de recepción compuesta además por las antenas estándar de 34 m y de 64 m pertenecientes a la DSN.

La incorporación de esta nueva antena a esta matriz de recepción, supuso el incremento de 0,8 dB a las otras dos que formaban la matriz [23].

La antena de alta eficiencia (HEF) de 34 m está equipada con un tipo de montura de azimut – elevación²⁹ impulsada.

La antena parabólica está sostenida por una estructura de acero que gira en azimut sobre cuatro conjuntos de ruedas autoalineables que viajan sobre una pista de acero circular nivelada con precisión. La pista se mantiene firme por 16 puntos que se unen a un pedestal central de hormigón armado [23].

La estructura de la antena parabólica está unida a una rueda dentada de elevación que impulsa la antena hacia arriba y hacia abajo.

Las velocidades de funcionamiento son de 0,4 grados/s tanto en azimut como en elevación [23].



Figura 2-31 Fotografía de una HEF de 34 m. (extraído de [23])

²⁹ El azimut se da en grados respecto al Norte en sentido horario. La elevación se da en grados respecto a la horizontal.

Dos notables desarrollos significativos que introdujo esta antena en el campo de la RF³⁰ fueron la alimentación de doble frecuencia que proporcionó la operación multifrecuencia simultánea sin el uso de la placa diroica y la conformación de doble reflector, que proporcionó una eficiencia mejorada de apertura.

Hacia mediados de 1976, se inició un programa para desarrollar una bocina de alimentación de bandas S y X con el objetivo de utilizar una unidad simétrica de “línea central” (CL) pudiéndose así reemplazar los por aquel entonces asimétricos y simultáneos reflectores de estas bandas (S, X) de la DSN. De este modo también se elimina la placa diroica y con este tipo de alimentación se podrían hacer transmisiones de alta potencia en las bandas X (7,145 – 7,235 GHz) y S (2,110 – 2,120 GHz).

El desarrollo de esta bocina se basó en el concepto de “bocina corrugada” donde se utiliza una guía de onda corrugada que permite dos tipos de modos de propagación simultáneos.

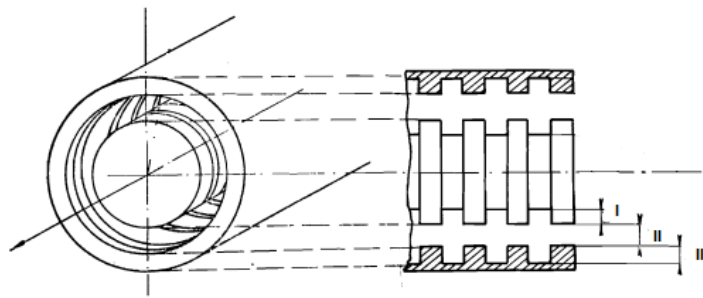


Figura 2-32 Detalle de una guía de ondas corrugada (extraído de [23])

Una guía de ondas corrugada consta de tres partes: una parte central (II) y otras dos partes con ranuras espaciadas uniformemente en el conducto interior y exterior, parte I y parte III respectivamente. Estas ranuras espaciadas deben tener una profundidad determinada relacionada con las longitudes de onda de las bandas para las que van a ser utilizadas (recordemos “S” y “X” en nuestro caso concreto).

En la Figura 2-33, se puede ver el esquema de un cono de alimentación de cuatro funciones (doble banda de recepción / doble banda de transmisión) correspondiente a una antena perteneciente a la DSN.

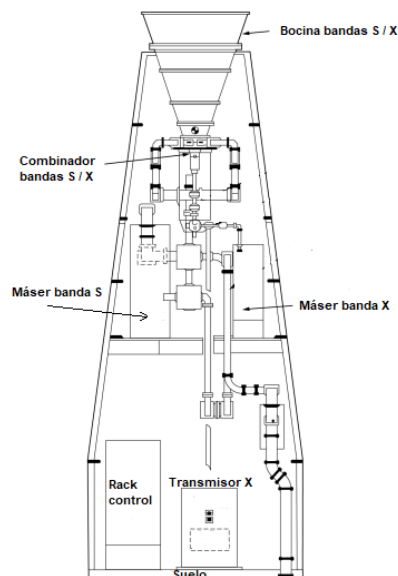


Figura 2-33 Detalle de un cono de alimentación de cuatro funciones (extraído de [23])

³⁰ Radiofrecuencia.

La alimentación de una antena de la DSN como es el caso de esta de 34 m. que se está estudiando con un poco más de detenimiento, conlleva una serie de ventajas si se hace a través de un sistema de guía de ondas de haz (BWG) en lugar de colocar directamente la alimentación en el punto focal de una antena de doble reflector.

Cuando se trabaja con un sistema BWG, la bocina de alimentación y el equipo soporte se coloca en una sala habilitada debajo de la antena y la señal es guiada desde la bocina de alimentación al subreflector, usando un sistema de espejos reflectantes. Esto permite diseñar equipos como transmisores refrigerados por agua y amplificadores criogénicos de bajo ruido de manera mucho más simplificada puesto que estos no tienen que inclinarse como ocurre en las antenas de doble reflector con alimentación convencional.

Por otro lado, la ubicación de estos equipos es mucho más accesible y permite realizar las tareas de mantenimiento y reparación de una manera más fácil y además las pérdidas asociadas con la lluvia que se producen en la cubierta del cuerno de alimentación se eliminan porque dicho cuerno está protegido de la intemperie.

Cuando se empezaron a poner en marcha los proyectos de I+D conducentes al posible uso de esta tecnología BWG en las antenas de la DSN, varios estudios señalaron la ventaja de utilizar la banda Ka (31,8 – 32,2 GHz en recepción y 34,2 – 34,7 GHz de transmisión) para el enlace de telecomunicaciones por lo que esta antena de 34 m fue diseñada en I+D para operar en banda Ka y ser así probada para poder introducir frecuencias de banda Ka en la red operativa.

El sistema BWG consta de una serie de espejos de sección cónica encerrados en un tubo metálico. En la entrada tenemos la bocina de alimentación y en la salida se irradia el subreflector del sistema de doble reflector.

Los exitosos resultados obtenidos en los trabajos de I+D sobre las antenas de guía de ondas de haz, se tomó la decisión de introducir antenas BWG de 34 metros en la red operativa.

Inicialmente el diseño se hizo simultáneamente para las bandas S (2,270 – 2,3 GHz en recepción y 2,110 – 2,120 GHz en transmisión) y X (8,4 – 8,5 GHz para recepción y 7,145 – 7,190 GHz para transmisión). Posteriormente, los paneles reflectores principales, el subreflector y los espejos BWG se diseñaron para fabricarse con la precisión suficiente como para permitirles trabajar en banda Ka (31,8 – 32,2 GHz en recepción y 34,2 – 43,7 GHz en transmisión).

En la Figura 2-34 se puede observar el diseño de una antena de 34 m BWG de las que actualmente se encuentran operativas en los tres centros de la NASA.

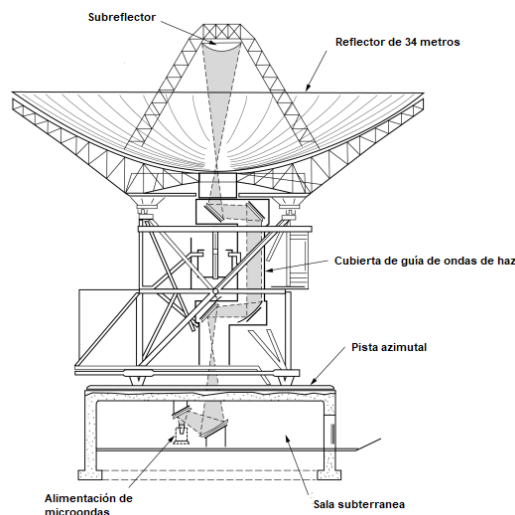


Figura 2-34 Diseño de una antena de 34 m. BWG (extraído de [23])

El tamaño y la ubicación de los espejos son relativamente fijos por la geometría de la estructura de la antena por lo que las variables de esta antena serán los diámetros y posiciones de las bocinas de alimentación y las curvaturas de los espejos.

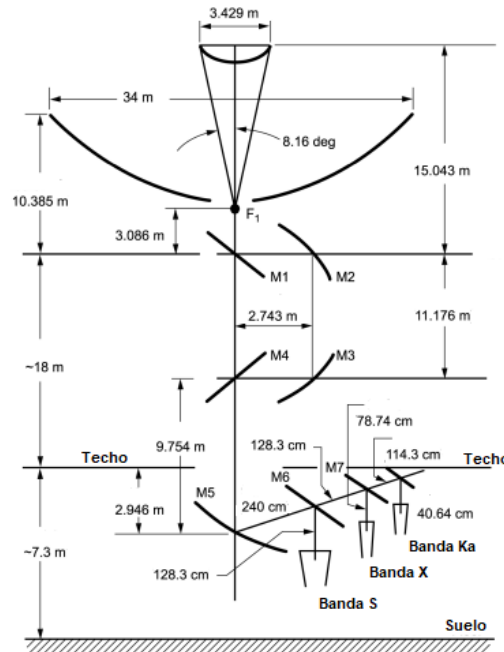


Figura 2-35 Detalle de las dimensiones de una configuración BWG (extraído de [23])

Para finalizar este apartado dedicado al estudio de la antena de alta eficiencia de 34 metros utilizada en la DSN, se darán algunos datos resultados de medidas básicas y pruebas realizadas en la misma para completar la información de los alcances conseguidos con esta antena.

Las mediciones y los resultados obtenidos se ofrecen con respecto a dos puntos focales dentro de la estructura de esta antena de 34 m que se han denominado como F_1 y F_2 y cuya ubicación se pueden ver en la figura 2-36 que representa la estructura básica del dispositivo:

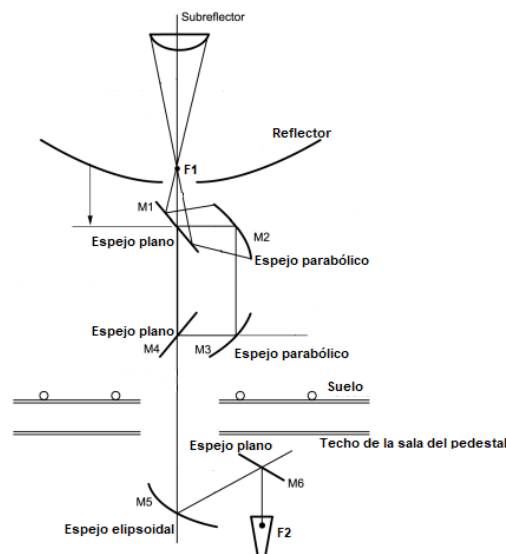


Figura 2-36 Detalle de la estructura básica de una antena de 34 m. con la ubicación de los puntos focales F_1 y F_2 (extraído de [23])

Las mediciones de eficiencia se llevaron a cabo utilizando las bandas X (8,45 GHz) y Ka (32 GHz). En la Figura 2-37 se pueden observar las eficiencias de la banda X en los puntos focales F1 y F2 en función del ángulo de elevación determinándose la eficiencia máxima de la banda X en F1 con un valor del 75,25 % a un ángulo de elevación de 42,5° y la eficiencia máxima de la banda X en F2 en 72,67 % a un ángulo de elevación de 49° [23].

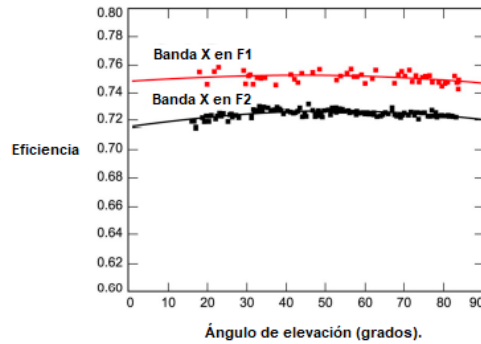


Figura 2-37 Eficiencias en F1 y F2 para 8,45 GHz sin atmósfera (extraído de [23])

En las Figuras 2-38 y 2-39 se puede estudiar la eficiencia máxima de la banda Ka en F1 que será del 60,60 % a un ángulo de elevación de 44,5° y la eficiencia máxima de la banda Ka en F2 del 57,02 % a un ángulo de elevación de 42° [23].

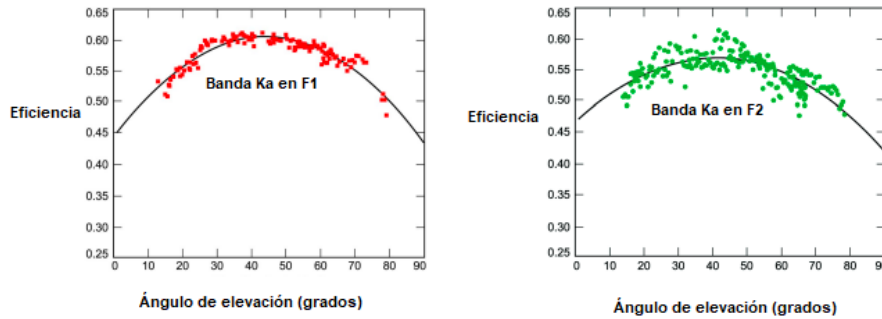


Figura 2-38 Eficiencias en F1 y F2 para 32 GHz sin atmósfera (extraído de [23])

También se realizaron mediciones de eficiencia en la banda S y en base a estas se determinó que la máxima eficiencia de esta banda en F2 era del 71,50 % [23].

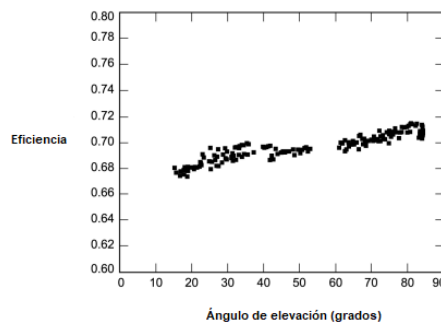


Figura 2-39 Eficiencia en F2 para 2,295 GHz sin atmósfera (extraído de [23])

También se realizaron mediciones de la temperatura de ruido de la antena y los valores obtenidos trabajando con las bandas S, X y Ka en función del ángulo de elevación.

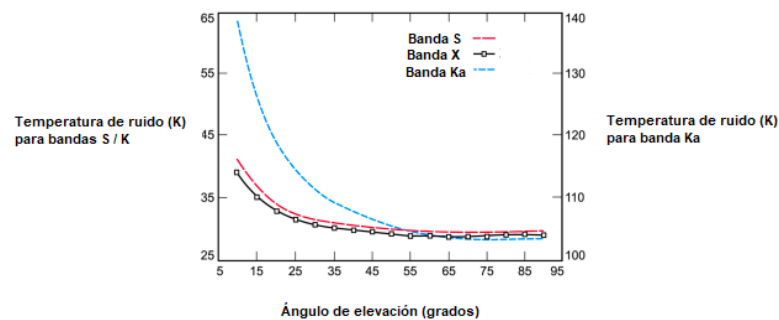


Figura 2-40 Temperatura de ruido de la antena en función del ángulo de elevación (extraído de [23])

Un requisito curioso y que por tanto se quiere reflejar en el presente trabajo, fue que en beneficio de la versatilidad de la antena BWG se debía poder actualizar o reparar dispositivos electrónicos ubicados en la sala del pedestal de la antena que no estuvieran en uso, pero mientras que la antena estuviese operativa y transmitiendo en otro modo. Para lograr esto, se pensó en encerrar la trayectoria del haz dentro de un escudo de metal, denominado velo, para que así la energía dispersada por el borde de los espejos pudiera mantenerse confinado dentro de ese escudo.

Se optó por crear una cavidad metálica en forma de pirámide invertida y se instaló alrededor de la elipse del sótano. Las aberturas del cuerno de alimentación penetran en la cubierta y el haz radiado permanece confinado y aislado del resto de la sala del pedestal de la antena. Las mediciones que se realizaron determinaron que los niveles en la sala estaban por debajo del nivel de seguridad aceptado de 1 mW/cm^2 por lo que era bastante seguro que el personal permaneciese en la sala del pedestal cuando la antena estuviera transmitiendo.

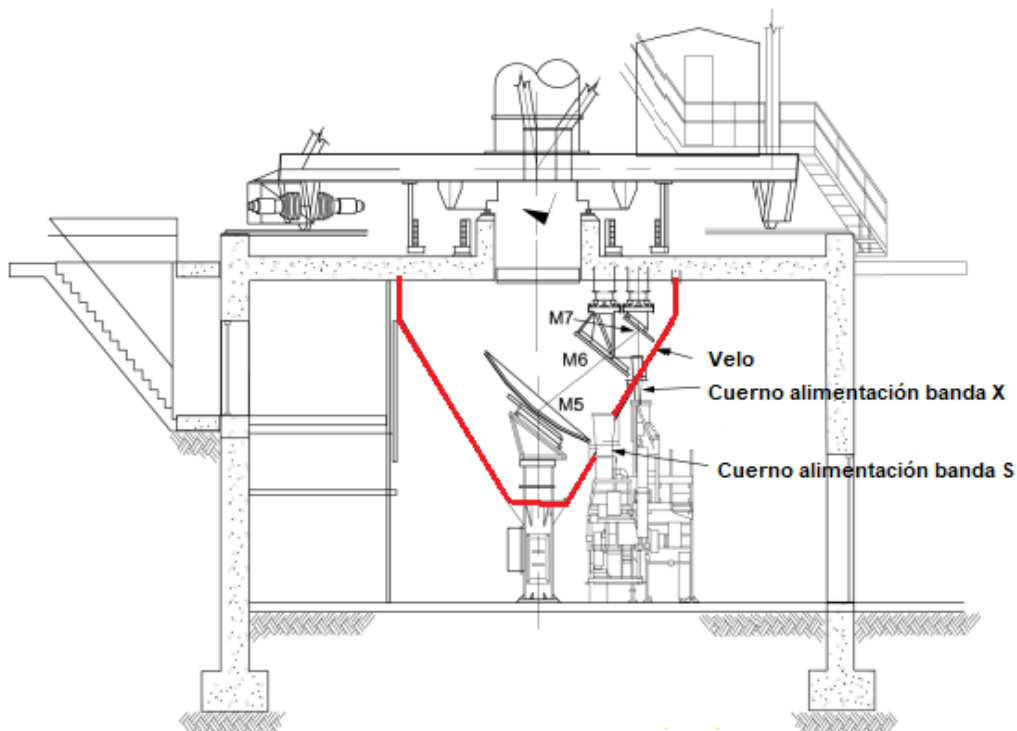


Figura 2-41 Descripción gráfica del “velo” (extraído de [23])

Cuando una nave espacial se mueve en ascensión o declinación recta, los haces de enlace ascendente y descendente deben apuntar en diferentes direcciones para comunicaciones simultáneas. La nave espacial se está moviendo y en un determinado instante de tiempo, el haz del enlace descendente debe apuntar donde la nave espacial estaba hace un tiempo y el haz del enlace ascendente debe apuntar donde la nave espacial estará dentro de un tiempo. De este efecto que se conoce como aberración, se obtiene que en el enlace radio que se produce entre una estación de tierra y una nave espacial, debe resultar un ángulo de compensación entre las direcciones óptimas de enlace ascendente y descendente.

Para poder efectuar comunicaciones de enlace ascendente y descendente en presencia de aberración planetaria, se requiere que el haz de recepción apunte a la posición prevista de la nave espacial (posición 1 de la Figura 2-42) y el haz de transmisión sea apuntado a la posición de la nave espacial de acuerdo con la corrección de la aberración espacial (posición 2 de la Figura 2-42).

