

1. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS Y SU ESPECTRO

1.1. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Una partícula cargada eléctricamente produce un efecto de atracción-repulsión con otras partículas cargadas que se encuentren en campo cercano, fenómeno resultante de la interacción de los campos eléctricos generados por cada una de ellas. Por otro lado, si una partícula cargada se desplaza en una trayectoria con un movimiento acelerado, a más de su campo eléctrico se genera espontáneamente un campo magnético asociado: en las cercanías tendremos la presencia de un “campo electromagnético”. Si este fenómeno natural puede, de algún modo, ser transmitido hacia un lugar remoto, diremos que hemos propagado una Onda Electromagnética.

Con este mismo principio, pero de maneras diferentes, se pueden generar ondas electromagnéticas deseadas y no deseadas. El elemento de mayor efectividad para generar ondas electromagnéticas al aire es una Antena, dispositivo muy importante para establecer telecomunicaciones. Una Antena en realidad es un transductor de dos vías, pues puede generar ondas electromagnéticas a partir de una tensión o voltaje (transmisión), y viceversa, es decir también genera una tensión o voltaje a partir de la presencia de una onda electromagnética (recepción).

De acuerdo con la Teoría Electromagnética, una onda de este tipo debe cumplir con las Ecuaciones de Maxwell, que no son otra cosa que el cumplimiento simultáneo de las Leyes de Gauss tanto para campos eléctricos como para campos magnéticos, Ley de Faraday y la Ley de Ampere modificada.

Ley de Gauss para campos eléctricos: $\nabla \cdot D(r, t) = \rho(r, t)$

Ley de Gauss para campos magnéticos: $\nabla \cdot B(r, t) = 0$

Ley de Faraday: $\nabla \times E(r, t) = -\frac{\partial}{\partial t} B(r, t)$

Ley de Ampere modificada: $\nabla \times H(r, t) = \frac{\partial}{\partial t} D(r, t) + J(r, t)$

Fig.1.1 En el gráfico adjunto se muestran las ecuaciones de Maxwell representadas en el dominio del tiempo en forma diferencial. Más adelante veremos una representación en el dominio de la frecuencia.

Las Ondas Electromagnéticas se pueden propagar por diferentes medios tanto dieléctricos como conductores, pero con diferentes efectos para la onda y el medio. Los parámetros del medio, como permeabilidad magnética (μ), permitividad eléctrica (ϵ) y conductividad (σ) regirán el comportamiento de la onda allí propagada.

1.2. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Las ondas electromagnéticas tienen como característica fundamental su frecuencia hertziana de oscilación, y pueden oscilar desde 0 Hz (DC) hasta, idealmente, una frecuencia infinita. El término “espectro” es comúnmente usado para denominar a la gráfica en la frecuencia -generalmente usando la Transformada de Fourier- de cualquier señal del dominio del tiempo, por tal razón a esta clasificación de las ondas en función de la frecuencia se la denomina “Espectro Electromagnético”

Una clasificación muy difundida del Espectro Electromagnético se muestra en la siguiente tabla

Tabla 1 Espectro Electromagnético

Rango de frecuencias		Banda	
3Hz	30Hz	ELF	ONDAS NO IONIZANTES
30Hz	300Hz	SLF	
300Hz	3KHz	ULF	
3KHz	30KHz	VLF	
30KHz	300KHz	LF	
300KHz	3MHz	MF	
3MHz	30MHz	HF	
30MHz	300MHz	VHF	
300MHz	3GHz	UHF	
3GHz	30GHz	SHF	
30GHz	300GHz	EHF	
300GHz	3THz	IR	
3THz	30THz	IR	
30THz	300THz	IR	
300THz	3PHz	LUZ VISIBLE	
3PHz	30PHz	UV	ONDAS IONIZANTES
30PHz	300PHz	Rx	
300PHz	3EHz	R Gamma	
3EHz		Radiación Cósmica	

Este amplio rango de frecuencias conocido como “Espectro Electromagnético”, el cual, con el fin de facilitar su estudio, es agrupado en varios conjuntos limitados de frecuencias denominadas “bandas”. A su vez, dentro de estas bandas se clasifican en detalle las frecuencias de ondas electromagnéticas y se les asigna el o los servicios que se debe brindar en cada una de ellas, tal como se muestra en la TABLA 2.

