



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**EFFECTOS DE LAS TORMENTAS SOLARES EN EQUIPOS ELECTRÓNICOS
Y SEÑALES ELECTROMAGNÉTICAS DE TELECOMUNICACIONES**

Juan José Leal Ortiz

Asesorado por el Ing. Hillberth Noel Alvarez Noriega

Guatemala, mayo de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**EFFECTOS DE LAS TORMENTAS SOLARES EN EQUIPOS ELECTRÓNICOS
Y SEÑALES ELECTROMAGNÉTICAS DE TELECOMUNICACIONES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN JOSE LEAL ORTÍZ

ASESORADO POR EL ING. HILLBERTH NOEL ALVAREZ NORIEGA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paíz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Manuel Fernando Barrera Pérez
EXAMINADOR	Ing. Erwin Efraín Segura Castellanos
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godinez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a consideración mi trabajo de graduación titulado:

EFFECTOS DE LAS TORMENTAS SOLARES EN EQUIPO ELECTRÓNICO Y SEÑALES ELECTROMAGNÉTICAS DE TELECOMUNICACIONES,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica, con fecha de 28 de abril de 2005.

Juan José Leal Ortiz

Guatemala, abril del 2,007

Ing. Mario Renato Escobedo
Director de Escuela
Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Escobedo

Por este medio me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado: **Efectos de las Tormentas Solares en Equipos Electrónicos y Señales Electromagnéticas de Telecomunicaciones**, que desarrollo el estudiante Juan Jose Leal Ortiz, carné 9713468, el cual a mi criterio cumple con los objetivos propuestos.

Por ello, me permito darle su aprobación, solicitándole darle el tramite correspondiente.

Atentamente,


Ing. Hillberth Noel Alvarez Noriega
Colegiado No. 6702
Asesor



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 03 de mayo 2007.

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **Efectos de las Tormentas Solares en Equipos Electrónicos y Señales Electromagnéticas de Telecomunicaciones**, desarrollado por el estudiante; Juan José Leal Ortiz, por considerar que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador Area de Electrónica



JCSP/sro



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Juan José Leal Ortiz titulado: **Efectos de las Tormentas Solares en Equipos Electrónicos y Señales Electromagnéticas de Telecomunicaciones**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 7 DE MAYO 2,007.

ACTO QUE DEDICO A:

- DIOS** Gracias por haberme concedido la oportunidad de estudiar y culminar mis estudios universitarios.
- MIS PADRES** Juan José Leal y Bernardina Ortiz, por brindarme la oportunidad de estudio, gracias por todo su sacrificio, cariño y apoyo.
- MIS HERMANOS** Magda, Carol, Evelyn y Edy, por su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos, esperando que Dios les brinde muchas bendiciones.
- MI SOBRINA Y CUÑADO** Jennifer y Frans, por formar ahora parte de mi familia esperando verlos con grandes éxitos en su vida.
- MIS AMIGOS** Allan Sac, Edna García, Judith Chavarria, Oscar Sitavi, Homar Gonzales, Anacelly Santiago, Jorge y Ronald Ruiz, por su compañerismo y compartir conmigo los buenos momentos de la vida.
- LA HERMANDAD CRUZADOS DE CRISTO** Lugar donde he conocido a muy gratos y buenos amigos con los que he compartido algo muy especial de nuestra fe.
- GRUPO DE MONTAÑISMO KASHEM** Por ser parte de mi vida de montaña y brindarme la oportunidad de obtener una nueva visión de la vida y el compañerismo.

MI ASESOR

Ing. Hillbert Noel Alvarez, por el apoyo incondicional en la realización de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. TORMENTAS SOLARES	1
1.1 Manchas solares	1
1.2 Manchas solares a través de la historia	5
1.3 Factores determinantes en el clima espacial	11
1.4 Perjuicios sobre el sistema tecnológico terrestre	13
1.5 La electricidad en la atmósfera terrestre	18
2. PAPEL DE LA IONOSFERA COMO MEDIO DE PROPAGACIÓN ANTE LAS RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS SOLARES Y TERRESTRES DE COMUNICACIONES	21
2.1 Capa ionosférica F	24
2.2 Capa ionosférica E	25
2.3 Capa ionosférica D	26
3. ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL FENOMENO DE UNA ONDA ELECTROMAGNETICA EN LA IONOSFERA	27
3.1 Ingreso de radiación electromagnética a la ionosfera	27
3.2 Propagación real de onda electromagnética	32
3.2.1 Reflexión de ondas electromagnéticas en las capas Ionosféricas	32

3.3	Modelos generales de análisis matemático	36
3.3.1	Representación en el dominio de la frecuencia	36
3.3.2	Fasores	38
3.3.3	Promedio temporal	39
3.3.4	Soluciones a las ecuaciones de Maxwell	40
3.4	Entornos para modelos de las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la Frecuencia	40
3.4.1	Caso estático	41
3.5	Representación de señales de interferencia	43
3.6	Bandas de propagación de onda en la ionosfera	46
3.6.1	Banda de 1.8 megahertz	46
3.6.2	Banda de 3.5 megahertz	47
3.6.3	Banda de 7 megahertz	47
3.6.4	Banda de 10 megahertz	48
3.6.5	Banda de 14 megahertz	48
3.6.6	Banda de 18 megahertz	49
3.6.7	Banda de 21 megahertz	50
3.6.8	Banda de 24 megahertz	50
3.6.9	Banda de 28 megahertz	50
3.7	Frecuencia Óptima de Trabajo	50

4.	CALIDAD Y EFECTO DE UNA ONDA ELECTROMAGNETICA ANTE UNA TORMENTA SOLAR	55
4.1	Fenómenos de señal	55
4.1.1	Dispersión temporal	57
4.1.2	Desvanecimiento	59
4.1.3	Dispersión en frecuencia	59
4.1.4	Dispersión en el tiempo	60
4.1.5	Dispersión por retardo	61

5.	MÉTODOS PARA PROTECCIÓN A EQUIPO ELECTRÓNICO ANTE INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS	63
5.1	Definiciones y normas	63
5.1.1	Breve historia de efectos en equipo electrónico	67
5.2	Creación de modelo para logro de compatibilidad electromagnética de sistemas y equipos	69
5.3	Desarrollo de sistemas bajo el criterio de compatibilidad Electromagnética	70
5.3.1	Fase de diseño	71
5.3.2	Fase de construcción	72
5.3.3	Fase de verificación	72
5.4	Descripción topológica de sistemas de protección electromagnética	73
5.5	Normas y aspectos legales internacionales	76
6.	MÉTODOS PARA REDUCIR ERRORES EN LAS COMUNICACIONES DEBIDO A INTERFERENCIAS	81
6.1	Métodos empleados para la detección de errores	81
6.1.1	Formas de control de errores	81
6.1.2	Error de bit	82
6.1.3	Bits de paridad CRC-N	83
6.1.4	Bits de paridad BIP-N	83
6.2	Métodos empleados para la corrección de errores	83
6.2.1	Fec a bloques	84
6.2.2	Fec convolucional	84
6.2.3	Corrección por pedido de repetición ARQ.	85
6.3	Comunicaciones inalámbricas de banda ancha MLDS	89
6.3.1	Definición de MLDS	90
6.3.2	Factores claves de la viabilidad del sistema MLDS	90

6.3.3	En qué consiste el MLDS	98
	6.3.3.1 Topología de red	102
6.3.4	Aspectos técnicos	103
6.3.5	Servicios MLDS	107
6.3.6	Ventajas y desventajas	107
CONCLUSIONES		111
RECOMENDACIONES		113
BIBLIOGRAFÍA		115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Interacción de radiación solar con el campo magnético terrestre	2
2.	Aurora Boreal	3
3.	Evolución del índice de manchas solares desde el año 1,600 al 2,000	5
4.	Ángulo solar cenital	19
5.	Ángulos de reflexión ionosféricos	24
6.	Reflexión de frentes de onda en la ionosfera	26
7.	Representación de corrientes en un conductor	37
8.	Función periódica seno	38
9.	Representación de un tren de pulsos por medio de la serie de fourier	39
10.	Representación de una señal por el espectro de fourier	40
11.	Pulso Trapezoidal	40
12.	Compatibilidad electromagnética	56
13.	Tipos de interferencia electromagnética	56
14.	Entorno electromagnético	57
15.	Formas de acoplamiento electromagnético	58
16.	Fases de diseño para logro de EMC	61
17.	Valores límites de emisiones electromagnéticas conducidas y radiadas.	68
18.	Marca de la Comunidad Económica Europea	70
20.	Ejemplo de envío de Datos	76
21.	Envío de datos con confirmación del receptor	76
22.	Sistema MLDS	88
23.	Servicios MLDS	89
24.	Antena utilizada en recepción para sistema MLDS	90

TABLAS

I	Parámetros ocasionados por tormentas solares	47
II	Ejemplo de codificación FEC	74
III	Comparación MLDS con otras tecnologías	98

GLOSARIO

Plasma	Sistema que contiene un número significativo de partículas cargadas libres y cuya dinámica presenta efectos colectivos dominados por las interacciones electromagnéticas entre las mismas.
Isótopo	Los átomos de cada isótopo tienen el mismo número atómico o de protones, Z , pero distinto número másico, A , lo cual indica que el número de neutrones es diferente y característico para cada isótopo.
Ionosfera	Parte de la atmósfera ionizada permanentemente debido a la fotoionización que provoca la radiación solar.
Heliosfera	Región espacial que se encuentra bajo la influencia del viento solar, que se compone de iones procedentes de la atmósfera solar.
Aurora boreal	Luz difusa pero predominante proyectada en la ionosfera terrestre producida cuando una eyección de masa solar choca con los polos norte y sur del campo magnético terrestre.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global, permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto, con una precisión hasta de centímetros o metros.
Refracción	Es la desviación que sufren las ondas en la dirección de su propagación, cuando el sonido pasa de un medio a otro diferente.

Toposfera	Llamada también troposfera, es la capa inferior de la atmósfera terrestre, está comprendida desde la superficie terrestre hasta una altitud de 6 a 18 kilómetros.
Decibel	Unidad empleada para expresar la relación entre dos magnitudes, que emplea unidad logarítmica de base 10.
Fading	Desvanecimiento de señal.
Jaula de faraday	Efecto producido cuando un conductor nulo es envuelto por un medio conductor que evita el ingreso de ondas electromagnéticas externas.
Comisión técnica TC77	Comité que elabora documentos técnicos sobre compatibilidad electromagnética con objeto de aprobación por parte del Comité Electrotécnico Internacional IEC para estándares internacionales.
Trama	Unidad de envío de datos. Normalmente una trama constará de cabecera, datos y cola.
Modulación TCM	Este sistema combina las técnicas de codificación y la modulación para transmisiones digitales sobre canales con banda limitada.
Asentimiento	Mensaje que se envía para confirmar que un mensaje o un conjunto de mensajes han llegado.
Ancho de banda	Transmisión de canales múltiples de datos sobre un medio de

comunicación simple. Para señales analógicas el ancho de banda es la anchura, medida en hercios, del rango de frecuencias en el que se concentra la mayor parte de la potencia de la señal.

Banda Ka	Banda ubicada entre los 17.7 y 21.2 gigahertz.
Rain fade	Absorción de señales de de radio frecuencia por lluvia o nieve, especialmente en los 11 GHZ.
QSPK	Modulación por cuadratura de fase. Es una forma de modulación en la que la señal se envía en cuatro fases, 45, 135, 225, y 315 grados.
Router	Este dispositivo interconecta segmentos de red o redes enteras. Toma decisiones lógicas con respecto a la mejor ruta para el envío de datos a través de una red interconectada y luego dirige los paquetes hacia el segmento y el puerto de salida adecuados.

RESUMEN

Actualmente, la globalización en la cual se encuentran sumergidos todos los países en el mundo conlleva a que cada día sea necesario crear nuevos sistemas de comunicaciones, eléctricos y electrónicos, esto además de encontrar mejoras en las recientes tecnologías también provoca encontrarse cada día con situaciones que en la antigüedad pasaban desapercibidas por los ojos humanos ante la total creencia de la inexistencia de los mismos, como lo son los fenómenos solares. Actualmente con los sistemas satelitales de comunicaciones las diferentes formas de comunicación han mejorado, se crean mejores sistemas eléctricos y cada día surgen componentes electrónicos mas pequeños, pero como en cualquier avance tecnológico también es de encontrarse con situaciones que en algunos casos pueden llegar a ser incontrolables por el ser humano, tal es el caso de las tormentas solares y la consecuente energía lanzada por las mismas al espacio exterior.

Las comunicaciones son principalmente las más afectadas por la energía irradiada por el sol, lo que genera pérdidas en las comunicaciones aunque los sistemas eléctricos en años recientes también han sido seriamente afectados, aunque se dañen los equipos eléctricos y electrónicos de comunicaciones y se tengan pérdidas económicas con los mismos, también implica un conjunto de pérdidas por la falta de funcionamiento de los mismos. Por lo que conocer este fenómeno y saber de qué manera podemos reducir al mínimo sus consecuencias es el propósito de esta investigación.

Por lo que en esta investigación se enfoca en el estudio de cómo las tormentas solares afectan las comunicaciones como prioridad, además de cómo proteger los

equipos, tanto eléctricos como electrónicos ante la amenaza de daño que pudieran sufrir al estar expuestos a energía externa de la tierra provocada por una tormenta solar.

Además de realizar un análisis de cómo proteger los componentes electrónicos, se mencionan 2 métodos utilizados en la actualidad para corregir errores en las comunicaciones. Por último se presenta un nuevo sistema de comunicaciones para la transmisión de datos, voz, televisión etc. como lo es el Sistema de Distribución de Servicio Local Multipunto, el cual promete ser un sistema que ayude a minimizar errores en las transmisiones.

OBJETIVOS

General

Conocer como los equipos electrónicos y señales de comunicaciones se comportan ante la presencia de un fenómeno producido fuera de la tierra como lo son las tormentas solares, así como proponer nuevos métodos o formas para corregir y minimizar los daños ocasionados por este.

Específicos

1. Conocer en qué consiste una tormenta solar y cómo ésta afecta los sistemas terrestres electrónicos y de comunicaciones.
2. Analizar la importancia de la Ionosfera como escudo protector terrestre ante radiaciones solares y su comportamiento como medio de propagación de ondas electromagnéticas.
3. Analizar el fenómeno de interacción entre las ondas electromagnéticas generadas por la radiación solar y las ondas electromagnéticas generadas para comunicaciones terrestres.
4. Plantear que calidad de señal electromagnética para comunicaciones podemos obtener ante la presencia de una tormenta solar.

5. Conocer los efectos y la forma de proteger los equipos electrónicos ante la amenaza de cualquier interferencia electromagnética.
6. Estudiar nuevos métodos y sistemas para minimizar el ingreso de errores en las comunicaciones.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones en la actualidad juegan un papel muy importante en cada uno de los seres humanos, el tener cada día más y mejor manera de comunicarnos es vital. Debido a lo anterior, se puede observar que con los aumentos tecnológicos cada día más impresionantes, también surgen situaciones adversas a estos avances, tal es el caso de las radiaciones producidas por fenómenos externos a el sistema terrestre específicamente el fenómeno de las tormentas solares.

Estudiar el fenómeno de las tormentas solares en la actualidad es complicado debido a que los sistemas utilizados en las comunicaciones satelitales, inalámbricas, fibra óptica etc. así como los componentes electrónicos empleados, no poseen un extenso tiempo de estar en uso. Los datos recabados sobre este fenómeno afectando el sistema terrestre, específicamente en sistemas eléctricos se remontan al siglo XIX, y es hasta mediado del siglo XX donde se han recabado los primeros análisis sobre las causas y efectos de dicho tema.

En la actualidad debido a que existen múltiples formas de comunicación como la televisión, radio, telefonía etc., todas estas formas de comunicaciones se ven afectadas por toda esa energía externa a la tierra, además se puede observar como este fenómeno repercute en un aspecto fundamental en la vida de los seres humanos como es el aspecto económico. Aunque surgen muchas interrogantes sobre cómo se puede luchar contra la naturaleza, el fin de estas investigación es proporcionar la información necesaria para poder saber de qué manera se pueden minimizar los daños en las comunicaciones,

equipos eléctricos y electrónicos ocasionados por el sol en estas erupciones de energía electromagnética.

Entre los aspectos importantes para minimizar daños a los equipos y sistemas de comunicaciones es necesario conocer como primer punto, en qué consiste dicho fenómeno, como puede ser la ocurrencia del mismo, cantidad de energía liberada, su comportamiento al entrar en contacto con la atmósfera terrestre así como otros que se abordaran con detalle en los primeros capítulos de esta investigación.

También es necesario mencionar que aunque en Guatemala no se poseen tantos servicios de comunicaciones como los que poseen los países industrializados, cada día a pasos pequeños existe un aumento en los equipos eléctricos, electrónicos y de comunicaciones en uso, por lo que se torna un poco complicado conseguir estadísticas relacionadas al fenómeno en mención, lo cual conlleva a estar actualizados sobre dicho tema con experiencias relacionadas a países desarrollados, que se han visto seriamente afectados en las telecomunicaciones y daños en equipos eléctricos y electrónicos.

Como cualquier investigación el análisis no sería tan importante si no posee además de un análisis detallado posibles soluciones al problema en cuestión. Por lo que se brinda un estudio de cómo se protegen equipos electrónicos y eléctricos en la actualidad ante radiaciones electromagnéticas externas. Aunque es imposible saber a ciencia cierta cuando se va a producir una tormenta solar, tomar todas las precauciones para evitar daños se torna importante por lo que se abordaran dos métodos utilizados para la detección y corrección de errores en comunicaciones, además de estudiar un nuevo sistema de comunicaciones que podría en el futuro ser una solución ante fenómenos de la naturaleza.

1. TORMENTAS SOLARES

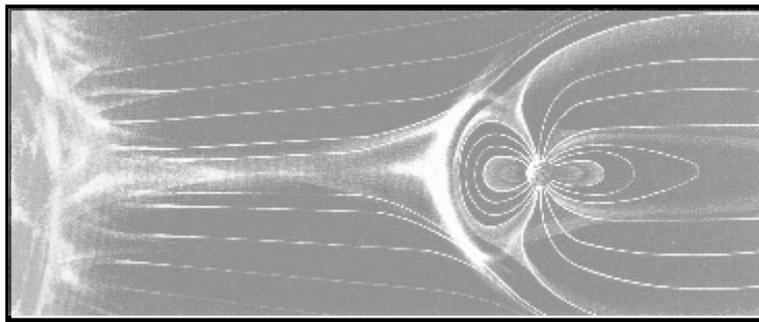
1.1 Manchas solares

La intensa actividad Solar provoca la acumulación de energía magnética en su atmósfera que en ocasiones es liberada en forma repentina y rápida, enviando una gran cantidad de radiación equivalente a millones de bombas de hidrógeno y energía hasta 10 millones de veces mayor que una erupción volcánica. Para comenzar a entender estos fenómenos se deben de conocer algunos datos como por ejemplo que el ancho del Sol tiene más de 1.4 millones de kilómetros, el Sol contiene un 99.86 por ciento de la masa de todo el Sistema Solar; más de un millón de Tierras podrían caber dentro de el mismo. La energía total radiada por el Sol es aproximadamente de trescientos ochenta y tres mil billones de kilovatios, el equivalente a la energía generada por una explosión de cien mil millones de toneladas de dinamita, explotando por segundo.

La parte más caliente de la atmósfera solar es un gas formado por partículas cargadas, en su mayoría electrones y protones, conocido como plasma. Este plasma solar es lanzado hacia el espacio exterior en forma radial a altas velocidades, llevando consigo el campo magnético solar, que junto con partículas eléctricamente cargadas, forman el viento solar. Suele tener unas velocidades de aproximadamente 450 Km/s. Mientras que la luz proveniente del sol tarda unos 8 minutos en llegar a la tierra, el viento solar generalmente alcanza la tierra en 2 ó 3 días desde su inicio y, a continuación, atraviesa el resto del sistema solar. Si se pudiera ver estas líneas invisibles de campo magnético solar, se podría observar que adquiere la configuración de una espiral debido a la rotación del sol. La energía liberada por el Sol no es siempre constante.

Una inspección de la superficie del Sol revela un laberinto de campos magnéticos y nubes arqueadas de plasma caliente rodeadas por oscuras y cambiantes manchas solares.

Figura 1. Interacción de radiación solar con el campo magnético terrestre.



En la figura anterior, se observa como el sol se encuentra lanzando energía a la izquierda y como a la derecha esta radiación interactúa con el campo magnético terrestre.

De vez en cuando, ya que no se pueden predecir con exactitud, en la superficie del Sol ocurre un evento que libera una inmensa cantidad de energía en forma de llama solar o eyección de masa coronal (CME), un estallido de gases electrificados muy calientes y con una masa que puede sobrepasar la del Monte Everest. Dado que estas erupciones solares duran generalmente muchos días, y que el Sol tiene una rotación de 28 días terrestres, diversos planetas quedan expuestos a las perturbaciones que estas erupciones propagan por el Universo. Según los datos recogidos por el satélite *SOHO* el cual debe su nombre a sus siglas en inglés y significa Observatorio Solar y Heliosférico, que orbita al astro rey, en el momento de la erupción el Sol brilla 100 veces más en rayos X, en relación con la medida habitual, en el espectro electromagnético. El satélite ha llegado a filmar la poderosa ola de protones que acompaña a una tempestad magnética.

A pesar de lo caliente que suena y las fantasías inmediatas que se pueden llegar a pensar, una llama solar no puede quemar instantáneamente o dar un bronceado inesperado a los seres humanos, en primer lugar, lo que llega a la Tierra no es una onda de calor pero sí un intenso bombardeo de radiación y partículas cargadas con energía.

La atmósfera terrestre hace un buen trabajo protegiendo de esta radiación, aunque es cierto que los astronautas fuera de sus naves están expuestos a verse afectados por dicha radiación, y aquí mismo en la tierra grandes instalaciones pueden convertirse en especie de antenas atrayendo la energía y verse afectadas.

Para la agencia nacional espacial estadounidense Nasa una llamarada solar es una rápida liberación de energía de una región específica del sol en la forma de radiación electromagnética, particularmente energética y con movimientos de masa, como se sabe una radiación electromagnética es una radiación que viaja por el espacio a la velocidad de la luz y se propaga por la interacción de campos eléctricos y magnéticos oscilantes. Las manchas solares son regiones localizadas con campos magnéticos extremadamente intensos. Esas manchas se entrecruzan, y el campo magnético resultante puede generar una liberación de energía repentina y violenta denominada fulguración (o explosión) solar. Las áreas en el hemisferio Norte son las más susceptibles de verse afectadas dada su cercanía al Polo Norte, aunque los efectos pueden ser percibidos en todo el planeta incluyendo Guatemala, en un grado menor; por lo tanto el polo norte tiende a atraer gran parte de la energía que llega a la tierra. De hecho las llamaradas solares causan espectaculares auroras boreales.

Figura 2. Aurora Boreal



Fuente: <http://www.spaceweather.com>

En la anterior figura se muestra la Aurora Boreal aparecida sobre Wisconsin, Estados Unidos el 22 de octubre de 2003. Durante la supertormenta solar ocurrida en 1859, tales auroras aparecieron tan al Sur del planeta como Cuba y Hawai.

Con la globalización e intercomunicación de sistemas a nivel mundial y el uso internacional y compartido de satélites y sistemas internacionales, pudieran verse afectados por estas "tormentas" solares, todos los seres probablemente están expuestos a sentir sus efectos o consecuencias en los próximos años. El incremento en la cantidad de satélites orbitando la tierra y la interconexión de sistemas de distribución de energía eléctrica, telecomunicaciones y transmisión de señales de televisión, radio, video, audio y datos en los cuales la sociedad actual depende para su desenvolvimiento diario, crean el escenario para un mayor impacto en nuestras vidas de estas poco conocidas tormentas o llamaradas solares. Cables de telecomunicaciones, líneas de alta tensión, tuberías y estructuras similares de longitud considerable pueden hacer el papel de antenas y atraer la energía bombardeada por estas llamaradas solares.