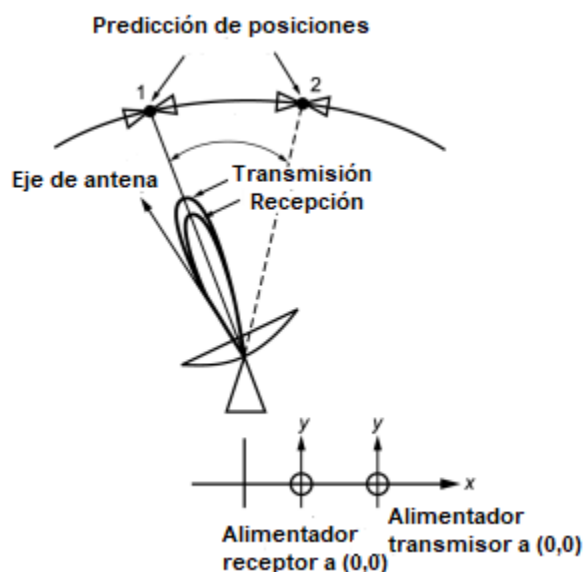


Figura 2-42 Disposición de antena sin punto de corrección para aberración del haz (extraído de [23])

Si no se corrige la posición de los alimentadores (Figura 2-42), estos estarán en sus posiciones nominales denominadas (0,0). La separación de las bocinas de alimentación en el espacio se debe al espejo dicróico que separa las frecuencias de transmisión y recepción.

Para llevar a cabo la corrección de la aberración del haz, debe corregirse la posición entre los haces de recepción y transmisión de tal manera que sea idéntica a la posición relativa entre las dos posiciones de la nave espacial (la que ocupa en el downlink y la que ocupa en el uplink). La variación de ángulo de un haz con respecto al otro se puede lograr de manera efectiva de dos modos distintos: inclinando el espejo encima de la bocina de alimentación o bien moviendo directamente las alimentaciones. Se determinó seguir el procedimiento de mover la bocina de alimentación de transmisión una distancia (x,y) dependiendo del ángulo de corrección previsto tal y como podemos ver en la Figura 2-43:

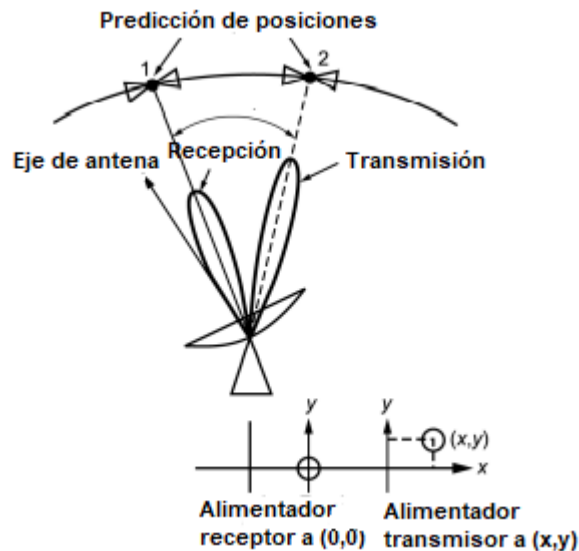


Figura 2-43 Disposición de antena con punto de corrección (moviendo el alimentador de transmisión) para aberración del haz (extraído de [23])

2.3.20 Agrupaciones (arrays) de antenas en la Red del Espacio Profundo

A medida que la señal que procede de una nave espacial que se está alejando de la Tierra vuelve cada vez más débil, surge la necesidad de idear buscar soluciones para compensar la reducción en la relación señal – ruido (SNR). Con las aperturas de antena máximas y las temperaturas de ruido del receptor más bajas llevadas a sus límites, el último método que nos queda para mejorar la SNR efectiva es el de combinar las señales de varias antenas. Esto se conoce como arraying y en el caso concreto de la DSN de la NASA, ha permitido extender las misiones de algunas naves espaciales más allá de la vida útil para la que habían sido diseñadas o planificadas. Otro beneficio relacionado y que se ha proporcionado por esta técnica de arraying o agrupación de antenas ha sido su capacidad para recibir velocidades de datos más altas que las que se pueden admitir con una sola antena. En definitiva, el arraying permite que un enlace de comunicaciones funcione como si tuviera una antena más grande que la disponible físicamente.

Las agrupaciones de antenas tienen muchos beneficios a la hora de configurarse como son: mejoras en el rendimiento, en la operatividad, ahorro de costes de implementación y mayor flexibilidad. Se procederá a continuación a ver estas utilidades que ofrecen las agrupaciones de antenas con un poco más de detalle:

Cuanto más grandes son las antenas, más estrecho es el ancho del haz por lo que el error de orientación de la antena es más crítico. Esto quiere decir que para permanecer dentro del haz principal y tener pérdidas mínimas la orientación de la antena tiene que ser muy precisa, lo cual en estructuras grandes como son las antenas de la DSN es más difícil de lograr.

Con una agrupación de antenas más pequeñas, el error en la orientación de la antena pierde relevancia y pasa de ser un problema mecánico a ser un problema electrónico. Al ser una apertura más pequeña, el ancho de haz de cada antena del array será más amplio y por lo tanto la agrupación en conjunto será más tolerante al error de puntería.

Con los arrays podemos aumentar la operatividad del sistema. Si utilizamos una única antena y ésta tiene un fallo el sistema quedará inoperativo, pero en un array, un fallo en una de sus antenas conllevará una degradación en el rendimiento del sistema, pero no provocará que todo se venga abajo y quede inoperativo.

Se produce un ahorro de costos por el hecho de que las antenas agrupadas son más pequeñas y por tanto; por la reducción de su tamaño, su peso y por ser más fáciles de construir, serán más baratas.

Esto anterior implicará también que las antenas, al ser más fáciles de construir podrán fabricarse por un mayor número de empresas y habrá más competencia lo que implicará reducción de costos.

Los arrays permiten una gran flexibilidad porque pueden agregarse elementos adicionales de forma incremental en aras de aumentar la apertura total si las necesidades de la misión así lo requieren.

¿Qué técnicas de agrupación pueden aplicarse?

Existen varios esquemas básicos que pueden emplearse para combinar las salidas de las antenas que forman parte de un array [29]:

- ✓ Combinación de espectro completo (FSC).
- ✓ Combinación de símbolos complejos (CSC).
- ✓ Combinación de flujo de símbolos (SSC).
- ✓ Combinación de banda base (BC).
- ✓ Agrupación de portadoras (CA).

Veremos uno de ellos como ejemplo de análisis y para tener unas nociones de cómo puede realizarse este proceso. No es fácil determinar sin ambigüedades cuál es la mejor técnica de arraying puesto que cada una tiene sus características, no obstante sí se puede decir que la técnica: combinación de espectro completo (FSC) es muy usada desde los primeros tiempos en la DSN. Su diagrama de bloques corresponde a la Figura 2-44:

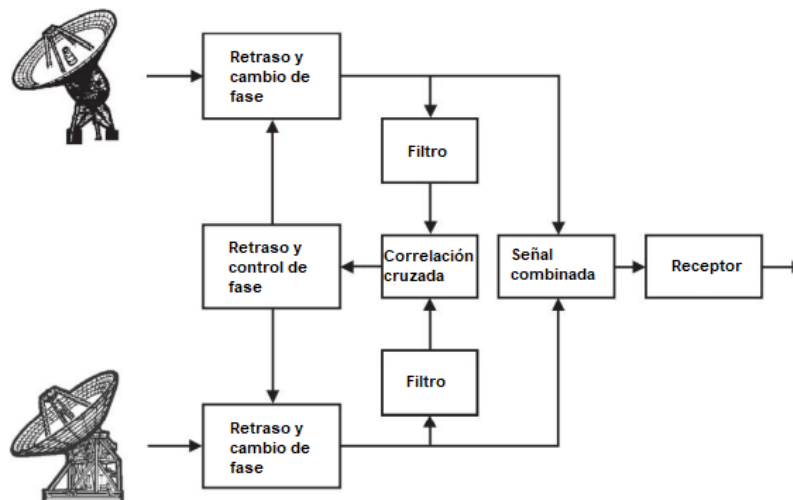


Figura 2-44 Diagrama de bloques de la técnica FSC (extraído de [29])

En FSC, las señales de frecuencia intermedia de cada una de las antenas del array, se dirigen al bloque de combinación donde se combinan. Para garantizar la coherencia de las señales, éstas deben retrasarse y ajustarse en fase antes de combinarse. Los flujos de señales se correlacionan para lograr una estimación del retardo y la fase correctos.

La principal ventaja de FSC es que el espectro recibido puede filtrarse si las características espectrales se conocen o si el espectro es desconocido. FSC se puede usar cuando la portadora es demasiado débil para rastrearla o no es posible rastrearla con una sola antena.

Recapitulando, como se ha visto, hay ocasiones en las que la utilización de una única antena dentro de un sistema de radiocomunicaciones que está prestando servicio en la DSN no es suficiente. Las características de la misión a la que está designada y las propias limitaciones técnicas de la antena hacen necesario buscar alguna alternativa para dar una solución a esta carencia.

La solución es usar las antenas de la Red de Espacio Profundo formando un array.

Los cálculos son complejos y dependen de muchos factores, pero a nivel orientativo se puede considerar que al combinar la actuación de una antena de 70 metros junto con otra antena de 34 metros HEF la recepción de la señal de una nave espacial obtiene una mejora del 20% y si se añadiese otra antena de 34 metros, entonces la mejora sería del 33% [20].

Se concluye, por tanto, que la técnica de arraying y los beneficios que aporta la agrupación de antenas sobre un sistema de radiocomunicaciones se ha considerado imprescindible para incluirlo como un apartado de este TFM.

2.4 Redes tolerantes a demoras

2.4.1 Introducción

El origen de las redes tolerantes a demoras ha sido la creación de la todopoderosa Internet. Esta gran autopista imprescindible en nuestras vidas y sin la cual ya prácticamente nada en la sociedad actual tendría sentido. Aquí en la Tierra se ha trabajado incansablemente para hacerla llegar a todos los rincones y hoy en día todavía se siguen desarrollando proyectos innovadores para solucionar el problema de aquellas regiones a las que todavía no llega la red de redes.

En definitiva, lo que realmente trasciende de todo esto es el hecho de que el ser humano quiere “llevarse” internet allá donde esté o donde tenga algún producto de su creación y sobre todo si son sus ojos o bien sus oídos allí. En el caso concreto del contenido de este TFM estamos hablando del espacio profundo y como la humanidad se está de alguna forma expandiendo por ahí... pues quiere acompañarse de su red de comunicaciones estrella.

Según el funcionamiento actual de Internet, a la hora de establecerse una comunicación, existe una ruta entre origen y destino y en esa comunicación entre extremos hay un nivel muy bajo de pérdidas por lo que su rendimiento es bueno. El protocolo utilizado es el “TCP/IP” y todos los nodos lo soportan.

En Internet la información es enviada mediante un modelo de intercambio de paquetes; un mensaje se divide en paquetes y estos viajan de manera independiente a través de los nodos que forman la red. A la hora de llegar al destino, los paquetes pueden llegar desordenados pero en el destino se unen en el orden correcto.

Bien, esta red se concibió para dar servicio en un determinado entorno y bajo una serie de premisas, pero cuando estas cambian por los motivos que sean aparecen una serie de dificultades que afectan considerablemente a su operatividad.

Las redes tolerantes a demoras (DTNs) nacen como una respuesta a ciertas dificultades que tenía que salvar Internet en un escenario concreto: el espacio. Ahí la complejidad que supone mantener la permanencia de la conectividad, las grandes latencias o retrasos que se producen principalmente por las enormes distancias que se manejan, la ausencia de que exista o establezca un trayecto extremo a extremo y como no, los altísimos costes que conlleva la implementación de una infraestructura, abocan la situación al nacimiento de las redes tolerantes a demoras.

2.4.2 Escenarios

El primer escenario que se planteó para que naciera la arquitectura inicial de las DTN fue el espacio. La idea de construir una Internet interplanetaria pretendía interconectar cualquier entorno donde la conectividad no estuviera disponible permanentemente y más concretamente proporcionar una red de comunicaciones entre naves espaciales.

En su desarrollo, se contempló la posibilidad de que esta solución fuese también aplicada en algunos entornos terrestres lo cual permitía cubrir varios escenarios.



Figura 2-45 Escenarios DTN

En oposición al tipo de comunicación que se utiliza en Internet, las DTNs proporcionan un entorno de transmisión muy robusto tolerante a fallos. Realmente una red tolerante a demoras es una red global que está compuesta por redes regionales por lo que una gran ventaja de las DTNs es que ofrecen una gran flexibilidad ya que permite que estas redes regionales, cada una de las cuales tiene sus propias demoras, interoperen.

Gracias a las DTNs:

- Se tiene la capacidad de permanecer en standby hasta que se complete la recepción de un conjunto de datos.
- Se identifica qué parte de datos quedan por recibir sin que se tenga que retransmitir todo el mensaje.
- Aunque no esté disponible en el momento presente, podrá reconfigurarse una ruta que se usará en el futuro.
- Se almacenarán en los nodos que funcionan como servidores fragmentos de información a la espera de que en algún momento futuro se pueda recomponer un mensaje íntegramente.

Gracias a la forma de trabajo que tienen las DTNs mediante un sistema de almacenamiento y reenvío, la red se asegura que la información no se pierda y además se consigue recomponer el mensaje para que llegue al destino.

Pero antes de invertir tanto esfuerzo en la creación de un nuevo concepto, hay que plantearse seriamente si, puesto que ya se cuenta con un modelo tan probado y garantizado y que ha tenido tanto éxito como es Internet, realmente se necesita desarrollar e implementar una red que sea conceptualmente distinta a la esencia de Internet y sea resistente a las latencias o demoras. La respuesta es afirmativa porque la actual Internet no puede soportar:

- Una conectividad intermitente debido principalmente a que en este tipo de redes en el espacio, los nodos no van a estar siempre visibles entre sí.
- Las comunicaciones tendrán un destino que estará muy lejos del origen lo cual originará elevadas latencias.
- Con motivo de las limitaciones de energía, las largas distancias y limitaciones técnicas, la tasa de error es notablemente elevada.

En estos casos el protocolo TCP resulta ineficaz y hay que proveer otros mecanismos que permitan el almacenamiento de los mensajes hasta que éstos puedan ser enviados.

Entonces, definitivamente está claro que la solución a la creación de una Internet interestelar será usar redes tolerantes a demoras (DTNs). Como se ha visto, con este tipo de redes podremos sobreponernos a los problemas que encontramos en una red que se extenderá en el espacio y a cuyos problemas de conectividad intermitente, grandes latencias y altas tasas de error no puede dar solución la actual Internet.

En una DTN se reenviarán los mensajes de un nodo a otro, pero en el caso de que un nodo no encuentre el siguiente nodo con el que hacer progresar los datos, los mensajes se almacenarán hasta que aparezca ese siguiente nodo de progresión. Para poder almacenar estos mensajes, los nodos contarán con discos duros de alta capacidad.

La realidad es que se pretende la convivencia de varias redes con distintos enlaces y nodos. Esta arquitectura se puede hacer crecer hasta allá donde se encuentre el ser humano o sus ingenios.

2.4.3 RFC 4838

El RFC 4838 [30] es un documento que nace del consenso del IRTF³¹ y en él se establece la arquitectura para redes DTN, es decir redes tolerantes a las demoras y a las interrupciones. Un sistema de comunicaciones previsto para proporcionar servicios similares a Internet pero a través de distancias interplanetarias en apoyo de la exploración del espacio profundo. En este memorándum se describe una arquitectura que aborda un abanico de problemas que hacen que los enfoques de red convencionales (como es el caso de Internet), no funcionen o sean poco prácticos.

Según se detalla en este estándar, entre las capas de transporte y de aplicación de las redes en las que va a trabajar, se inserta la capa denominada “de paquete” pasando a llamarse aquellos nodos que tengan esta característica: nodos DTN. En esta capa se contará con un medio de almacenamiento para los paquetes, que sea durable en el tiempo y que por lo tanto, hará frente a las interrupciones que pueda sufrir la red.

Los paquetes pasarán de un nodo al siguiente y se cuenta con sistemas de confirmación de entrega pudiendo existir además lo que normalmente se conoce como acuse de recibo. Asimismo, para monitorizar el estado de salud de la red también se implementarán algoritmos de gestión y de diagnóstico de la misma.

Este tipo de redes, a diferencia de Internet, no se focaliza en la conmutación de paquetes, sino en el reenvío de mensajes virtuales.

Se verá en los siguientes apartados cómo se materializa el estándar RCF 4838.

³¹ Internet Research Task Force: Es el Grupo de Trabajo de investigación de Internet y promueve la investigación para la evolución de Internet mediante la creación de grupos de investigación que trabajan en temas relacionados con los protocolos, aplicaciones, arquitectura y tecnología de Internet.

2.4.4 Transacciones de datos. El protocolo Bundle

¿Cómo se realizan las transacciones de datos en las DTNs? En la Figura 2-46 se puede apreciar de un simple golpe de vista mediante las comparaciones entre una transacción de datos típica de internet y una en una DTN.

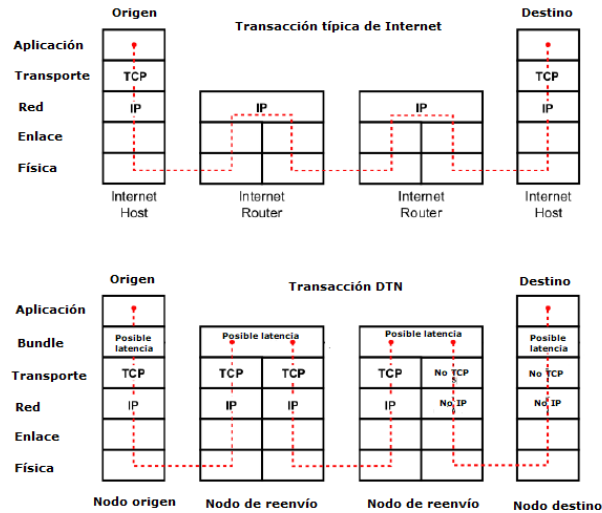


Figura 2-46 Comparación entre una transacción de datos típica de Internet y una en DTN (extraído de [31])

La diferencia que se puede observar es que para las redes DTN aparece una capa denominada “Bundle”.

El protocolo Bundle es el protocolo principal que el IRTF ha definido para las redes DTN y se especifica en el RFC 5050 [31]. La misión de este protocolo consiste en empaquetar toda la información en una sola entidad que recibe el nombre de bundle y después se transmite a través de la DTN. Su mecanismo de almacenamiento y reenvío hacen de él el protocolo de entrega de datos más fiable en este tipo de entornos “difíciles” para los que se han ideado las DTNs. No obstante hay que tener en cuenta que este protocolo no es capaz por sí mismo de efectuar una comunicación debido a que es necesario establecer contacto con los protocolos de las capas inferiores para que se realice el intercambio de datos.

Como se puede ver en la Figura 2-14, el protocolo bundle se sitúa en la capa del mismo nombre y permite la interoperabilidad entre redes que son heterogéneas.