Tabla 2 Servicios y frecuencias

Radiodifusión AM	535-1605 KHz
Radio de onda corta	3 -30 MHz
Radiodifusión FM	88-108 MHz
TV VHF (2-4)	54-72 MHz
TV VHF (5-6)	76-88 MHz
TV VHF (7-13)	174-216 MHz
TV UHF (14-83)	470-890 MHz
Celular USA	824-849 MHz
	869-894 MHz
Celular GSM	880-915 MHz
	925-960 MHz
GPS	1575.42 MHz
	1227.60 MHz
Horno microondas	2.45 GHz
DBS USA	11.7-12.5 GHz
Bandas ISM	902-928 MHz
	2.400-2.484 GHz
	5.725-5.850 GHz
Radio UWB USA	3.1-10.6 GHz

A medida que aumenta la frecuencia de una onda electromagnética, aumenta su energía interna y disminuye su longitud de onda (λ). De acuerdo a la energía interna de una onda, el Espectro Electromagnético se clasifica en Ondas Ionizantes y Ondas No Ionizantes

Una Onda o Radiación Ionizante es aquella que tiene suficiente energía como para ir arrancando los electrones de valencia de los cuerpos que encuentren por su camino; las Ondas o Radiaciones No Ionizantes no tienen esta particularidad. Es conocido que si a un átomo se le logra arrancar o añadir un electrón, este se convierte en una sustancia (ión) de características muy

diferentes a las del átomo original, aunque tampoco se convierte en otro elemento químico, lo cual fue el sueño de los alquimistas.

Es conveniente aquí anotar que si un ser vivo recibe en forma descontrolada una Radiación Ionizante, los átomos de sus células, por definición, perderían o ganarían electrones lo cual las transformaría en algo anormal, es decir mutarían. El resultado final puede ser imaginado.

Aunque, a pequeñas exposiciones, las Ondas No Ionizantes no podrían causar tales mutaciones en células de seres vivos, sí podrían causar otras perturbaciones como un aumento de temperatura, y otros como cambios de comportamiento tal como se ha comprobado en experimentos con animales; por esta razón se estudian casos de cambios de comportamiento en todos los seres vivos si están expuestos a altas cantidades de dicha radiación.

Las ondas electromagnéticas denominadas generalmente como Ondas de Radio, identificadas también como RF, son energéticamente bajas y cubren desde frecuencias de algunos Hz hasta 10^9 Hz y sus fotones tienen energía hasta unos 10^{-5} eV. Les siguen en energía las ondas denominadas Microondas, de las que hablaremos más adelante.

La zona de infrarrojos comprende ondas entre 3×10^{11} Hz y 4×10^{14} Hz y la energía de los fotones cubre desde 10^{-3} eV hasta 1,6 eV, aproximadamente. Estas ondas son producidas principalmente por cuerpos calientes y se generan también en varios movimientos de las moléculas. El espectro visible, en cambio, comprende frecuencias desde 4×10^{14} Hz hasta 8×10^{14} Hz; con energía entre 1,6 eV hasta alrededor de 3,2 eV. En el ser humano esta radiación es percibida por la retina de sus ojos e identificada por el cerebro como colores diferentes de acuerdo a la frecuencia que incida.

La siguiente zona energética es el espectro ultravioleta, radiación no visible por el ser humano pero con energía fotónica desde 3 eV hasta 2×10^3 eV, energía suficiente para producir ionización. Esta radiación tiene como su fuente natural al sol, y por eso esta radiación UV, de manera adecuada, puede ser utilizada con efectos medicinales y terapéuticos; también puede radiarse UV por descargas eléctricas sobre átomos o moléculas.

Las ondas electromagnéticas con energía entre $1,2 \times 10^3$ eV y $2,4 \times 10^3$ eV y que oscilan desde 5×10^{17} Hz hasta 5×10^9 Hz, comprenden la zona de Rayos X. esta radiación, si no está controlada puede producir efectos nocivos a la salud del ser humano, y, en cambio, con un régimen de control los Rayos X pueden usarse como herramienta de diagnóstico médico en traumatología, como elemento radioactivo contra células cancerígenas, etc.

La radiación cósmica y los Rayos Gamma son las zonas más energéticas del espectro electromagnético con la diferencia que los últimos pueden ser generados por el hombre y controlados para que su radiación pueda ser usada para ayudar en investigación y avances científicos. Los Rayos Gamma se generan en los reactores nucleares, que no son pocos en el mundo, en

general en todos los procesos nucleares y en particular ciertas sustancias radiactivas.