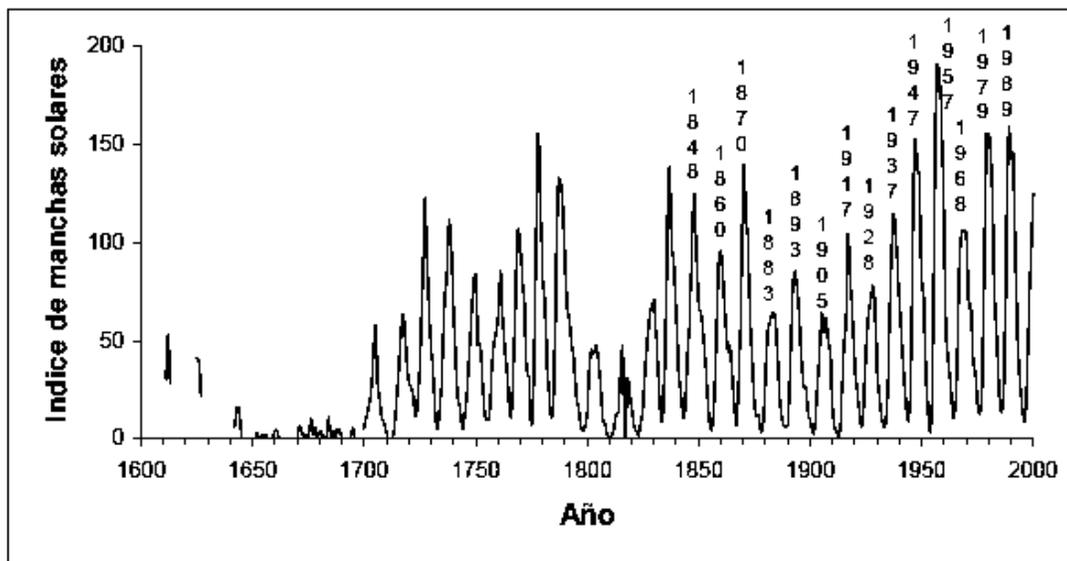
1.2 Manchas solares a través de la historia

Los datos de telescopio acumulados desde el siglo XVII, así como la historia de la Tierra escrita en los hielos de Groenlandia y la Antártida, han permitido establecer que las tormentas solares que se están conociendo en la actualidad son las más intensas de los tiempos modernos. Se han multiplicado desde 1940 y no tienen precedentes en los últimos 1150 años. Esta agitación solar, que perturba las telecomunicaciones y el suministro eléctrico, al mismo tiempo que provoca auroras boreales, continuará en el futuro sin que se pueda prever su frecuencia e intensidad con exactitud. La historia de las tormentas solares ha podido reconstruirse calculando el número de manchas presentes en la superficie del Sol.

El equipo de Ilya Usoskin, de la Universidad finlandesa de Oulu, y sus colegas del Instituto Max Plank de Alemania, se apoyaron en los datos recaudados por los astrónomos desde principios del Siglo XVII, cuando se inventó el telescopio, para confeccionar esta historia. El Sol presenta pequeñas manchas oscuras que a veces pueden verse a simple vista. Las mismas fueron no sólo observadas sino también registradas en China al menos desde el siglo II A.C. La cosmología aristoteliana dominante en Occidente, por la cual el cielo debía ser perfecto e inalterable, permite explicar la pobre cantidad de estas observaciones que existen allí antes del siglo XVII. Galileo ayudó a demoler los argumentos de un Sol perfecto y también su invención del telescopio permitió un mejor seguimiento de las manchas. Además quedó casi ciego, ya que sólo cuando el Sol se encuentra cerca del horizonte, tras un manto de nubes o neblina, o proyectando la imagen sobre una superficie se pueden evitar severos efectos sobre la vista. En la gráfica se ha representado el índice de manchas solares (depende de la cantidad y el tamaño de las mismas) a lo largo del tiempo.

Los datos provienen al año 1700 de una gran diversidad de observadores y los posteriores son del **Sunspot Index Data Center** (Centro de índice de datos de manchas solares). Puede verse que el índice de manchas no varía en forma arbitraria.

Figura 3. Evolución del índice de manchas solares desde el año 1600 al 2000



Fuente: www.personal.us.es/jluque

El comportamiento se repite aproximadamente cada 11 años, asignándosele a los picos y valles el nombre de máximo y mínimo (de actividad) solar. Se guarda el tope del presente ciclo para fines del año 2000, que aparentemente será inferior a los dos anteriores. Actualmente se sabe que la variación de las manchas es el indicador más obvio del estado de humor del sol, ya que la cantidad de erupciones, la intensidad de la radiación del sol, el comportamiento del viento solar y otros aspectos también dependen de este ciclo.

Asimismo los científicos han analizado hielo de Groelandia y de la Antártida para descubrir la concentración de berilio 10 en la atmósfera a lo largo del tiempo, ya que cuanto más activo está el Sol más disminuyen las concentraciones de berilio-10, un isótopo que se puede encontrar en nuestro planeta cuando los rayos cósmicos de alta energía impactan la atmósfera terrestre. Con los datos de ambas fuentes en la mano descubrieron que el número de manchas solares visibles desde 1940 es mucho más intenso que el que existió en los mil años anteriores. Estos episodios de la vida del Sol ocurren esporádicamente, por lo que representan un problema para la tecnología terrestre a pesar de los 150 millones de kilómetros que separan el sol de la tierra.

Los datos más antiguos descubiertos son sobre la tormenta solar más grande de la historia conocida, por lo que está ayudando a medir su intensidad y a calcular la probabilidad de que lo que ocurrió en los cielos terrestres hace casi un siglo y medio puedan repetirse. En medios científicos donde las explosiones solares y otros eventos solares son tema de conversación y análisis, lo que sucedió el 1 y 2 de septiembre de 1859 son siempre el tema principal entre todas las leyendas astronómicas.

En pocas horas, las comunicaciones telegráficas de Estados Unidos y Europa colapsaron espontáneamente, causando numerosos incendios, mientras que las Auroras Boreales, fenómenos producidos por la inducción solar y asociados con regiones cercanas al Polo Norte, fueron observados en lugares tan al sur como Roma, La Habana y Hawai, con efectos similares en el Polo Sur.

Lo ocurrido en 1859 fue una combinación de varios fenómenos que tuvieron lugar simultáneamente en el Sol. Si hubieran ocurrido por separado entonces hubieran sido eventos notables.

Al ocurrir en forma simultánea, causaron la perturbación más potente en la ionosfera de la tierra en toda la historia. Lo que ocurrió en los 150 millones de kilómetros de espacio interplanetario que separan al Sol de la Tierra, fue lo siguiente: el 28 de agosto de ese año, los observadores solares notaron el desarrollo de numerosas manchas solares en la superficie del Sol, desde el 28 de agosto al 2 de septiembre, diversas manchas solares fueron observadas. Entonces, el 1 de septiembre de ese año el Sol liberó una descomunal explosión solar, durante casi un minuto la cantidad de luz solar producida en esa región se duplicó.

Con la explosión vino la liberación de una nube de plasma cargada magnéticamente, denominada eyección de masa coronal conocida por la abreviación CME. No todas las CME se dirigen hacia la Tierra, tardan normalmente de tres a cuatro días en llegar, ésta tardó 17 horas y 40 minutos. La eyección de masa coronal no sólo fue extremadamente rápida, los campos magnéticos que contenía eran intensos y en directa oposición a los campos magnéticos terrestres. Esto hizo que la eyección de masa coronal del 1 de septiembre de 1859 cancelara el propio campo magnético de la Tierra, permitiendo a las partículas cargadas penetrar en la atmósfera.

El resultado de tal fenómeno estelar fue un espectáculo de luz y mucho más, incluyendo cortes potenciales en redes eléctricas y sistemas de comunicaciones de esa época. En 1859, el invento del telégrafo había ocurrido sólo 15 años atrás y la infraestructura eléctrica estaba realmente en su infancia.

La tormenta solar ocurrida en 1994 causó errores en dos satélites de comunicaciones, afectando los periódicos, las redes de televisión y el servicio de radio en Canadá. Otras tormentas han afectado sistemas desde servicios móviles y señales de TV hasta sistemas GPS y redes de electricidad.

En los siguientes párrafos se presenta una cronología de algunos problemas tecnológicos destacados en asociación a las tormentas solares. Puede verse que la mayoría de estos hechos ocurrieron en épocas próximas a un máximo solar.

- Cuando la telegrafía estaba en sus comienzos, todo el sistema de cableado de Inglaterra se tornó inestable durante dos tormentas solares en 1847 y 1859. Gracias a la “energía gratis” algunos telegrafistas no necesitaron baterías para enviar mensajes, pero otros estuvieron cerca de electrocutarse o tenían líneas inoperables.
- El 24 de Marzo de 1940 en el noreste de los Estados Unidos y el este de Canadá una gran tormenta ocasionó notables fluctuaciones en el voltaje de línea y dejó ocasionalmente fuera de servicio el suministro de energía eléctrica.
- El 9 y 10 de Febrero de 1958 el cable de comunicación transatlántica en el hemisferio norte padeció las consecuencias de una tormenta solar severa, a raíz de lo cual las señales fueron distorsionadas hacia una elevada vociferación o un suave susurro, dependiendo de la dirección del voltaje inducido respecto al voltaje de operación.
- En 1979 tras 6 años de uso el satélite *Skylab* se despedazó sobre el Océano Índico y Australia por no haberse previsto adecuadamente los incrementos de la fricción atmosférica durante los lapsos de alta actividad solar.

- El 13 de marzo de 1989 una tormenta solar llevó los transformadores del sistema de suministro eléctrico de la hidroeléctrica de Québec a la saturación, ocasionando frecuencias diferentes a los 60 Hz y fluctuaciones de voltaje. En sólo 90 segundos el sistema colapsó y se produjo en el este de Canadá un corte de 9 horas. La tormenta también ocasionó que algunos sistemas automáticos como portones de garaje funcionaran por si solos.
- El 4 de Junio de 1989 una potente explosión demolió parte de las vías del tren Transiberiano en Ural, provocando 2 trenes en llamas con centenares de víctimas fatales.
- Los satélites de comunicaciones canadienses *ANIK E1* y *E2* de *Telesat* respectivamente el 20 y 21 de enero de 1994 perdieron temporalmente el control orbital. Esto se debió a los efectos de electrones de alta energía que penetraron profundamente en la electrónica e indujeron grandes voltajes entre componentes, ocasionando descargas eléctricas entre los mismos con la consecuencia del daño al equipo. Finalizaron abruptamente transmisiones de televisión en Canadá y Estados Unidos, se cortaron conversaciones telefónicas y se alteró el control de tráfico aéreo por lo que debieron aterrizar algunos aviones.
- El satélite *Telstar 401* al servicio de AT&T quedó fuera de servicio el 11 de enero de 1997 con sólo 3 años de antigüedad por las inclemencias del clima espacial. Este hecho redujo considerablemente el servicio de satélites *Skynet*, que consistía de tres naves usadas para transmitir programas de televisión.
- El 19 de Mayo de 1998 un sistema de control del satélite de comunicaciones *Galaxy IV* de la corporación *PanamSat* quedó fuera de servicio.

El hecho interrumpió en Estados Unidos casi un día completo el servicio de radiomensajes de hasta un 90 % de los usuarios, algunas transmisiones de noticias y el funcionamiento parcial de las máquinas de tarjetas de crédito.

- Se sospecha que un serio accidente de trenes con 19 muertos en Enero de 2000 en Noruega pudo deberse a un cambio fatal de la señal ferroviaria a vía libre ocasionado por la elevada actividad solar.

1.3 Factores determinantes en el clima espacial

El estado en el que se encuentran el Sol, la heliosfera y la parte superior de nuestra atmósfera con su entorno, con especial énfasis en las condiciones que puedan afectar el planeta determinan el clima espacial. El sol es el protagonista principal. Este tema puede afectar el funcionamiento de sistemas técnicos en el espacio exterior y en la Tierra, producir riesgos sobre la salud humana y alterar el clima terrestre. El clima espacial es por lo tanto mucho más que las impresionantes e inofensivas auroras boreales.

A pesar de que al Sol lo se observa siempre igual, su realidad dista de ser tranquila, constante y uniforme pues tiene un comportamiento variable a lo largo del tiempo. La tierra es sensible a la cambiante actividad del principal protagonista del clima espacial el sol. Si se intenta entender las relaciones entre la actividad solar y sus efectos en el sistema terrestre, se debe tratar también de tener una clara comprensión de los procesos climáticos en el espacio. Un producto final de sumo interés de este proceso de investigación será la posibilidad de poder emitir alertas tempranas sobre los correspondientes peligros. Diversos proyectos científicos que intentan estudiar fenómenos climáticos espaciales se están desarrollando actualmente.

El nivel de comprensión presente no permite aún contestar muchos de los interrogantes, pero está claro que cada vez resulta más esencial, casi imprescindible, conocer mejor el comportamiento del Sol, su entorno y el medio espacial cercano a nuestro planeta para pronosticar ciertos fenómenos y prevenir o al menos reducir a un mínimo posible algunas consecuencias indeseadas.

El clima espacial depende fundamentalmente del Sol, que es una fuente de radiación de ondas electromagnéticas y de partículas atómicas. Estas partículas de alta energía además del sol pueden provenir de otras zonas de nuestra galaxia o de más allá. Además tienen cierto rol la capa más externa de la atmósfera terrestre y la zona adyacente, respectivamente la ionosfera y la magnetosfera (campo magnético terrestre).

La radiación electromagnética viaja a la velocidad de la luz (300 mil Km/seg.) y por lo tanto atraviesa los 150 millones de Kms. del Sol a la Tierra en sólo 8 minutos. Los rayos cósmicos solares pueden alcanzar velocidades de hasta 100 mil Km/seg. y por ello arriban a la Tierra en algunas decenas de minutos o unas pocas horas. Las partículas del viento solar provocadas por tormentas solares en cambio viajan a unos 400 Km./seg. y demoran por lo tanto unos 4 días en llegar a la tierra, lo cual es útil para la predicción del clima espacial porque a diferencia de los casos anteriores otorga suficiente tiempo para tomar precauciones ante llegadas peligrosas.

El contenido energético del viento solar y de los rayos cósmicos es muy inferior al de la radiación electromagnética, pero no es de descartar que puedan estar afectando al sistema terrestre a través de procesos altamente no lineales.

Dentro del viento solar, las eyecciones de masa constituyen un fenómeno de singular importancia para la meteorología espacial, puesto que consisten en la expulsión de gran cantidad de materia hacia afuera del Sol y su velocidad puede alcanzar los 2 mil Km/seg. Estos eventos contienen partículas atómicas cargadas de altas velocidades, que pueden producir grandes corrientes eléctricas y diferencias de voltaje. Esto constituye un serio peligro para los satélites, particularmente los que se encuentran en el espacio exterior. Hay épocas de gran actividad solar en las que puede haber un promedio 3 de estos eventos cada 24 horas, aunque sólo llega 1 cada 5 días a la Tierra (el resto se pierde en otras partes del espacio).

Los rayos cósmicos galácticos producidos por otras estrellas solares en otra parte del universo poseen una importancia secundaria en la determinación del clima espacial. Curiosamente su auge sucede durante un mínimo de actividad solar, ya que por las condiciones ambientales más calmadas pueden ingresar más fácilmente a la heliosfera. Además, al ingresar los rayos cósmicos galácticos a nuestra atmósfera colisionan con los constituyentes de la misma y generan una cascada de nuevas partículas que pueden llegar a la superficie terrestre. Pasajeros de aviones, computadoras y trenes pueden quedar expuestos a los efectos de estos rayos cósmicos secundarios.

1.4 Perjuicios sobre el sistema tecnológico terrestre

El hombre no supo reconocer ni imaginó durante mucho tiempo las causas espaciales detrás de muy diversas alteraciones del sistema terrestre. Esto se debe en gran parte a que los efectos pueden involucrar a componentes aislados dentro de un sistema, por lo que no siempre son claramente visibles (por ejemplo en el aislamiento eléctrico de cables internos) o que ocasionan un daño a largo plazo (como pueden ser los efectos en la salud). Eso hizo que muchas veces quedara enmascarada la razón primaria y que las sospechas fueran dirigidas hacia otras causas aparentemente más obvias.

Probablemente fue el astrónomo William Herschel en un artículo sobre el efecto de la variación de las manchas solares en el régimen de lluvias el primero en relacionar las variaciones en el sol con consecuencias concretas sobre el sistema terrestre.

Esta suposición de una conexión del Sol con el clima terrestre precedió a la revelación de la existencia del ciclo solar de 11 años en una publicación de Heinrich Schwabe en 1844. William Ellis del observatorio real de Greenwich efectuó quizás el primer pronóstico de los efectos de las tormentas espaciales en 1879, al vincular las manchas con las perturbaciones geomagnéticas (campo magnético terrestre) y anticipando entonces que en el próximo máximo solar la telegrafía se encontraría al igual que en casos anteriores en problemas, lo cual fue corroborado en 1881. El telégrafo es uno de los más antiguos sistemas hechos por el hombre, que además involucró materiales eléctricamente conductores y por ello fue quizás el primer elemento tecnológico afectado por el clima espacial. Por lo que se analizará que elementos tecnológicos pueden verse afectados por las tormentas solares:

- Electrónica. Los componentes electrónicos se han vuelto una parte esencial y necesaria del ser humano. Los mismos se han ido miniaturizando progresivamente por décadas y operan cada vez con voltajes y corrientes eléctricas menores. Una consecuencia es que el “ruido electrónico” de cierta intensidad puede llegar a causar errores al correr programas por medio de alteraciones espontáneas y sin causa aparente. En general estos efectos no alteran el funcionamiento de una computadora a nivel de chip, ya que el sistema puede hacer una verificación. Estos errores pueden ser ocasionados en la Tierra por tormentas solares, ya que las partículas pueden partir los átomos de los semiconductores, de los que constan los componentes integrados y eso puede producir un exceso de electrones que afecta al sistema electrónico.

Investigaciones de *IBM* en chips de memoria RAM estática han concluido que estos inconvenientes ocurren 13 veces más seguidos a 3,100 m que al nivel del mar, algo totalmente consistente con el hecho de que la energía provocada por las tormentas solares se va atenuando a medida que va descendiendo en la parte más baja de la atmósfera. La frecuencia de errores también debe incrementarse con la latitud puesto que el blindaje magnético terrestre respecto a las partículas cargadas presenta su máxima y mínima defensa respectivamente en el ecuador y los polos. Los microchips de la electrónica de los aviones modernos también operan con pequeñas corrientes y voltajes y están por lo tanto sometidos a los mismos efectos. Se han observado incrementos de la ocurrencia de errores en algunos componentes que pueden llegar a multiplicarse por 15 a una altura de vuelo de 9 Km. respecto al nivel del mar.

- Satélites. Para una gran diversidad de funciones, los satélites permanecen habitualmente largos períodos en el espacio, por lo que no es improbable que se crucen en su trayectoria partículas cargadas de alta energía, que pueden llegar a atravesar sin problemas capas de hasta 4 cm. de aluminio. Se puede producir la acumulación o liberación repentina de cargas en componentes o efectos en la electrónica, que ocasionan el daño y la destrucción de elementos o creación de comandos fantasma. Las tormentas pueden conducir a una pérdida de orientación. Los satélites de órbitas bajas también pueden empezar a perder altura, reingresar a la atmósfera e incendiarse o impactar la superficie terrestre.

Esto se debe a que durante las tormentas espaciales la atmósfera se expande debido al aumento de energía ingresada, lo cual empieza a producir fricción sobre la nave.

La radiación ultravioleta se hace sentir en especial en el largo plazo, ya que lleva a un envejecimiento prematuro de sistemas electrónicos, celdas solares y material estructural.

El uso de modernos componentes cada vez más pequeños hace algunos satélites más susceptibles a la radiación. Peligro para astronautas y sus instrumentos. Las partículas energéticas aceleradas de las llamaradas solares pueden resultar dañinas para cosmonautas y los instrumentos electrónicos en uso en el espacio, aunque en general estos se encuentran a salvo dentro de sus naves o estaciones espaciales. Pero las misiones de exploración fuera de cabina deberán proporcionar protección y vigilancia para los tripulantes ante las radiaciones solares.

- Redes eléctricas. Una tormenta con influencia magnética puede producir diferencias de voltaje entre transformadores de alta tensión conectados al mismo voltaje de referencia (tierra). Por lo tanto una corriente eléctrica inducida fluye entre los mismos a lo largo de las líneas conectando a ambos. Los transformadores pueden llegar eventualmente a saturarse y entonces aparecen alteraciones a las frecuencias de 50 ó 60 Hz, ocasionando un mal funcionamiento de reguladores en elementos de protección de los consumidores. Además, se reduce la capacidad de transmisión del sistema, cae la tensión de las líneas, se pueden producir fallas y eventualmente un apagón total. En el peor caso puede suceder también un recalentamiento e incendio de los transformadores de alta tensión por una corriente muy elevada respecto al rango de operación diseñado para los mismos.

- Corrosión. Aunque en Guatemala no se encuentra una gran cantidad de oleoductos y gasoductos vale la pena mencionar los mismos. Los oleoductos y gasoductos tienen una tendencia a corroerse, sobre todo en puntos de la superficie donde una corriente eléctrica puede fluir desde el metal hacia el terreno circundante. Tienen una capa aislante para evitar este proceso, pero suele añadirse una medida de protección adicional que requiere del mantenimiento permanente de la tensión de los mismos a un valor de -1 voltio respecto al terreno. No obstante, los cambios solares pueden llegar a inducir voltajes en estos tubos que hagan que se sobrepase significativamente esta pequeña diferencia y la protección contra corrosión se torne no efectiva. Aun no queda claro hasta donde se debe responsabilizar a las tormentas solares de estos efectos, pero si resulta obvio que a altas latitudes los oleoductos y gasoductos están más expuestos a los mismos. Inclusive la corrosión que experimentan los grandes puentes metálicos y las torres de alta tensión puede ser atribuida en parte a este fenómeno.

- Telecomunicaciones. En el caso de los cables modernos de fibra óptica pueden aparecer problemas puesto que contienen elementos metálicos, ya sea para proveer corriente a los amplificadores, como para refuerzo o cobertura. La longitud de cables de comunicaciones que atraviesan aguas profundas hace que pueden llegar a inducirse fluctuaciones de incluso algunos miles de voltios en líneas transoceánicas y transmarítimas. Los problemas no sólo aparecen en sistemas de telecomunicaciones que usan cables sino también en aquéllos que usan ondas de radio que pasan o se reflejan en la ionosfera, puesto que la misma se ve muy perturbada durante algunos eventos. Esto incluye a los sistemas de posicionamiento global GPS (para determinar la precisa ubicación de algo en la Tierra) y a los sistemas de navegación.

Servicios de voz, datos y video degradados o interrumpidos. Los cada vez más comunes servicios que usan satélites para enviar transmitir datos, voz y video y comunicar sistemas y personas alrededor del globo podrán verse degradados e incluso suspendidos por tormentas y llamaradas solares.

Problemas con radares. Los radares en tierra podrán ver afectado su funcionamiento, debido al "ruido" provocado por las tormentas, dejando sus informaciones carentes de valor o incluso con datos erróneos. Interrupción de señales de radio. Señales de radio de larga distancia pueden interrumpirse como consecuencia de cambios en la ionosfera terrestre. Dificultades con la televisión por cable y vía satélite. Los problemas arriba mencionados pueden afectar también los satélites de transmisión televisiva, resultando en problemas en la difusión de la programación. Problemas con teléfonos celulares y radios portátiles. Que usan la ionosfera para enviar señales de radio, así como aquellos que dependen de satélites para su comunicación.