En la Figura 2-47 se muestra el formato que tienen los mensajes del protocolo Bundle. A continuación se analizará brevemente para comprenderlo mejor:

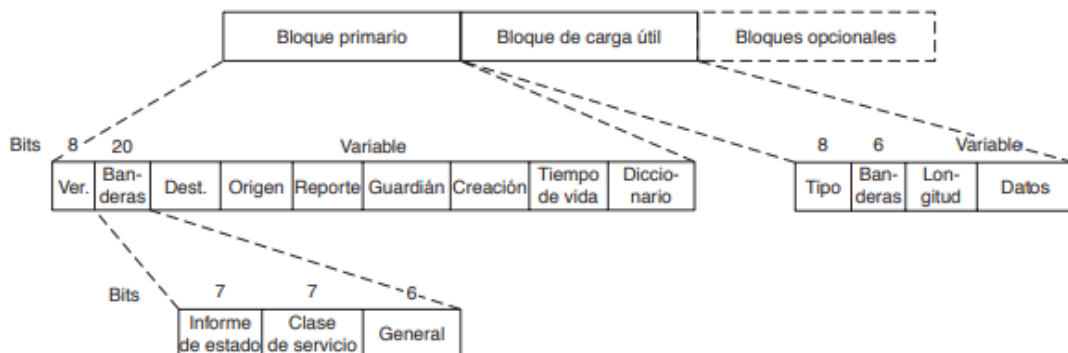


Figura 2-47 Formato de mensajes del protocolo Bundle (extraído de [32])

Cada mensaje se puede dividir en tres partes o bloques: en primer lugar un encabezado o bloque primario, después un bloque de carga útil para los datos y por último unos bloques opcionales [32]:

- Bloque primario = El primer campo es la versión, de 8 bits y luego un campo banderas de 20 bits. Algunas de las funciones de las banderas son permitir al origen que marque sus bundles como de alta o baja prioridad, indicar si el destino debe confirmar la recepción del bundle, etc... Después vienen las direcciones donde sobresalen tres partes interesantes de este diseño: los campos identificadores destino y origen y un campo identificador como guardián que es la parte encargada de comprobar que el bundle se entregue. Estos identificadores no son direcciones IP, debido a que, como ya se ha dicho, el protocolo bundle está diseñado para progresar a través de varias interredes, define sus propios identificadores que se asemejan más a nombres de alto nivel (similares a las URL de las páginas web) que a direcciones de bajo nivel (como serían las direcciones IP), esto proporciona a las redes DTN un escenario de enrutamiento a nivel de aplicación como puede ser la entrega de correo electrónico o la distribución de actualizaciones software.

Existe también un identificador reporte destinado a los mensajes de diagnóstico. La codificación de los identificadores se hace como referencia a un campo diccionario cuya longitud es variable.

El campo creación se encarga de reflejar la hora en la que se creó el bundle y le asigna a éste un número de secuencia que viene del origen para mantener el orden y un tiempo de vida que marca la franja después de la cual los datos del bundle ya no serán de útiles puesto que habrán “caducado”.

- Bloque de carga útil = Este bloque empieza con un campo tipo que lo identifica como carga útil, acompañado de un conjunto de banderas. Por último viene el campo de datos precedido de un campo de longitud.

- Bloques opcionales = Son bloques que pueden existir en el formato o bien puede que no se añadan. Un ejemplo de bloque opcional sería el que transporta parámetros de seguridad.

2.4.5 Nodos DTN

¿Cómo se realizan las transacciones?

Principalmente en una DTN, los nodos pueden ejercer como: origen, destino o como aquel elemento que reenvía los paquetes de información dentro de la red.

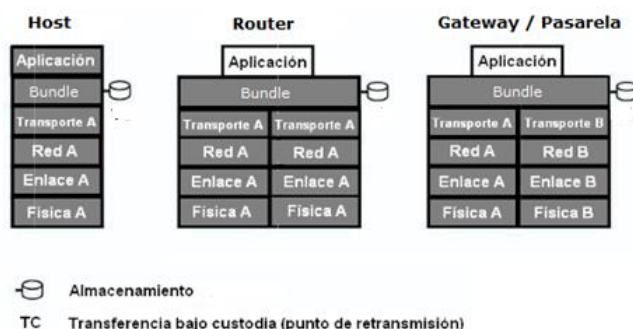


Figura 2-48 Nodos DTN (extraído de [33])

En base a esto anterior, se identificarán [34]:

1. Host.- Es el origen o destino y envía y/o recibe los paquetes, pero no es el encargado de reenviarlo. La capa bundle de un host soporta altas latencias y debido a esto, normalmente se le

dota de capacidad de almacenamiento persistente para poder meter los paquetes en tanto en cuanto no se encuentre un enlace disponible.

2. Router.- Su área de trabajo queda restringida a una única región DTN. A semejanza de los host, la capa bundle de los routers soporta altas latencias, por lo que también se le dota de capacidad de almacenamiento persistente. Tiene posibilidad de trabajar como host.
3. Gateway.- Es como una pasarela cuya misión es la de realizar el reenvío de paquetes entre dos regiones DTN. La capa bundle de los gateways debe tener almacenamiento persistente y capacidad de custodia en la transferencia de los mensajes. También tiene posibilidad de trabajar como host.

2.4.6 Método de almacenamiento y reenvío

Existen ocasiones en las que, por las circunstancias que sea, la conectividad entre dos o más nodos de una red es intermitente. Esto en el espacio puede darse con relativa facilidad ya que será muy frecuente que los nodos estén en movimiento.

En Internet, cuando se produce una conectividad intermitente, esto desemboca en una pérdida de datos. Sin embargo las DTNs están pensadas para mantener la comunicación entre los nodos a pesar de que se produzcan cortes intermitentes. La clave está en el almacenamiento y el reenvío de datos. Aquellos lugares o dispositivos encargados de realizar el almacenamiento de los mensajes deberán contar con un “disco duro” donde acopiar la información de manera indefinida...estos serán los almacenadores persistentes.

Gracias al almacenamiento persistente, los nodos de las DTNs solucionarán los problemas que puedan surgir cuando [33]:

- No exista comunicación con el siguiente salto de red durante un periodo de tiempo prolongado.
- La velocidad de envío o recepción de datos de un nodo sea mayor que el otro.
- La fiabilidad de trabajo de un nodo sea mayor que la del otro.
- Sea necesario retransmitir los datos si se produce un error en el enlace.
- Sea necesario retransmitir los datos si un nodo no hace el reenvío del mensaje.

Sea como fuere y debido a que, como hemos dicho anteriormente los nodos en el espacio estarán en movimiento, es absolutamente necesario contemplar el almacenamiento de datos para que estos queden protegidos.

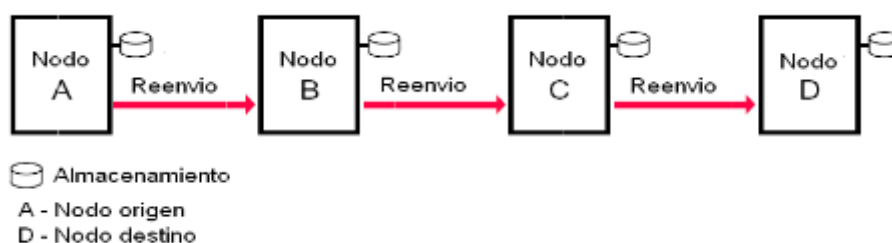


Figura 2-49 Representación del mecanismo de almacenamiento y reenvío (extraído de [33])

La DTN consiste en una red de subredes independientes en las que no existe un canal único de comunicación entre origen y destino. Deben aprovecharse en estas redes contactos ocasionales para realizar la transferencia de datos. Estas ocasiones de transferencia pueden ser aleatorias o estar programadas en el tiempo, es decir los nodos origen y destino siguen un patrón de movilidad (por

ejemplo un satélite alrededor de un planeta) y se puede en cierta forma planificar el envío y/o recepción de datos.

2.4.7 Transferencia bajo custodia

En determinadas arquitecturas, como es el caso que nos ocupa de las DTNs, la transferencia bajo custodia es realmente importante puesto que permitirá delegar la responsabilidad en la entrega de los datos al nodo que, en primera instancia los recibe y posteriormente los retransmite.

Las transferencias son organizadas entre las capas bundle de los nodos. Una vez realizado el envío de los paquetes se espera un tiempo prudencial (controlado por un temporizador) hasta que se envía un acuse de recibo al nodo origen desde el nodo receptor.

En el momento en el que el nodo emisor del paquete recibe confirmación de que se ha entregado el paquete de forma correcta, este nodo emisor borra su copia almacenada de tal forma que la responsabilidad se traslada al nodo receptor quien deberá enviar el paquete al siguiente nodo.

Si por algún motivo, el temporizador finaliza la cuenta para la que ha sido programado y no se ha recibido el acuse de recepción de los datos, el origen vuelve a retransmitir el paquete y el temporizador vuelve a iniciar la cuenta. El valor que se asigna al temporizador se asigna de manera local en base a experiencias anteriores.

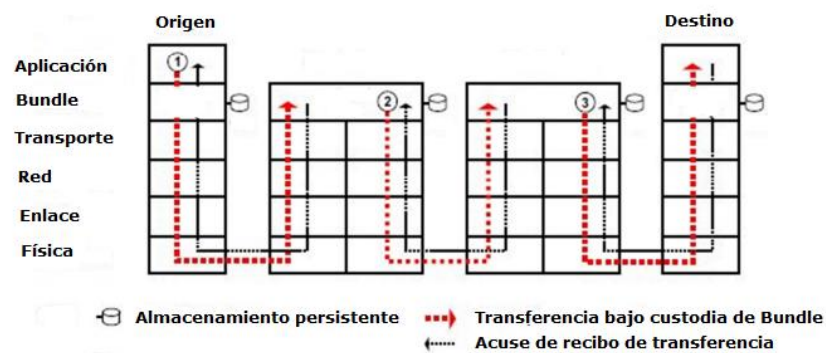


Figura 2-50 Representación del concepto “transferencia bajo custodia en una red DTN” (extraído de [33])

2.4.8 Una nueva tecnología óptica subacuática aún en desarrollo

A día de hoy, la comunicación bajo el agua se puede producir de tres formas:

1. Mediante señales de radio.
2. Mediante señales acústicas.
3. Por señales de luz.

Con las ondas de radio las distancias que se alcanzan son muy cortas, mientras que con las señales acústicas se consiguen alcances mayores pero se tiene como contrapartida la limitación de la velocidad de los datos.

Investigadores de las universidades de Waterloo (Canadá) y la Universidad de Ciencia y Tecnología de Arabia Saudí han colaborado en el desarrollo de un sistema que permita enviar información a través del agua basado en tecnología láser [35] (pto. 3 anterior; comunicación bajo el agua por señales de luz).

Esta nueva tecnología óptica subacuática³² está todavía en sus inicios aunque los resultados obtenidos le auguran un futuro prometedor.

Mediante esta tecnología, un buzo que posea un móvil protegido para que pueda ser usado bajo el agua podrá enviar datos desde este dispositivo a la superficie del mar. El proceso sería el siguiente [35]:

El móvil transmitirá los datos vía radio (WIFI) hasta un dispositivo instalado en el tanque de aire del buzo. En este punto y a través de una pequeña computadora, los datos recibidos se convierten en pulsos de luz que representarán información binaria.

Esta información binaria se enviará hacia la superficie utilizando un láser. En los estudios realizados este láser es de 520 nanómetros para distancias de más de 20 metros de profundidad. Si se quieren manejar distancias más cortas, se usará una matriz de leds verdes obteniendo en este caso longitudes de comunicación inferiores a los 10 metros.

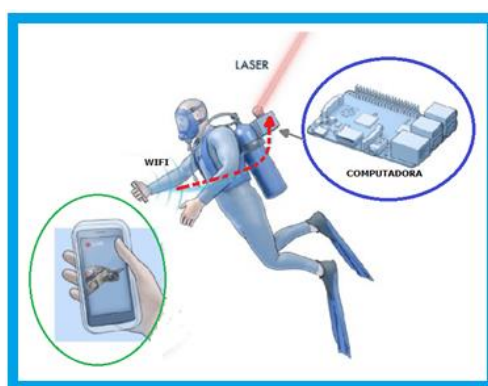


Figura 2-51 Detalle de la tecnología óptica subacuática en un buzo (extraído de [35])

Ya en la superficie, un fotodetector instalado en un buque recibe los pulsos de luz que tras ser procesados, se harán llegar a donde corresponda mediante, por ejemplo, la conexión a internet que tenga el propio barco.

En las pruebas realizadas se consiguieron transferencias con una velocidad máxima de 2,11 Mbps y una latencia de 1 ms. Teniendo en cuenta que entre transmisor y receptor había una distancia de unos pocos metros y las aguas estaban tranquilas [35].

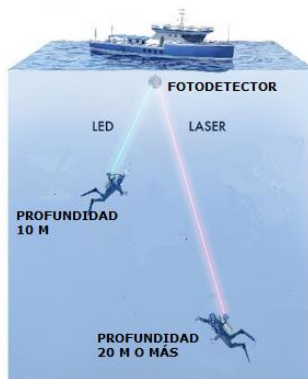


Figura 2-52 Implementación de la tecnología como un WIFI para buzos (extraído de [35])

³² Aqua – Fi en su denominación original [35]

2.4.9 Implantes para controlar las conductas de los peces

Como resultado de la patente [36] se podrían implantar unos dispositivos electrónicos en peces con el objetivo de estudiar sus constantes vitales, actividad y conductas.

Estos dispositivos son semejantes a una etiqueta que podría tener una forma más o menos sencilla dependiendo de la finalidad para la que se fabricase. No obstante e independientemente de la complejidad, todas comprenderían un microcontrolador, una memoria, una batería y opcionalmente podrían tener un transceptor óptico [36].

Este implante se localiza en el opérculo³³ del pez que se pretende supervisar.



Figura 2-53 Ubicación del implante (extraído de [36])

Estos dispositivos cuentan con dos elementos clave: memoria y transceptor óptico por lo que son candidatos a ser nodos de una red DTN.

³³ Protección de las branquias.

3 DESARROLLO DEL TFM

3.1 Los Complejos para la Red del Espacio Profundo

3.1.1 Deep Space Network

Para el establecimiento de las comunicaciones en el espacio profundo, la NASA cuenta con una red a nivel internacional que tiene instalaciones cuya administración y operación recaen en la Dirección de Redes Interplanetarias del JPL. Esta red recibe el nombre de Red de Espacio Profundo (DSN: Deep Space Network) [1].

La DSN tiene varios objetivos como son: radioastronomía, observaciones vinculadas a la exploración del sistema solar y el universo en general y apoyo a las misiones de naves espaciales interplanetarias (entre otras).

Como es lógico, el elemento clave en esta DSN son las antenas y a éstas se dedicará una parte de este TFM de manera monográfica puesto que son el enlace indispensable para establecer las comunicaciones que permitirán comandar las naves espaciales, así como recibir todo tipo de información que éstas recopilen y que, en muchas ocasiones, nunca antes se habrá visto en la Tierra.

La estructura y disposición de la DSN está configurada por tres grandes centros o complejos de antenas distribuidos por el globo terráqueo a una distancia de 120° unos de otros. La ubicación de cada uno de estos centros es [1]:

- El Complejo de Comunicaciones del Espacio Profundo de Goldstone (California, EE.UU).
- El Complejo de Comunicaciones del Espacio Profundo de Madrid (Madrid, España).
- El Complejo de Comunicación del Espacio Profundo de Canberra (Canberra, Australia).

La explicación de que estos tres centros se encuentren distribuidos de esta forma, con una separación de 120° grados entre sí, es porque de esta manera se permite que haya una comunicación constante con las naves espaciales (cualquiera de ellas) a medida que la Tierra realiza su movimiento de rotación.

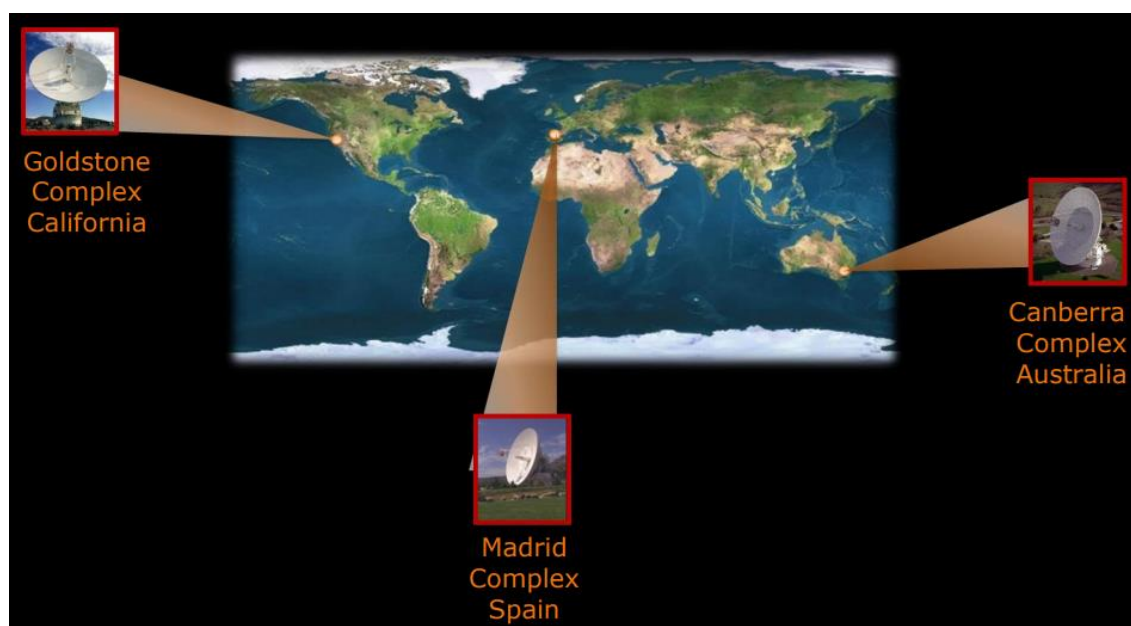


Figura 3-1 Ubicación de los complejos de la DSN (extraído de [22])

Antes de que una nave espacial desaparezca por el horizonte en uno de los tres complejos de la DSN, ya hay otro de ellos que la tiene visible y toma el relevo de sus comunicaciones.

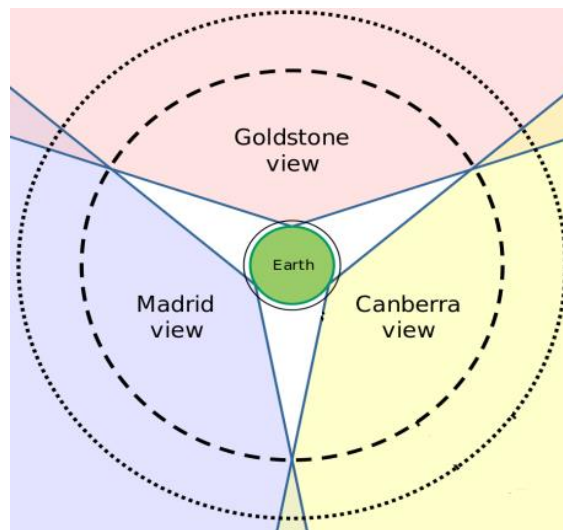


Figura 3-2 Separación de 120° de los complejos de la DTN (extraído de [22])

Pero como se ha comentado anteriormente, es importante subrayar que la DSN no es sólo un conjunto de tres complejos de antenas, sino que se trata de una potente red gracias a la que podemos comandar, rastrear y monitorizar el estado de salud y seguridad de las naves espaciales allí donde se encuentren por muy lejos que sea. Además con la DSN, tendremos la oportunidad de investigar asteroides, planetas y los satélites / lunas que los orbitan.