1.3. LAS MICROONDAS

Microondas es un término descriptivo que se utiliza para identificar ondas electromagnéticas en el espectro de frecuencias comprendido, en su primera definición, entre las bandas UHF y EHF, lo que corresponde a longitudes de onda de 1 m a 1 mm. La energía de los fotones comprende desde 10^{-5} eV hasta 10^{-3} eV aproximadamente.

Una característica importante es que estas ondas son consideradas como NO IONIZANTES, es decir no poseen suficiente energía –a bajos niveles de exposición- para arrancar los electrones de valencia del cuerpo donde la onda incide. Posteriores definiciones llevan a las microondas al límite de las definiciones entre lo ionizante y lo no ionizante. Las ondas ionizantes se definieron desde los rayos ULTRAVIOLETAS hacia delante (frecuencias mayores). Lo cierto es que radiación es radiación, y que, por lo tanto, exposiciones pequeñas como grandes exposiciones a nivel de microondas podrían ser dañinas según el cuerpo que las reciba.

Se presenta a continuación una tabla con bandas de microondas.

Tabla 3 Bandas asignadas a microondas

BANDA	FRECUENCIAS	BANDA	FRECUENCIAS
L	1-2 GHz	Ka	26-40 GHz
S	2-4 GHz	U	40-60 GHz
C	4-8 GHz	V	50-75 GHz
X	8-12 GHz	E	60-90 GHz
Ku	12-18 GHz	W	75-110 GHz
K	18-26 GHz	F	90-140GHz

1.3.1. Análisis de circuitos con fuentes a nivel de Microondas

Como las longitudes de onda son reducidas, la fase de la onda varía rápidamente con la distancia y, por consiguiente, la diferencia de fase en varias posiciones tomadas en un mismo conductor va a ser significativa. Incluso la diferencia de fase en distintas partes de un mismo componente no sería despreciable.

Debido a esto, las técnicas de análisis y diseños de circuitos, de mediciones y generación de potencia, así como las técnicas de amplificación en estas frecuencias van a diferir notablemente de las correspondientes técnicas

utilizadas en circuitos alimentados con frecuencias más bajas. Para resolver circuitos a frecuencias bajo la zona de microondas será necesario analizar el comportamiento de sus componentes activos y pasivos en términos de ondas de corriente y ondas de voltaje; y en el caso de frecuencias de la zona de microondas dicho análisis será en términos de los campos eléctricos y magnéticos asociados al generador. Los métodos de mediciones también son especiales.

A altas frecuencias, el comportamiento de un resistor, capacitor o inductor sería concentrado sólo si su dimensión es mucho menor que la longitud de onda de la frecuencia de la fuente. Con el avance de la tecnología en microelectrónica de silicio, ha sido posible fabricar elementos concentrados de uno o dos mm. Por otra parte, para simular elementos concentrados en circuitos de microondas, se emplea muy a menudo dispositivos hechos de sistemas distribuidos formados por pequeñas secciones de líneas de transmisión y guías de onda.

La generación de microondas se logra con diferentes tecnologías: klystron, tubo de onda progresiva, magnetrón, diodos de avalancha, transistores. A pesar de los avances en dispositivos de estado sólido, cuando se requiere la generación de potencias elevadas a frecuencias de microondas, los tubos de vacío resultan imprescindibles.

Todos los tubos de microondas dependen de la interacción entre un haz de electrones y un campo electromagnético soportado por un circuito de microondas. El haz de electrones se origina a partir de un cañón de electrones, que generalmente comprende un cátodo (la fuente de emisión), un electrodo de enfoque, un electrodo de modulación y un ánodo. Los electrones se generan por emisión termoiónica, manteniendo el cátodo a una alta tensión negativa con respecto al ánodo, que generalmente se conecta a tierra.

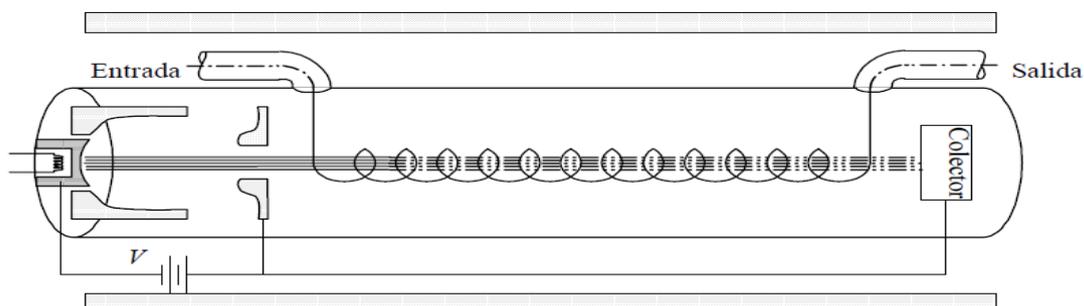


Fig.1.2 Esquema básico de un Tubo de Ondas Progresivas (TWT)