1.5 La electricidad en la atmósfera terrestre

Un dato importante y que debe de tomarse en cuenta es la corriente eléctrica que circula a través de la atmósfera, esta corriente aunque es pequeña, alrededor de 10 microamperios cruzan cada metro cuadrado paralelo a la tierra. El aire evidentemente no es un aislador perfecto y debido a su conductividad, una pequeña corriente producida por el campo eléctrico pasa del cielo a la tierra.

En uno que otro lugar hay entre las moléculas de aire un ión, una molécula de oxígeno, que por ejemplo ha perdido o ha adquirido un electrón más, estos iones no permanecen como moléculas simples puesto que su campo eléctrico normalmente acumula otras moléculas alrededor de ellas.

Cada ión se transforma entonces en un pequeño montoncito que junto con otro montoncito se desplaza en el campo, produciendo la corriente observada. Por lo que ocurre una interrogante ¿de donde provienen estos iones? Primeramente se pensó que estos iones eran producidos por la radiactividad de la tierra, se sabía que la radiación proveniente de materiales radiactivos podía transformar el aire en conductor por ionización de las moléculas. Las partículas como los rayos por ejemplo, que salen de los núcleos atómicos se mueven tan rápidamente que pueden arrancar electrones a los átomos dejando iones a su paso. Esto implica por supuesto que si se desplaza hacia alturas mayores se debe encontrar con una ionización menor debido a que la radiactividad proviene de todo lo que hay en el suelo, es decir de los restos de radio, uranio, potasio, etc.

Aunque la densidad de corriente eléctrica en el aire es solamente de unos pocos microamperios por metro cuadrado hay muchísimos metros cuadrados en la superficie de la tierra. La corriente eléctrica total que llega a la superficie de la tierra en cada instante es constante y muy cercana a los mil ochocientos amperios. Esta corriente por supuesto es positiva, lleva más cargas hacia la tierra. De esta manera se tiene una fuente de tensión de 400 mil voltios con una corriente de 1,800 amperes o sea una potencia de 700 megawatts.

Con una corriente tan grande en descenso las cargas negativas que hay sobre la tierra deberían descargarse rápidamente. En efecto sería necesaria solamente una media hora para descargar toda la tierra.

Debido a que la tierra es negativa y el potencial en el aire es positivo si suben suficientemente alto la conductividad es tan grande que no hay ninguna posibilidad de que el potencial varíe horizontalmente. El aire para la escala de tiempo que se está hablando es efectivamente conductor.

Esto ocurre a alturas vecinas a los 50 kilómetros. No es tan alta como la ionosfera en la cual hay gran cantidad de iones producidos fotoeléctricamente por el sol.

2. PAPEL DE LA IONOSFERA COMO MEDIO DE PROPAGACIÓN ANTE LAS RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS SOLARES Y TERRESTRES DE COMUNICACIONES

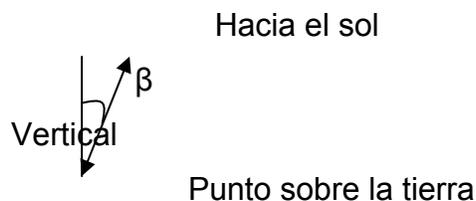
En la actualidad existe un alto interés por el uso de las comunicaciones vía ionosférica, debido a los continuos avances en la tecnología electrónica empleada en la fabricación de equipos de comunicaciones de alta frecuencia (transmisores digitales, filtros activos, control de los equipos mediante sistemas de computo, etc.) unido a la posibilidad de grandes cálculos matemáticos ligados a sistemas de computo, con elevadas velocidades de reloj y grandes cantidades de memoria, todo ello a precios sorprendentemente bajos. Muestra de este interés por las comunicaciones en alta frecuencia es el intento de crear una nueva generación de equipos de radiocomunicaciones inteligentes, es decir capaces de crear y mantener los enlaces de manera automática. Existen, no obstante algunos factores negativos en el proceso de investigación de comunicaciones en esta área (ionosférica), tales como la falta de personal con experiencia en general y lo escaso del número de grupos de investigación en esta área. Entre los grupos de investigación es necesario mencionar el Grupo VI del comité consultivo internacional de radio conocido por las siglas CCIR, perteneciente a la unión internacional de telecomunicaciones ITU, que han logrado mantener vivo el interés por este campo de la investigación.

La ionosfera es una capa atmosférica alta, dotada de una gran conductividad eléctrica gracias a los electrones liberados por la radiación solar, básicamente en el rango de rayos ultravioleta y X, además en menor medida por los rayos cósmicos.

La ionosfera se extiende entre los 50 y 2 mil Km. de altitud sobre la superficie terrestre, dividiéndose por razones históricas en tres capas o regiones denominadas D, E, y F en orden creciente de altura y concentración de electrones, cumpliendo las capas E y F el papel de reflector de las ondas radioeléctricas y siendo la capa D la principal causante de la atenuación sufrida por las mismas entre las frecuencias de 2 y 30 Mhz, además de la responsable también de la reflexión de las ondas de muy baja frecuencia (*very low frequency*) VLF, y extra baja frecuencia (*Extra low frequency*) ELF. También denotaremos a la alta frecuencia por las siglas HF (*high frequency*).

Al ser la radiación solar principalmente el origen de la ionización, es lógico esperar, como así sucede, que la intensidad de la ionización dependa de la intensidad de dicha radiación y de la trayectoria o camino que la misma recorra a través de la atmósfera. Esto conlleva en una mayor ionización de las capas atmosféricas altas y en una relación inversa entre la ionización medida y el ángulo solar Cenital, con un valor máximo donde este ángulo sea cero. El ángulo solar cenital es el ángulo delimitado entre la recta que une un punto de la superficie terrestre con el sol y la vertical de este punto, se denotará como β .

Figura 4. Ángulo solar cenital.



Asimismo se nota una relación directa entre las variaciones en la altura, la concentración de electrones y el comportamiento de las distintas capas ionosféricas y los cambios reflejados en la actividad solar durante el día, a través de las distintas estaciones del año y a lo largo de los sucesivos ciclos solares.

La actividad de la ionosfera en lo que a su papel dentro de la comunicación a larga distancia le corresponde, depende de la intensidad de ionización de la misma, la cual como ya se ha mencionado, es el claro reflejo de la actividad solar, se denotará a las comunicaciones a la larga distancia por las siglas CLD. Esta a su vez mantiene una relación directa con el número de manchas solares existentes en cada momento, cuyo número varía cíclicamente con una periodicidad de 10.7 años, aunque se referirá en general al ciclo de 11 años, siendo este solo un valor medio, pues se han registrado ciclos de 7.3 años como el más corto y de 17.1 años como el más largo.

Un número elevado de manchas solares provoca una fuerte radiación solar con gran ionización en las capas altas de la atmósfera que es entonces capaz de devolver a la tierra frecuencias de hasta 40 Mhz, mientras que por el contrario un bajo número de manchas y la baja actividad solar que le acompaña hace que descienda fuertemente la ionización, convirtiéndose prácticamente inútiles para la comunicación de larga distancia a las frecuencias situadas por encima de los 20 Mhz.

La indicación de la actividad solar se puede obtener para propósitos estadísticos y actividades retrospectivas de investigación a través del *International sunspot number* ISN (número internacional de reporte de manchas solares), calculando mensualmente mediante la media suavizada del número de manchas solares contabilizadas durante los seis meses anteriores y los seis posteriores al mes en cuestión.

Si lo que se desea es la actividad solar actual la obtendremos a través del flujo de ruido radioeléctrico en la frecuencia de 2.800 Mhz, que ha demostrado ser una buena indicación del flujo solar.

Se le acostumbra denominar flujo solar en 10.7 centímetros y es transmitido por las estaciones patrón de frecuencia y tiempo conocida por sus siglas en inglés WWV en FT. Collins, Colorado, en el minuto 18 de cada hora y WWVH en Kahuai, Hawai Estados Unidos, en el minuto 45 de cada hora, en las frecuencias de 1.5 Mhz, 5 Mhz, 10 Mhz, 15 Mhz y 20 Mhz. Estas emisiones además de su utilidad como patrón de frecuencias y tiempo pueden servir para la comprobación de las predicciones de propagación que se realicen. Las capas ionosféricas que han demostrado tener relación con las comunicaciones de larga distancia son las mencionadas anteriormente la E, D y F.

2.1 Capa Ionosférica F

Se extiende por encima de los 130 Km. y es la más alta de todas las capas que componen la ionosfera, dividiéndose durante el día en dos subcapas, la F1 o de *Appleton* comprendida entre los 130 y 210 Km. y la F2 o de Van Allen entre los 250 y 400 Km. de altura. La subcapa F1 alcanza una densidad electrónica máxima de 2×10^{11} electrones/metro cúbico, existiendo solo durante el día y si bien puede cumplir el papel de deflectora de algunas frecuencias es más frecuente que actúe como atenuadora de las frecuencias que se reflejan en la subcapa F₂. La subcapa F₂ presenta una densidad típica de electrones de 10^{12} e/m³ durante el día y de 5 a 10^{10} e/m³ durante la noche, siendo la principal zona deflectora responsable de la comunicación a larga distancia, con una máxima distancia de salto único de 4 mil Km.

Su comportamiento es difícil de modelar, debido a que esta influida por los vientos, por distintos efectos electrodinámicos y por la variación de la ionización debida a la diferente radiación solar durante el día y la noche, durante el curso de las distintas estaciones del año y a lo largo del ciclo solar de los once años.

2.2 Capa ionosférica E

También denominada de *Headviside-Kennelly*, esta situada entre los 90 y 130 Km. de altura sobre la tierra e incluye a la capa normal E y a las denominadas capas esporádicas E y Es.

La capa normal E es homogénea y existe solo durante la radiación solar directa, alcanzando por tanto su máximo durante el medio día local y desapareciendo durante la noche, ya que aquí la atmósfera es todavía lo suficientemente densa para que pueda existir una gran recombinación de los iones generados por la actividad solar. Presenta por tanto una fuerte dependencia del ángulo solar cenital, con máximos en su densidad electrónica durante el verano en lo que a la variación estacional se refiere e incrementándose asimismo al aumentar el número de manchas solares. Este máximo es del orden de los 10^{11} e/m³ a la altura de 110 Km. Durante la noche desaparece prácticamente, quedando solo los restos de la ionización existente durante el día. Es la capa ionosférica más baja y aun capaz de ser útil en la comunicación de larga distancia, siendo muy adecuada para la propagación diurna de comunicaciones a distancias menores de 2 mil Km.

La capa esporádica E tienen su origen en la existencia de zonas relativamente densas de ionización situadas a unos 110 Km. de altura, produciéndose únicamente en determinadas estaciones del año.

No dependen de la actividad cíclica solar y son especialmente útiles en los periodos en lo que la baja actividad solar deja cortada la propagación en las bandas por encima de los 21 Mhz.

2.3 Capa ionosférica D

Por ultimo se encuentra la capa ionosférica D situada entre los 50 y 90 Km. sobre la tierra. Tiene una actividad directamente proporcional a la radiación solar percibida, presentando los valores máximos de ionización de 10^8 a 10^9 e/m³ inmediatamente después del mediodía local y bajando a valores muy pequeños durante la noche manteniéndose asimismo a una pronunciada variación estacional. Produce un marcado efecto de absorción de toda la señal que pasa a través de ellas siendo esta absorción inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia utilizada.

3. ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL FENÓMENO DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA EN LA IONOSFERA

3.1 Ingreso de radiación electromagnética a la ionosfera

Cuando una onda de radio penetra en la ionosfera, los electrones liberados por la radiación solar producen un campo eléctrico que los hace volver a radiar como nuevos emisores de carga, proceso en el cual se puede observar dos fenómenos distintos: uno de cambio de velocidad del frente de onda que produce la refracción del mismo y otro de cambio de la polarización de la onda reemitida, debido a este último fenómeno se observa la influencia del campo magnético terrestre sobre los procesos de absorción y reemisión de la onda de radio. Se analizará a continuación como una onda de radio de una frecuencia determinada que llega con un ángulo de incidencia adecuado, al encontrar un medio con una concentración creciente de electrones sufre sucesivas refracciones hasta retornar a la tierra.

Si se ignora la influencia de campo magnético terrestre el índice de refracción que se denota por la letra “n” de la ionosfera viene dado por la expresión siguiente:

$$n^2 = 1 - (f_N / f)^2$$

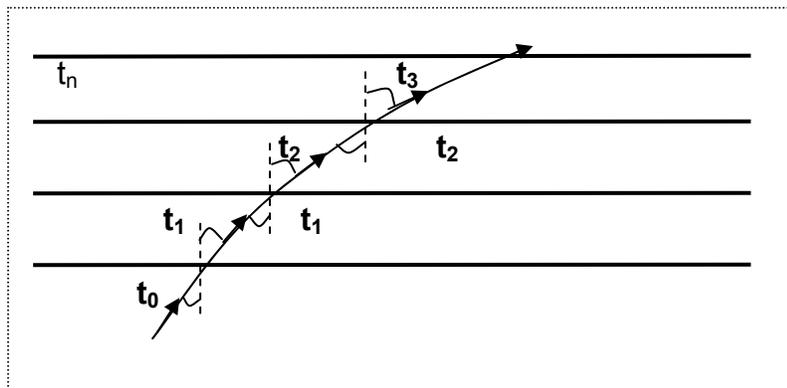
Donde f es la frecuencia de la onda incidente y f_N es la frecuencia de resonancia o también llamada frecuencia de plasma, la cual es proporcional a la raíz cuadrada de la concentración de electrones “N” y cuyo valor viene determinado por la expresión,

$$f_N = 9 N^{1/2}$$

Al ascender en la atmósfera se inicia desde una concentración de electrones nula, con un índice de refracción igual a uno, como se obtuvo de la expresión anterior si $N = 0$ entonces se deduce que $f_N = 0$ con lo que $n = 1$; hacia una concentración creciente de electrones, con su correspondiente disminución en el índice de refracción. Esto quiere decir que si la anchura de la capa ionizada es suficiente, la refracción de una onda radioeléctrica incidente continuará hasta que alcance los noventa grados.

A partir de aquí el proceso continuará y la onda retornará de nuevo a la tierra por simetría, ya que ahora se tendrá una onda retornando que penetrará en una ionosfera de densidad electrónica decreciente e índice de refracción creciente, con un ángulo inicial de incidencia de noventa grados. Si bien la variación de la concentración de electrones continua y la trayectoria de la onda es una curva también continua, se modela este proceso como si existiera un número casi infinito de capas de un ancho casi nulo, como se observa en la figura 5 donde t_n es el ángulo.

Figura 5. Ángulos de reflexión ionosféricos.



Aplicando la ley de Snell en el límite de cada capa obtendremos:

$$n_0 \sin t_0 = n_1 \sin t_1 = n_2 \sin t_2 = \dots = n_n \sin t_n$$

Para un rayo que entre en la ionosfera bajo un ángulo de incidencia t_0 desde la atmósfera no ionizada, donde $n_0 = 1$, la reflexión tendrá lugar cuando t_n tenga noventa grados, o lo que es lo mismo: $\sin t_n = 1$. Llevando estas consideraciones a la expresión donde se igualan por la ley de Snell se llega a la conclusión de que la reflexión tendrá lugar a una altura donde la ionización tenga un valor que haga que el coeficiente de refracción sea: $n = \sin t_0$.

Para una incidencia vertical donde $\sin t_0 = 0$, la reflexión ocurre a la altura donde $n = 0$ por lo tanto de la ecuación: $n^2 = 1 - (f_N / f)^2$ Deducimos que esto ocurre cuando $f = f_N$.

Si f_v es la frecuencia reflejada en incidencia vertical a la altura donde la frecuencia de plasma es f_n obtenemos para la onda que incide oblicuamente la siguiente expresión:

$$n^2 = \sin^2 t_0 = 1 - (f_N / f)^2 = 1 - (f_v / f)^2 \text{ y por tanto } (f_v / f)^2 = 1 - \sin^2 t_0$$

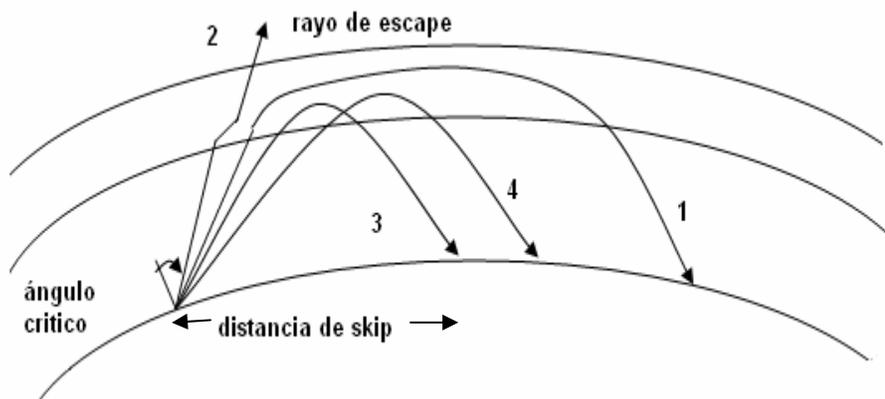
Luego $(f_v / f)^2 = \cos^2 t_0$. Y $f_v / f = \cos t_0$ ó, lo que es lo mismo $f = f_v \sec t_0$.

Esto lleva a la conclusión de que una onda de frecuencia f que incide en la ionosfera bajo un ángulo t_0 será reflejada a la misma altura donde la intensidad de ionización electrónica sea suficiente para producir la reflexión de una onda de incidencia vertical y frecuencia, $f_v = f \cos t_0$.

Es decir una determinada capa ionosférica reflejara siempre frecuencias más altas con una incidencia oblicua que con incidencia vertical. El análisis de una situación ionosférica determinada se realiza frecuentemente mediante sondeos verticales, comprobando el valor de f_v o frecuencia máxima que en ese momento se refleja bajo un ángulo de incidencia vertical. A esta frecuencia se le denomina frecuencia crítica f_o .

Se observa que al aumentar el ángulo de incidencia también aumenta la frecuencia máxima utilizable junto al alcance, siendo esto último por razones geométricas evidentes, en la figura 5 los rayos número 3 y 4.

Figura 6. Reflexión de frentes de onda en la ionosfera.



Asimismo se observa también como en un frente de ondas que esta siendo reflejado hacia la tierra, al disminuir el ángulo de incidencia, llega un momento en el que en lugar de reflejarse totalmente se refracta realizando una penetración lateral en la ionosfera figura 5 rayo 1, pudiendo retornar a la tierra bajo ángulos muy diferentes.

A este ángulo por debajo del cual no existe retorno neto de los frentes de onda previsto por leyes geométricas lo denominamos ángulo de distancia de silencio llamado también ángulo de *skip*.

Si se sigue disminuyendo el ángulo de incidencia aún más, se encontrara con que el frente de onda incidente no sufrirá una refracción suficiente y después de una ligera desviación escapará al espacio exterior denominándose entonces rayo de escape, en la figura 5 rayo 2, los cuales han incidido en la ionosfera bajo un ángulo inferior a un ángulo limite denominado ángulo critico. A estas conclusiones se ha llegado considerando una superficie terrestre e ionosfera planas, así como una densidad de iones estables en cada punto a lo largo del tiempo.

Si se considera que la tierra tiene forma esférica y que la densidad de electrones varía en cada punto y a lo largo del tiempo tendríamos expresiones realmente complejas para encontrar la frecuencia a utilizar en función de la frecuencia reflejada bajo incidencia vertical. La práctica demuestra que es suficiente introducir un coeficiente de corrección k para obtener una aproximación adecuada.

Así la ecuación $f = f_v \sec t_0$ queda de la siguiente forma: $f = k f_v \sec t_0$

En esta expresión, en la que lo más importante es su forma funcional, f_v es la máxima frecuencia reflejada en incidencia vertical, t_0 es el ángulo de entrada del frente de onda en la ionosfera y k una constante cuyo valor dependerá de la capa en cuestión sobre la que se efectúa la refracción y de las circunstancias particulares de cada momento, tales como la estación del año, momento del ciclo solar en el que estemos etc. Es en el cálculo del valor de esta constante, para cada caso en particular donde se centran todos los esfuerzos de los diferentes programas para la predicción de la propagación ionosférica.

3.2 Propagación real de una onda electromagnética

Cuando una onda de radio se refracta en alguna capa ionosférica y vuelve a la tierra se dice que ha efectuado un salto, llamado Distancia de Salto Único para lo cual se utiliza su abreviación, DSU, a la que sobre la superficie terrestre separa el punto de emisión de la señal del punto de llegada de nuevo a la tierra. El valor máximo que toma esa magnitud para una capa determinada en una condición determinada recibe la denominación de Máxima Distancia de Salto Único, MDSU. Se denomina ángulo de radiación "AR" al ángulo formado por la trayectoria de la onda radioeléctrica emitida por una antena con el plano de la tierra.

Las ondas emitidas bajo un gran ángulo desviarán poco su trayectoria, no retornando a la tierra. El ángulo a partir del cual se produce el retorno recibe el nombre de Angulo de Radiación Critico, ARC. El valor de este ángulo dependerá fundamentalmente de la frecuencia utilizada, de la capa donde se efectúe la reflexión y de la distancia entre emisor y receptor. Se define como zona de silencio a la distancia comprendida entre el punto donde ya no se recibe la señal transmitida, debido a la atenuación de la onda de tierra y el punto donde de nuevo se vuelve a recibir, debido a la onda reflejada.

3.2.1 Reflexión de onda electromagnéticas en las capas ionosféricas.

Frecuentemente es más práctico considerar el trayecto de una onda radioeléctrica como resultado de una reflexión en lugar de una refracción. Para una determinada distancia de salto único. Se habla entonces de una altura virtual "AV", que es la altura donde estaría situada una hipotética capa que reflejaría ondas de manera que se obtuviera la misma DSU.

Asimismo, se define el ancho de banda de propagación como el conjunto de frecuencias utilizables para establecer un enlace radioeléctrico entre dos puntos geográficos determinados.

Al límite superior de dicho intervalo de ancho de banda se le denomina Frecuencia Máxima Utilizable “MUF” y al límite inferior Frecuencia Mínima Utilizable, “LUF”. Entre ambos límites se sitúa la frecuencia óptima de trabajo “FOT”, como frecuencia más adecuada al uso correcto que se pretende. Se puede considerar como válida la mayoría de las veces la aproximación que utiliza el valor de la frecuencia optima de trabajo FOT como 0.85 veces el valor de la frecuencia máxima utilizable. Todos estos valores se definen para unas condiciones de trabajo determinadas tales como potencia utilizada, modo de transmisión, la hora solar en los puntos de emisión y recepción de la señal, época del año, actividad solar, etc.

Naturalmente una onda radioeléctrica puede refractarse en la ionosfera, retornar a la tierra y reflejarse sobre ella para, de nuevo, volver a refractarse y así realizar un número variable de sucesivos saltos, número que depende tanto del estado de la ionosfera, de las capas envueltas en la refracción, así como de la naturaleza de la superficie terrestre donde se efectúen las reflexiones.

Esto provoca que en determinadas condiciones, el receptor pueda captar ondas que han realizado un diferente número de saltos, bien por haber sido emitidas bajo diferentes ángulos de emisión y haberse refractado en distintos puntos de la misma capa ionosférica, o debido a que el trayecto de llegada se ha realizado por circunvalación de la superficie terrestre en distintos sentidos.