Cada uno de los tres complejos que forman la DSN tiene un campo de antenas de gran tamaño y está configurado de manera que permita la comunicación vía radio entre varias naves espaciales y la Tierra de manera continua.

Recapitulando lo ya visto en el capítulo anterior acerca de la DSN, recordemos que las antenas instaladas en los complejos son mecanismos de enfoque que proceden a concentrar la potencia de las señales que se reciben con datos de las naves espaciales así como de las señales que se transmiten con comandos para ellas. El apuntamiento de las antenas debe ser muy preciso a la nave espacial porque hay que tener en cuenta que una antena sólo puede ver una pequeña parte del cielo de una manera similar (para hacerse una idea) a como sería mirar el cielo a través de una pajita de las que se utilizan para beber los refrescos.

Estas antenas, cuentan además con sistemas receptores ultrasensibles que deben permitir la detección de las señales de radio extremadamente débiles que emiten las naves espaciales desde el espacio exterior al planeta Tierra. No obstante se identifican dos problemas:

1. Como es lógico, la señal se ve degradada por el ruido emitido por los objetos del universo y este ruido se amplifica junto con la señal.
2. El propio amplificador, también añade ruido.

La DSN utiliza una tecnología que efectúa en enfriamiento de los amplificadores de las antenas unos pocos grados por encima del cero absoluto además de técnicas especiales para codificar señales de tal forma que el sistema receptor pueda ser capaz de distinguir la señal del ruido no deseado.

Cada complejo cuenta con un centro de procesamiento de señales que, de manera remota opera las antenas. Se encarga de su apuntamiento y control así como de la recepción de datos, transmisión de comandos y generación de datos de navegación de las naves espaciales.

Una vez que estos centros de procesamiento de señales tienen lista la información, la transmiten al JPL para que desde allí tras sufrir un nuevo procesamiento, se distribuya a los organismos / organizaciones científicas correspondientes por medio de una red de comunicaciones terrestres.



Figura 3-3 Esquema de trabajo de la DSN de la NASA

3.2 Desarrollo de una nueva arquitectura de comunicaciones espaciales

3.2.1 Introducción

Ya se ha acometido anteriormente en este Trabajo Fin de Máster, el estudio de la Red del Espacio Profundo que actualmente está operando la NASA y que permite la comunicación radio entre la Tierra y las misiones que hay desplegadas algunas de ellas a varios miles de millones de kilómetros de nuestro planeta.

Este sistema de comunicaciones que cuenta con una tecnología puntera y específica debido al servicio que tiene que prestar, permite establecer contacto y transferir información con las misiones así como controlar, monitorizar y dirigir las naves espaciales. Es una infraestructura de elevado rendimiento insustituible a día de hoy que pocas entidades pueden permitirse y que, como se ha visto ya, algunas organizaciones “alquilan” para poder hacer uso de estos enlaces en los intereses que puedan tener a la hora de recibir información de sondas espaciales y del espacio en general.

También se ha comentado ya anteriormente en este trabajo que actualmente estas arquitecturas de comunicaciones se establecen punto a punto entre la nave espacial y el centro de control de la misión, para lo cual es necesario implementar ventanas horarias de cara a usos compartidos de los mismos recursos por distintas misiones en la ventana que a cada una de ellas le sea asignada en base a otros determinantes como interés de la misión, presupuesto económico asignado a la misma, cantidad de

información requerida, etc... En la Figura 3-4 se puede ver un ejemplo de enlace espacial punto a punto para una determinada misión.

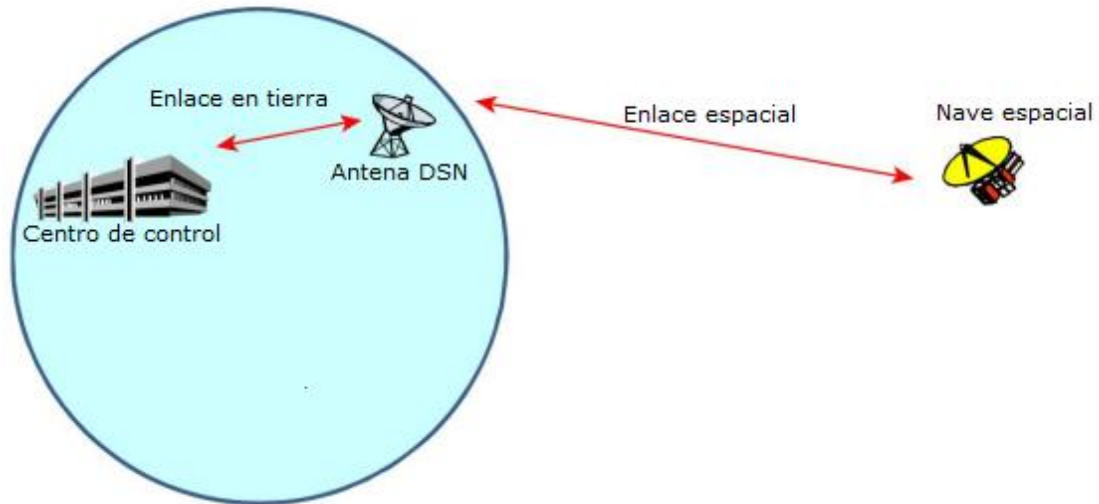


Figura 3-4 Esquema de un enlace espacial punto a punto (extraído de [37])

Sin menosprecio de este sistema de comunicaciones espaciales, que a día de hoy es el que se encuentra implementado y su uso es satisfactorio, hay que tener en cuenta que la cantidad de misiones espaciales que hay operativas a día de hoy es elevada, su número va “in crescendo” y al mismo tiempo se van volviendo cada vez más exigentes por lo que las arquitecturas de comunicaciones que les dan servicio cada vez serán más demandantes.

Se empieza a dejar un poco ya el campo del presente, lo actual, lo tangible, de la red DSN tal y como está montada y dando servicio y tal y como se ha estudiado para pasar ahora al campo del futuro, el diseño, el cómo deberá ser, qué servicios deberán proporcionarse, cuál será la arquitectura sobre la que desarrollar el futuro de las comunicaciones en el espacio profundo.....en el espacio interestelar.

En este campo del futuro, el único enlace de datos que se establece actualmente entre el centro de control de la misión y la nave espacial deberá sustituirse por arquitecturas de comunicaciones que proporcionen saltos de red. Los relés que se utilicen en estos saltos podrán ser naves espaciales o estaciones terrestres y habrá que tener en cuenta el establecimiento de “nodos” que permitan hacer regeneración de la señal. También habrá que hacer frente a las limitaciones de visibilidad que se den por ejemplo por el movimiento de los planetas que se encuentren en el escenario de estos sistemas de comunicaciones y tendrán que habilitarse elementos de almacenamiento de los datos que permitan “guardar” la información hasta que las traslaciones o rotaciones de los planetas permitan que las limitaciones de visibilidad desaparezcan y se restablezcan las comunicaciones entre nodos visibles para hacer posible el progreso de las comunicaciones suspendidas por la falta de visibilidad entre elementos.

Parece, por tanto, que el futuro se dibuja como un escenario en el que se contemplan múltiples nodos que no sólo se comunican entre el espacio y la Tierra, sino que también pueden establecer comunicaciones entre sistemas que se encuentren en el espacio. El aumento del número de sistemas que se irá produciendo con el paso del tiempo, conllevará que la gestión de la conectividad y las transferencias de datos entre este, como se ha dicho, número cada vez mayor de sistemas será cada vez más complejo.

Este escenario ya se ha vivido con el desarrollo de la telefonía desde su creación, hace más de 100 años. Cuando el número de sistemas/usuarios era lo suficientemente pequeño, era viable realizar la conmutación de circuitos de manera manual mediante operadores humanos. En cuanto el número de abonados empezó a crecer, este sistema telefónico tuvo que evolucionar y transformarse en conmutaciones automáticas de circuitos.

La arquitectura de comunicaciones espacial requerirá un cambio similar desde los sistemas de comunicaciones espaciales tradicionales hacia una arquitectura de red más flexible para la comunicación espacial del futuro.

3.2.2 Contemplando los posibles escenarios de acción en el espacio

Una vez establecidas las bases de hacia dónde se quiere llegar y teniendo en cuenta que a día de hoy es un campo de estudio pendiente de desplegarse, hay que empezar por analizar los posibles escenarios a encontrarse para acometer el desarrollo de la solución final. Este será el contenido del presente apartado que servirá, además de para contemplar los posibles escenarios de acción, para resaltar en cada uno de ellos los problemas que deben considerarse a la hora de, posteriormente, definir un servicio de comunicaciones a nivel interplanetario, esta internet Interestelar motivo de este Trabajo Fin de Máster en definitiva.

Una estación terrestre, una nave espacial

Se trata del escenario más simple y el que se estudiará en primer lugar. Consta de un centro de control único que establece comunicaciones con una astronave a través de una única estación terrestre. Puede verse en la Figura 3-5:

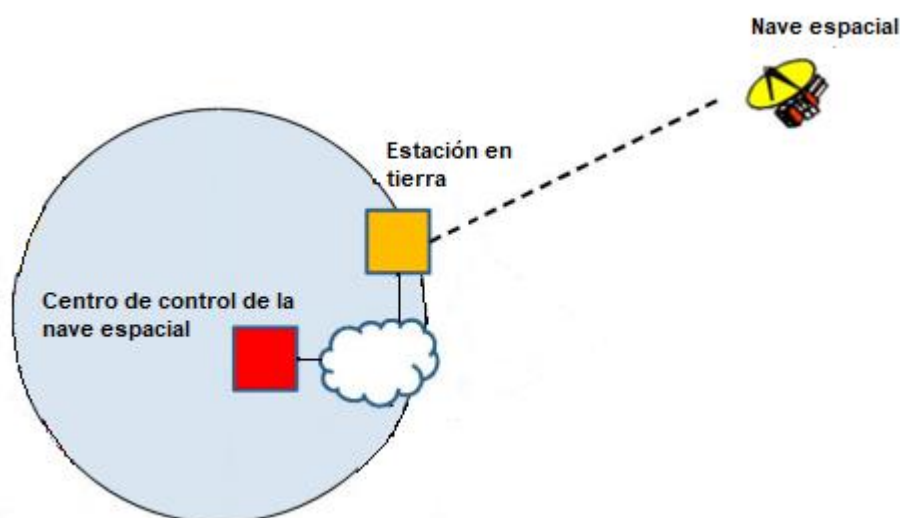


Figura 3-5 Escenario una estación terrestre, una nave espacial (extraído de [37])

Los aspectos más importantes que se consideran en este escenario son [37]:

- La conectividad con la nave espacial normalmente es predecible pero puede que no sea continua. En este caso el centro de control debe saber en qué momento la estación terrestre está en comunicación con la nave espacial para, en ese momento, comenzar a transmitir.
- Los períodos de contacto entre la estación terrestre y la nave espacial pueden ser de duración breve.
- La conectividad entre la estación terrestre y la nave espacial puede perderse inesperadamente.

Establecer comunicaciones con un elemento aterrizado a través de un orbitador controlado de manera independiente

El escenario planteado en este segundo caso es la existencia de un orbitador que se utiliza de relé para comunicarse con un elemento aterrizado en otro planeta, satélite, etc... El orbitador cuenta con un centro de control independiente que gestiona sus operaciones mientras que el elemento aterrizado cuenta también con su propio centro de control.

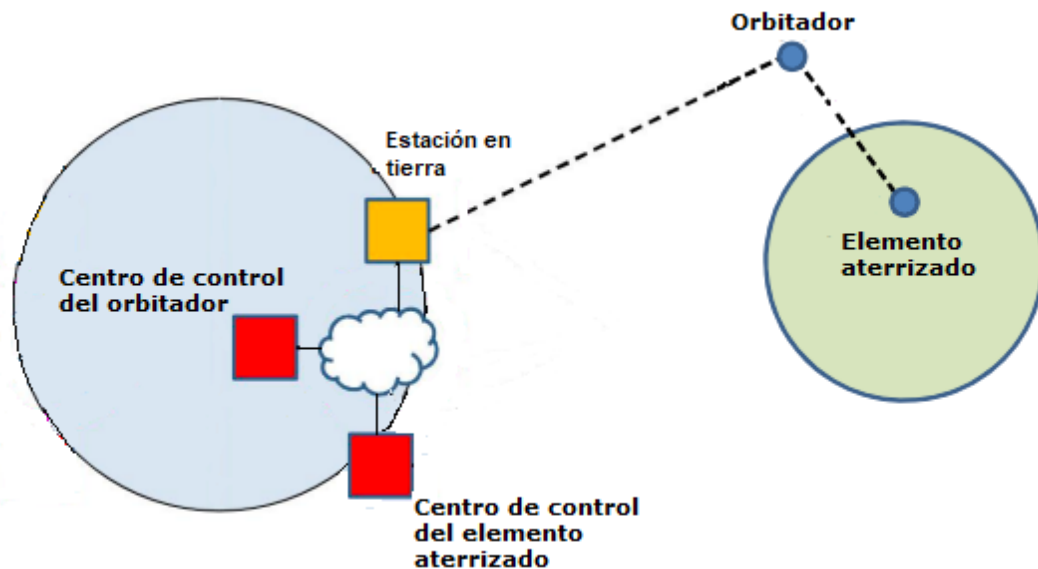


Figura 3-6 Escenario de comunicaciones a través de un orbitador controlado (extraído de [37])

Este escenario es generalizable al establecimiento de comunicaciones con cualquier nodo que se encuentre más allá del orbitador. [37]

Aspectos a considerar:

- La conectividad entre todos los elementos puede ser intermitente.
- La conectividad entre los elementos de este escenario puede cambiar de manera predecible o impredecible.
- Se debe contemplar la posibilidad de que exista una comunicación de “emergencia” y a bajo nivel entre el orbitador y el elemento aterrizado si no hay capacidad de comunicación directa entre el módulo aterrizado y tierra.

Comunicaciones con elemento aterrizado a través de orbitadores controlados independientemente

En este caso se considerará la posibilidad de un escenario en el que existe un centro de control del orbitador que tiene a su cargo una cierta cantidad de orbitadores (dos en concreto) y un centro de control del elemento aterrizado que desea utilizar los servicios de los orbitadores para comunicarse con el elemento aterrizado.

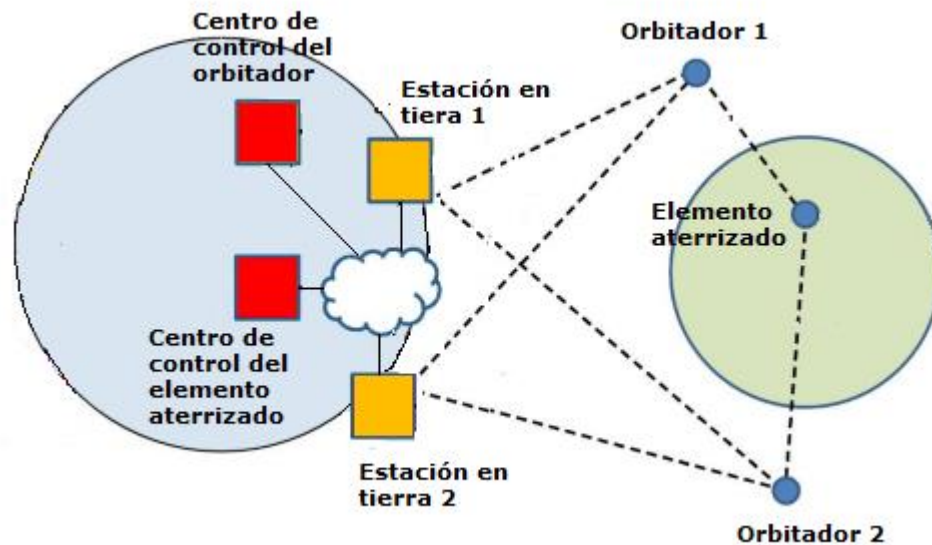


Figura 3-7 Escenario de comunicaciones a través de dos orbitadores controlados (extraído de [37])

Las consideraciones de este escenario serían [37]:

- Las rutas de datos que deberán seguirse para comunicar el elemento aterrizado y el centro de control del elemento aterrizado (qué estación terrestre se usará y qué orbitador se usará como repetidor) deben determinarse a través de algún mecanismo.
- La conectividad entre los elementos puede ser intermitente.
- Puede haber ocasiones en las que sea mejor esperar una conectividad futura en lugar de realizar la transmisión en el instante actual porque la ruta de latencia más baja hacia el destino no se corresponda con aquella en la que el primer salto se produzca antes.
- La conectividad entre elementos puede cambiar de manera predecible o impredecible.
- Si ambas estaciones en tierra transmiten de manera simultánea, puede haber colisiones en el elemento aterrizado.
- Si las dos estaciones en tierra pueden recibir simultáneamente del elemento aterrizado, pueden recibirse múltiples copias de los datos “downlink” en el centro de control.
- La estación en tierra con mejor conectividad puede cambiar su estado de conectividad de manera predecible o impredecible.
- Puede ocurrir que sea mejor transmitir desde una estación en tierra y recibir en la otra.

Existencia de una red aterrizada

Se plantea ahora una ampliación del escenario anterior en el sentido de que ahora tendremos a mayores, varios elementos aterrizados que usarán un protocolo de red local para comunicarse entre ellos.

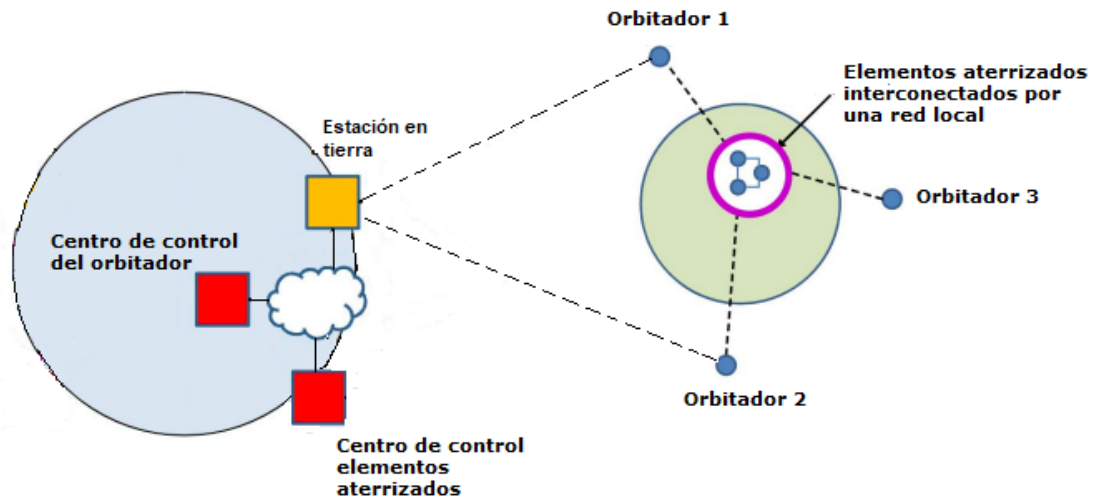


Figura 3-8 Escenario de comunicaciones con existencia de una red aterrizada (extraído de [37])

La consideración principal a tener en cuenta en este caso sería que si los elementos aterrizados utilizan un protocolo de interconexión diferente a utilizado en las comunicaciones extremo a extremo, será necesario usar algún tipo de “pasarela” o “gateway” de comunicaciones entre protocolos.