1.3.2 Características y aplicaciones de las microondas

A altas frecuencias se tiene mayor ancho de banda, definida como capacidad para llevar información, puesto que el 1% de ancho de banda a 600 MHz es 6 MHz (que es el ancho de banda de un canal de televisión), pero en cambio a 60 GHz, ese 1% de ancho de banda corresponde a 600 MHz (ancho de banda para 100 canales de televisión, por estas razones los enlaces satelitales tienen

grandes capacidades. Sin embargo no todo es color rosa, debemos lidiar con dos fenómenos físicos que a baja frecuencia son casi inexistentes: el efecto piel y la pérdida por radiación. Ambas producen pérdidas de potencia, el efecto piel porque las microondas tienden a penetrar en los materiales conductores y las pérdidas por radiación porque, dependiendo del medio de transmisión, las ondas pueden “escaparse” al medio ambiente circundante como radiación, especialmente si se favorece la presencia de una onda estacionaria en el medio conductor.

Las ondas a nivel de microondas viajan por la atmósfera con “línea de vista” y no por la ionósfera como sucede en emisiones a frecuencias mucho más bajas. Además, comparadas con ondas de baja frecuencia, la energía de las microondas es mucho más fácil de controlar, concentrar y dirigir, por eso es muy útil para cocinar alimentos, secado de objetos y elevación de temperaturas.

Las microondas se aplicaron principalmente a las comunicaciones, servicio en el cual las microondas también cumplen un papel importante; adicionalmente se las aplica en varios aspectos de la vida diaria como el doméstico, la salud, la seguridad, etc.

Entre otros, los usos más comunes de las microondas comprenden:

- Comunicaciones: redes telefónicas como GSM, CDMA, radiodifusión y televisión UHF, sistemas de banda ancha como LMDS, MMDS, WLL.
- Control y seguridad en transportes aéreo, marítimo y terrestre: RADAR, MLS (microwave landing system).
- Investigación: debido a que no se reflejan en la ionósfera, la radioastronomía estudia las radiaciones electromagnéticas que se originan en estrellas y otros objetos astronómicos, control de plagas.
- Militar: sistemas de posicionamiento, ataque y defensa como GPS, GLONASS (contraparte rusa del GPS), Loran C
- Telemática: se alcanzan cada vez velocidades de transmisión más altas, lo que implica uso de señales de frecuencias a nivel de microondas.
- Calentamiento: uso doméstico, transferencia de calor, usos terapéuticos, aplicaciones en hornos industriales.

Cuando se trabaja a nivel de microondas es imperioso seguir las recomendaciones de los fabricantes de equipos y materiales, a fin de conseguir los resultados esperados. Los cables que se usen deberán ser de muy buena calidad y de la menor longitud posible, hay que descartar la tentación de fabricar cables para ser usados en alta frecuencia a menos de que se disponga de las herramientas adecuadas.

Mecánicamente, se deberán ajustar conectores hasta obtener el torque especificado, para ello hay herramientas con torque ajustable; a pesar de que haya familias de conectores muy “parecidos” a simple vista es mejor no aparear conectores diferentes.

1.4. MEDIOS DE TRANSMISIÓN

A diferencia de la transmisión de la energía eléctrica comercial, que son ondas oscilantes a 60 ó 50 Hz, los servicios de telecomunicaciones utilizan ondas electromagnéticas de frecuencias elevadas para poder transmitir información de un lugar a otro. Como ejemplos tenemos la radiodifusión AM que utiliza ondas de frecuencias en el rango de 540-1080 KHz, la radiodifusión FM con frecuencias entre 80 – 108 MHz, los servicios de telefonía móvil personal (celulares) en diferentes bandas conocidas como 850 Mhz, 2 GHz, etc.

Estos servicios son conocidos como inalámbricos, pues la información llega al usuario a través de una interfaz aire, es decir usando la atmósfera. Se puede notar, entonces, que la atmósfera es uno de los medios de propagación de ondas electromagnéticas que más se usa en la actualidad, aunque en los viajes interplanetarios e investigaciones intergalácticas se utiliza también el espacio sideral considerado como “vacío”, aunque estrictamente hablando el espacio exterior no está “vacío”.