Los distintos recorridos provocan la llegada de diferentes frentes de ondas con el mismo contenido pero con diferencias de tiempo, lo cual provocará en definitiva fenómenos de desfase e interferencia con la consecuente alteración de la información transmitida.

La repercusión final de esos procesos dependerá de las exigencias de fiabilidad del enlace, del modo de codificación de la información y de la forma de transmisión.

Así pues, todas estas alteraciones en la onda radioeléctrica transmitida apenas producirán trastornos a una emisión en código Morse transmitido y recibido manualmente por operadores expertos, causara dificultades de comprensión en determinadas circunstancias en las emisión vocal de amplitud modulada AM o en la banda lateral única BLU y crearan severas alteraciones en los diferentes modos de transmisión digital como teletipo etc. La propagación de una onda electromagnética entre dos puntos situados en la superficie terrestre se efectúa habitualmente por el camino más corto, recorrido sobre un círculo máximo, que es la línea imaginaria producida por el corte de la superficie terrestre con un plano que pasa por los puntos de emisión y recepción de la onda, así como por el centro de la tierra.

Si un embargo a veces no es este el camino seguido, pues la trayectoria realizada sigue un círculo máximo, pero por el camino más largo. Esto puede ser debido, entre otros factores a que este camino largo se recorra por un área donde al ser de noche, la capa D, principal responsable de la atenuación de las ondas refractadas en la ionosfera, ha desaparecido, pudiendo suceder además que las reflexiones producidas sobre la tierra amortigüen más la onda que va por el camino corto que la del camino largo.

Lo anteriormente descrito puede suceder si las últimas reflexiones se producen sobre zonas altamente conductoras y por tanto muy reflejantes, como la superficie del mar.

Se llama línea o franja gris a la línea que separa el día de la noche. En una cara de la tierra avanza hacia el día con el amanecer y en la cara opuesta avanza hacia la noche con el atardecer. La propagación a lo largo de la línea gris es muy eficiente, debido fundamentalmente a que la capa D, que absorbe fuertemente la radiación electromagnética, desaparece rápidamente con el anochecer y no le da tiempo a formarse en el lado del amanecer, eliminándose de esta manera y en ese recorrido el principal obstáculo para la comunicación de larga distancia.

Se considera por último el fenómeno denominado dispersión por el cual una onda altera la trayectoria esperada según las leyes puras de la refracción y reflexión. La dispersión o *Scatter* puede ser en sentido directo o de avance, produciéndose en la toposfera y para frecuencias superiores a los 20 Mhz. Esto tiene como consecuencia la recepción de la señal radiada en la zona de silencio siendo un fenómeno esporádico y poco utilizable para enlaces fijos.

A veces se observa que después del primer salto las ondas se reflejan sobre la tierra hacia el transmisor ya que la superficie terrestre no es en general un medio liso y homogéneo, hablándose entonces de dispersión inversa. Este fenómeno, cuando se produce es más estable, ayudando a disminuir la zona de silencio.

3.3 Modelos generales de análisis matemático

Todos los fenómenos electromagnéticos no cuánticos se pueden describir a partir de las ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{aligned} \rightarrow \nabla \cdot D &= \rho && \text{(ley de Gauss eléctrica)} \\ \rightarrow \nabla \cdot B &= 0 && \text{(ley de Gauss magnética)} \\ \rightarrow \nabla \times E &= - \frac{\partial B}{\partial t} && \text{(ley de Faraday - Lenz)} \\ \rightarrow \nabla \times H &= j + \frac{\partial D}{\partial t} && \text{(ley de Maxwell-Ampere)} \end{aligned}$$

Donde E es el campo eléctrico, D densidad de campo eléctrico, H el campo magnético y B la densidad de campo magnético. Las fuentes de campo son la densidad de carga eléctrica ρ y j la densidad de corriente. Todas las cantidades son en general funciones de la posición espacial y del tiempo. Este es un conjunto de ecuaciones diferenciales vectoriales acopladas inhomogeneas. En general su resolución conlleva un largo trabajo matemático. Si tomamos la divergencia de la ley de Maxwell-Ampère y usamos la ley de Gauss eléctrica podemos obtener la llamada ecuación de continuidad de carga eléctrica: $\nabla \cdot j + \partial\rho/\partial t = 0$. La ecuación anterior representa el principio de conservación de carga eléctrica. El estudio propio de resolución de este tipo de ecuaciones no forman parte de esta investigación por lo que solo se toman para su aplicación.

3.3.1 Representación en el dominio de la frecuencia

Una forma de simplificar estas ecuaciones es pasar de la representación en el dominio del tiempo a la representación en el dominio de la frecuencia. En la representación en el dominio del tiempo campos y fuentes dependen de la posición y del tiempo.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, t).$$

Donde F es una componente cualquiera de los campos. En la representación en el dominio de la frecuencia se usa la transformada de Fourier de los campos:

$$F(\mathbf{r}, t) \Leftrightarrow \mathfrak{F}(\mathbf{r}, \omega) \Rightarrow F(\mathbf{r}, t) = \int_0^{\infty} \mathfrak{F}(\mathbf{r}, \omega) e^{i\omega t} d\omega$$

$$F(\mathbf{r}, t) \Leftrightarrow \mathfrak{F}(\mathbf{r}, \omega) \Rightarrow \frac{\partial F}{\partial t} \Leftrightarrow i\omega \mathfrak{F}(\mathbf{r}, \omega)$$

Y las ecuaciones de Maxwell quedan de la siguiente manera, donde todos los campos son las transformadas de los campos electromagnéticos:

- ▼ • $\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, \omega) = \rho(\mathbf{r}, \omega)$
- ▼ • $\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, \omega) = 0$
- ▼ • $\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) + i\omega \mathbf{B}(\mathbf{r}, \omega) = 0$
- ▼ • $\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, \omega) - i\omega \mathbf{D}(\mathbf{r}, \omega) = \mathbf{j}(\mathbf{r}, \omega)$

En la representación en el dominio de la frecuencia es posible establecer otras relaciones entre los campos que simplifican la resolución. Estas relaciones se denominan leyes o relaciones constitutivas y dependen del medio en el que se desarrollan los fenómenos y de la frecuencia:

$\mathbf{D}(\mathbf{r}, \omega) = \epsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega)$	ϵ : permitividad dieléctrica
$\mathbf{J}(\mathbf{r}, \omega) = \sigma_\omega \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega)$	σ : conductividad
$\mathbf{B}(\mathbf{r}, \omega) = \mu_\omega \mathbf{H}(\mathbf{r}, \omega)$	μ : permeabilidad (magnética)

En general estos parámetros son matrices que relacionan dos campos vectoriales, dependientes de la posición en medios inhomogéneos y de la dirección en el espacio para medios anisotrópicos. En este caso solo se analizan medios isotrópicos y que se pueden dividir en regiones microscópicas donde las propiedades son homogéneas.

Un caso importante en particular es el medio vacío, y por lo tanto se puede considerar como vacío al aire desde el punto de vista electromagnético donde los parámetros mencionados anteriormente equivalen a: $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m y $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m lo que simplifica grandemente las ecuaciones de Maxwell. Con estas relaciones y si se conocen las fuentes las ecuaciones Maxwell tienen dos incógnitas: el campo E y el campo H. Las aplicaciones de las ecuaciones de Maxwell consisten entonces en:

- Dadas las fuentes, hallar los campos (problema directo);
- Dados los campos, hallar las fuentes (problema inverso).

3.3.2 Fasores

La integral de Fourier representa la superposición o adición de un número indefinido de funciones armónicas elementales $\mathfrak{Z}(r, \omega) e^{i\omega t}$ para distintos valores de ω . Donde todos los campos son las transformadas de los campos electromagnéticos, estas funciones son independientes y ortogonales porque forman un conjunto base, cada uno de estos términos es en general una cantidad compleja, pero su suma debe ser real porque lo es la función original.

Por la linealidad de las ecuaciones de Maxwell y de la mayoría de las operaciones realizadas sobre los campos es posible escribir:

$$\mathcal{L}[F(r, t)] = \mathcal{L} \int_0^{\infty} \mathfrak{Z}(r, \omega) e^{i\omega t} d\omega = \int_0^{\infty} \mathcal{L}[\mathfrak{Z}(r, \omega) e^{i\omega t}] d\omega$$

Donde se observa que la aplicación de un operador lineal a la función original en el dominio del tiempo equivale a la superposición de la aplicación del operador a las armónicas de la representación. Por lo tanto la representación de Fourier nos permite trabajar con cada armónica de la representación por separado y al final recomponer por superposición el resultado. Esto lleva a que el análisis de las propiedades de las señales armónicas sea de interés y sea el tipo de señales utilizadas para análisis.

Otro punto importante son los fasores. Se denomina fasores a las funciones armónicas porque se las puede pensar como una cantidad cuya fase varía en el tiempo. Por ejemplo $g(t) = g_0 \cos(\omega t + \theta_0)$ representa un fador de amplitud g_0 y fase inicial θ_0 . Se puede pensar en un plano complejo de modo que las proyecciones sobre el eje imaginario y el eje real son, respectivamente $g(t) = g_0 e^{i(\omega t + \theta_0)}$ por lo tanto esto implica que la parte real de esta función es equivalente a $g_0 \cos(\omega t + \theta_0)$. Y la parte imaginaria corresponde a $g_0 \sin(\omega t + \theta_0)$.

3.3.3 Promedio temporal

En muchas ocasiones la cantidad significativa es el promedio temporal o valor medio de las magnitudes en estudio. Si $f(t)$ es una función periódica de periodo T , se define el valor medio como:

$$\langle f \rangle = \frac{1}{T_0} \int_0^{\infty} f(t) dt.$$

Si $f(t)$ no es una función periódica se define el valor medio

$$\text{Como } \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T_0} \int_0^T f(t) dt$$

Se puede demostrar que para dos funciones armónicas de igual frecuencia representadas por fasores.

$f(t) = \text{Re} \{ f_0 e^{i \omega t} \}$ y $g(t) = \text{Re} \{ g_0 e^{i \omega t} \}$ el promedio temporal sería:

$$\langle fg \rangle = \frac{1}{T_0} \int_0^T f(t)g(t) dt = \frac{1}{4} (f_0 g_0^* + f_0^* g_0) = \frac{1}{2} \text{Re} (f_0 g_0^*) = \frac{1}{2} \text{Re} (f_0^* g_0)$$

3.3.4 Soluciones a las ecuaciones de Maxwell.

En el vacío es posible hallar una solución general de las ecuaciones de Maxwell en términos de los potenciales electrodinámicos o potenciales retardados vectorial A y escalar Φ :

$$E(r, t) = -\nabla \Phi(r, t) - \frac{\partial A(r, t)}{\partial t} \qquad B(r, t) = \nabla \times A(r, t)$$

Estos potenciales no son independientes, sino que están relacionados por la condición de Lorentz: $\nabla \cdot A + \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0$

Con la introducción de los potenciales electrodinámicos, las ecuaciones de Maxwell llevan a las siguientes ecuaciones de onda vectoriales inhomogéneas:

$$\nabla^2 \Phi(r, t) = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 \Phi(r, t)}{\partial t^2} = \rho(r, t)$$

$$\nabla^2 A(r, t) - \frac{\partial^2 A(r, t)}{\partial t^2} = \mu_0 j(r, t)$$

Donde $c = \sqrt{(\mu_0, \epsilon_0)}$ representa la velocidad de la luz.

3.4 Entornos para modelos de las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia.

Las ecuaciones de Maxwell y sus soluciones generales permiten resolver cualquier problema electromagnético.

La aplicación práctica de estas soluciones es difícil y habitualmente no es posible obtener soluciones analíticas. Por otra parte, el mismo nivel de generalidad de este análisis esconde a veces características fundamentales de los fenómenos que son los que habitualmente importan desde el punto de vista de ingeniería.

Por ello se introduce, cuando es posible la modelización en el dominio de la frecuencia que lleva a simplificar el tratamiento de los modelos. Se puede particularizar más aun la simplificación de estos modelos observando el comportamiento límite para frecuencias muy bajas.

3.4.1 Caso estático

Para un entorno de análisis estático puro, los campos y sus fuentes no dependen del tiempo. Se trata de distribuciones de carga en reposo y corrientes estacionarias continuas. Las ecuaciones de Maxwell se escriben en este caso:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho(r)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(r) = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(r) = \mathbf{j}(r)$$

Y se ve que los campos eléctricos y magnéticos están desacoplados es decir, la mutua dependencia que surge de las leyes de Faraday y de Maxwell-Ampere solo opera cuando los campos dependen del tiempo. El campo eléctrico depende de la distribución de cargas y el campo magnético de la distribución de corriente. En el caso general estas distribuciones están acopladas entre sí por la ecuación de continuidad pero en el caso estático no. Como se observa en la siguiente expresión:

$$\nabla \cdot \mathbf{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \Rightarrow \nabla \cdot \mathbf{j} = 0$$

En términos de los potenciales electrodinámicos, los campos en el vacío se pueden escribir como:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\nabla \Phi(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r})$$

Y los potenciales electrodinámicos se convierten en los correspondientes potenciales estáticos:

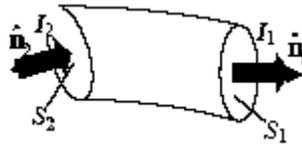
$$\nabla^2 \Phi(\mathbf{r}) = \frac{\rho(\mathbf{r})}{\epsilon_0} \Rightarrow \Phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(\mathbf{r}')}{R} dV'$$

$$\nabla^2 A(\mathbf{r}) = \mu_0 \mathbf{j}(\mathbf{r}) \Rightarrow A(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}')}{R} dV'$$

Se observa que toda referencia al tiempo se ha eliminado y ya no existe retardo entre la fuente y el campo. Existe una acción a distancia instantánea. Por otra parte, al estar desvinculadas las distribuciones de carga y de corrientes, estos potenciales estáticos son independientes, como lo son los campos entre sí. De estas ecuaciones surgen las siguientes propiedades de los campos estáticos: $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$

Las corrientes que satisfacen esta ecuación se denominan corrientes estacionarias o corrientes continuas. Si se integra esta ecuación al recinto formado por un trozo de conductor por el que circula una corriente se puede demostrar que las corrientes que atraviesan secciones cualesquiera son siempre las mismas: $I_1 = I_2 = I_3 = \text{constante}$. O sea que la corriente es la misma a lo largo de todo el circuito. El resto del análisis conlleva a un estudio propio de las ecuaciones de Maxwell pero el presente servirá para comprender de qué manera puede dañar equipo electrónico, que se abordará en el capítulo 5.

Figura 7. Representación de corrientes en un conductor



3.5 Representación de las señales de interferencia

Las señales de interferencia se expresan en términos de su representación temporal (en el dominio del tiempo) o en su representación espectral (en el dominio de la frecuencia), estas dos representaciones están ligadas entre sí por la transformada de Fourier que consiste en una serie de Fourier para funciones periódicas en el dominio del tiempo y una integral de Fourier para funciones no periódicas en el dominio del tiempo.

Señal periódica con período T:

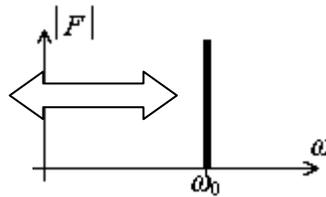
$$F(r, t) \Leftrightarrow \mathfrak{F}(r, \omega) \Rightarrow F(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \mathfrak{F}_n(r) e^{in\omega_0 t}$$

Señal no periódica:

$$F(r, t) \Leftrightarrow \mathfrak{F}(r, \omega) \Rightarrow F(r, t) = \int_0^{\infty} \mathfrak{F}(r, \omega) e^{it\omega} d\omega$$

En el primer caso el espectro consiste en el conjunto numerable (discreto aunque infinito) de coeficientes complejos $\mathfrak{F}_n(r)$ para cada frecuencia armónica $\omega_n = n\omega_0$ donde ω_0 es la frecuencia fundamental $\omega_0 = 2\pi/T$, mientras que en el segundo se trata de la función compleja de la frecuencia $\mathfrak{F}(r, \omega)$. Por ejemplo, la función periódica $\sin(\omega_0 t)$ tiene un solo coeficiente de Fourier para $\omega_n = \omega_0$. En la figura se abajo se representa la función seno.

Figura 8. Función periódica seno



Un tren de pulsos de período T y ancho ω tiene la representación de la siguiente forma:

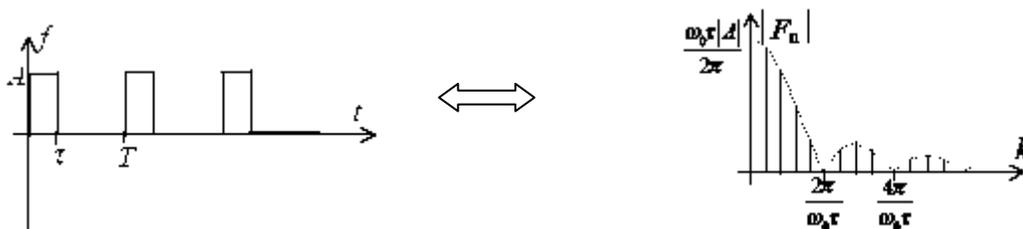
$$f(t) = A \sum_{n=1}^{\infty} [H(t - nT) - H(t - nT - \zeta)] \sum_{n=0}^{\infty} \frac{iA}{2\pi n} (e^{-in\omega_0 \zeta} - 1) e^{in\pi\omega_0 \zeta}$$

De donde los coeficientes de fourier son:

$$F_n = \frac{iA}{2\pi n} (e^{-in\omega_0 \zeta} - 1) \Rightarrow |F_n| = \frac{\omega_0 \zeta |A|}{2\pi} \frac{\text{sen}(n\omega_0 \zeta)}{n\omega_0 \zeta} = \frac{\zeta |A|}{n\pi \zeta/T} \frac{\text{sen } n\pi \zeta/T}{n\pi \zeta/T}$$

Y queda la representación gráfica en la figura 8.

Figura 9. Representación de un tren de pulsos por medio de la serie de fourier

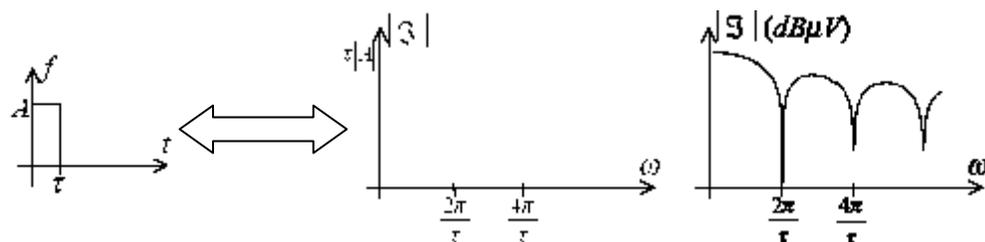


A medida que aumenta el período (o disminuye el factor de servicio del tren de pulsos la densidad de coeficientes aumenta, hasta que, en el límite la serie de fourier se transforma en la integral de fourier cuyo módulo es la envolvente de los valores absolutos de los coeficientes:

Los ceros de la integral de fourier se verifican para las frecuencias $\omega_k = 2k\pi\zeta$ Para señales digitales el ancho de pulso es del orden de los nanosegundos lo que lleva a el primer cero del espectro de fourier el cual se halla de 6 a 10 Ghz, dentro del espectro de microondas, por lo que para la mayoría de las aplicaciones practicas basta con considerar esta primera parte del espectro.

En la figura 9 se muestran la señal en el dominio del tiempo y la representación en el dominio de la frecuencia en amplitud y en decibeles (dB). En este último grafico la curva tiende a menos infinito para los ceros de la amplitud del espectro.

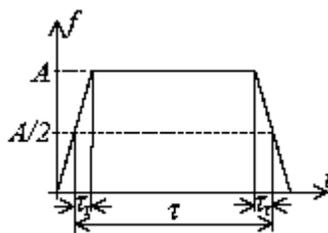
Figura 10. Representación de una señal por la integral de fourier.



En las situaciones reales los pulsos no pueden subir o bajar abruptamente de intensidad, de manera que tendrán un tiempo de crecimiento ζ_r definido como el intervalo desde cero al valor máximo A de la señal y un tiempo de caída ζ_f definido como el intervalo desde el máximo A hasta cero. Estos valores son no nulos, lo que altera el espectro de fourier.

Para simplicidad se acostumbraba considerar un pulso en forma de trapecio, cuyos tiempos de subida y caída son iguales ($\zeta_f = \zeta_r$). El ancho del pulso ζ se mide entre los puntos de altura mitad $A/2$. En la figura se esquematiza el pulso trapezoidal.

Figura 11. Representación de un pulso en forma trapezoidal.



3.6 Bandas de propagación de ondas en la ionosfera

Se aborda a continuación el comportamiento genérico respecto a la comunicación de larga distancia de las distintas bandas de radioaficionado, que será en ellas donde se basa la presente investigación, al estar uniformemente distribuidas por todo el espectro de frecuencias de la alta frecuencia HF y ser accesibles con los menores trámites administrativos y legales.

Se hace la salvedad de que la banda de 1.8 Mhz, correspondiente a 160 metros de longitud de onda, no pertenece en realidad a la HF sino a las frecuencias medias o MF, pero se incluye aquí porque su uso puede ser en algunas situaciones, determinante para conseguir el enlace deseado.

3.6.1 Banda de 1.8 MHz

En la banda de 1.8 Mhz, 160 metros de longitud de onda.

Sufre extrema absorción en la capa D durante el día, aunque las señales emitidas bajo ángulos muy altos pueden retornar a la tierra, proporcionando durante las horas diurnas un alcance de hasta 125 Km., aproximadamente. Durante la noche al disiparse la capa D, las señales emitidas con ángulos de radiación bajo proporcionan alcance de varios miles de kilómetros. Los ruidos estáticos y los procedentes de las tormentas son muy abundantes durante el verano, llegando a veces a hacer imposible su uso. Es por tanto una banda nocturna y de utilización preferente durante el invierno.

3.6.2 Banda de 3.5 MHZ

Para la banda de 3.5 Mhz, 80 metros de longitud de onda, el comportamiento es muy parecido a la banda de 1.8 mhz pero sin tanta absorción diurna por lo que su alcance puede llegar durante el día hasta los 400 Km.

Durante la noche sus señales pueden llegar al máximo, manteniéndose la sensibilidad a los ruidos estáticos y a los producidos por las tormentas. Es pues una banda nocturna e invernal como la anterior.

3.6.3 Banda de 7 MHZ

En el caso de la banda de 7 Mhz, 40 metros de longitud de onda esta es la banda de frecuencia más baja en la que se aprecia la existencia de una zona de silencio o de Skip. Se puede utilizar durante el día para comunicaciones hasta una distancia de unos 800 Km., distancia que variará en función de la hora solar en el punto donde se realiza la primera y en general única refracción diurna, lugar que esta situado normalmente en la mitad del trayecto entre el punto de emisión y el de recepción.

Durante la noche posibilita comunicaciones alrededor del mundo entero, aunque de nuevo una cierta sensibilidad a los ruidos estáticos y a los producidos por tormentas provoca cierta incomodidad durante los meses de verano, sin llegar al extremo de las dos bandas anteriores, por lo que se puede usar durante las horas nocturnas tanto en invierno como en verano.

3.6.4 Banda de 10 MHZ

La Banda de 10 MHZ, 30 metros de longitud de onda. Posee características comunes a las bandas diurnas y nocturnas, pudiéndose utilizar hasta los 1600 Km. durante el día y proporcionando un enlace mundial durante la noche. Si bien en general puede ser considerada una banda de uso durante las 24 horas, durante las épocas de mínimo solar la máxima frecuencia utilizable MUF puede caer por debajo de los 10 Mhz, pasando entonces a poseer el perfil de las bandas diurnas de frecuencias más altas. Es la banda de frecuencia más baja en la que se hace notar el efecto de las variaciones debidas al ciclo solar.