3.2.3 Las comunicaciones actuales

Viene siendo recurrente y se ha expuesto en varias ocasiones el hecho de que las comunicaciones en el espacio profundo y debido a que el fin de las naves espaciales es la exploración y la ciencia, están pensadas para el establecimiento de comunicaciones entre estas naves y estaciones terrestres de tal forma que tenemos comunicaciones entre y desde el centro de control en la Tierra hacia la nave espacial (uplink) y comunicaciones de telemetría y datos (downlink) en sentido nave a tierra. Sin embargo podría darse la necesidad de que una nave espacial de exploración tuviera que comunicarse con otra nave espacial de manera directa o que una nave espacial tuviera que comunicarse con varios centros de control de tierra.

Este punto de vista representa un avance en las comunicaciones espaciales tradicionales, sin embargo la arquitectura de datos que se ha ido desarrollando representa una traba para el desarrollo de sistemas de comunicaciones inter-naves fundamentalmente por dos motivos:

1.- Las estructuras de datos se han desarrollado y optimizado para el establecimiento de comunicaciones gestionadas punto a punto.

2.- Algunos estándares recomendados por el Comité Consultivo para los Sistemas de Datos Espaciales (CCSDS)³⁴ permiten ciertas capacidades que pueden resultar incompatibles a la hora de ser implementadas.

Para dar solución a esta casuística, se requiere desarrollar un nuevo protocolo o conjunto de nuevos protocolos que admitan de una manera práctica y eficiente el reenvío automatizado de datos a través de múltiples saltos entre nodos.

³⁴ El CCSDS es un foro multinacional para el desarrollo de normas de sistemas de comunicaciones y datos para vuelos espaciales.

3.2.4 Colaboraciones entre agencias. Interoperabilidad

El desarrollo de las actividades espaciales a nivel mundial y el ya tradicional fenómeno de la globalización han traído muchos cambios en la forma de trabajar. Mientras que antiguamente existía una especie de “monopolio” en el lanzamiento de misiones al espacio, cada vez es más común la colaboración de varias naciones, organismos o agencias en la organización de una misión espacial. Estas agencias no sólo realizan o pueden contribuir a la construcción de las naves espaciales y sus equipos de a bordo, sino que existen también agencias que requerirán de información en el desarrollo de la misión una vez que haya sido lanzada al espacio a la hora de entregar datos por la nave y que llegan a la Tierra en el enlace downlink.

Es por tanto, un objetivo que también hay que tener en cuenta, el de aumentar el nivel de interoperabilidad entre agencias espaciales. La solución pasará con toda probabilidad por crear una arquitectura de interconexión espacial que permitirá a las diferentes agencias poder compartir recursos extraterrestres (tanto en otros planetas como en el espacio en general) y de esta forma poder apoyarse mutuamente aunque los sistemas finales no sean accesibles directamente desde la Tierra.

Desarrollar un sistema de interconexión de redes creando lo que sería una red de redes interestelar respaldará la interoperabilidad y permitirá compartir recursos ofreciendo la oportunidad de obtener un mayor rendimiento científico.

La interconexión de redes tendrá que permitir su interoperabilidad, se puede ver un ejemplo en la Figura 3-9:

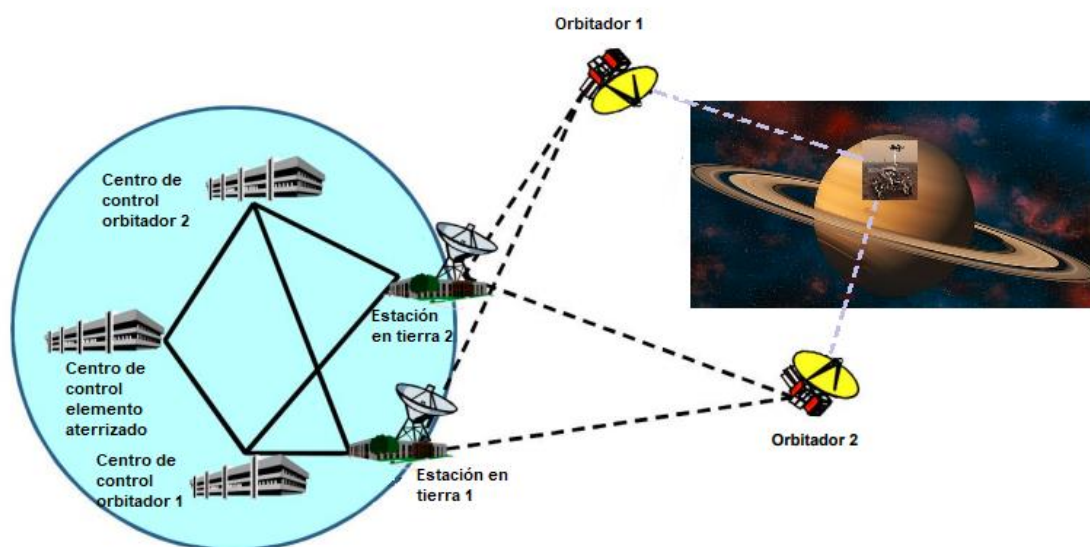


Figura 3-9 Interoperabilidad de redes en el espacio (extraído de [37])

3.2.5 Antecedentes

Cabe preguntarse si existe algún antecedente en el que podamos apoyarnos para tenerlo como punto de referencia o germen de todo lo que se está estudiando en este apartado acerca del camino que se está siguiendo para desarrollar e implementar esa futura internet interestelar.

Efectivamente, existe un antecedente importante que se va a desarrollar en este apartado y es el “Servicio de operaciones de retransmisión de Marte (MaROS)”.

En el año 2008 había seis naves espaciales en Marte que tenían la capacidad de comunicarse entre sí gracias a la existencia de una red de retransmisiones cuya topología se puede ver de manera sencilla en la Figura 3-10:

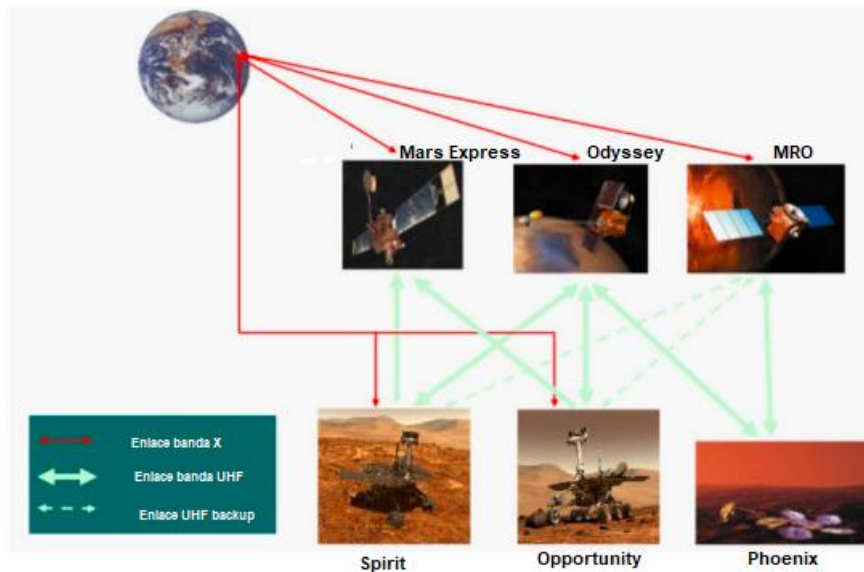


Figura 3-10 Gráfico de comunicaciones entre naves operando en Marte (extraído de [30])

Los vehículos Spirit y Opportunity desde su llegada a Marte han estado transmitiendo datos a la Tierra a través del orbitador Odyssey. El MRO³⁵ ha concluido la misión científica principal para la que fue lanzado y ha servido, junto con el Odyssey, como enlace de retransmisión primaria para el módulo Phoenix [30].

Esta red está compuesta por vehículos que, en algunos casos, no fueron diseñados para interactuar entre sí.

El primero de los desafíos técnicos a los que hubo que hacer frente fue al tema de la interfaz de las radios de las naves espaciales. Por otro lado, también era necesario interconectar los sistemas de datos terrestres (GDS) que formaban cada uno de los proyectos. Para conectar cualquier GDS a la nave espacial in situ tenía que desarrollarse también el enlace espacial.

La Red del Espacio Profundo DSN sirve como intermediario entre todas las naves espaciales que conforman la red y los sistemas de datos en tierra de los operadores de las naves y por lo tanto la DSN se erige como recurso estándar.

En esta “infraestructura” comunicaciones contamos por tanto con cuatro interfaces que son [30]:

- 1.- Interfaz GDS a GDS.
- 2.- Interfaz GDS a DSN.
- 3.- El enlace espacial.
- 4.- Interfaz de radio a radio.

Se pueden ver en la Figura 3-11, las diferentes familias de interfaces de esta red que acaban de enunciarse:

³⁵ Mars Reconnaissance Orbiter.

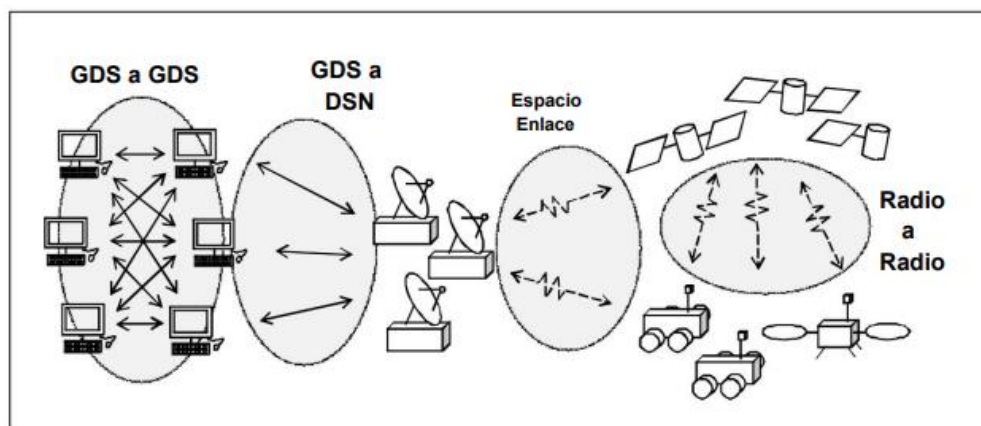


Figura 3-11 Interfaces de la red correspondiente al gráfico de la figura anterior (3-45) (extraído de [30])

Las interfaces enlace espacial e interface de radio a radio son permanentes puesto que una vez que han sido implementadas permanecen sin cambios.

No ocurre esto con la interfaz GDS para la que hay que crear tantas como se puede observar en la parte izquierda de la figura de arriba debido a que es necesario facilitar la transferencia de datos entre los diversos operadores de naves espaciales y puesto que la mayoría de las naves espaciales actualmente se administran de forma independiente y cada una tiene sus propios procesos, cronogramas, etc...

Este servicio de operaciones de retransmisión de Marte se propone los siguientes objetivos principales [30]:

- ✓ Automatizar el mayor número posible de procesos.
- ✓ Simplificar las operaciones de cambios en la configuración de la red.
- ✓ Estandarizar las interfaces presentes en la red de retransmisión.
- ✓ Contar con un mecanismo seguro para permitir la transferencia de datos entre los participantes de la red.
- ✓ Seguir una política de simplificación para introducir nuevos participantes en la red de retransmisión.

MaROS está configurado para erigirse como intermediario entre los operadores de las naves espaciales que forman parte de esta red. Se trata de una infraestructura común que gestiona el intercambio de información de tal forma que todos sus componentes se comuniquen y se entiendan.

Si ocurre que aparece una nueva nave espacial que quiere formar parte de este sistema, su introducción será un proceso relativamente sencillo puesto que conllevará agregar esa nueva nave a la base de datos de naves espaciales. En principio no se requiere llevar a cabo ninguna otra acción ni cambio en el sistema. Es importante y hay que tenerlo en cuenta que para formar parte de esta red, los operadores de la nueva nave espacial "candidata" sólo necesitan cumplir con las especificaciones de la interfaz y haber recibido los correspondientes permisos de usuario.

El formato de interfaz que se eligió fue XML debido a su generalidad, simplicidad y facilidad de uso en internet.

Tras la implementación de Servicio de Operaciones de Retransmisión de Marte y su operación, se ha adquirido una experiencia que ha dado como fruto la aparición de una serie de ventajas sobre las comunicaciones directas que se hacen de manera tradicional con la Tierra como principalmente son [30]:

- Incremento en el retorno de los datos científicos: al utilizar MaROS, las velocidades de los datos recibidos son aproximadamente del triple que las velocidades alcanzables por medio del enlace directo a la Tierra.

- Menor potencia requerida: los enlaces directos requieren aproximadamente 5 W/h por cada Mb de datos de retorno, mientras que MaROS usa alrededor de 0,1 W/h.
- Menor masa requerida: las operaciones de retransmisión requieren de una menor masa en los elementos aterrizados.

La conclusión es que el desarrollo de MaROS supone la consolidación de toda una experiencia adquirida durante seis años de funcionamiento de la red de retransmisión ad hoc en Marte. A falta de un sistema de retransmisión dedicado in situ que pueda confirmar los beneficios que brindarán las comunicaciones de retransmisión sin necesidad de intervención humana, MaROS es el germen que se necesitaba para confirmar las ventajas que los avances en tecnología nos brindarán en el futuro desarrollo del establecimiento de una Internet interestelar, de hecho, MaROS ya está posicionado para evolucionar a medida que se envían más naves espaciales a Marte y la red de retransmisión se expande.

3.2.6 Definición de la red. Procedimiento utilizado para el reenvío de mensajes sobre un posible caso práctico

Llegados a este punto, se continúa en el estudio de la futura creación de una Internet interestelar similar a la que se utiliza actualmente en los hogares, trabajos, establecimientos, organismos, etc... pero con la particularidad de que en este caso, el escenario de acción no será la Tierra, sino cualquier punto del universo donde se encuentre una nave, una sonda o cualquier otro ingenio humano. Es importante tener en cuenta que este punto del universo, gracias al rápido avance de la tecnología, cada vez estará más alejado de nuestro planeta por lo que la infraestructura con la que tendrá que desarrollarse esa red así como los protocolos que usará para permitir el tránsito de la información de una manera satisfactoria entre sus nodos serán claves para contribuir al éxito de su operatividad.

La arquitectura sobre la que se sustentará el establecimiento de la Internet interestelar desarrollada en este trabajo corresponde con una Red Tolerante a Demoras (DTN). Esta red permite el establecimiento de comunicaciones cuando no existe un trayecto pre-establecido entre los nodos origen y destino. En este caso la progresión de la información que transite deberá efectuarse mediante saltos.

Es fácilmente identificable el hecho de que lo que realmente se conseguirá finalmente es una “súper red” totalmente heterogénea puesto que además de la Internet interestelar propiamente dicha, existirán otras redes como por ejemplo Internet terrestre que se unirá a la interestelar mediante un gateway (elemento que permite interconexión entre dos redes distintas con diferente tecnología) por lo que gracias al protocolo Bundle se podrá materializar este importante requisito. Lo mismo ocurre y así hay que tenerlo previsto, en los casos futuros en los que posibles redes instaladas en planetas, estaciones espaciales u otros y que se habrán creado en su día conforme a sus protocolos específicos. Estas deberán unirse a la interestelar mediante su correspondiente Gateway y no habrá ningún problema gracias al Bundle.

La esencia de esta Internet interestelar, que el autor ha basado en el concepto DTN será la de proceder a almacenar un mensaje que se reciba en un nodo y transportarlo para transmitirlo o replicarlo³⁶ en el momento en el que se produzca el contacto con otro nodo de la red.

La latencia que exista entre contactos inter-nodales, dependerá de muchos factores: distancias elevadas entre nodos, zonas de sombra entre dos nodos por la interposición de un satélite o un planeta, etc... pero lo que sí es cierto es que esa latencia en la mayoría de los casos será muy elevada (horas, días...)

Gracias al desarrollo de esta Internet interestelar sobre una infraestructura DTN: el que los nodos tengan movilidad permitirá conectar un mundo que actualmente está desconectado y por otro lado mediante la posibilidad de almacenamiento de los mensajes en los nodos hasta que se produzca el

³⁶ Se tratará indistintamente cualquiera de los dos términos por considerarse equivalentes ambos en este ámbito

momento del reenvío en el encuentro con el siguiente nodo, podremos salvar el gran escollo que significan las elevadas latencias espaciales.

En concreto, para la definición / prototipo de la red interestelar que se pretende desarrollar en este TFM y basándose en la información tratada con anterioridad, se expondrá a modo de ejemplo ¿cuál sería el modelo que seguiría un correo electrónico que una persona desde la Tierra, podría mandar a un astronauta que se encuentre en otro planeta? En la figura 3-12 se explica el mecanismo de almacenamiento y reenvío que utilizará esta Internet interestelar para, como ejemplo, mandar un e-mail en sentido Tierra – espacio.

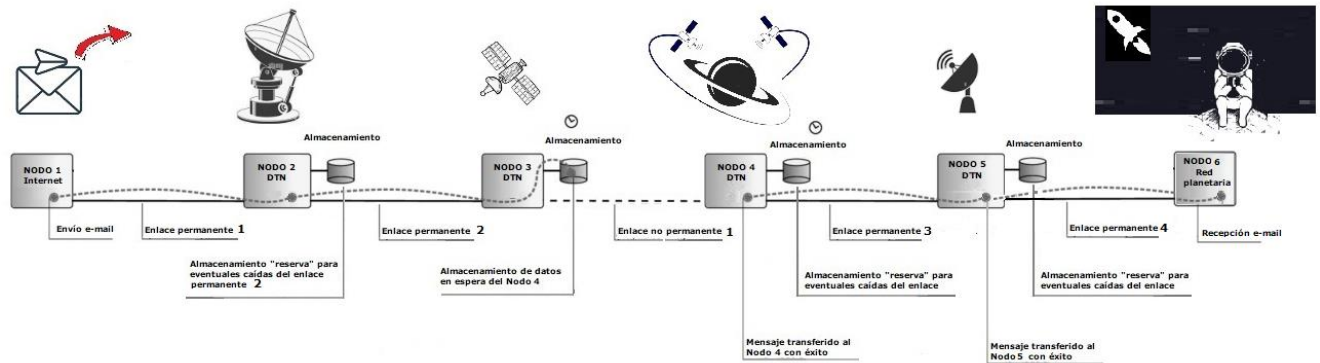


Figura 3-12 Mecanismo de almacenamiento y reenvío del prototipo propuesto de Internet interestelar

En esta parte de red que dará servicio al envío de un correo electrónico participarán de forma directa 6 nodos:

Nodo 1.- Será el nodo fuente u origen. Es un nodo de Internet que da servicio al domicilio de la familia de un astronauta y quieren mandarle un correo electrónico (a partir de ahora mensaje). A través del enlace permanente 1, ese mensaje llegará al nodo 2.

Nodo 2.- Este nodo estará ubicado en la Estación Espacial DSN y es un nodo DTN. Hace función de pasarela puesto que interconecta Internet terrestre con Internet interestelar (red DTN). A este nodo se le dota de una unidad de almacenamiento porque a pesar de que tiene visión directa con un satélite espacial por medio de un enlace permanente 2 (recordemos que como se vio en el “apartado 3.1.1. Deep Space Network” la DSN contaba con tres centros repartidos a lo largo del globo terráqueo y distanciados entre sí 120°) podría producirse una caída inesperada de este enlace. La unidad de almacenamiento en este nodo retendrá el mensaje hasta que se recupere la comunicación Estación Espacial – satélite. El mensaje ahora está en el nodo 3.