Existen otras situaciones donde no es conveniente utilizar la atmósfera como medio de transmisión de ondas electromagnéticas, y sucede cuando se desea llevar información entre un transmisor y su antena (lado de transmisión), o desde una antena al receptor (lado de recepción). En estos casos utilizamos un medio físico que puede ser una Línea de Transmisión, que básicamente es un cable especial de dos conductores, o una Guía de Ondas, medio que tiene forma tubular, por lo que físicamente se parece a un tubo con sección transversal rectangular, circular o elíptica, dependiendo del caso.

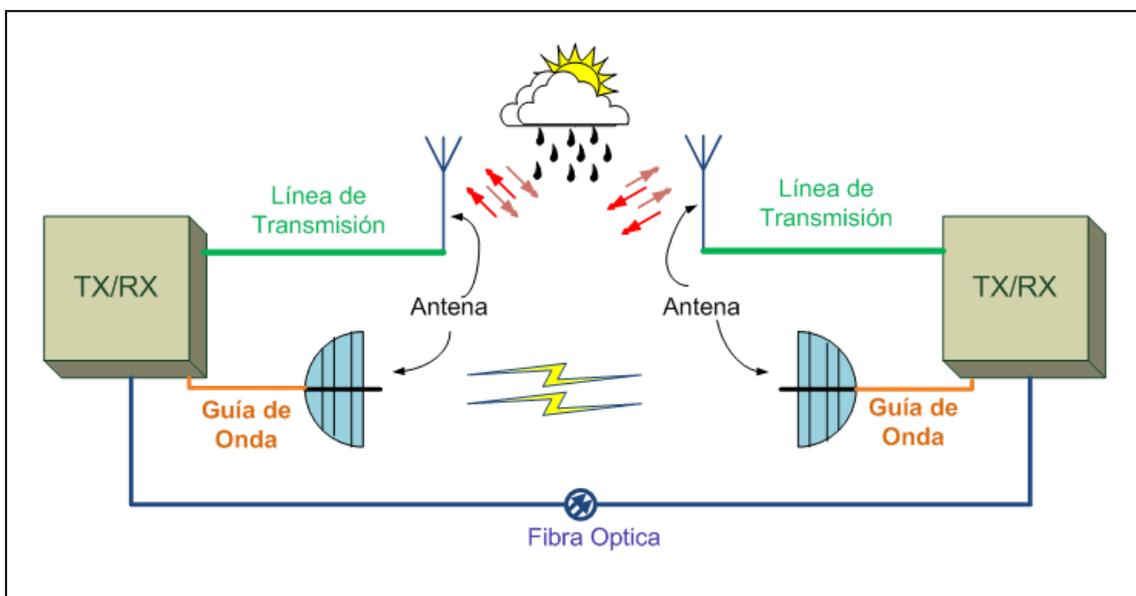


FIG 1.3 Medios de transmisión usados en Telecomunicaciones

Una línea de transmisión trabaja bastante bien, con muy poca atenuación, hasta frecuencias de pocos Ghz, por lo que si se quiere trabajar a frecuencias superiores se deberá utilizar una guía de ondas, aunque este medio es –por naturaleza- atenuativo.

Otro medio de transmisión de ondas muy actual es la “Fibra Optica”, usado para llevar información en forma digital entre dos puntos remotos lejanos usando las frecuencias a nivel de infrarrojos o superiores, generalmente del orden de THz, con una clara ventaja sobre los demás medios: no sufre por interferencias electromagnéticas.

Se han dado grandes esfuerzos científicos por descubrir un medio de transmisión de ondas electromagnéticas con cero atenuación, denominados de manera general como “Superconductores”, esfuerzos que han dado su fruto en laboratorio, pues se han conseguido fabricar materiales superconductores que lamentablemente no pueden ser implementados en el campo, pues para su funcionamiento deben mantenerse estrictamente al cero absoluto de temperatura, lo cual sería muy difícil y oneroso para grandes recorridos.

En la realidad, los sistemas de telecomunicaciones son híbridos respecto a los medios de transmisión que usan, pues cada uno de ellos se suelen usar en diferentes situaciones de distancia, cobertura, facilidad de mantenimiento, condiciones climáticas, etc., y considerando lo más importante para una empresa, la relación costo-beneficio que lleve a la satisfacción del cliente.