3.6.5 Banda de 14 MHZ

La banda de 14 MHZ, 20 metros de longitud de onda. Es la banda más usada para la comunicación de larga distancia "CLD", pues esta siempre disponible durante las horas diurnas con independencia de la influencia del ciclo solar, aunque en los momentos de máxima actividad de este queda abierta para las comunicaciones también durante toda la noche, pues es una frecuencia lo suficientemente elevada como para no sufrir una gran absorción en la capa D y al mismo tiempo lo suficientemente baja como para refractarse de una forma adecuada en las capas F_1 y F_2 .

Presenta una zona de silencio apreciable no siendo de gran perturbación los ruidos estáticos sobre las comunicaciones. Todas estas características positivas generan un importante problema que es la gran congestión existente en esta banda, lo cual produce frecuentes interferencia entre las distintas transmisiones.

3.6.6 Banda de 18 MHZ

La banda de 18 Mhz, 17 metros de longitud de onda. Similar en muchos aspectos a la banda de 21 Mhz que describiremos a continuación pero sin una influencia tan marcada de la actividad solar. Durante los años de elevada actividad solar es utilizable durante el día y las primeras horas de la noche para comunicaciones en todo el mundo, mientras que los períodos en lo que esta actividad es moderada se cierra para todas la comunicaciones inmediatamente al anochecer. En los períodos de baja actividad solar es utilizable únicamente en las horas del día en trayectos norte-sur y solo en latitudes medias o en el Ecuador.

3.6.7 Banda de 21 MHZ

La banda de 21 Mhz, 15 metros de longitud de onda. Su Comportamiento muy similar a la banda de 14 Mhz pero con una gran dependencia de la actividad solar. En los años en los que esta es máxima se mantiene durante todo el día y hasta muy avanzada la noche a las comunicaciones con todo el mundo, pasando a ser una banda diurna en los años de actividad solar media y cerrándose completamente los años de baja actividad solar.

3.6.8 Banda de 24 MHZ

La banda de 24 Mhz, 12 metros de longitud de onda. Banda fundamentalmente diurna durante los períodos de moderada y baja actividad solar, siendo utilizable hasta bien avanzada la noche siendo los máximo de la misma. Nunca queda sin actividad salvo en los años de mínimo solar en latitudes altas. Incluso tiene actividad esporádica en la capa E desde el final de la primavera hasta el otoño, aunque a veces puede ser utilizable en ciertos períodos del invierno.

3.6.9 Banda de 28 MHZ

La banda de 28 Mhz, 10 metros de longitud de onda. Es la banda con variaciones más extremas respecto al ciclo solar, durante cuyos máximos es posible establecer comunicaciones a grandes distancia utilizando muy poca potencia en el transmisor durante el día y hasta horas muy avanzadas de la noche. Al ir decayendo la actividad solar va recortándose el número de horas que es utilizable, llegando a quedar totalmente sin propagación durante los años del mínimo solar. También se activa esporádicamente la capa E desde finales de abril hasta mediados de agosto con total independencia del ciclo solar.

3.7 Frecuencia óptima de trabajo

Si se establece comunicaciones entre dos puntos de la superficie terrestre separados por una determinada distancia, se necesita conocer el intervalo de frecuencias que se puede utilizar utilizar.

Al utilizar frecuencias muy altas puede suceder que estas no se reflejen en la ionosfera y escapar al espacio exterior.

Además si se utilizan frecuencias muy bajas se obtendrá una comunicación con ruidos excesivos y utilizando potencias mayores de las estrictamente necesarias. El intervalo de frecuencias utilizables esta limitado para cada lugar y momento por la frecuencia máxima utilizables y la frecuencia mínima utilizable es decir la MUF y LUF.

La máxima frecuencia utilizable se obtiene multiplicando la frecuencia crítica por un factor que manifieste la relación existente entre las distancia de transmisión, el ángulo de elevación de la onda transmitida y la capa ionosférica donde se efectuó la refracción.

La dificultad principal para la obtención de este factor va a ser la variación de la ionización en las distintas capas ionosféricas, las cuales se corresponde con la distinta radiación solar durante el día y la noche, durante las distintas estaciones del año y a lo largo del ciclo solar de los once años.

La LUF va a venir determinada por la absorción ejercida por la capa D que va a ser inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia utilizada. Dado que la utilidad o no de una señal determinada para la realización de una comunicación va a venir determinada por el hecho de que la relación señal/ruido de la onda recibida sea mayor que la permitida por el receptor utilizado, la LUF va a estar influida por todos aquellos factores que modifiquen la cantidad de energía que finalmente llegue al lugar de recepción, siendo mayor cuando más lo sean las pérdidas sufridas por la onda en su camino desde el emisor hasta el receptor, cualquiera que sea el origen de las mismas. Cuando se incrementa la potencia de transmisión, disminuyen las perdidas de propagación ionosféricas o se mejora el rendimiento de las antenas se obtiene un descenso, a veces muy importante de la mínima frecuencia utilizable.

Entre ambos límites se sitúa la frecuencia óptima de trabajo o FOT, que como ya se ha mencionado, se obtiene de una manera empírica multiplicando por el factor 0.85 el valor medio mensual de la MUF para el circuito en cuestión.

Una vez teniendo en cuenta todos los efectos mencionados anteriormente, el principal objetivo será la determinación de la frecuencia crítica para un determinado circuito, lo cual se abordará a continuación, no resultará fácil dada su dependencia de múltiples factores, algunos de los cuales van a resultar a efectos prácticos casi aleatorios.

Se denomina f_{0x} a la frecuencia crítica de la capa x, siendo la máxima frecuencia reflejada desde esa capa. Así f_{0E} y f_{0F_2} son las frecuencias críticas de las capas E y F_2 respectivamente en una situación determinada, que estará relacionada con las densidades electrónicas máximas en la misma.

La densidad electrónica crece con la altura, siendo mínima en la capa D y máxima en la capa F_2 por lo que f_{0F_2} será siempre mayor que f_{0E} y tomándose como válida, en general y para incidencia vertical, la igualdad: $MUF = f_{0F_2}$. Como se estudio anteriormente la frecuencia de plasma f_N se puede expresar con bastante aproximación como: $f_N = 9 N^{1/2}$. Siendo N la densidad electrónica en una capa determinada y f_N la frecuencia en Hertz.

Si se toma N_m como el valor máximo de la densidad electrónica en una capa, todas las ondas con incidencia vertical y con una frecuencia menor a su frecuencia de plasma serán capaces de volver a la tierra, estando la frecuencia crítica expresada por lo tanto como: $F_0 = 9N_m^{1/2}$.

Se pueden ver algunos valores habituales en la tabla I, aunque desgraciadamente estos valores solo sirven como referencia ya que para un mismo recorrido se puede observar grandes variaciones en la frecuencia crítica con el transcurrir del día, con los cambios de estación a lo largo del año y con los años dentro del ciclo de los once años.

Además entre otros aspectos que hay que tomar en cuenta para la elaboración de la tabla I son los cambios de estación a lo largo del año y con los años dentro del ciclo de los once años, sin contar con la posible ocurrencia de variaciones en la propagación prevista, debida a irregularidades en la radiación solar y a otros fenómenos como las esporádicas capas ionosféricas E, auroras boreales, etc.

Tabla I. Parámetros ocasionados por tormenta solares.

Capa ionosférica	Período	Concentración E	Frecuencia Critica MHz
D	½ día	$10^8 - 10^9$	0-09 – 0-28
E	½ día	10^{11}	2.8
F1	Día	2×10^{11}	4.0
F2	Día	10^{12}	9.0
F3	Noche	5×10^{10}	2-0

Se puede tener una apreciación de esta variabilidad de las condiciones considerando que se han determinado valores de la f_0F_2 que no alcanzaban los 2 Mhz durante los años mas bajos del ciclo solar y tan altos como 15 Mhz en presencia de esporádicas capas E, pudiéndose considerar como normal un valor de 10 Mhz.

4. CALIDAD Y EFECTO DE LA SEÑAL DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA ANTE UNA TORMENTA SOLAR

4.1 Fenómenos de señal

Otro factor a tener en cuenta y tan importante como la frecuencia máxima utilizable MUF para un determinado recorrido es la calidad de la señal obtenida, pues de nada nos serviría una señal con una aceptable relación señal/ruido si la distorsión sufrida durante el trayecto es de tal magnitud que imposibilite la decodificación de la misma. Una onda electromagnética sufre durante su recorrido desde el punto de emisión al de recepción diferentes alteraciones, siendo las más importantes para el caso de una onda reflejada en la ionosfera la debida a la atenuación, retardo, *fading* o desvanecimiento, desplazamiento en frecuencia (doppler), dispersión en frecuencia, en tiempo y distorsión de retardo.

Si se toma una señal compleja y por tanto con distintas frecuencias dentro de un ancho de banda, denominadas $E(t)$ y se transmite de un punto a otro de la superficie terrestre, realizando este proceso mediante una única reflexión ionosférica. Como toda onda que cruza un medio físico sufrirá retardo, al ser la ionosfera un medio dispersivo, las distintas frecuencias que componen nuestra onda recorrerán caminos ligeramente distintos, lo cual conducirá a retardos también distintos para las mismas. A esta nueva onda compleja, distorsionada por el retardo temporal, la denominaremos $E'(t)$.

Sabemos también que nuestra onda va a sufrir atenuación y desvanecimiento aleatorio, el primero de estos procesos debido a que el proceso de refracción ionosférica no tiene un rendimiento tal del 100 % y el segundo producido por súbitas variaciones de los valores de ionización debidas a su vez a alteraciones de la radiación solar en el punto de la ionosfera donde se produce la refracción.

Está multiplicidad de procesos podemos incorporarla a nuestra onda $E'(t)$ multiplicándola por una ganancia aleatoria expresada por $G(A, v, s, t)$ donde: A representa la atenuación con un valor entre 0 y 1, “ v ” y “ s ” representan el fading en términos de desplazamiento y dispersión de frecuencia respectivamente, y “ t ” el tiempo.

Ahora la onda recibida $E_R(t)$ tendrá la siguiente expresión:

$$E_R(t) = G(A, v, s, t) E'(t-t)$$

Se debe ahora tener en cuenta el hecho de que esta onda puede haber sido reflejada por las capas E o F_1 , y que además puede haberse dividido en dos haces, uno ordinario y otro extraordinario, debido al efecto del campo magnético terrestre y que finalmente puede haber llegado mediante un único salto o mediante varios. Todas estas posibles variaciones configuran los distintos modos de transmisión de una onda. Para el modo j -ésimo salto se obtendrá la siguiente expresión:

$$E_{Rj}(t) = G_j(A_j, v_j, s_j, t_j) E'(t-t_j)$$

Y la señal recibida, expresada como resultado de la suma de los diferentes saltos tendrá finalmente la siguiente expresión: $E_{Rj}(t) = \sum_{j=1}^n G_j(A_j, v_j, s_j, t_j) \cdot E'(t-t_j)$. Si además se considera la señal que pueda llegar a través de la onda de superficie (onda de tierra), está sufrirá un retraso t_g diferente pero no tendrá variaciones aleatorias y la nueva expresión de la onda será: $E_g(t) = A_g(t-t_g) + \sum_{j=1}^n G_j(A_j, v_j, s_j, t_j) \cdot E'(t-t_j)$

La aparente complicación de está expresión se ve disminuida por el hecho de que la mayor parte de los distinto modos posibles sufre una fuerte atenuación siendo útiles tan solo unos pocos de ellos y siendo también frecuente el que no tenga influencia alguna de la onda de superficie debido al relativo alcance de la misma.

Se tratará ahora con detalles cada uno de los fenómenos anteriormente expuestos, su causa, magnitud, variabilidad y efecto sobre la onda transmitida.

4.1.1 Dispersión temporal

En la dispersión temporal para lo cual se denotara por las siglas t_j , la señal que se obtiene en el punto de recepción es en realidad la suma de las señales que han realizado recorridos muy distintos y que por tanto han sufrido distintos retrasos, dando lugar a una dispersión en el tiempo de la onda final. Esto es lógico si tenemos en cuenta que se puede estar recibiendo simultáneamente la señal propagada a través de la denominada onda de tierra junto a la refractada en la ionosfera, refracción que se ha podido realizar en varias capas de la misma simultáneamente y que por tanto ha dado lugar a distinto número de saltos durante su trayecto.

Se debe de tener en cuenta también la posibilidad de estar recibiendo además señales que han realizado distintos trayectos ionosféricos debido a la posible incidencia en la ionosfera bajo la influencia del campo magnético terrestre.

Todos estos procesos pueden interferir gravemente en la transmisión de datos cuando estos retrasos son de magnitud comparable al período de la información digital transmitida, es decir a la duración de la información que separa un estado digital del siguiente transmitido denominado Duración de Estado, denominando al fenómeno de interferencia de transmisión de datos como Interferencia Interestados.

Estudios recientes al respecto demuestran que existe una frecuencia por debajo de la MUF en la que la dispersión en el tiempo toma valores máximos. Valores que pueden servirnos como referencia son los siguientes para un recorrido de 2 mil quinientos Kms. podemos llegar a tener una dispersión temporal máxima de 3 ms, para mil de 5 ms y para 200 Km. puede llegar a 8 ms. Dichos datos son obtenidos en forma aleatoria debido a que el medio ionosferico donde se propaga la onda electromagnética sufre cambios constantes.

Se estudia por consiguiente como una elevación adecuada de la frecuencia a utilizar es algo básico para obtener elevadas frecuencias de transmisión de datos, estando limitada a la elección a un estrecho intervalo de frecuencia por debajo de la MUF, ya que si se desciende mucho por debajo de la misma, se incrementa notablemente la posibilidad de encontrar grandes retrasos por trayectos múltiples, y que por lo tanto se tenga que recurrir a la disminución del ritmo de transmisión de datos para poder excitar la interferencia interestados.

4.1.2 Desvanecimiento

Es frecuente que al analizar las señales recibidas en un receptor se note que fluctúan en amplitud y fase, fenómeno denominado desvanecimiento G_j , que se aprecia como disminuciones de la intensidad de la señal recibida, con un carácter periódico y de frecuencia variable, del que son responsables los cambios que sufre la ionosfera.

Estos son cambios básicamente en la curvatura del reflector ionosférico, rotaciones en los ejes de la elipse de polarización, variaciones temporales de la absorción y cambios en la densidad electrónica de la ionosfera. En trayectoria de 2,000 Km. el desvanecimiento más común es el producido por el amanecer y al anochecer con un ritmo típico de 10 a 40 desvanecimientos por minuto.

4.1.3 Dispersión en frecuencia

En la dispersión por frecuencia V_j , el desplazamiento en frecuencia que se produce para una trayectoria simple (de modo único) esta causado por las variaciones producidas en el tiempo de la altura de la capa reflectora y de la densidad electrónica. En el caso de que el transmisor y el receptor estén fijos y si h es el ángulo de fase para un determinado haz en un tiempo t , resulta: $V_j = fdh/ cdt$.

Los mayores desplazamientos en frecuencia debidos al efecto Doppler ocurren durante el día, con valores positivos relativamente elevados durante el amanecer y valores negativos durante el atardecer.

En los días en los que no hay grandes alteraciones ionosféricas se pueden obtener valores que oscilan entre 0.01 y 1 Hz para trayectos de salto único, siendo en general mayores para las trayectorias con reflexión en la capa F que para las que lo hacen en la capa D, incrementándose en mayor medida en las incidencias verticales que en la oblicuas.

No obstante, es frecuente encontrarse con desplazamientos entre 5 y 10 Hz durante la ocurrencia de grandes alteraciones ionosféricas, aunque solo durante unos pocos minutos. Puede servir como referencia el hecho de que durante las llamaradas solares se encuentren desplazamientos de 1 a 2 Hz.

4.1.4 Dispersión en tiempo

En la dispersión en el tiempo S_j , dado que cada modo de propagación está compuesto por un número determinado de rayos o haces con trayectorias ligeramente diferentes, cada uno de ellos sufrirá desplazamiento en frecuencia ligeramente diferente, resultando una dispersión de las frecuencias recibidas. Valores Aproximados en condiciones ionosféricas de tranquilidad podría ser de 0.02 Hz para las reflexiones en la capa E y de 0.15 Hz para las efectuadas en la capa F.

Esta dispersión en frecuencia modula cada pulso transmitido y contribuye al desvanecimiento periódico de los pulsos recibidos, aunque un período mayor que la duración típica de los mismos.

4.1.5 Dispersión por retardo

Por último se encuentra el parámetro conocido como dispersión por retardo t_j , el cual tiene su origen en el hecho de que el retardo sufrido por una onda depende de su frecuencia y por tanto no es constante para las distintas frecuencias contenidas en un ancho de banda determinado y en que la dispersión causada por la reflexión en la capa E es muy pequeña mientras que es de mayor magnitud si la capa reflectora es la F.

En lo que se refiere a la transmisión de datos la importancia de la distorsión por retardo esta relacionada con la tasa de cambio del retardo con la frecuencia y el tiempo, dado que un canal de propagación ionosférica no es estacionario ni en frecuencia ni en tiempo, aunque si se limita el ancho de banda a unos 10 Khz. y si se considera un tiempo lo suficientemente corto, alrededor de 10 minutos, se puede utilizar frecuentemente el modelo estacionario. De esta forma considerando un número discreto de modos de propagación de onda, se puede modelar el canal ionosferico mediante una línea de retardo con un número también discreto de dispersiones, cada una de las cuales estará modulada en fase y amplitud por un coeficiente que varía en el tiempo.

5. PROTECCIÓN A EQUIPO ELECTRÓNICO ANTE INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS

5.1 Definiciones y normas

Al analizar el daño que puede sufrir cualquier equipo por interferencias electromagnéticas, en este caso en particular la debida por tormentas solares tenemos que tomar en cuenta ciertos aspectos como es el caso de la compatibilidad electromagnética, por lo tanto surge la definición de la compatibilidad electromagnética la cual esta definida como la habilidad de un dispositivo, unidad de equipo o un sistema para funcionar satisfactoriamente en su ambiente electromagnético sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables a nada en ese ambiente, esta es la definición de compatibilidad electromagnética proporcionada por la directiva europea sobre este tema. La anterior definición de compatibilidad electromagnética, denotado por las siglas EMC, posee dos facetas:

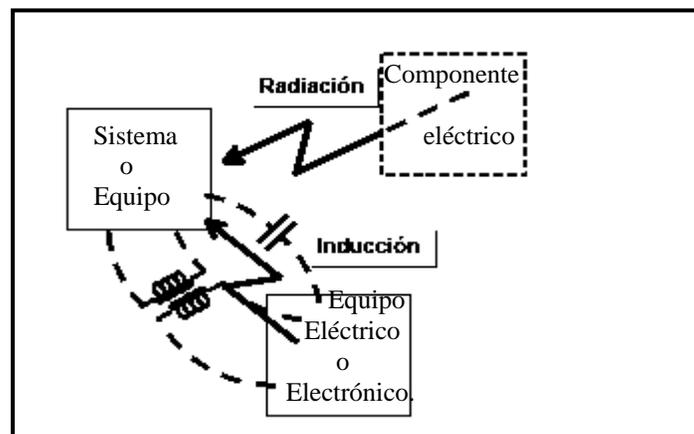
- La habilidad de un dispositivo, unidad de equipo o sistema para funcionar satisfactoriamente en un medio ambiente donde hay campos electromagnéticos causados por fuentes ajenas.
- La no introducción de perturbaciones electromagnéticas intolerables en el medio ambiente que puedan generar fallas de funcionamiento en otros dispositivos unidades de equipo o sistemas.

Es de notarse que la noción de EMC está ligada a un objeto: un dispositivo, una unidad de equipo o sistema, y es éste el que debe ser el objetivo del diseño, prueba y certificación a las que alude la norma.

Además hay que tener claro dos conceptos más, primero mencionemos el de perturbación electromagnética, el cual se entiende como cualquier fenómeno que pueda degradar el funcionamiento de un dispositivo, equipo o sistema, y afectar adversamente a materia inerte o viva.

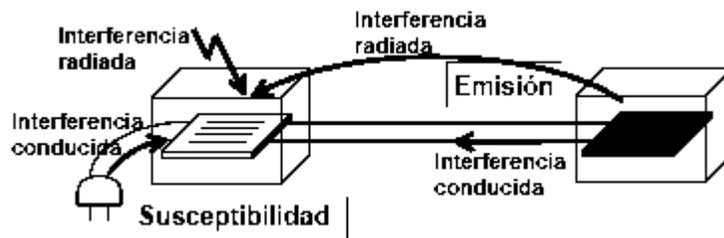
Tenemos por último, lo que es interferencia electromagnética, EMI, la cual consiste en la degradación del funcionamiento de un dispositivo, equipo canal de transmisión o sistema causada por una perturbación electromagnética.

Figura 12. Compatibilidad electromagnética.



Las acciones tendientes a asegurar la compatibilidad electromagnética de productos tecnológicos tienden a eliminar o hacer inofensivas estas interferencias. Esta doble calificación de la noción de compatibilidad electromagnética impone entonces dos clases de modelos y de criterios: los modelos y criterios de susceptibilidad o inmunidad y, los modelos y criterios de emisión.

Figura 13. Tipos de interferencia electromagnética.



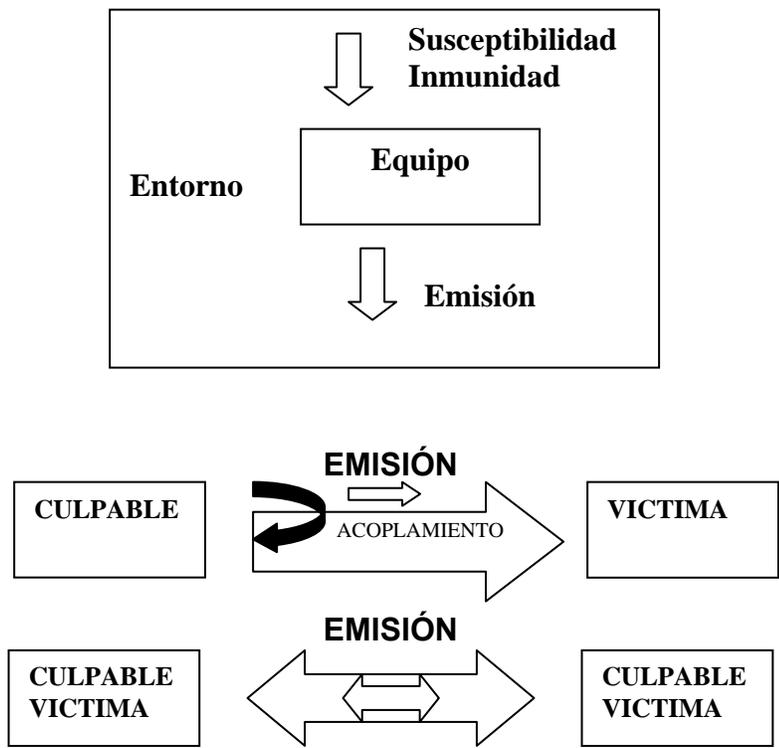
La susceptibilidad se refiere a la posibilidad del objeto de funcionar mal debido a las interferencias. Recientemente, se ha introducido la noción de inmunidad, que se refiere a la habilidad del objeto para funcionar en un ambiente con ruido electromagnético. Los criterios de emisión se refieren a la necesidad de que nuestro objeto no perturbe a otros objetos de su ambiente o a sí mismo.

En el estudio de este fenómeno, el objeto que genera interferencia se denomina culpable y el que es perturbado por esa interferencia, víctima. La acción de la interferencia se da a través de mecanismos de acoplamiento.