Nodo 3.- Es el satélite que interconecta la Estación Espacial y la constelación de satélites que orbitan alrededor del planeta destino. Este nodo cuenta con otra unidad de almacenamiento, pero a diferencia de la anterior este debe estar prevenida ante la posibilidad de que se produzcan latencias (más o menos grandes) y es por este motivo por el que gráficamente se ha distinguido la unidad de almacenamiento con un reloj. La elevada distancia entre los nodos 3 y 4, las condiciones de movimiento de ambos y las potencias que manejan en las transmisiones (mucho menores que la estación en la Tierra) entre otros, justifican la calificación del enlace como no permanente. A la primera oportunidad de contacto, el satélite transfiere el mensaje a la constelación de satélites en el planeta destino, mensaje por tanto a bordo del nodo 4.

Nodo 4.- Formado por la constelación de satélites del planeta destino. Desde aquí transferirá el mensaje al nodo 5 a través de un enlace permanente, en concreto el enlace permanente 3. Tenemos una casuística similar a lo que ocurría entre los nodos 2 y 3, motivo por el que ha optado por dotarlo también de un elemento de almacenamiento que se ha denominado “reserva”. Mensaje en nodo 5.

Nodo 5.- Podría decirse que el nodo 5 es un gemelo del nodo 2 pero donde la Estación se encuentra en el planeta destino. También con una unidad de almacenamiento de reserva teniendo en cuenta el sentido inverso de la comunicación, esto es cuando el mensaje se envíe hacia la Tierra. En este caso ante eventuales caídas del enlace permanente 3 de manera inesperada el nodo 5 debe contar con esa unidad de almacenamiento para retener el mensaje hasta que pueda pasarlo al nodo 4.

En condiciones normales, existe visión directa entre el nodo 5 y la constelación de satélites (que forman el nodo 4). Mensaje en nodo 6.

Nodo 6.- Pertenece a la Internet del planeta destino, es un nodo gemelo del nodo 1. Entrega el correo electrónico (mensaje) al destinatario que como se puede ver ya lo está leyendo.

Queda ahora por definir el protocolo de enrutamiento para la red DTN que se seguirá en este prototipo de Internet interestelar.

3.2.7 Definición de la red. Método de enrutado

Establecer un protocolo de enrutado que satisfaga las necesidades de la red es vital. Desde este punto de vista, se considera imprescindible incluirlo como un apartado en este TFM para desarrollarlo explícitamente.

En la definición de nuestra Internet interestelar, es muy importante considerar algunos aspectos concernientes al enrutado que se elegirá para implantarlo en el prototipo que se está desarrollando.

El enrutado, repercutirá en la forma de replicado de mensajes entre nodos. Si este se efectúa de una manera repetitiva, se mejorarán las posibilidades de entrega lo cual conllevará una reducción del tiempo de tránsito de la información en la red.

Existen varios protocolos de enrutado, pero lo primero que se va a definir para esta red es la elección de un modelo donde no se habrá definido con antelación un número determinado de réplicas para un mensaje. En este sentido será un esquema de enrutamiento ilimitado [38]. Al elegir esta opción, ampliamos las posibilidades de réplicas y no ponemos límites a éstas ante una infraestructura en la pretendemos primar el establecimiento de una comunicación aprovechando todas las opciones de transmisión de información entre nodos posible sin establecer “tope” a éstas.

El protocolo de enrutamiento que se adoptará será el conocido como “rap de burbujas” [38]

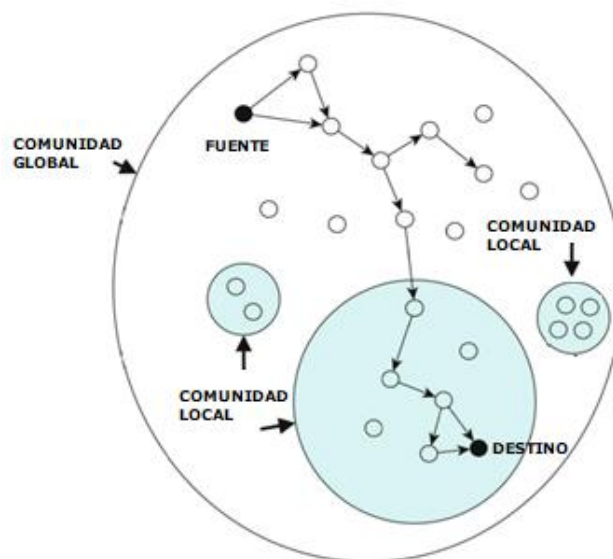


Figura 3-13 Gráfico descriptivo del protocolo de enrutamiento “Rap de Burbujas” para redes DTN (extraído de [38])

Este protocolo tiene similitudes con actitudes que tienen conexión con la vida real desde el punto de vista de que en una sociedad cualquiera a la hora de establecerse cualquier tipo de interacciones entre personas pertenecientes a esta, dichas interacciones se pueden clasificar en relación con aquellas comunidades involucradas

Según este protocolo, todos los nodos pertenecerán a una comunidad global, que será la red DTN. Luego, internamente los nodos pertenecerán a comunidades locales diferentes. El reenvío de mensajes se hará de forma que al principio los nodos reenviarán los mensajes a otros nodos que se encuentren en la comunidad global. Esto se hará así hasta que el mensaje alcance un nodo que pertenezca a la misma comunidad local que el nodo destino, a partir de este punto el reenvío de mensajes ya se hará dentro de la propia comunidad local hasta que se alcance el nodo destino.

La elección de este protocolo se ha hecho teniendo en cuenta que en un escenario con límites tan enormemente grandes y que a medida que la tecnología va avanzando se van ampliando cada vez más, parece interesante poder contar con una especie de clasificación (comunidades locales) que puede resultar beneficiosa para orientar las réplicas de una manera más eficiente. El poder considerar comunidades locales como planetas, galaxias, etc... redundarán en una ventaja muy considerable de la que podrá sin ninguna duda beneficiarse la comunicación entre host fuente y host sumidero de la información.

Esta Internet interestelar cuenta, por tanto con una infraestructura de nodos que se fundamentan en una secuencia que será de almacenamiento, transporte y reenvío de datos entre nodos. Será fundamental que los nodos de esta red sean cooperativos y “acepten” los mensajes que les llegan de otros nodos puesto que si esto no fuese así, el funcionamiento de esta red / prototipo se verá seriamente afectado.

El autor, ha decidido considerar este hecho y promover la cooperación entre los nodos para lo cual se establecerá en la red un sistema de incentivos que ofrecer a los nodos. El sistema que se implantará será el que podríamos denominar como “reputación”³⁷ y cuyo fundamento consiste en que cada nodo es evaluado por sus nodos vecinos teniendo en cuenta cómo se haya portado a la hora de colaborar con otros nodos. El valor de reputación será bajo si el nodo no coopera y alto si el nodo es cooperante. El hecho será que todos los nodos cooperarán entre sí con el objetivo de obtener altos valores de reputación.

Si se produjese el hecho de que un nodo cayese por debajo de un determinado umbral, ese nodo será condenado al destierro.

3.2.8 Definición de la red. Dificultades y beneficios

Se indicarán a continuación de manera breve (algunos de ellos ya se han dejado entrever anteriormente), las dificultades y los beneficios más reseñables que envuelven al desarrollo este proyecto tan ambicioso de la creación de una internet interestelar.

Dificultades:

- El escenario de esta red será el espacio, por lo que las comunicaciones progresarán:
 - ✓ Sufriendo los inconvenientes de enlaces inalámbricos de baja calidad.
 - ✓ En presencia de largos retrasos (latencias).
 - ✓ Las naves espaciales se encuentran a minutos u horas luz de la Tierra y habrá comunicaciones discontinuas.
- Los satélites y orbitadores representan nodos a través de los que viajan los datos y están en constante movimiento por lo que cambian su posición entre sí y a su vez con la Tierra, lo cual representa que forman una red altamente dinámica.

³⁷ Nomenclatura extraída de [38]

Beneficios:

- Preservar la integridad de los datos salvando los problemas de latencia.
- Reorganizar rutas “futuras” en la red aunque en ese momento no estén disponibles, lo cual permite anticiparse a posibles pérdidas de enlace.
- Aumentar la velocidad de recepción de los datos que nos llegan a la Tierra desde las naves espaciales o sondas (downlink).
- La existencia de nodos intermedios y orbitadores, permitirá una reducción de potencia muy considerable en las comunicaciones con respecto al actual sistema de enlace directo entre la Tierra y la misión espacial.

Es claro por tanto que hay que avanzar hacia el desarrollo de esta nueva red de comunicaciones y en esto se están invirtiendo todos los esfuerzos de los actores que intervienen en el mundo de las comunicaciones en el espacio profundo.

Se ha diseñado aquí un caso práctico a modo de ejemplo para contextualizar el procedimiento de reenvío de mensajes y almacenamiento que se seguirá en el prototipo de red DTN propuesto. El número de nodos, así como las permanencias o no de los enlaces y las necesidades de almacenamiento en cada uno de los nodos dependerán de las misiones concretas a las que se quiera dar servicio.

Todo se irá montando como un puzzle y la infraestructura irá creciendo a mayores sobre lo montado anteriormente. La tecnología irá mejorando con el tiempo y con ella el alcance de las misiones espaciales y por tanto, el despliegue de la Internet interestelar que aportará las comunicaciones.

Para finalizar esta parte, se presentará en la Figura 3-14 una visión global de lo que se está buscando implementar en un futuro.

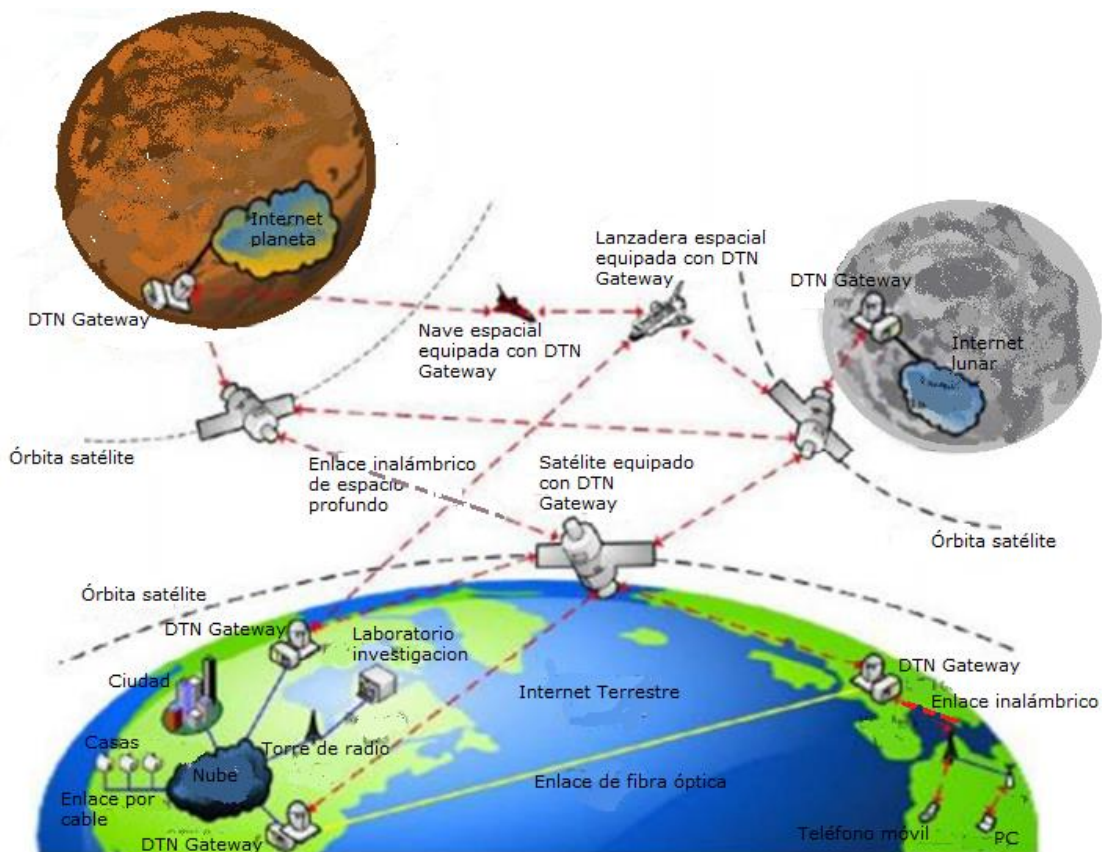


Figura 3-14 Posible escenario a implementar para el desarrollo de una Internet interestelar (extraído de [33])

3.3 Implementación práctica para el Ministerio de Defensa

3.3.1 Desarrollo de un prototipo de arquitectura basada en redes DTN para la aplicación en la Armada

El autor no ha querido concluir el desarrollo del prototipo de una red de comunicaciones para su implementación en un entorno hostil (que en resumidas cuentas se podría sintetizar en esto) sin llevar también esta solución, además del entorno espacial, a una aplicación dentro del ámbito del Ministerio de Defensa, la Armada para ser más concretos.

La necesidad de idear una red de comunicaciones que permita el intercambio de información en el espacio, puede tener aplicaciones también en la Tierra. Escenarios complicados para las comunicaciones y donde el despliegue de una infraestructura fija que dé servicio se torna poco menos que imposible a día de hoy son candidatos a recibir el auxilio de una solución como la planteada para el establecimiento de una Internet interestelar.

En principio la Armada, que desde siempre y por su particular idiosincrasia ha volcado gran parte de sus esfuerzos en el desarrollo de sus sistemas de comunicaciones, ojos y oídos de sus unidades desplazadas y navegando a través de mares y océanos sin ningún otro punto de apoyo en muchas millas a la redonda, presentan a priori, una candidatura “fuerte” para ser usuarios de redes DTN.

Es cierto que hoy en día, los sistemas radio y satélite han allanado el camino y permiten que los barcos puedan enlazar con sus bases prácticamente en cualquier punto del globo terráqueo y a cualquier hora (salvando algunas situaciones determinadas). Pero hay otras unidades que a pesar de estar en la mar, como los barcos, no cuentan con una solución fácil para establecer comunicaciones con sus bases. Son los submarinos que trabajan sumergidos la mayor parte del tiempo y que se están rodeados, más que eso: envueltos en un medio tan hostil para la propagación como (salvando las distancias y cada uno con su especial casuística) puede ser el espacio profundo...el agua.

Es por este motivo por lo que para encarar el tramo final de este TFM se va a (nunca mejor dicho) dar un fuerte golpe de timón para pasar del espacio profundo al “océano profundo”. Se procederá a elaborar un prototipo de red con el que mejorar las actuales condiciones de comunicación en las que se mueven los submarinos de la Armada.

La principal característica de un submarino es su discreción. En cualquiera de sus misiones, un alto porcentaje de su esfuerzo se concentrará en pasar inadvertido, no ser detectado. La seguridad de un submarino navegando, será tanto mayor cuanto más difícil sea localizarlo. Un submarino descubierto por el enemigo es un blanco fácil y con toda probabilidad se convertirá en un submarino hundido.

Toda la esencia, por tanto, de un submarino gira en torno a que a lo largo de su vida se comporte como un elemento sigiloso ante el enemigo por lo que todos los ruidos/señales que pueda emitir, la exposición de mástiles y las emisiones de ondas electromagnéticas que pueda realizar deben quedar relegadas a momentos muy puntuales y siempre en aquellas circunstancias en las que la misión y supervivencia de la unidad con su dotación no se comprometan más allá de los límites establecidos.

En un submarino, la discreción en sus comunicaciones conforma su “talón de Aquiles”. A las condiciones físicas por las antenas y equipos instalados en espacios reducidos donde la habitabilidad es tan limitada, hay que añadir como se ha comentado anteriormente las emisiones electromagnéticas y cómo no, el medio donde se desenvuelve como es el agua del mar, tan adversa para la propagación radioeléctrica.

Las partes anteriores estudiadas a lo largo de este TFM: las comunicaciones en el espacio profundo y el desarrollo de una futura Internet interestelar, forman los mimbres en los que se apoyará la finalización de este trabajo con una aplicación a unas determinadas unidades de la Armada que, si bien no son naves espaciales guardan relativa similitud con ellas desde el punto de vista de que las comunicaciones son vitales para su actividad, operan en entornos hostiles y sus condiciones de

habitabilidad están sometidas a los problemas de espacio que plantean sus estructuras, efectivamente se trata de los submarinos.

3.3.2 Las comunicaciones actuales en submarinos de la Armada

Actualmente, los submarinos de la Armada cuentan con dos³⁸ canales básicos de comunicaciones con el exterior que son:

- Las comunicaciones vía radio.
- Las comunicaciones vía satélite.

Ambos métodos tienen sus peculiaridades y su forma de operar que a continuación se van a describir de manera breve.

Las comunicaciones radio para submarinos en la Armada.

Cuando los submarinos están en la mar establecen comunicaciones radio con sus centros o estaciones mediante HF y LF simultáneamente. La principal característica de la onda electromagnética de LF, es la capacidad de penetración en el agua que permite al submarino recibir la radiodifusión mientras permanece en inmersión unos cuantos metros bajo el nivel del mar.

Para que este procedimiento sea discreto, el submarino larga una antena de unos 400 metros aproximadamente para facilitar la recepción de la señal. Esta antena es un cable adujado en un carretel que se larga o recoge a discreción por lo que solamente se utilizará en determinadas ocasiones.

La comunicación LF es únicamente recepción (radiodifusión) para el submarino por lo que es un sistema de escucha muy discreto. Para que el submarino pueda transmitir utilizará el procedimiento denominado como Buque – Tierra y es mediante HF. Este tipo de comunicación se realiza desde la estación radio que la Armada tiene en Madrid (Santorcaz) y debido a que esta comunicación sí es indiscreta y se pone en peligro la seguridad del submarino: pues es fácilmente detectable, este procedimiento sólo puede realizarse en determinadas ventanas horarias cuyo establecimiento es RESERVADO y con una duración muy corta en el tiempo. El submarino irremediamente tiene que hacer superficie e izar una antena luego su vulnerabilidad es muy alta.

La rapidez con la que se tiene que realizar este proceso y los condicionantes que conlleva un enlace vía radio, más en estas condiciones hostiles sobre todo para el submarino que necesita tiempo para establecer un enlace estable (lo cual no siempre es posible) y transmitir su información, hace que el éxito de estas comunicaciones no sea todo lo deseable llegando en numerosas ocasiones a verse obligado a cortar el enlace sin haber finalizado correctamente la comunicación o incluso sin haber llegado a establecerla teniendo que esperar a otro momento dependiendo de las condiciones de la misión que se esté realizando.

Para solventar en la medida de lo posible los problemas que pueden plantearse por este motivo, es bastante habitual pasar cinta varias veces, lo cual quiere decir que el grupo o bloque de mensajes que hay que transmitirle al buque, se repite varias veces a fin de asegurarse que le llega íntegramente y no se pierde información por el camino lo cual no quiere decir que aun así, las condiciones del enlace o que en ocasiones tiene que activar inmersión inesperadamente se dé el hecho de que no se le ha transmitido todo el tráfico previsto.

³⁸ Las comunicaciones por ondas sonoras no entran dentro de esta clasificación por no considerarse comunicaciones con el exterior sino comunicaciones de ubicación o localización.

La señal LF es emitida desde la estación radio de Guardamar del Segura, sita en dicha localidad.

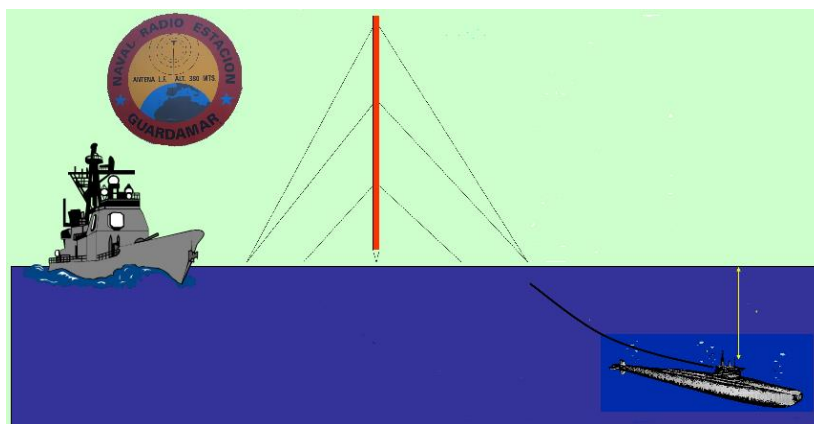


Figura 3-15 Representación de comunicación submarina a través de la ER de Guardamar del Segura

La estación de Guardamar es famosa por su antena LF de 365 m de altura que constituye a día de hoy la construcción más alta de la Unión Europea.



Figura 3-16 Fotografía de la antena de LF en Guardamar (extraído de [39])

Las comunicaciones satélite para submarinos en la Armada.

Los terminales satélite que montan los submarinos de la Armada han sido diseñados específicamente para que trabajen a bordo de los mismos y bajo las condiciones que tendrán que soportar. No son, por tanto terminales “comerciales”. Con esto se quiere dar a entender que este tipo de dispositivos se han pensado a medida para dar el mejor servicio posible. Las velocidades que se tienen son de aproximadamente los 100 Kbps.

Para proceder al establecimiento del enlace, se comunica una ventana horaria con antelación y el submarino sube a la superficie, se orienta la antena y una vez que se establece la portadora puede intercambiar tráfico con su Centro de Comunicaciones.

Los equipos satélite de los submarinos tienen antenas parabólicas muy pequeñas que rondan los 30 cm. de diámetro y su estabilidad es relativa motivo por el que las pérdidas de enlace suelen ser frecuentes y el tráfico se interrumpe por lo que se debe volver a pasar todo este tráfico de nuevo tras producirse una interrupción o bien identificar junto con el Centro de Comunicaciones al que se encuentra conectado, qué parte del tráfico se ha perdido para volverlo a transmitir.

Otra cosa que se debe tener en cuenta es que las antenas de los submarinos normalmente se encuentran confinadas en un habitáculo estanco para protegerlas del agua y sus efectos. Cuando la nave hace superficie y quiere conectarse al satélite, tiene que desplegar la antena y una vez que ha acabado, tiene que arriarla y volverla a su alojamiento estanco. Todo este proceso lógicamente puede producir averías tanto en el mecanismo de la antena como en las condiciones de estanqueidad de su receptáculo y de hecho, la realidad es que las citadas averías se producen y con bastante más frecuencia de la deseable por lo que buscar soluciones alternativas implica un hándicap para, en la medida de lo posible reducir el impacto de este tipo de averías.

En definitiva, los terminales satélite de los submarinos aun siendo operativos, deben mejorarse aún más con el desarrollo de la tecnología actual para su uso en este tipo de plataformas.

3.3.3 Análisis de viabilidad del uso de las redes DTN en este escenario

Llegados a este punto, el planteamiento es estudiar si se puede contar con alguna alternativa a los problemas que se plantean en el establecimiento de las comunicaciones actuales con submarinos tanto por sus circunstancias específicas de discreción, así como por el medio en el que se mueve; sumergido en el mar.

¿Qué impedimentos se presentan en este escenario? algunos de los más importantes son:

- ✓ Cortes en el enlace de comunicaciones por necesidades operativas de la unidad (inmersiones).
- ✓ Cortes en el enlace de comunicaciones por condiciones atmosféricas, distancias de radiodifusión, estabilidad antena satélite, etc...
- ✓ Necesidad de retransmisión de los datos debido a cualquiera de los dos puntos anteriores.
- ✓ Necesidad de retransmisión de los datos porque uno de los nodos implicados en la arquitectura de la red que da servicio a la unidad no ha realizado el reenvío del mensaje.
- ✓ Que no exista comunicación con el submarino durante un periodo de tiempo prolongado de inmersión.

En definitiva y en resumen, existe una unidad en la mar y aún más un submarino que cuenta con poco tiempo para poder comunicarse, que se encuentra en un medio de trabajo muy hostil, que las comunicaciones son, aún si cabe, más importantes para su actividad porque no tiene otros “ojos y oídos”, como se ha dicho tenemos que se pierda información en cualquiera de los dos sentidos (TX³⁹ o RX⁴⁰).

Una vez recopilados los impedimentos más importantes que rodean a las comunicaciones de los submarinos, se puede observar que las redes DTN, que dan respuesta a los problemas que se presentan para el futuro desarrollo de una Internet interestelar, ofrecen también una solución a los problemas de las comunicaciones submarinas en su ambiente de trabajo.

Como resultado de lo anterior se establece que las redes ocasionales o redes DTN presentarán la solución práctica que como resultado de este TFM se propondrá para el establecimiento de una red de transporte dirigida a las comunicaciones de los submarinos de la Armada como mejora de las dos opciones anteriormente expuestas (radiodifusión y comunicaciones satélite) y que son las que actualmente se utilizan.

³⁹ Transmisión

⁴⁰ Recepción

3.3.4 La solución Aqua - Fi

Se ha mencionado anteriormente (2.4.8. Una nueva tecnología óptica subacuática aún en desarrollo) una nueva tecnología que aunque todavía se encuentra en desarrollo, a día de hoy ya presenta un enorme potencial y con el paso del tiempo sin lugar a dudas se mejorará notablemente.

Esta tecnología es la denominada como Aqua-Fi y será la que en este TFM se utilizará como medio de comunicación subacuático entre el submarino y los receptores de los distintos nodos DTN con los que directamente se comunicará para establecer comunicaciones con su CECOM⁴¹.

El submarino deberá ir equipado con varios dispositivos “transceptores”⁴² Aqua-Fi⁴³ estratégicamente situados en su casco con el objetivo de facilitar la conectividad de la nave ante la presencia de otro elemento transceptor (nodo DTN) al que conectarse independientemente de la posición o rumbo que siga el submarino.

Los transceptores estarán formados por un emisor láser y un fotodetector para la recepción. Los emisores láser de todos los transceptores del submarino irán conectados a la computadora que, a bordo, hará la conversión de datos de señales eléctricas de la LAN interior a pulsos de luz que será la información a transmitir. En el desarrollo que se ha hecho sobre la tecnología Aqua-Fi anteriormente se comentaba también que existía la posibilidad de, en lugar de láser, usar matrices de leds verdes, pero las distancias entre transceptores deben ser inferiores a 10 m. [35] para poder establecer el enlace por lo que no se recurrirá a esta solución por no considerarse práctica en aras de salvaguardar la discreción de la unidad, punto clave de la razón de ser del submarino. En el desarrollo de este modelo, la comunicación se hará únicamente vía láser que a día de hoy ya permite distancias mayores de 20 m entre transceptores (submarino – nodo DTN).

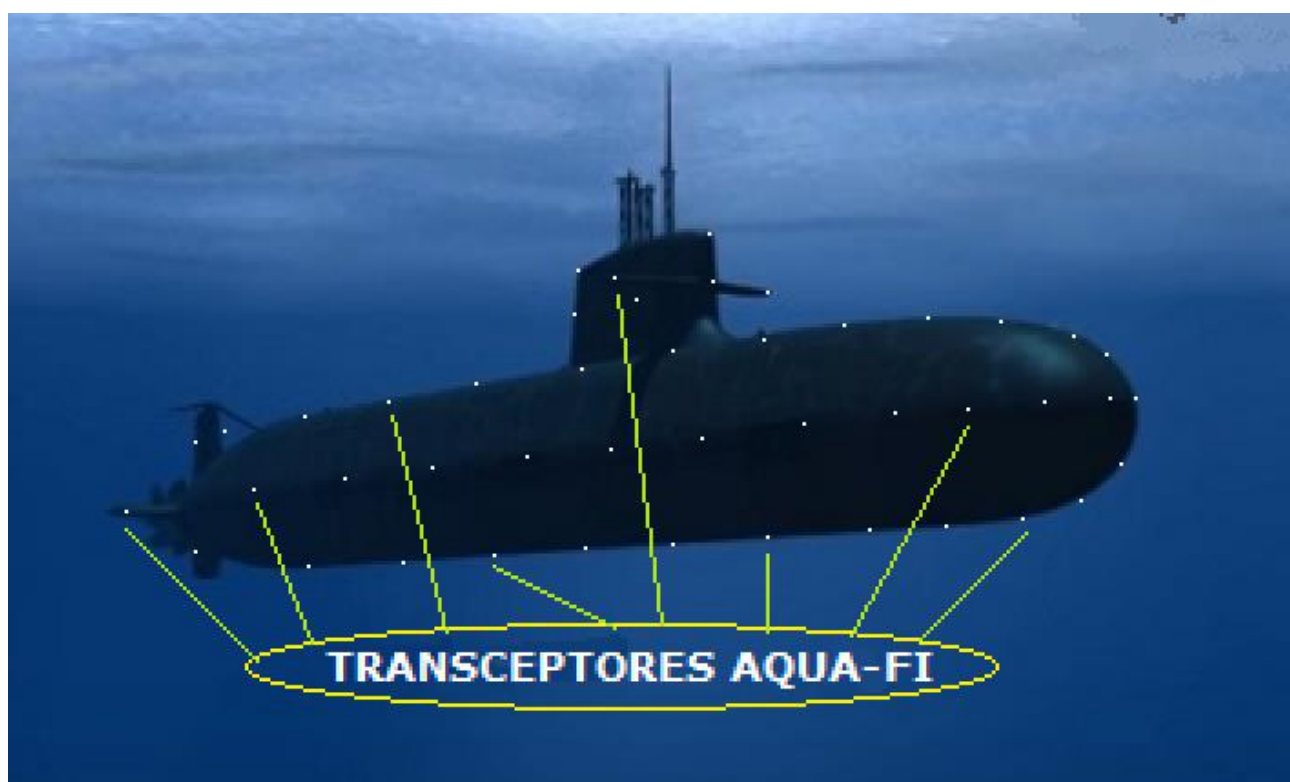


Figura 3-17 Prototipo de disposición de transceptores Aqua - Fi en un submarino

⁴¹ Centro de Comunicaciones

⁴² Un transceptor es un equipo de comunicaciones que puede ser utilizado como transmisor y como receptor.

⁴³ El término transceptor Aqua-Fi ha sido creado en el marco de este TFM.

3.3.5 La red DTN submarina

Los transceptores del submarino, enlazarán con los transceptores que conforman los nodos de la red de comunicaciones que presta servicio a la embarcación y que como ya se habrá podido deducir a medida que se iba desarrollando este TFM, será una red tolerante a demoras puesto que cumple con las expectativas requeridas.

Cuando en la demora que sigue el submarino consiga establecer un enlace con uno de los nodos, se producirá la transferencia de información y el submarino habrá establecido la comunicación de una manera discreta.

El funcionamiento general de este tipo de redes ya ha sido explicado con anterioridad en este TFM y será el adoptado para esta aplicación concreta al MINISDEF. No obstante, conviene aclarar el protocolo de enrutamiento que se pretende implementar en la red de este prototipo.

Lo ideal pasa por encontrar el protocolo de enrutamiento que mejor se adapte a nuestra red, maximizando la tasa de entrega de mensajes, minimizando tanto la tasa de sobrecarga como la latencia promedio de entrega de mensajes, pero sin perder de vista la seguridad del submarino para que no sea descubierta su posición. En este sentido no parece aconsejable utilizar el protocolo de enrutamiento elegido para el prototipo de Internet interespacial de este TFM y que se recuerda que era: Rap de Burbujas puesto que la clasificación de nodos en comunidades se estima como una peligrosa posibilidad de vulneración de la posición de la nave si por cualquier motivo un actor malicioso consiguiese localizar posiciones de transferencia de paquetes y las asemeje a las comunidades locales correspondientes.

Como en las redes DTN se utilizan varios protocolos de enrutamiento, para este desarrollo concreto, se utilizará el protocolo denominado como “Epidemia”[38] que se fundamenta en la propagación de enfermedades epidémicas en la vida real y desde este punto de vista, su funcionamiento en la red sería el siguiente: un nodo que tiene un mensaje se considerará que es un nodo infectado. En el momento en el que un nodo infectado contacta con otro nodo que no tiene ese mensaje y por lo tanto no está infectado, el nodo infectado transmite el mensaje al segundo nodo y lo infecta... esta cadena transcurre así sucesivamente; infectando nodos hasta que en la red ya hay múltiples nodos infectados y el mensaje termina por llegar a su destino.

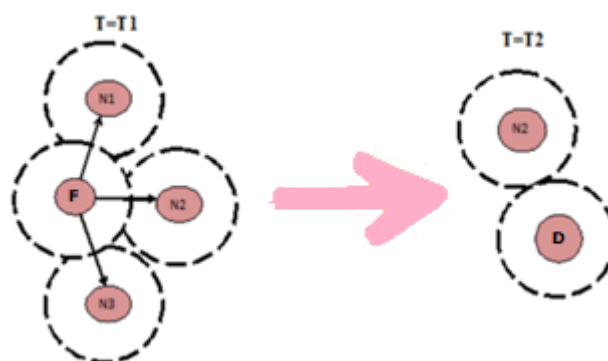


Figura 3-18 Representación gráfica del protocolo Epidemia (extraído de [38])

El autor, en este caso ha considerado que puesto que se trata del establecimiento de una red que va a dar servicio a una unidad que se encontrará desarrollando una misión de especial sensibilidad y que afectará a los intereses de la defensa nacional o agrupación aliada dependiendo del caso, promover la cooperación entre los nodos cobra una especial relevancia por lo que deberá asegurarse la citada cooperación en un grado que se podría definir como de primera clase.

Para lograr este objetivo de máxima cooperación se va a utilizar un incentivo de crédito [38] que consiste en realizar pagos en forma de moneda virtual a los nodos cuando han participado en el reenvío de mensajes.

La red de nodos DTN será lo más “tupida” posible para maximizar las ocasiones de encuentro - enlace con el submarino. Por este motivo, se utilizarán como nodos todos los elementos susceptibles de serlo bien porque han sido diseñados exclusivamente para ese fin: boyas tanto de superficie como submarinas o bien porque formen parte de otro elemento que no fue concebido para este fin concreto pero servirán de soporte físico y medio de desplazamiento: barcos tanto de la Armada como mercantes de bandera nacional, UAVs, drones etc...

Ahora queda plasmar de una manera gráfica cómo se pretende establecer la red y sus potenciales nodos. Como se puede observar en la Figura 3-19, la red está compuesta por nodos multidisciplinarios y de diversa naturaleza que facilitarán el contacto con el submarino para que así, se reduzcan las latencias al máximo.

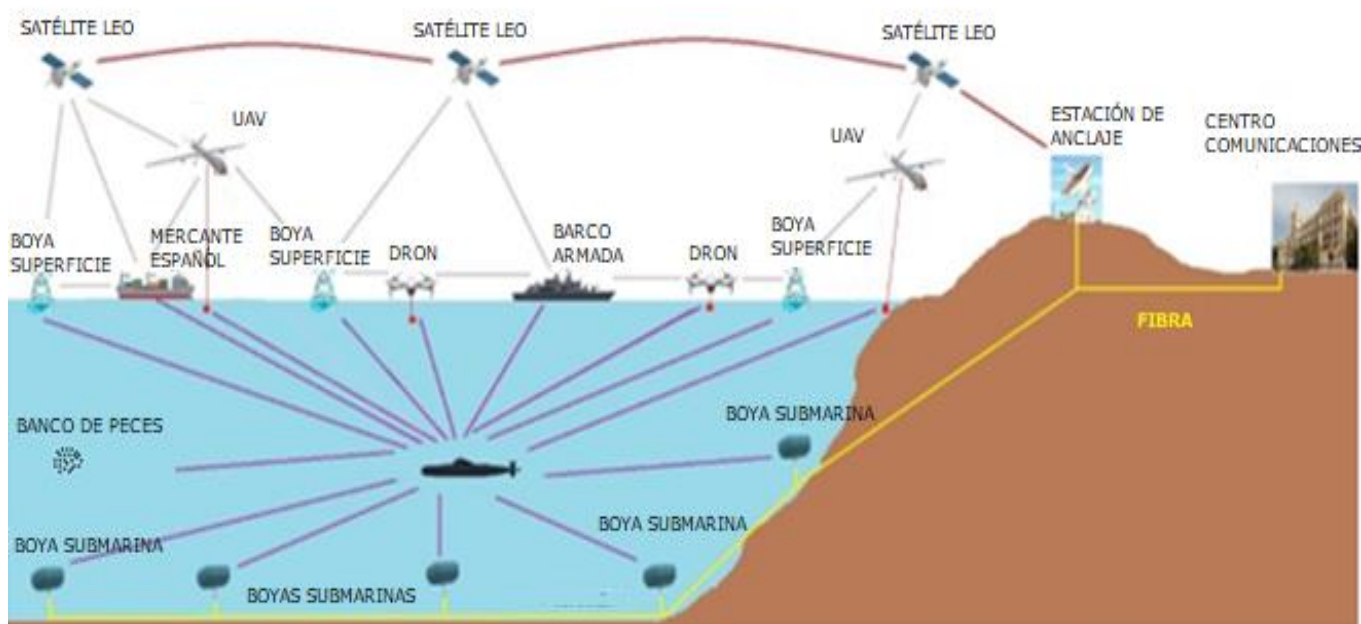


Figura 3-19 Prototipo de red propuesta en este TFM para comunicaciones submarinas en la Armada

Esta red será, por tanto, muy heterogénea en cuanto a las naturalezas de los nodos que la compondrán y es importante mencionar aquí que los tamaños de los búfer con los que cuentan los nodos repercutirán en la tasa de entrega de mensajes a través de la DTN. Sin entrar en mayores detalles y con la utilización del protocolo Epidemia, la Figura 3-20 ofrece una orientación de la proporción de entrega de mensajes con diferentes tamaños de búfer en una red tipo con este protocolo de enrutado.

Es claro que se pretende realizar el mayor esfuerzo posible para dotar a los nodos de la red del mayor tamaño de búfer siempre, claro está, de acuerdo con las características de cada nodo.

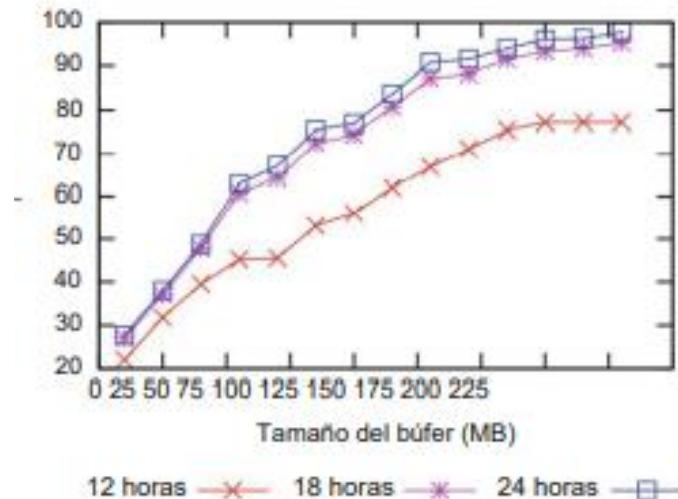


Figura 3-20 Efectos de los tamaños de búfer en la tasa de entrega de mensajes en una DTN con protocolo Epidemia (extraído de [38])

Gracias al establecimiento de una red DTN para las comunicaciones de los submarinos de la Armada, las posibilidades que a partir de aquí se abren en un futuro no demasiado lejano son verdaderamente impresionantes, valga enunciar brevemente el hecho de pensar en el concepto IoT donde todos los dispositivos del submarino podrían ser visibles e interaccionar. Éstos podrían ser cualquiera, desde sensores y dispositivos mecánicos hasta objetos cotidianos como el frigorífico, el calzado o la ropa. Cualquier cosa que se pueda imaginar podría ser conectada a Internet e interaccionar sin necesidad de la intervención humana, el objetivo por tanto es un entendimiento directo de máquina a máquina, o lo que se conoce como una interacción M2M (machine to machine) o dispositivos M2M⁴⁴.