En muchos casos se producen interferencias mutuas ya que ambos sistemas son fuentes de perturbaciones electromagnéticas. Para que un objeto sea compatible debe satisfacer tres criterios:

- No produce interferencia sobre víctimas potenciales.
- No produce interferencia sobre sí mismo.
- No es susceptible (es inmune) a las emisiones de otros sistemas.

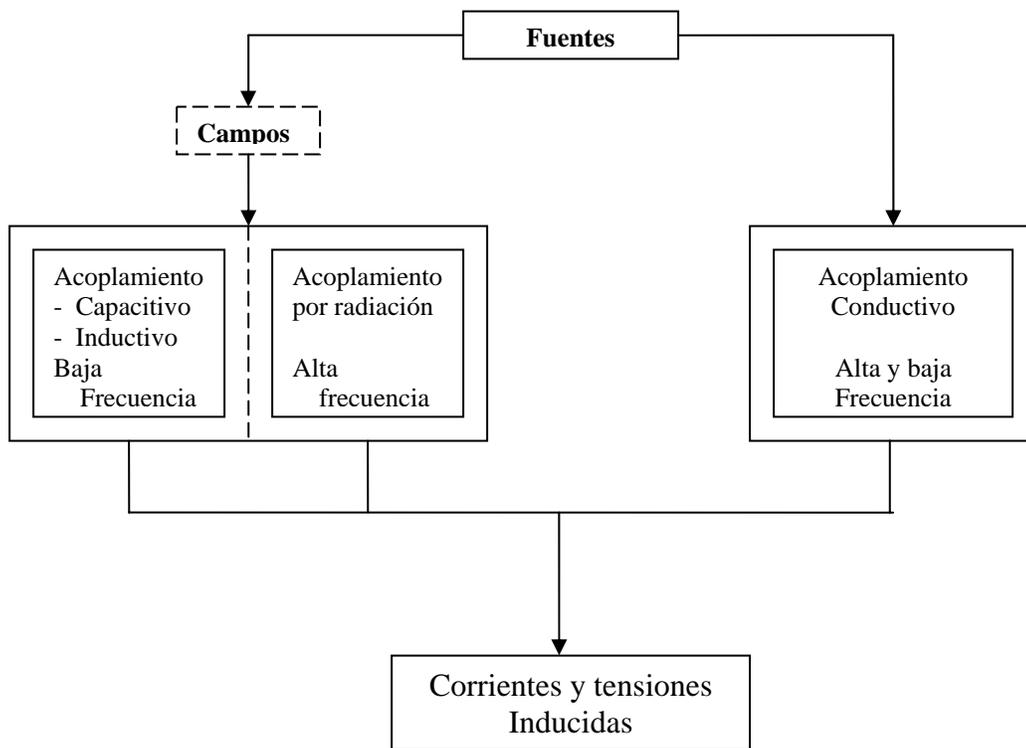
Figura 14. Entorno electromagnético.



Para lograr estos objetivos, se debe trabajar en tres aspectos en todas las etapas de producción de objetos tecnológicos:

- 1) Disminuir en lo posible la emisión de interferencias.
- 2) Disminuir la eficacia de los mecanismos de acoplamiento.
- 3) Aumentar la inmunidad del objeto a su ambiente electromagnético.

Figura 15. Formas de acoplamiento electromagnético.



5.1.1 Beneficios de un buen diseño para asegurar compatibilidad electromagnética.

De los muchos beneficios que surgen de un buen diseño para EMC se pueden destacar los siguientes:

- Seguridad: Recientemente la seguridad se ha convertido en una gran preocupación en el diseño de dispositivos electrónicos. Esto debido a la gran cantidad de equipos que surgen cada día al mercado mundial.

El número de casos de daños y heridas causadas por el mal funcionamiento debido a interferencias electromagnéticas se ha incrementado con la proliferación de artefactos eléctricos y electrónicos en todos los ámbitos de acción humana, como teléfonos celulares, computadoras portátiles, y la incorporación de componentes electrónicos en sistemas vehiculares cada vez más complejos, como automóviles y aviones.

- Reducción de costos: Es generalmente mucho menos costoso identificar y solucionar problemas durante la fase de diseño de un producto que durante la fase de producción. A menudo, cuando se identifica un problema en la fase de producción el producto debe regresar a la fase de diseño para corregir adecuadamente el problema.
- Aumento de confiabilidad: Técnicas apropiadas de EMC aplicadas durante la fase de diseño pueden incrementar la confiabilidad del producto. Soluciones de último minuto a menudo requieren el agregado de componentes extra que no sólo aumentan los costos, sino que incrementan la complejidad del sistema.
- Legalidad: Los dispositivos, equipos y sistemas electrónicos deben reunir diversos requerimientos legales en prácticamente cualquier país para poder ser comercializados, y las consecuencias legales de equipos mal diseñados que generen daños pueden llevar a costosos juicios y multas.

5.2 Creación de modelo para logro de compatibilidad electromagnética de sistemas y equipos.

La modelización de fenómenos de EMC surge desde el inicio del uso industrial de campos electromagnéticos. En 1926 se publica una teoría, aún usada hoy, para calcular el campo magnético creado por el retorno por tierra de las corrientes de las líneas de alta tensión. En 1934 se publica la teoría de la penetración de campos electromagnéticos a través de blindajes metálicos, que recién se usó para cálculos prácticos en la década de los 60.

Ante la necesidad de modelizar un fenómeno de EMC se puede seguir los siguientes pasos:

- Decidir si se usará un modelo en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia.
- Definir el entorno a usar.
- Construir el modelo de circuitos o de campos.
- Resolver el modelo para obtener valores casi exactos.
- Realizar mediciones o experiencias para validar el modelo, y
- Usar diversas leyes físicas o principios generales para validar el modelo. (Conservación de la energía, comportamiento a diferentes frecuencias, etc.).

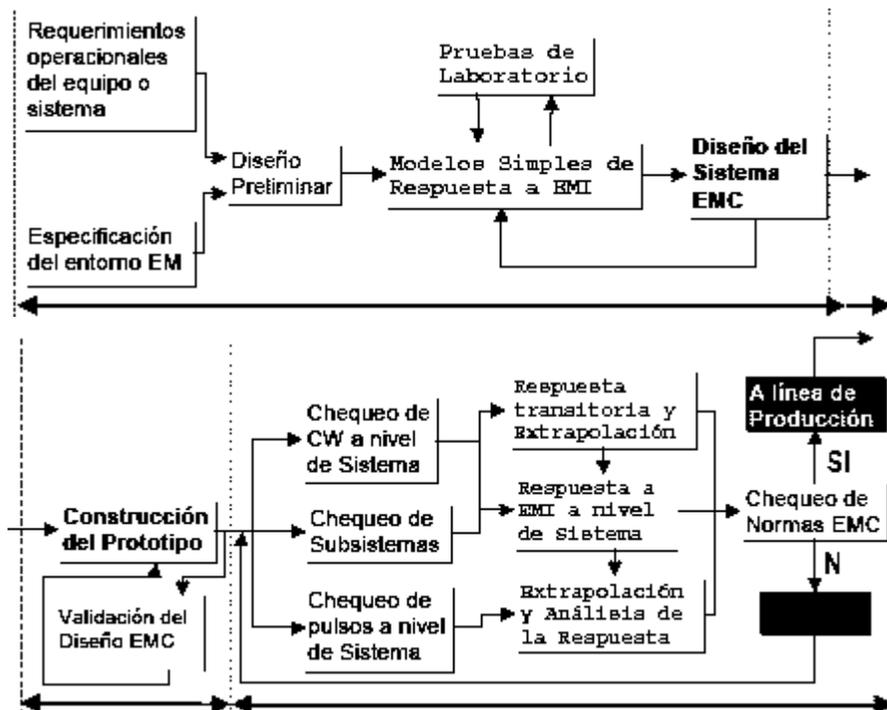
El entorno de modelización se elige de acuerdo a las características del problema. Puede haber situaciones donde sea necesario combinar diferentes entornos. Si el sistema es lineal, se pueden superponer los efectos de varias causas. En el desarrollo del modelo es fundamental determinar cuáles son los fenómenos esenciales que deben tenerse en cuenta para obtener un modelo válido y dejar de lado en un primer análisis los fenómenos secundarios.

Habitualmente, el objetivo de la modelización es predecir una forma de onda de tensión o corriente sobre determinados puertos de un circuito o la intensidad y/o distribución espacial de los campos en las cercanías del equipo. Siempre es necesario chequear la validez de la modelización mediante edición de prototipos del sistema en análisis. Esta etapa es generalmente la más difícil y costosa. Un desacuerdo entre las cantidades predichas por el modelo y las cantidades medidas debe llevar a modificar el modelo.

5.3 Desarrollo de sistemas bajo el criterio de compatibilidad electromagnética.

En la figura se esquematiza las fases de diseño, señalando los sitios donde se deben establecer modelos de comportamiento:

Figura 16. Fases de diseño para logro de EMC.



5.3.1 Fase de diseño

En esta fase se parte de los requerimientos operacionales del sistema, es decir, el conjunto de especificaciones y objetivos del mismo y la especificación del ambiente electromagnético en que deberá operar.

Si en determinado caso no se conocen las especificaciones, se realiza una especificación del peor caso o diversas especificaciones, como por ejemplo, uso hogareño, uso industrial, uso militar, etc.). A partir de estas especificaciones se realiza un diseño preliminar donde se establecen los modelos de acoplamientos más sencillos posibles y los niveles estimados de señales eléctricas dentro del sistema para ayudar a desarrollar el concepto de diseño de EMC y proveer a la protección del sistema. Estos niveles de variables como tensión, corriente y potencia permiten seleccionar los dispositivos adecuados para funcionar adecuadamente. También permiten señalar los sitios o subsistemas más sujetos a posibles fallas.

El diseño preliminar tendrá parámetros y hasta subsistemas ajustables que se probaran contra el ambiente electromagnético a fin de afinar el diseño. En esta etapa, que será habitualmente de aproximaciones sucesivas, los refinamientos van cambiando el modelo de EMC, a partir de modelos simples (por ejemplo, para modelos ideales) que se van complicando a medida que el diseño se hace más detallado.

A menudo es necesario realizar pruebas de laboratorio para chequear la validez de partes del modelo y observar la reacción entre distintos subsistemas diseñados por separado. Una vez incorporados todos los subsistemas al diseño se verifica el funcionamiento del sistema según especificaciones.

En esta etapa es habitual que deban realizarse modificaciones para llevar al sistema a cumplir las especificaciones de uso y las condiciones de EMC.

5.3.2 Fase de construcción

En esta fase aparte de la construcción propia del equipo o sistema pueden surgir desviaciones del comportamiento del sistema tanto en su operación como en su diseño de EMC, por lo que se deben realizar mediciones sobre el prototipo para ajustar el diseño.

5.3.3 Fase de verificación

Una vez que el sistema está construido, se requiere chequear que en todas sus operaciones y condiciones de uso no presenta problemas de EMC en el ambiente electromagnético de diseño. Para ello se deben realizar pruebas de inmunidad y pruebas de nivel de emisión, tanto con señales de onda continua como con pulsos, analizando el comportamiento de todos los subsistemas, especialmente aquellos considerados críticos para el buen funcionamiento o de mayor susceptibilidad a interferencias. En muchos casos es imposible chequear todas las situaciones de funcionamiento en sistemas complejos o en sistemas adaptativos, cuya respuesta depende de la índole del estímulo.

También es posible que no se cuente con todos los instrumentos o con el ancho de banda necesario para realizar las mediciones o éstas sean muy costosas. En este caso se procede a extrapolar los resultados de las mediciones realizadas a otra circunstancia mediante el uso del modelo.

En el caso de sistemas lineales esta extrapolación es simple y directa, mediante espectros y convolución. Para sistemas no lineales se requieren modelos confiables y un esfuerzo numérico importante. Muchas veces la respuesta del sistema a situaciones complejas puede deducirse de la respuesta a varias señales simples como pulsos, rampas, etc.

Las pruebas de emisión se realizan por separado de las pruebas de inmunidad, pero los conceptos de inmunidad y emisión están ligados teóricamente por la propiedad de reciprocidad electromagnética. Finalmente se define si el sistema satisface las normas de EMC vigentes en el lugar de comercialización. La falla de cumplimiento de alguno de estos criterios requiere el rediseño del sistema y la repetición de las fases de construcción y verificación.

El diseño aquí esquematizado puede ser costoso y llevar mucho tiempo, pero se ahorran infinidad de problemas en la comercialización y el uso de los equipos, que habitualmente tienen un costo mayor de llegar a los mercados o juicios legales derivados del mal funcionamiento.

5.4 Descripción topológica de sistemas de protección electromagnética

Una de las técnicas más usadas para lograr EMC, desde el punto de vista de la inmunidad, es el uso de barreras que impiden el paso de las señales de posible interferencia. Estas barreras pueden ser filtros, blindajes, acoples ópticos, etc. El concepto de barrera es muy antiguo y se remonta a las primeras aplicaciones de jaula de Faraday.

El problema fundamental de las barreras es que deben dejar pasar las señales que el sistema usa para su funcionamiento.

Se puede colocar un receptor de radio dentro de una jaula de Faraday, consiguiendo así que no llegue a su antena ningún campo de interferencia, pero tampoco llegará la señal deseada. Por lo tanto, las barreras presentan siempre discontinuidades o puntos de entrada por donde ingresan las señales que el sistema debe intercambiar con el ambiente para su funcionamiento. Las discontinuidades se deben proteger adecuadamente para evitar el ingreso de señales que puedan causar interferencia.

La descripción de las barreras electromagnéticas del sistema, desde el punto de vista de su naturaleza eléctrica y la existencia de mecanismos de penetración de señales indeseables, se conoce como topología electromagnética. Aunque existen tratamientos teóricos matemáticos de este concepto, lo cual sería objeto de un estudio por separado, el objetivo es su uso como una herramienta práctica para facilitar el análisis de EMC, por lo que se va a describir mediante un ejemplo. Consideremos por ejemplo un avión volando cerca de una tormenta.

El campo y las descargas eléctricas de la tormenta constituyen el entorno electromagnético en el que se encuentra el avión. Este entorno genera señales que causan la circulación de corrientes y la inducción de carga sobre la cubierta externa de metal y otras acciones en el interior del avión. Estas fuentes pueden causar interferencia en los circuitos de mando y comunicación del avión. Supongamos que deseamos estimar la tensión y corriente inducidas en un determinado circuito en el interior del avión. Para simplificar el proceso, conceptualmente es más sencillo considerar al sistema (avión) como una o más capas de blindaje, situadas una dentro de la otra, que excluyen la radiación exterior en su interior.

En este ejemplo la radiación incidente puede penetrar al sistema por tres vías o puntos de entrada:

- penetración de campos por la abertura en el fuselaje (por ejemplo, una ventana);
- penetración de tensiones y corrientes inducidas en la antena de comunicaciones;
- penetración por difusión de campos a través de las distintas capas de blindaje.

Estas penetraciones indican que el blindaje no es perfecto. Un sistema bien diseñado tiene un pequeño número de puntos de entrada en sus capas de blindaje y debe ser posible identificarlos con facilidad y asociar a cada uno un mecanismo de acoplamiento específico. En este ejemplo cada punto de entrada se puede modelizar por separado en forma sencilla.

La penetración por aberturas o puntos de entrada se modeliza con métodos de sistemas radiantes (modelos de alta frecuencia), la penetración a través de la antena se modeliza primero por la inducción de los campos externos sobre la antena, la propagación a lo largo de la línea de transmisión que une la antena a los circuitos susceptibles y finalmente aplicando un modelo circuital. La difusión de campos a través del fuselaje se modeliza por la propagación de ondas en medios metálicos.

El diseño de un sistema para EMC debe tener barreras bien definidas con un número limitado de puntos de entrada. Cada uno de estos puntos de entrada debe tener mecanismos de protección adecuados (filtros de línea y de señal, blindajes específicos, etc.).

Para un sistema complejo que se ha diseñado sin utilizar una topología electromagnética bien definida, puede ser difícil identificar los posibles mecanismos de interferencia o separarlos para analizarlos en forma independiente.

Esto lleva a que se debe analizar el sistema en toda su complejidad, lo que es muy difícil y está sujeto a errores. Por otra parte, el desarrollo de un plan de EMC es casi imposible. Estructurar el diseño a partir de su topología electromagnética no sólo lleva a una forma clara de organizar el diseño, sino que provee una forma simple de analizar, convalidar y verificar los modelos, porque es posible dividir el problema en un conjunto de penetraciones o puntos de entrada independientes que pueden analizarse y medirse por separado.

5.5 Normas y aspectos legales internacionales

El estudio de las interferencias surge a fines del siglo XIX con los primeros sistemas de comunicaciones, como el telégrafo, ante la interferencia causada por eventos naturales como caída de rayos sobre las líneas, en primera instancia y en este caso el provocado por las tormentas solares.

En 1934 la diseminación de transmisiones de radio era tan importante, que se creó una comisión regulatoria para definir reglas y recomendaciones: el Comité Internacional especial de Perturbaciones Radio eléctricas (CISPR). El aumento de las comunicaciones desde la segunda guerra mundial llevó a nuevas normativas. La mayoría de los países industrializados posee normas propias, y hay organismos internacionales que tratan de compatibilizar estas distintas normas. Los organismos nacionales más importantes son:

- FCC (*Federal Communications Commission, USA*)

- VDE (*Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik*, Alemania)
- BSI (*British Standards Institute*, Reino Unido)
- VCCI (*Voluntary Control Council for Interference by Information Technology Equipment*. Japón)

Los organismos internacionales más importantes son:

- IEC (*International Electrotechnical Commission*)
- CENELEC (*Comité Européen de Normalisation Electrotechnique*)

IEC, fue creado en 1906 para promover la cooperación internacional en todos los temas de estandarización en el campo de la tecnología eléctrica. Tanto IEC como CENELEC poseen Comisiones Técnicas (respectivamente TC77 y SC210A) que entienden sobre problemas generales de EMC. En ambas organizaciones los estándares producidos por estas comisiones son utilizados por Comités de Producto que los aplican a diferentes productos comerciales.

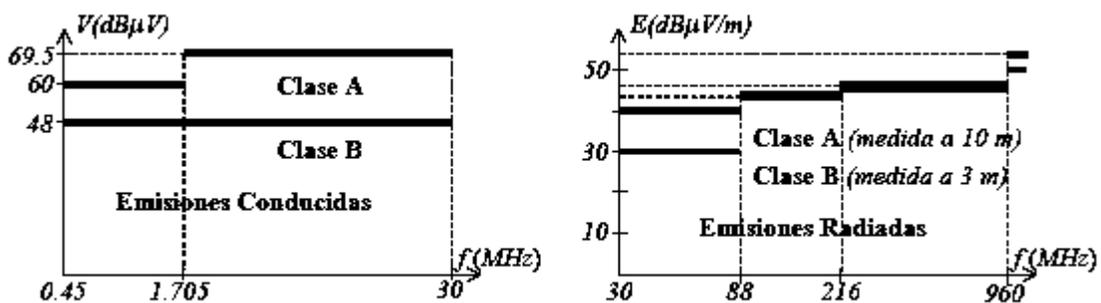
IEC ha desarrollado un acuerdo de colaboración con CISPR y cuenta con un organismo asesor sobre temas de EMC llamado ACEC.

A partir de un acuerdo reciente entre IEC y CENELEC esta última organización toma los estándares de IEC y los establece en la Comunidad Europea como estándares “armonizados” que son luego tomados por las autoridades de aplicación en los países miembros. IEC cuenta con acuerdos de colaboración y coordinación con organismos eléctricos internacionales y asociaciones de ingenieros para una mayor discusión de los aspectos técnicos de la estandarización.

Las regulaciones pueden ser obligatorias, como las estadounidenses de la FCC y las Directivas Europeas de la CE, o voluntarias, como la aprobación del VCCI en Japón. En cualquier caso, seguir las regulaciones de EMC puede dar ventajas comerciales dado que muchos mercados requieren la aprobación de algún ente regulador en cuestiones de EMC para comercializar productos.

La estandarización lleva a normas y estándares, que a su vez se traducen en regulaciones detalladas que se conocen como directivas. Las directivas establecen límites precisos a la emisión de interferencia, técnicas de control y prueba de equipos para satisfacer los estándares y normas. Hay estándares básicos que describen procedimientos de pruebas, y en algunos casos instrumentación y técnicas de calibración, mientras que los estándares más específicos de productos o aplicaciones usualmente definen límites, niveles de severidad y criterios de cumplimiento.

Figura 17. Valores límites de emisiones electromagnéticas conducidas y radiadas



Fuente: www.fcc.com

Todas las normas dividen a los equipos en Clase A (equipos de uso profesional o industrial) y Clase B (equipos de uso doméstico).

Los requerimientos generales de EMC en Estados Unidos están definidos por la comisión federal de comunicaciones (FCC), mientras que la administración de comida y drogas (*Food and Drug Administration*) FDA, regula los productos médicos. Los requerimientos obligatorios de la FCC conciernen primariamente con dispositivos de computación, definidos como cualquier dispositivo o sistema electrónico que genera y usa pulsos de temporización a una frecuencia por encima de 9,000 ciclos por segundo y usa técnicas digitales.

La parte 15 de la FCC cubre dispositivos de radiofrecuencia capaces de emitir energía de RF en el rango de 9 KHz. - 200 GHz. La medición debe hacerse de acuerdo a la norma ANSI C63.4-1992. La parte 18 cubre equipos industriales, científicos y médicos, definidos como cualquier dispositivo que use ondas de radio para propósitos industriales, científicos o médicos y no están diseñados para comunicaciones. Mientras que la mayoría de las regulaciones de la FCC sólo se ocupan de las emisiones, la FDA también requiere inmunidad para ciertos equipos que son usados para asegurar la vida (respiradores, alimentación, etc.).

Las Partes 15 y 18m de la FCC incluyen regulaciones así como aspectos técnicos y límites. La Parte 68, que gobierna los requerimientos técnicos para el registro de equipos terminales de telecomunicaciones, incluye prueba de picos debidos a rayos (inmunidad a picos). La Parte 15 actualmente tiene tres diferentes procedimientos para mostrar conformidad:

- Verificación, donde el fabricante o el importador llena un informe de pruebas que demuestran cumplimiento.
- Certificación, que requiere una revisión de la aplicación por la FCC, y el uso de un único número de identificación de la FCC.

Mientras en Europa las normas más extendidas son las emitidas por la Comunidad Europea, que produjo su primer directiva sobre EMC en 1989 (la Directiva 89/336/CEE). Esta directiva tenía como objetivos eliminar las barreras comerciales entre los países miembros, disminuir y controlar la emisión electromagnética del medio ambiente.

La directiva 89/336/CE ha sido modificada y complementada por otras Directivas posteriores y sigue en revisión y actualización. Los productos comercializados en los países miembros que cumplan con las condiciones mínimas descritas en la Directiva llevan una marca de conformidad, que se muestra en la figura, indicando este hecho.

Figura 18. Marca de la Comunidad Económica Europea



Las normas precedentes regulaban estándares de susceptibilidad de equipos e instalaciones. La Directiva 89/336/CEE es la primera que también incluyen regulaciones sobre la emisión de señales potencialmente dañinas.

Las normas europeas se clasifican como normas generales (de emisión y susceptibilidad/ inmunidad) o normas para productos específicos (de emisión y susceptibilidad/inmunidad).

6. MÉTODOS PARA REDUCIR ERRORES EN LAS COMUNICACIONES DEBIDO A INTERFERENCIAS

6.1 Métodos empleados para la detección de errores

En comunicaciones prácticamente todas las señales digitales producidas en la actualidad llevan asociados el proceso de detección o corrección de errores. El primer paso es reconocer la existencia de los mismos; es decir, debemos disponer de métodos que permitan la evaluación del número de errores. Posteriormente el número de errores se expresa como una Tasa de Error de BIT *BER (Bit Error Rate)*. Luego de reconocida la existencia de errores puede ser posible la identificación del mismo y la corrección. Se disponen de diferentes tipos de códigos y de formas para corregir errores: la retransmisión de un paquete de datos *ARQ* (a pedido cuando el receptor detecta la presencia de errores y solicita la retransmisión obligada, repitiendo la transmisión sin necesidad del pedido) y la corrección de errores de envío *FEC (Forward Error Correction)* que envía suficiente cantidad de bits de redundancia como para detectar el bit errado.

6.1.1 Formas de control de errores

Existen varias formas de detectar errores. La más usada es la que recurre a los bits de paridad. Para lo cual se tiene que tomar en cuenta los siguientes puntos:

- SEÑAL DE PRUEBA. Consiste en generar con un instrumento apropiado una secuencia periódica o seudo aleatoria. En el receptor la secuencia recibida se compara con una generada localmente y se cuenta el número de diferencias. Se trata de una cuenta exacta de errores pero requiere ocupar el canal con la señal de prueba.

- ERRORES DE CÓDIGO. Se trata de evaluar las violaciones al código de línea de la señal que se transmite.
- ALINEAMIENTO DE TRAMA. Consiste en contar errores que se producen en la palabra de alineamiento. Esta palabra es una secuencia conocida y repetitiva pero de corta duración, por lo que la cuenta no es exacta y lenta.
- BITS DE PARIDAD. Sobre la señal a transmitir se agregan bits de paridad que son recalculados en el receptor. Si el número de bits de paridad es suficientemente alto se puede conocer el bit errado y corregirlo.

6.1.2 Error de bit

A continuación se indica la relación que existe entre la tasa de error de bit BER y el número de errores cuando el método de conteo de errores es la palabra de alineamiento de trama. La cuenta no es exacta y por ello existe una probabilidad de contar errores. Si los errores están producidos por un ruido gaussiano se encuentran distribuidos en forma aleatoria y uniforme. En este caso el número de errores x en el tiempo T tiene una distribución Poisson. Es decir la probabilidad de contar un número de errores x se expresa como: $P(x) = \mu^x \cdot e^{-\mu} / x!$ (μ es el valor promedio de errores).

Por ejemplo, en una trama de 2048 kb/s se tienen 7 bit de alineamiento cada 512 bits (2 tramas). En un tiempo de 0,3 segundos el número de bits que se controlan son 8,400. Si se fija un umbral de $BER = 10^{-3}$ el valor promedio de errores será $\mu = 8,4$ (un error cada mil bits). Si se realiza la sumatoria de las probabilidades de contar menos de 8 errores en el período de tiempo se tiene:

$$\sum^8 P(x) = P(x=0) + P(x=1) + \dots + P(x=7) = 0,53$$

En pocas palabras: en 0,3 segundos hay una probabilidad del 47% de contar más de 8 errores con una BER de 10^{-3} . Es decir, si determinamos un tiempo de evaluación de 0,3 segundos y en el intervalo contamos 8 o más errores, la probabilidad que exista una BER de 10^{-3} es del 50% aproximadamente.

6.1.3 Bits de paridad por el método de chequeo de redundancia cíclica CRC-N

El método de Chequeo de Redundancia Cíclica CRC es el más utilizado para el cálculo de los bits de paridad. En general ya que este no es el punto central de la investigación, se mencionará que cuando se utilizan bits de paridad el cálculo mediante la CRC se indica sólo por el polinomio generador, que en este caso es X^4+X+1 .

6.1.4 Bits de paridad bip-n

El control de errores sobre los sistemas de la jerarquía digital sincrónica se efectúa mediante el criterio de Paridad Intercalada a Bloques BIP. Se divide la trama STM-1 en M grupos de N bits y controlando cada grupo mediante un bit de paridad. Se tiene así formado un control BIP-(N, M). Corresponde a un caso especial de CRC donde el polinomio generador es $XN+1$.

6.2 Métodos empleados para la corrección de errores

El pedido de respuesta automática denotado por sus siglas en inglés **ARQ** (*Automatic Repeat Request*). Consiste en la retransmisión de la información afectada por errores. ARQ es más simple que el método FEC y solo retransmite si hay errores. FEC elimina el protocolo a cambio de complejidad en el cálculo. ARQ no permite la transmisión en tiempo real (voz y vídeo).

Corrección de errores de envío, denotado por las siglas en inglés **FEC** (*Forward Error Correction*). Consiste en enviar bits de paridad suficientes para reconocer la información afectada por errores. Existe una gran cantidad de códigos del tipo FEC que permiten corregir errores.

Se dispone de las siguientes variantes:

- FEC a bloques. Las variantes más usadas son *BCH* y *RS (Reed-Solomon)*.
- FEC convolucional. Aplica el algoritmo de Viterbi.

6.2.1 Fec a bloques

Se denomina distancia Hamming entre dos códigos al número de símbolos en que se diferencian. La mínima distancia esta dada por $d_{min} > 2.t + 1$, donde t es el número de errores corregidos.

6.2.1.1 Código Hamming

Según la codificación Hamming el número de bits de paridad P necesarios para corregir un error en una secuencia de I bits de información debe cumplir con la desigualdad: $2P \geq 1 + I + P$. Para lo cual los parámetros definidos son:

- Longitud del bloque $N = 2^M - 1$
- Bits de información $I = M$
- Distancia mínima $d = 3$
- Corrección de errores 1 por bloque

6.2.2 Fec convolucional

La codificación FEC convolucional se presenta como el método más interesante para el futuro teniendo en cuenta la aplicación como modulación TCM (*Trellis Code Modulation*).

Mientras la entrada puede ser cero o uno, la salida será 00-11 ó 01-10. Dependiendo del nivel en que se encuentre (A, B, C, D) la codificación de un cero o uno de entrada es distinta. Como se observa en la siguiente tabla:

Tabla II. Ejemplo de codificación FEC

-entrada	0	1	1	0	0	1	1
-salida (FEC1/2)	00	11	10	10	11	11	10
-salida (FEC3/4)	00	1.	.0	10	1.	.1	10

6.2.2.1 Corrección de Viterbi

El método, denominado decodificación de máxima probabilidad o algoritmo de Viterbi-1976 (*Maximun Likelihood Metric* o *Minimun Distance Metric*), consiste en computar a cada camino un peso consistente en el número de diferencias acumuladas. Cuando se recibe un error (01 en lugar de 11) se encuentra que dicha secuencia es imposible; solo 2 errores consecutivos pueden simular un camino correcto. Detectado el error es necesario saber cual es; es decir, si se transmitió 00 o 11. Ambos caminos comienzan con un peso 1 (número de errores acumulados).

6.2.3 Corrección por pedido de repetición ARQ

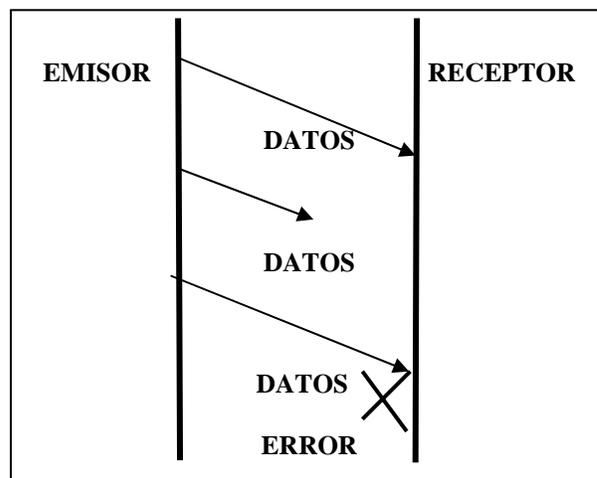
El ARQ (del inglés *Automatic repeat request*) es un protocolo utilizado para el control de errores en la transmisión de datos, garantizando la integridad de los mismos. Éste suele utilizarse en sistemas que no actúan en tiempo real ya que el tiempo que se pierde en el reenvío puede ser considerable y ser más útil emitir en el momento que correctamente un tiempo después. Esto se puede ver muy claro con una aplicación de videoconferencia donde no resulta de utilidad emitir el píxel correcto de la imagen 2 segundos después de haber visto la imagen.

Esta técnica de control de errores se basa en el reenvío de los paquetes de información que se detecten como erróneos (Esto quiere decir que no todos los paquetes de información se detectan como erróneos). A continuación lo que se necesita es un código que detecte el mayor número posible de errores ya que si se detecta un error lo que se hace es pedir una retransmisión por parte del emisor, y si no se detecta error alguno, se supone que la trama ha llegado sin errores. Existen tres tipos principales de ARQ:

- ARQ de parada y espera
- ARQ de envío continuo y rechazo simple
- ARQ de envío continuo y rechazo selectivo

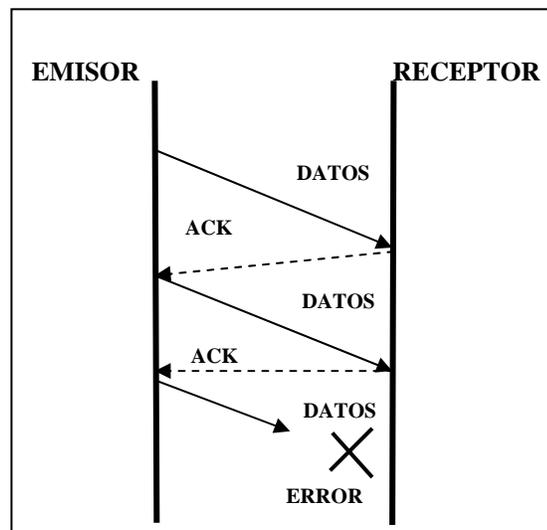
Si el emisor no recibe información sobre la recepción del paquete durante un tiempo fijado (*timeout*) éste se reenvía automáticamente. Esencialmente existen tres tipos de ARQ aunque en la práctica se combinen buscando el sistema óptimo para cada canal o estado de tráfico concreto. Lo más simple es ir enviando los datos trama a trama y que el receptor no juegue ningún papel, como se ve en la figura 20 si no se toma ninguna medida más, si llega algún error el bloque transmitido se pierde

Figura 19. Ejemplo de envío de datos



Para evitar la pérdida de información se pueden introducir los asentimientos o confirmaciones del receptor denotados como *ACK* como se puede observar en la figura 21. El emisor espera a que le llegue un asentimiento para enviar la trama siguiente.

Figura 20. Envío de datos con confirmación del receptor



Ahora no se pierde ninguna trama, pero un error hace que el sistema se bloquee ya que el emisor se queda esperando indefinidamente (lo que implica además una memoria en el emisor que sea infinita ya que tiene que almacenar toda la información que le va llegando pero no puede transmitirla). Evitar este problema es simple: no hay más que introducir un tiempo de espera máximo pasado el cual el emisor retransmite la trama. En este intervalo hay que tener en cuenta el tiempo de transmisión y propagación de la trama y del asentimiento y el tiempo máximo de proceso en el receptor.

La solución final y que parece resolver todos los problemas es introducir un bit en los asentimientos que distinguan los asentimientos a dos tramas consecutivas (de la misma forma que se distinguían dos tramas consecutivas).

6.3 Comunicaciones inalámbricas de banda ancha de distribución local de servicio multipunto

En la actualidad se encuentra un nuevo sistema para comunicaciones inalámbricas que se mencionará como una posible solución al tema de investigación de las tormentas solares, conocido como Sistema Local de Distribución Multipunto denotado por sus siglas en inglés LMDS (*Local Multipoint Distribution System*). La comunicación vía LMDS aparece como una prometedora tecnología de gran valor estratégico en el marco de las comunicaciones inalámbricas de banda ancha. El origen de LMDS se sitúa en 1,986 y se atribuye a Bernard Bosssard que concibió un proyecto de distribución de señales de vídeo analógico utilizando un esquema de emisión de radio en frecuencia modulada, con una estructura punto-multipunto, utilizando una zona del espectro nunca utilizada anteriormente: la banda de 28 GHz. Su importancia se debe fundamentalmente a tres razones:

- A. En primer lugar, los sistemas LMDS se pueden desplegar e instalar muy rápidamente en comparación con las tecnologías basadas en cable e incluso con relación a las inalámbricas. Además, estos sistemas pueden ser ampliados muy fácilmente.

- B. En segundo lugar, LMDS permite el acceso a Internet de alta velocidad, tanto para el sector residencial como para el empresarial, gracias a las técnicas digitales que se han incorporado recientemente.

C. Finalmente, esta tecnología presenta un importante potencial como tecnología de acceso (especialmente compatible con las redes de fibra óptica) para nuevos operadores que no dispongan de grandes recursos financieros.

6.3.1 Definición del Sistema de distribución local de servicio multipunto

Básicamente LMDS es una tecnología de comunicaciones inalámbricas de banda ancha en el marco multimedia. Estos sistemas utilizan estaciones base distribuidas a lo largo de la zona que se pretende cubrir, de forma que en torno a cada una de ellas se agrupa un cierto número de usuarios, generando así de una manera natural una estructura basada en células, también llamadas áreas de servicio.

Cada célula tiene un radio de aproximadamente 4 kilómetros (como promedio), pudiendo variar dentro de un intervalo en torno a los 2-7 kilómetros. Y como indica la primera sigla de su nombre “L” (local), la transmisión tiene lugar en términos de distancias cortas.

6.3.2 Factores claves de la viabilidad del sistema de distribución de servicio local multipunto.

A la hora de realizar la planificación y despliegue de un sistema inalámbrico punto a multipunto existen varios factores que deben tenerse en cuenta como lo son: zona geográfica del terreno, densidad de abonados, consumo de tráfico, calidad de servicio requerida, balance de potencias del enlace radio, tamaño y número de celdas, reutilización de frecuencias, etc.

Hasta hace pocos años, se creía que las frecuencias tan altas utilizadas en LMDS no permitirían ofrecer de forma práctica un servicio masivo. La razón principal era la atenuación debida a efectos meteorológicos (entre ellos las tormentas solares), y a las altas potencias de emisión necesarias en consecuencia para lograr un cierto alcance de la señal, lo que haría poco viable económicamente utilizar estas frecuencias como soporte de un servicio a la población en general, dada la dificultad-costo de emitir y recibir con la calidad adecuada la potencia de señal necesaria.

Sin embargo, LMDS ha conseguido superar estas dificultades, fundamentalmente en la banda de 28 GHz, como demuestran desde hace varios años los sistemas en operación comercial existentes, entre los que destacan los de *Cellular Vision* en la ciudad de Nueva York y en 40 GHz, Philips (en pilotos experimentales).

Las principales claves técnicas del sistema son tres:

1. El teorema de Shannon de equivalencia entre ancho de banda y potencia.
2. La recepción de haces muy estrechos y con polarización estable.
3. La reutilización de frecuencias.

Por el teorema de Shannon de equivalencia exponencial entre potencia y ancho de banda, se observa que si se duplica el ancho de banda utilizado, sólo es necesario emitir la raíz cuadrada de la potencia para lograr la misma relación señal a ruido en recepción. En bajas frecuencias, el espectro es un recurso particularmente escaso que se ha ido saturando a medida que han surgido nuevos servicios de telecomunicación, por lo que se debía recurrir a emisiones de alta potencia para compensar la limitación de ancho de banda.

Es algo parecido a lo que sucede en una habitación con mucho ruido de fondo: hablamos más alto para aumentar la relación señal a ruido y hacernos entender. Lo malo es cuando la habitación está "saturada" y todo el mundo debe hablar alto a la vez, hasta que llega un momento en que ni así se logra entender la comunicación. En MLDS se utiliza la táctica contraria: como el ancho de banda espectral es un recurso menos escaso (se dispone de 1, 2 ó 3 GHz), se utilizan sistemas de modulación en banda ancha para transmitir la señal (por ejemplo, modulación FM). Esto permite utilizar potencias mucho más bajas que en sistemas como la TV convencional o el MMDS (*multipoint multichannel distribution system*), que dispone de "sólo" 200 MHz de ancho de banda), que emplean modulación AM.

Así por ejemplo, en Nueva York se transmite 49 canales analógicos de TV, a los que se han añadido recientemente para demostración 175 canales digitales utilizando polarización opuesta, transmitidos todos ellos de forma simultánea. Para ello, se utilizan potencias de emisión tan bajas como 20-30 vatios en el emisor principal y de unos 100 milivatios (mW) en los repetidores. Por su parte, los canales telefónicos necesitan menos de 1 mW, frente a los cientos de milivatios o los varios vatios que radia un teléfono móvil convencional. Además, la calidad de señal recibida es excelente, muy superior a la de la TV convencional durante al menos el 99,9% del tiempo de emisión (los sistemas se diseñan para que menos del 0.1% del tiempo la calidad de imagen sea de "convencional" a "inferior"), frente al 99.7% de tiempo garantizado por los sistemas de TV satélite, que ya ofrecen mejor calidad que la TV convencional.

Este ahorro de potencia en emisión y recepción permite utilizar equipos más pequeños y baratos. Las otras dos claves del sistema son la recepción de haces muy estrechos y con polarización estable, y la reutilización de frecuencias.

Emitiendo un haz con polarización muy estable, y captando solamente el haz de mayor potencia recibido en la antena (detección de haces muy estrechos, con discriminación de polarización), se desechan las contribuciones secundarias de señal procedentes de múltiples reflexiones, lo que suprime interferencias e imágenes "fantasmas". Además, esto proporciona robustez adicional frente a la lluvia. Por último, utilizando simultáneamente polarización opuesta y desplazamientos de las frecuencias centrales por canal, tanto para difusión en células adyacentes como para canales de retorno de banda ancha en la propia célula, se consigue duplicar el ancho de banda efectivo del sistema, por lo que en LMDS a 28 GHz no es necesario alternar frecuencias entre células adyacentes, algo imprescindible en otros sistemas celulares, con el consiguiente ahorro de este recurso natural escaso y de creciente valor.

Dadas sus enormes posibilidades en banda ancha, el potencial de LMDS en el escenario de las telecomunicaciones sin hilos se compara en algunos sectores con la ruptura que supuso en su momento la fibra óptica en el mundo del cableado; de hecho, se le confiere el carácter de fibra óptica virtual.

En LMDS, cuando se establece una transmisión, esa "llamada" no puede transferirse desde una célula a otra como ocurre en el caso de la telefonía celular convencional; es por lo que LMDS se inscribe en el contexto de las comunicaciones fijas. En definitiva, el sistema LMDS se puede contemplar, desde un punto de vista global, como un conjunto de estaciones base (también conocidas como *hubs*) interconectadas entre sí y unidas a usuarios, donde las señales son de alta frecuencia (banda Ka), donde el transporte de esas señales tiene lugar en los dos sentidos (*two-way*) desde/hacia un único punto (el *hub*) hacia/desde múltiples puntos (hacia los usuarios), en base siempre a distancias cortas.

En consecuencia, se puede decir que LMDS es celular debido a su propia filosofía; en efecto, la distancia entre el hub y el emplazamiento de usuario viene limitada por la elevada frecuencia de la señal y por la estructura punto-multipunto, lo cual genera de forma automática una estructura basada en células.

En la banda Ka, el carácter innovador fundamental de la tecnología LMDS consiste en que trabaja en el margen superior del espectro electromagnético, en la banda Ka de 28 GHz, concretamente en el intervalo 27.5 - 29.5GHz, y en la banda de 31 GHz utilizada habitualmente para control de tráfico y vigilancia meteorológica, concretamente en el intervalo 31.0 - 31.3 GHz. La utilización de las bandas de frecuencia más elevadas del espectro ha tenido lugar tradicionalmente en el ámbito de sectores muy especializados, como defensa, y en particular, en el sector espacial, debido sobre todo a la complejidad de los sistemas electrónicos involucrados, especialmente de los semiconductores, con importantes repercusiones económicas.

En consecuencia, la utilización de estas bandas de frecuencia se ha visto históricamente reducida a estos sectores considerados de importancia estratégica por los gobiernos. Sin embargo, los rápidos avances en tecnología de semiconductores, concretamente en Arsenio de Galio (AsGa) ha permitido la obtención de circuitos integrados monolíticos de microondas, así como procesadores avanzados de señal, han propiciado que los costos disminuyan considerablemente hasta el punto de que la integración de las comunicaciones espaciales en el sector comercial ha pasado a constituir un proyecto viable y consolidado en todos sus aspectos. El paso siguiente viene dado por la utilización de estas frecuencias elevadas, con la sofisticada tecnología electrónica asociada, en el segmento terrestre, y es aquí donde LMDS aparece como una de las primeras actuaciones.

En efecto, las frecuencias correspondientes a la banda Ka se utilizan en el contexto de las comunicaciones por satélite: la innovación que conlleva LMDS se basa en su utilización en las comunicaciones terrestres.

Las señales de elevada frecuencia se han considerado siempre inadecuadas para las comunicaciones terrestres debido a que experimentan reflexiones cuando encuentran obstáculos (como árboles, edificios, etc.) en su camino de propagación, originando lo que se conoce como zonas de sombra a las que no llega la señal; en cambio, como las frecuencias bajas atraviesan fácilmente estos obstáculos, han constituido tradicionalmente las frecuencias de elección para este tipo de comunicaciones.

Sin embargo, como las frecuencias altas del espectro ofrecen importantes ventajas en términos de ancho de banda y bajo nivel de saturación del espectro, se está generando un gran interés en extender su aplicación desde el ámbito de las comunicaciones espaciales hacia el ámbito terrestre, siendo LMDS uno de estos resultados.

Como consecuencia directa de trabajar con las frecuencias más elevadas del espectro, LMDS requiere la existencia de un *line-of-sight* o camino sin obstáculos entre la estación base/hub y la antena situada con un usuario o abonado para que la señal no sufra reflexiones y pueda llegar a su destino. Por ello, LMDS se considera un sistema *line-of-sight* óptico en el sentido de que el camino entre los dos puntos entre los que se establece la transmisión debe aparecer libre de obstáculos.

Esta exigencia genera inevitablemente la aparición de zonas de sombra hasta el extremo de que en una zona urbana la sombra puede llegar a afectar a un 40 por ciento de los usuarios que existen en una célula.

Para tratar de optimizar la solución a este problema se utilizan estrategias basadas en la acumulación de células, de forma que las zonas resultantes de la intersección de esas células puedan tener acceso a más de una estación base y así disminuir la probabilidad de que se produzcan rupturas del *line-of-sight*. La eficacia de este método viene dada en términos del porcentaje de usuarios de la célula a los que la señal les llega o la emiten sin problemas y que se estima en torno a un 85-90 por ciento.

Otros métodos para tratar de disminuir el nivel de sombra en una determinada zona se basan en la utilización de reflectores y amplificadores. Además debido a que las moléculas de agua afectan al comportamiento de las señales de alta frecuencia en términos de transferencia de la energía de la señal a la molécula de agua, lo que produce un efecto de degradación de la señal conocido como "*rain fade*", la lluvia constituye en principio un problema para LMDS ya que provoca la pérdida de la potencia de las señales.

Esto se soluciona básicamente aumentando la potencia de transmisión, reduciendo el tamaño de la célula o mediante ambos métodos a la vez.

En el primer caso se utilizan normalmente sistemas de potencia variable que, asociados a equipos de detección de lluvia, aumentan la potencia de transmisión de forma automática cuando se produce la lluvia; cuando la optimización en la variación de potencia no resulta suficiente, se disminuye el tamaño de la célula para conseguir más potencia.

De hecho, en células con radio menor de 8 Km. el *rain fade* no aparece. En general, en áreas geográficas con niveles de lluvia medios e incluso elevados se han conseguido niveles de fiabilidad del orden del 99,99 por ciento. Otros agentes meteorológicos, como la nieve, el hielo o las tormentas solares, no introducen un deterioro en la señal considerable hasta el momento.

La comunicación en LMDS se establece de acuerdo con el concepto de radiodifusión, en concreto punto-multipunto donde las señales viajan desde o hacia la estación central hacia o desde los diferentes puntos de recepción (hogares y oficinas) diseminados por toda la célula. La particularidad aparece aquí, como se puede observar en lo anterior, en que la comunicación se puede establecer en los dos sentidos simultáneamente desde la estación central a los diferentes puntos de emplazamiento de usuario y viceversa. Esto es posible gracias a la tecnología digital, que ha sido en realidad lo que ha dado toda la importante potencia tecnológica y estratégica que presenta los sistemas LMDS actuales, a los que se ha dado en llamar LMDS de segunda generación para distinguirlos de los primeros desarrollos que utilizaban tecnología analógica y un esquema de modulación FM .

Actualmente la FCC está trabajando activamente en la generación de un soporte regulatorio para LMDS que permita optimizar su potencial tecnológico.

Dentro de esta línea, ha asignado 1,150 MHz de espectro no continuo en 28-31 GHz, llamado Bloque A, y 150 MHz en la banda de 31 GHz, llamado Bloque B, con lo cual LMDS conlleva un ancho de banda espectral total de mil trescientos MHz. La tecnología LMDS utiliza el método de modulación QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) que permite reducir las interferencias y aumentar casi hasta el cien por ciento la reutilización del espectro.

En LMDS la sectorización se realiza en cuadrantes, normalmente utilizando polaridades alternadas horizontal y vertical en cada sector. Esta diversidad en la polarización permite optimizar la reutilización de frecuencia; en el caso de 4 sectores se obtiene una ventaja de 4:1 con respecto a otros sistemas que no emplean técnicas de reutilización de frecuencia, lo cual proporciona una importante ventaja competitiva en términos de costos. Los niveles de reutilización del espectro obtenidos se acercan al cien por ciento.

En general, se puede afirmar que la capacidad de estos sistemas LMDS es realmente notable; en la literatura existente se encuentran datos relativos a esta capacidad tales como que una sola estación base proporciona líneas telefónicas y de datos para dar servicio a aproximadamente 80,000 abonados.

6.3.3 En que consiste el LMDS

El LMDS (*Local Multipoint Distribution System*) es un sistema de comunicación de punto a multipunto que utiliza ondas radioeléctricas a altas frecuencias, en torno a 28 ó 40 GHz, en las que existen bandas de frecuencia de unos 2 GHz con atenuación mínima (conocidas como "ventanas espectrales") ante los agentes atmosféricos.

Dada la anchura de banda disponible, el LMDS puede ser el soporte de una gran variedad de servicios simultáneos: televisión multicanal, telefonía, datos, servicios interactivos multimedia.

El territorio a cubrir se divide en células de varios kilómetros de radio (3-9 Km. en la banda de 28 GHz, 1-3 Km. en la banda de 40 GHz).

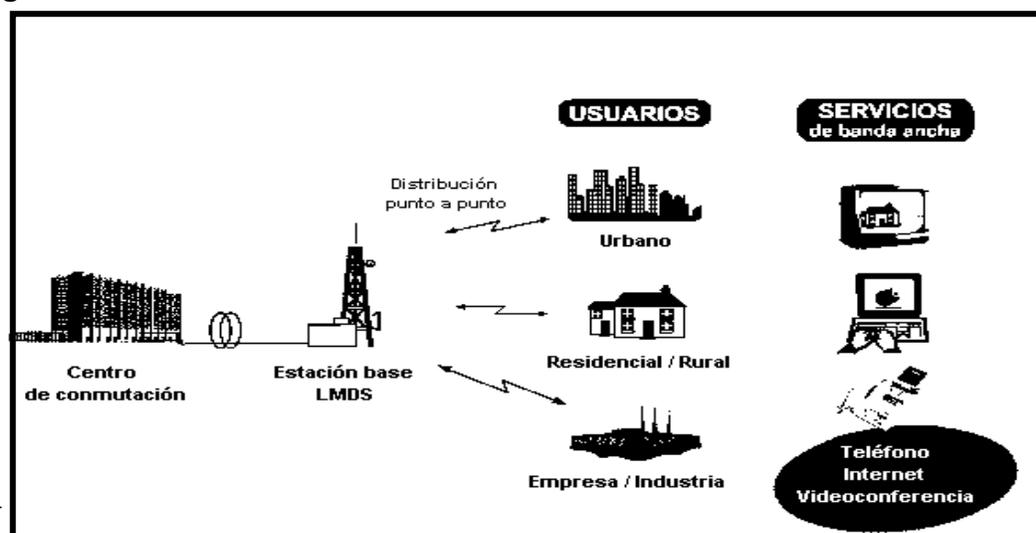
El abonado al sistema recibe la señal mediante una de tres vías: desde el emisor principal de la célula, si existe visibilidad directa entre éste y el receptor; desde un repetidor, en zonas de sombra; mediante un rayo reflejado en alguna superficie plana (paredes de edificios, reflectores/repetidores pasivos, etc.). La antena receptora puede ser de dimensiones muy reducidas (antenas planas de 16 x 16 cm. con capacidad de emisión en banda ancha), señal de TV o datos a alta velocidad, telefonía o datos de baja velocidad.

La tecnología LMDS se basa en la conversión de las señales en ondas de radio que se transmiten por el aire. Esta nueva tecnología presenta una serie de ventajas hasta ahora inalcanzables a través de las conexiones vía cable: alta capacidad de transmisión, despliegue e instalación muy rápida, crecimiento inmediato y simplicidad en el mantenimiento.

El término LMDS es derivado de:

- **L** (local), denota que las características de propagación de las señales en este rango de frecuencias delimita el área potencial de cobertura de una sola celda; El rango de un transmisor LMDS es aproximadamente 5 Km., según pruebas realizadas en áreas metropolitanas.
- **M** (multipunto), indica que las señales son transmitidas según un método punto-multipunto; el enlace inalámbrico entre el receptor y la estación es una transmisión punto a punto.
- **D** (distribución), se refiere a la distribución de las señales, las cuales pueden ser tráfico simultáneo de voz, datos, Internet y video.

Figura 22. Servicios MLDS



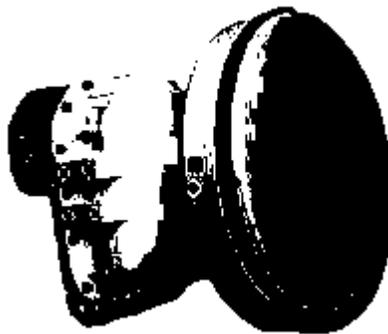
Fuente: www.monografias.com/basede

- **S** (servicio), indica la naturaleza del suscriptor en la relación entre operador y consumidor; los servicios ofrecidos en una red LMDS dependen completamente del tipo de negocio del operador.

Sus principales elementos son:

- Usuarios finales: residencial y empresarial.
- Equipamiento de usuario final.
- Antena tipo disco de reducido diámetro (10-15 cm. de diámetro).

Figura 23. Antena utilizada para recepción en sistema MLDS.



Fuente: www.monografias.com/basede

- Receptor / Transmisor RF: equipo que transmite y recibe.
- Receptor RF: equipo que únicamente recibe señales,
- Equipamiento adaptador: adapta las señales RF para su recepción decodificada por la terminal del usuario.
- Terminales: teléfono, televisor, u ordenador personal.
- Estación base, consistente en una torre de varios metros de altura dónde se instalan dos antenas que dan cobertura a los usuarios ubicados en las cercanías (hasta 6 Km.).

Se pretende que la estación base proporcione cobertura en todas las direcciones, por lo que se emplean dos antenas que cubren sectores de 180 grados cada una.

- Cabecera: soporta o facilita la transmisión de los diferentes servicios (voz, datos, TV, Internet), procesando la información y enviándola a todas las estaciones base. Incluye:
 - Conexión de alta capacidad a Internet, con los correspondientes routers y servicios de autenticación y gestión.
 - Servidor de aplicaciones interactivas Web TV y de vídeo avanzado.
 - Sistema de captación de canales de TV por satélite, generación de canales propios, y generación de la señal de TV correspondiente a los diferentes servicios ofertados.
 - Sistema de conmutación de voz.
 - Sistema de acceso condicional para TV.
 - Sistema de gestión de red.
 - Sistema de acceso, para la optimización del uso del ancho de banda entre los diferentes clientes.
- Red de transporte, que conecta la cabecera con otras redes de voz, datos o TV.
- Internet de flujo asimétrico: definido como el acceso a Internet con diferente velocidad de bajada de acceso o recepción de información (*download*) y de subida o emisión de información (*upload*), a la cuál se conecta el usuario. Este tipo de acceso es muy adecuado para aplicaciones asimétricas en que el usuario descarga mucha más información de la red de la que envía, sea del tipo que sea (voz, datos, imágenes).

- Internet de flujo simétrico: la velocidad de recepción y de transmisión son idénticas. Entorno típico de las aplicaciones empresariales en las que se intercambia continuamente similar cantidad de información en ambos sentidos.

6.3.3.1 Topología de red

En el diseño de sistemas LMDS son posibles varias arquitecturas de red. La mayoría de los operadores de sistemas utilizarán diseños de acceso inalámbrico punto–multipunto, a pesar de que se pueden proveer sistemas punto-a-punto y sistemas de distribución de TV con el sistema LMDS. Es de esperarse que los servicios del sistema LMDS sean una combinación de voz, datos y video. La arquitectura de red LMDS consiste principalmente de cuatro partes:

1. Centro de operaciones de la red (*NOC*), contiene el equipo del Sistema de Administración de la Red que está encargado de administrar amplias regiones de la red del consumidor. Se pueden interconectar varios *NOC*'s.
2. Infraestructura de fibra óptica, la infraestructura basada en fibra óptica.
3. Estación base, es donde se realiza la conversión de la infraestructura de fibra a la infraestructura inalámbrica. Los equipos que permiten la conversión incluyen la interfaz de red para la terminación de la fibra, funciones de modulación y desmodulación, equipos de transmisión y recepción de microondas ubicados típicamente en techos o postes. Entre sus características se encuentra la conmutación local que puede no estar presente en diferentes diseños.

Si la conmutación local se encuentra presente, los consumidores conectados a la estación base pueden comunicarse entre sí sin tener que entrar en la infraestructura de fibra óptica. De esta manera, la administración del canal de acceso, registro y autenticación ocurren localmente en la estación base.

La arquitectura estación-base alternativa simplemente provee enlace a la infraestructura de fibra óptica. Todo el tráfico dentro de la infraestructura de fibra debe terminar en switches *ATM* o equipos de oficina central. Bajo este escenario, si dos consumidores conectados a una misma estación base desean comunicarse entre ellos, la comunicación se lleva a cabo en una zona centralizada. Las funciones de autenticación, registro y administración de tráfico se realizan centralizadamente.

4. Equipo del cliente (*CPE*), las configuraciones del equipo especial del cliente varían entre vendedor y vendedor y dependen de las necesidades del cliente. Principalmente, toda configuración incluye equipo microondas externo y equipo digital interno capaz de proveer modulación, desmodulación, control y funcionalidad de la interfaz del equipo especial del cliente. El equipo del cliente puede añadirse a la red utilizando métodos de división de tiempo (*time-division multiple access* - TDMA), división de frecuencia (*frequency-division multiple access* - FDMA) o división de código (*code-division multiple access* – CDMA).

6.3.4 Aspectos técnicos

Entre los elementos técnicos fundamentales necesarios para evaluar la viabilidad de un proyecto LMDS se encuentra el número de usuarios/abonados, que a su vez aparece como una función del tamaño de la célula, de la densidad de células y de la potencia de la estación base.

Paralelamente, el tamaño de la célula se establece en función de las zonas de sombra, condiciones meteorológicas relativas a lluvia, cantidad de las células y tecnología utilizada en los equipos

Básicamente, la infraestructura asociada a LMDS consiste en el segmento de la estación base o *hub* y el segmento de usuario. Este último está conformado por una serie de antenas/transmisores de baja potencia situados con cada usuario; en cada hogar para el caso residencial y en cada oficina industrial para el caso de negocios.

El tamaño de estas antenas, que se pueden instalar en tan sólo dos horas, es muy pequeño. Las antenas reciben las señales emitidas por la estación base/hub al mismo tiempo que emiten señales hacia esa estación base/hub. Mediante un bajo convertidor en la banda de 28GHz se pasa a una frecuencia intermedia IF (*Intermediate Frequency*) para que la señal sea compatible con los equipos del usuario.

De forma recíproca, mediante un *up-converter*, esta señal de frecuencia intermedia se convierte en una señal de frecuencia en 28 GHz para generar la transmisión desde el usuario hacia el hub.

Otras partes del segmento de usuario son una serie de interfaces para implementar la integración en el marco del sistema de comunicaciones del usuario, y equipos para realizar la interconexión con la red WAN (*Wide Area Network*) como enlaces con la central telefónica para generar líneas telefónicas y/o cabeceras de televisión por cable, una interfaz Ethernet para conectar ordenadores y equipos asociados y una interfaz de red para controlar la interacción entre los diferentes equipos informáticos y de comunicaciones.

En concreto, esta interfaz de red, conocida como NIU (*Network Interface Unit*), constituye una interfaz estandarizada para todos los equipos existentes en el emplazamiento de usuario, como, por ejemplo, PBX.

A modo de resumen y en términos muy generales, en el segmento de usuario la antena capta la señal emitida por el hub y la unidad de interfaz de red la convierte en voz, vídeo y datos, y la distribuye. La antena sectorizada permite reutilizar frecuencias, lo cual produce un notable incremento de la capacidad global del sistema, en particular, en lo que concierne a la generación de servicios en dos sentidos.

Su modo de funcionamiento se basa en dividir el diagrama de radiación de la antena en sectores, de forma que se puedan crear diferentes nodos de área de servicio. Así, si se dispone de un determinado margen de frecuencias X en la antena para cubrir una zona en la que se encuentran Y abonados, según el principio de sectorización de la antena, esta zona se podría dividir en, por ejemplo, Z sectores, de modo que cada uno de ellos, donde habría Y/Z abonados, utilizaría la frecuencia X completa para su propio servicio, con lo cual se obtiene una multiplicación de la capacidad del sistema en términos del número de abonados al que se puede dar servicio, al mismo tiempo que cada sector presenta un conjunto de servicios previamente determinado. Este tipo de antenas aparece habitualmente en el ámbito de las comunicaciones celulares.

Durante la planificación de celdas para una red LMDS, hay que tomar en cuenta los siguientes atributos:

- Penetración de suscriptores – El desempeño del sistema de distribución se mide con la penetración de los suscriptores, el cual es el porcentaje de suscriptores que poseen suficiente nivel de señal para lograr una excelente calidad de servicio.

- Calidad de Servicio (*quality of service* – QoS) – La calidad del servicio se encuentra afectada por varios factores como por ejemplo: la obstrucción del camino de transmisión, el solapamiento de celdas (15% es normal) y redundancia del sistema.
- Presupuesto de Enlace, es utilizado para estimar la máxima distancia a la que un suscriptor puede estar localizado de una celda teniendo aún aceptables niveles de confiabilidad del servicio. El presupuesto contabiliza todas las pérdidas y ganancias del sistema a través de varios tipos de equipos. El presupuesto del enlace analiza varios parámetros de la red, incluyendo radio portadora-a-ruido.
- Selección del tamaño de la celda – El tamaño máximo de celda para servir un área esta relacionado al nivel de confiabilidad deseado obtenido a partir del presupuesto del enlace. El tamaño de la celda puede variar dentro del área de cobertura debido al tipo de la antena, su altura y pérdida de señal. Los anteriores efectos guardan relación con el tipo de área de cobertura por ejemplo urbano, suburbano o cobertura de baja densidad. La selección del tamaño de la celda afecta el costo capital total para la cobertura del área requerida.
- Velocidades de acceso de hasta 8 Mbps.
- Modelo capital-costo – El modelo capital-costo es utilizado para estimar los requerimientos de capital de la red. El modelo encierra consideraciones de diseño tales como presupuesto de enlace, tamaño de celda, solapamiento de celdas, número de celdas, capacidad de tráfico, número de sectores, costo por cada celda, y costo capital total.

Las siguientes técnicas son utilizadas para optimizar el reuso de frecuencia en redes LMDS:

- Minimización de múltiples caminos y cruce de polarización utilizando antenas altamente direccionales y posicionándolas a grandes alturas.
- Maximización de la direccionalidad de las antenas de las celdas a través de la sectorización del sistema de distribución; el equipo microondas de la celda es generalmente configurado con múltiples sectores, antenas, transmisores y receptores. Una configuración típica es una celda con cuatro sectores utilizando antenas de 90 grados de amplitud de rayo para proveer servicios al conjunto de suscriptores. Cada una de estas antenas sectorizadas (transmisores y receptores) puede soportar el ancho de banda total del espectro reservado.

6.3.5 Servicios MLDS

La capacidad de LMDS para comunicar en los dos sentidos permite generar servicios de carácter interactivo tales como videoconferencia, acceso a Internet de alta velocidad, además de servicios convencionales como, por ejemplo, telefonía y programación de vídeo multicanal. En líneas generales, se puede afirmar que LMDS aparece como una alternativa tecnológica dentro del escenario general de las comunicaciones que se podría utilizar como una sistema para reducir los errores en comunicaciones en este caso en particular por el provocado por tormentas solares en el sistema terrestre, en el que todas las aplicaciones se puedan proporcionar a través de una única plataforma.

6.3.6 Ventajas y desventajas

A modo de resumen, se pueden citar varias características del sistema LMDS que suponen una ventaja competitiva:

- a) Al ser un sistema de transmisión de banda ancha, se posibilita la integración de los servicios sobre el mismo medio de transmisión.

- b) Puesto que es un sistema de transmisión de datos, toda la información que se pueda digitalizar será susceptible de ser transmitida por él. Por lo tanto, utilizando la misma tecnología, un mismo usuario puede recibir servicios muy diferentes tales como acceso a Internet, telefonía, información multimedia bajo demanda, datos, etc.
- c) Al permitir la bidireccionalidad, se pueden ofrecer servicios como la TV multicanal, la telefonía o el acceso a Internet conjuntamente mediante una plataforma única. Otras tecnologías inalámbricas tales como MMDS o el satélite no lo permiten.
- d) Al ser el medio de transmisión radio, el desarrollo de la infraestructura necesaria para el establecimiento del servicio es fácil de desarrollar. Por el contrario, en los sistemas basados en redes de cable, se exige llegar de manera física a cada uno de los clientes que soliciten el servicio.
- e) El tiempo de ejecución de la infraestructura es mucho menor, lo cual implica que los costes de establecimiento se reducen enormemente, puesto que con una sola estación transmisora se cubren todos los posibles clientes que entren dentro de la extensa área de cobertura de la misma.
- f) La calidad de la señal no se ve afectada por las defectuosas redes de acceso locales existentes en muchos países, ya que todo el sistema local se realiza independiente de las mismas, vía radio.
- g) Por último, puesto que gran parte del desembolso de estos sistemas se destina al equipamiento de usuario (antena receptora, convertidores, módems, etc.), el operador no incurre en estas inversiones hasta que el cliente no solicita el servicio.
- h) Bajos costos de introducción y desarrollo
- i) Infraestructura escalable basada en la demanda, cobertura y concentración de edificios.
- j) Bajos costos de mantenimiento, manejo y operación del sistema.

Entre las desventajas de LMDS tenemos:

- a) Alcance limitado
- b) Tecnología nueva
- c) Obviamente como no es una tecnología totalmente difundida en el mundo deben de surgir más desventajas conforme se difunda la misma.

Tabla III. Comparación MLDS con otras tecnologías.

Tamaño del archivo	Dial-up 48 Kbps	ADSL 256 Kbps	LMDS 8 Mbps
2 Megabytes	7 mins.	1.3 mins.	3 seg.
10	35 mins.	6.5 mins.	13 seg.
140	8.1 horas	1.5 horas	3 mins.

CONCLUSIONES

1. Es necesario y fundamental tener presente lo que es la ocurrencia de fenómenos naturales, en este caso específico las tormentas solares, ya que estas tormentas afectan de manera directa los sistemas de comunicaciones, eléctricos y electrónicos. En el caso de Guatemala dada su ubicación geográfica es afectada en menor grado, pero debido a que las comunicaciones actuales son globales y que todos los países se encuentran interconectados en sus sistemas eléctricos y comunicaciones, el daño repercutirá a grandes distancias de el lugar donde ocurre el fenómeno. Puede además provocar tanto pérdidas económicas como de tiempo. Aunque no se sabe con precisión cuando ocurrirá un fenómeno de este tipo si se conoce cierta tendencia estadística de ocurrencia lo que permite estar mejor preparados ante la presencia de dicho fenómeno.
2. En la actualidad existen cierto estándares para regular las perturbaciones electromagnéticas, así como organismos internacionales especializados en dicho estudio, por lo tanto se puede conocer, manejar y diseñar equipos de tipo eléctrico como electrónico siguiendo dichos estándares. Además se torna importante y necesario reducir al mínimo las radiaciones electromagnéticas que se pudiesen percibir, ya que las mismas pueden provocar daños tanto a seres humanos como a otros equipos circundantes a nuestro alrededor.

3. Existen gran variedad de métodos para corregir los errores en las comunicaciones que en la actualidad son principalmente del tipo digital por lo que la utilización de los métodos de corrección de errores de envío Fec y pedido de respuesta automática Arq para la detección y corrección de errores en las comunicaciones son necesarias, ya que en el caso de datos erróneos provocados por perturbaciones solares electromagnéticas o por cualquier perturbación, podemos minimizar hasta donde sea posible los daños.

4. El sistema de distribución servicio local multipunto es un prometedor sistema de transmisión de datos, aunque su uso es relativamente nuevo, a proporcionado ciertas ventajas que sólo el tiempo dirá su funcionalidad, aunque su funcionamiento sea en el ancho de banda de la alta frecuencia permite brindar una gama extensa de servicios que jamás se pensó que fuera posible utilizar en el espectro electromagnético en el que se encuentra, por lo que su utilización en países pequeños como Guatemala permitiría conocer nueva tecnología y permitiría avances tecnológicos e industriales considerables.

RECOMENDACIONES

1. Al utilizar equipos eléctricos o electrónicos es necesario conocer las especificaciones de los mismos, para tener en cuenta el grado de radiación electromagnética que producen y si estos son admisibles para el contacto con el ser humano y el ambiente.
2. En el momento de diseñar sistemas eléctricos como una subestación eléctrica, se deben de tomar en cuenta la ocurrencia de fenómenos naturales, como las radiaciones electromagnéticas de origen solar, fenómeno no tomando en cuenta en la antigüedad en la realización de éste tipo de diseños.
3. Las empresas dedicadas a comunicaciones de audio, voz o video deben mantener mayor control en la ocurrencia de fenómenos solares, ya que la interrupción de comunicaciones provoca pérdidas de equipos o económicas, que pueden llegar a ser considerables.

BIBLIOGRAFÍA

1. Herbert, Taub, **Principles of Communication System**. 2da edicion, Singapur: editorial Macgraw-Hill Book company 759 pp. 1989.
2. R. Collin, **Antennas and Radiowave Propagation**, Macgraw Hill internacional Editions, 1985.
3. Johnk, Carl, **Teoría Electromagnética: Principios y Aplicaciones**, editorial Limusa, México 1990.
4. W. Hayt Jr, **Teoría Electromagnética**, 5ta. Edición, Mcgraw Hill, 5ta edición 1991.
5. Freeman, Roger L. **Radio System Design for Telecommunications**. 4ta edición, Estados Unidos: editorial John Wiley & Sons, Inc. 1998.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

6. www.spaceweather.com, Enero de 2005
7. www.esluque.com, Enero de 2005
8. www.fi.ubar.ar, Febrero de 2005
9. www.monografias.com/basede, Febrero de 2005