Escenarios relacionados con este concepto y que ya están al cabo de la calle son los “Smart Buildings” y las “Smart Cities” donde la existencia del Internet de las cosas permiten interactuar con estos escenarios para controlar múltiples entornos: el tráfico, cámaras de vigilancia para seguridad, climatizaciones, transporte público, etc... y un sinnúmero de cosas hasta donde la imaginación nos lleve.

Regresando al entorno propuesto en este TFM en este apartado, las comunicaciones para submarinos que con la futura implementación de una red DTN estarán mucho más conectados que en la actualidad ya no sólo restringirán su uso a nuestro prototipo de un sistema de comunicaciones discreto sino que se extenderá dando un salto cualitativo para poder comunicarse con el exterior en otros ámbitos dentro de la misma unidad, como podrán ser:

1. Uso del SAPZO⁴⁵ para la moral y bienestar de las dotaciones permitiendo servicios de mensajería instantánea para comunicaciones con familiares (siempre que las operaciones en curso lo permitieran), contenidos de TV, etc...
2. Posibilidad de implantación a bordo de los submarinos de la Armada de un servicio de telemedicina que permita mejorar las condiciones médicas y sanitarias de la dotación en tiempo real.
3. Capacidad de monitorización de los elementos vitales de la nave: máquinas, niveles de oxígeno, víveres, condiciones de estanqueidad, mantenimientos preventivos, etc...
4. Transmisión en tiempo real de imágenes en la superficie tomadas por elementos exteriores como pueden ser, unidades aliadas, drones, etc... que evitarán en muchas ocasiones la hasta

⁴⁴ <https://www2.deloitte.com/es/es/pages/technology/articles/IoT-internet-of-things.html>

⁴⁵ Servicio de Apoyo al Personal en Zona de Operaciones

ahora necesidad de navegar en cota periscópica para tener una visibilidad del entorno con el peligro que para la discreción supone.

Es muy interesante considerar un escenario que puede producirse y para el que este prototipo de solución de comunicaciones para submarinos ofrece ventajas operativas.

Supongamos que la nave se encuentra en medio de una situación donde las infraestructuras se han visto seriamente mermadas y afectadas por diversos motivos como pueden ser: catástrofes naturales, escenarios de conflicto, ataques terroristas, etc...

La actual situación de comunicaciones para un submarino inmerso en uno de estos escenarios implicaría prácticamente la imposibilidad de poder contactar con el mando. Una solución como la planteada con el uso de las redes DTN presenta una posibilidad real de comunicación puesto que la probabilidad de que un mensaje progrese ante circunstancias tan adversas es precisamente el caldo de cultivo que, como ya se ha visto a lo largo del desarrollo de este TFM, promovió la creación de estas redes sobre las que actualmente se está estudiando y trabajando para lograr avances en pro de su uso y operatividad.

3.3.6 Seguridad del tráfico en la red

¿Qué tipo de información, desde el punto de vista de su clasificación de seguridad transitará por este modelo de red submarina?

El autor, distingue dos tipos: SINCLAS y CONFIDENCIAL⁴⁶.

La información SINCLAS no está clasificada y por tanto puede ser accedida por cualquier persona.

La información CONFIDENCIAL será información a la que no puede tener acceso nadie que no sea destinatario de la misma por, entre otros, contener datos que pueden comprometer las circunstancias de la misión que está desarrollando la unidad y a su vez, tener implicaciones sobre terceros (incluyendo en algunos casos la propia seguridad nacional).

Por tanto, para el tratamiento de la información SINCLAS no habrá que tomar ninguna medida. Los mensajes que se generen podrán circular en claro puesto que no implicarán nada desde un punto de vista operativo.

Para la transmisión de mensajes CONFIDENCIAL, es decir que sí que tienen un nivel de clasificación de seguridad, deberá utilizarse un método de cifrado off – line que garantice la confidencialidad de la comunicación.

El funcionamiento de este sistema off – line se basa en el siguiente procedimiento:

- Para los mensajes que se originen en el CECOM de la base, se procederá a su cifrado mediante un equipo preparado a tal efecto y con unas claves determinadas y establecidas conforme a procedimientos que no vienen al caso describir en este documento.
- Una vez cifrado el mensaje, se procederá a inyectarlo en la red para su remisión a la unidad.
- Cuando en la unidad se produzca la recepción del mensaje, el CECOM del submarino procederá al descifrado del mismo con un equipo homólogo al del CECOM de la base y que esté cargado con unas claves compatibles con las de la carga y que también se habrán establecido conforme a procedimiento.

⁴⁶ Esta clasificación que hace el autor no corresponde con la realidad, es ficticia y simplemente tiene la finalidad de distinguir que sobre la red habrá dos tipos de información una que estará clasificada y otra que no lo estará.

- Para lo mensajes originados en el submarine, el procedimiento será el mismo, pero a la inversa.

El hecho de utilizar este sistema de cifrado off – line se debe a que la propia red DTN no contará con una seguridad capaz de garantizar la transmisión a través de ella de información CONFIDENCIAL del Ministerio de Defensa.

4 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

4.1 Conclusiones

La conclusión de este TFM es que, una vez desarrollado el estudio de las comunicaciones en el espacio profundo que han sido la base sobre la que se están realizando los estudios de una Internet interestelar, se ha modelado el desarrollo de una red de comunicaciones “similar” a la actual Internet, pero cubriendo las carencias que hacen que esta Internet “terrenal” tal y como la conocemos no sea una realidad práctica en un entorno tan hostil como es el espacio debido, entre otras cosas, a las elevadas latencias que se producen. A tal efecto, se han considerado los principales escenarios espaciales que a priori, esta Internet interestelar tendrá que cubrir. Posibles escenarios futuros reales más complejos, tendrán cabida sin más que montarlos como si fuesen un puzle en base a los datos en este trabajo.

La solución desarrollada es la de las redes tolerantes a demoras (DTN) o redes ocasionales que mediante elementos de almacenamiento en sus nodos, permiten retener la información hasta que llegue el momento de pasarla al siguiente nodo independientemente del tiempo que transcurra. Gracias a esto salvamos el problema de la alta latencia, insalvable en la concepción de la actual Internet que utilizamos diariamente en nuestras vidas y dispositivos y que hacen que sus protocolos (TCP, IP) no puedan sobrevivir en una infraestructura espacial.

A la hora de modelar un caso práctico para el Ministerio de Defensa y basado en el concepto de Internet interestelar, el autor ha decidido llevarlo adelante para el escenario de las comunicaciones submarinas, hermanadas con las comunicaciones en el espacio desde el punto de vista de que presentan entornos hostiles para la comunicación de las unidades en ellos inmersas y cumplen con las premisas necesarias para dotarlos de una solución basada en las redes ocasionales (DTN). La investigación que ha hecho el autor sobre el nacimiento de una nueva tecnología que permite las comunicaciones subacuáticas mediante láser, ha sido otro punto que se ha sometido a consideración puesto que representa una comunicación mucho más discreta que los actuales métodos radio o satélite para los submarinos que se encuentran realizando una misión.

La aplicación de estas tecnologías reales, a día de hoy ya representan poder proyectar una infraestructura de red de comunicaciones dirigida a los submarinos de la Armada. Con ella se solventarán los problemas a los que estas unidades se ven expuestas por los continuos cortes que sufren en el establecimiento de sus comunicaciones ya sea debido a la estabilidad de antenas que además tienen poco tiempo para poder orientarse, o por el poco tiempo que cuentan para poder transmitir su información puesto que se vuelven más vulnerables e indiscretos ante el enemigo y como no; por trabajar en un medio tan hostil como representa el mar. Las comunicaciones submarinas vía láser permitirán establecer comunicaciones discretas sin necesidad de que la nave tenga que hacer superficie.

Se ha determinado que es importante que el submarino cuente con un número elevado de transceptores de comunicaciones incorporados en su estructura externa y que estos estén dispuestos de una manera uniforme en toda su envergadura para poder facilitar el encuentro y la conexión con los nodos de la red DTN más aún teniendo en cuenta el medio de trabajo.

4.2 Líneas futuras

Se estima que en primera instancia, al llevar este estudio a su implementación práctica en un futuro, la distancia máxima que podrá haber entre el submarino y el nodo de la DTN al que se conectará podría ser de unos 50 m. y la velocidad máxima garantizada de transferencia de datos sería de 1Mbps lo cual ya de entrada constituye un gran avance con respecto a los sistemas actuales.

Se quiere hacer referencia en este apartado del hecho de que, está claro que la naturaleza del objeto de este prototipo, submarinos militares y algunas de sus condiciones de operatividad, misiones de inteligencia, requieren de canales de comunicaciones seguros que no puedan ser interceptados e interpretados. En lo que respecta a esto, las redes DTN están es continua mejora y aunque ya se usan elementos de seguridad, a la hora de materializar esta idea hay que tener en cuenta que deben cumplir con ciertas normas y guías que cuya naturaleza no son objetos de este TFM. Símplemente se considera oportuno enunciarlo aquí, en este apartado de “líneas futuras” como un hito muy importante a plantearse como línea de trabajo en el desarrollo de una DTN para el uso concreto objeto de este trabajo de aplicación para la Armada.

Se estima que el avance de la tecnología y el desarrollo de estas redes desde un punto de vista de la seguridad, conseguirán dar una solución al actual método de cifrado off – line concebido por el autor en este TFM para poder utilizar un sistema de cifrado on – line que contribuirán a la “automatización” del sistema de cifrado con lo que se ganará tiempo y operatividad, recursos ambos muy valiosos.

La implementación de la DTN submarina con todos sus nodos y características, así como la incipiente tecnología Aqua-Fi que todavía necesita madurez son los principales hándicaps contra los que esta idea debe luchar a día de hoy.

En un futuro no demasiado lejano y gracias al desarrollo de la tecnología, la implementación práctica de esta propuesta podría ver la luz para contribuir a mejorar las comunicaciones de los submarinos y paliar uno de los principales miedos que navegan con ellos.....ser descubiertos.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Web Jet Propulsion Laboratory,» Red de Espacio Profundo [En línea]. Available: <https://www.jpl.nasa.gov/missions/dsn>. [Último acceso: 29 junio 2022].
- [2] M. S. Reid, Low-Noise Systems in the Deep Space Network, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2008.
- [3] J. H. Yuen, Deep Space Telecommunications Systems Engineering, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 1982.
- [4] W. Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Editorial Pearson Educación, 2003.
- [5] M. K. Simon, Bandwidth - Efficient Digital Modulation with Application to Deep - Space Communications, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2001.
- [6] «Web del Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones E.T.S.I. Telecomunicación,» [En línea]. Available: <https://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/antenas/Curso0809/Ant0809-5.pdf>. [Último acceso: 10 agosto 2022].
- [7] «Web del Departamento de Educación del Gobierno Vasco,» [En línea]. Available: <https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ICTV/ICTV04/es IEA ICTV/04 Contenidos/website 512 antenas parabolicas de foco centrado.html>. [Último acceso: 14 agosto 2022].
- [8] «Web Página personal Constantino Pérez Vega,» [En línea]. Available: https://personales.unican.es/perezvr/pdf/Antenas%20con%20Reflector%20Parab%20C3%B3lico_V4.pdf. [Último acceso: 13 agosto 2022].
- [9] «Web Universitat Politècnica de Valencia,» [En línea]. Available: http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Reflectores.pdf. [Último acceso: 11 agosto 2022].
- [10] «Web ART CHIST,» [En línea]. Available: <https://artchist.blogspot.com/2019/10/bandas-de-frecuencias-de-satelites-de.html>. [Último acceso: 05 julio 2022].
- [11] J. Taylor, Deep Space Communications, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2014.
- [12] W. A. Imbriale, Spaceborne Antennas for Planetary Exploration, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2006.
- [13] «Wikipedia,» Alineación de bandas en una heterounión, [En línea]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Band_Alignment_at_a_Type_I_Heterojunction.png. [Último acceso: 25 julio 2022].
- [14] «Web de transistores,» [En línea]. Available: <https://transistores.info/hemt-transistor-de-alta-movilidad-de-electrones/>. [Último acceso: 25 julio 2022].
- [15] «Wikipedia,» Transistores HEMT, [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Transistores_HEMT. [Último acceso: 27 julio 2022].

- [16] «Web Jet Propulsion Laboratory,» [En línea]. Available: <https://trs.jpl.nasa.gov/handle/2014/40245>. [Último acceso: 20 julio 2022].
- [17] «Web NASA Science,» [En línea]. Available: <https://spaceplace.nasa.gov/interstellar/en/>. [Último acceso: 09 agosto 2022].
- [18] «Web Infobae America Ciencia,» [En línea]. Available: <https://www.infobae.com/america/ciencia-america/2021/05/12/la-nave-espacial-voyager-1-detecta-zumbidos-fuera-del-sistema-solar/>. [Último acceso: 09 agosto 2022].
- [19] «Web NASA Science,» [En línea]. Available: <https://spaceplace.nasa.gov/dsn-antennas/sp/>. [Último acceso: 09 agosto 2022].
- [20] «Web Investigación y Ciencia,» La Red de Espacio Profundo de la NASA cumple 50 años [En línea]. Available: <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/tecnologia/35/posts/la-red-de-espacio-profundo-de-la-nasa-cumple-50-aos-12241>. [Último acceso: 09 septiembre 2022].
- [21] J. W. Layland, L. L. Rauch, The Evolution of Technology in the Deep Space Network: A History of the Advanced Systems Program, California Institute of Technology, 1997.
- [22] «Presentación PPT ofrecida por el Complejo de Comunicaciones del Espacio Profundo de la NASA en Robledo de Chavela en una de las visitas realizadas por el autor,»
- [23] W. A. Imbriale, Large Antennas of the Deep Space Network, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2002.
- [24] «Web Muy Interesante,» La NASA apagará los instrumentos de las sondas Voyager [En línea]. Available: <https://www.muyinteresante.es/ciencia/articulo/la-nasa-apagara-los-instrumentos-de-las-sondas-voyager-181655887225>. [Último acceso: 16 agosto 2022].
- [25] «Web NASA Science,» Voyager 1 y 2: La Misión Interestelar [En línea]. Available: <https://spaceplace.nasa.gov/voyager-to-planets/sp/>. [Último acceso: 16 agosto 2022].
- [26] «Web El Sol de Puebla,» Una postal desde el espacio interestelar [En línea]. Available: <https://www.elsoldepuebla.com.mx/doble-via/ciencia/te-has-preguntado-como-es-afuera-del-sistema-solar-una-postal-desde-el-espacio-interestelar-asi-es-el-espacio-interestelar-4463594.html>. [Último acceso: 16 agosto 2022].
- [27] «Web NAUKAS,» La historia de las Voyager, los mensajeros interestelares de la humanidad [En línea]. Available: <https://danielmarin.naukas.com/2012/09/16/la-historia-de-las-voyager-los-mensajeros-interestelares-de-la-humanidad/> [Último acceso 16 agosto 2022].
- [28] «Web El blog de Daniel Marín,» [En línea]. Available: <https://danielmarin.naukas.com/2012/09/16/la-historia-de-las-voyager-los-mensajeros-interestelares-de-la-humanidad/> [Último acceso: 16 agosto 2022].
- [29] D. H. Rogstad, A. Mileant, T. T. Pham, Antenna Arraying Techniques in the Deep Space Network, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2003.
- [30] V. Cerf, Delay - Tolerant Networking Architecture, Internet Research Task Force, 2007.
- [31] «Web de profesores de la Universidad Técnica Federico Santamaría,» [En línea]. Available: <http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo323.ipd438/2s17/projects/reports/InternetInterplanetario.pdf>. [Último acceso 23 agosto 2022].
- [32] A. S. Tanenbaum, Redes de computadoras, Editorial Pearson, 2012.

- [33] «Web Departamento de Ingeniería de Sistemas Telemáticos de la ETS de Ingenieros de Telecomunicación-UPM,» [En línea]. Available: https://www.dit.upm.es/~posgrado/doc/TFM/TFMs2012-2013/TFM_Maria_Irene_Paez_2013.pdf. [Último acceso 10 octubre 2022].
- [34] «Web Universidad Carlos III de Madrid,» Evaluación del protocolo Bundle mediante un emulador de redes [En línea]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/288502259.pdf>. [Último acceso 04 octubre 2022].
- [35] «Web Xataka,» Aqua-Fi: crean el primer "Wi-Fi submarino" mediante LEDs y láseres para poder enviar información inalámbricamente bajo el agua [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/investigacion/aqua-fi-crean-wi-fi-submarino-mediante-leds-laseres-para-poder-enviar-informacion-inalambricamente-agua>. [Último acceso 03 noviembre 2022].
- [36] «Web OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS» Publicación número 2 725 913. DISPOSITIVO Y MÉTODO DE MONITORIZACIÓN DE ACTIVIDAD EN PECES [En línea]. Available: https://consultas2.oepm.es/pdf/ES/0000/000/02/72/59/ES-2725913_A1.pdf [Último acceso 26 diciembre 2022].
- [37] The Consultative Committee for Space Data Systems, Rationale, Scenarios, and Requirements for DTN in Space, Space Operations Mission Directorate NASA Headquarters Washington, 2010.
- [38] S. Misra, Opportunistic Mobile Networks, Editorial Springer, 2016.
- [39] «Web Xataka,» Torreta de Guardamar: la estructura más alta de Europa está en Alicante y es detectable a kilómetros tanto en tierra como bajo el mar [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/otros/torreta-guardamar-estructura-alta-europa-esta-alicante-visible-a-kilometros-tierra-como-mar> [Último acceso 03 noviembre 2022].

Después de esta sección, pueden figurar tantos anexos como sea preciso.

ANEXO I: LISTADO DE ACRÓNIMOS

BER	Bit Error Rate
BPF	Band Pass Filter
bps	Bits per second
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BWG	Beam Waveguide
CECOM	Centro de Comunicaciones
dB	Decibelio
dBi	Decibelio respecto a una antena isotrópica
DSN	Deep Space Network
DSS	Deep Space Station
DTN	Delay Tolerant Networking
FET	Field Effect Transistor
FSC	Full Spectrum Combining
Gb	Gigabit
HEF	High Efficiency Antenna
HEMT	High Electron Mobility Transistor
IETF	Internet Engineering Task Force
IRTF	Internet Research Task Force
JPL	Jet Propulsion Laboratory
KPI	Key Performance Indicators
LNA	Low Noise Amplifier
LPF	Low Pass Filter
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PSK	Phase Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radiofrecuencia
SAPZO	Servicio de Apoyo al Personal en Zona de Operaciones

SNR	Signal Noise Ratio
TFM	Trabajo Fin de Máster
UA	Unidad Astronómica
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones