

Sistemas de Radiocomunicación

Primera Parte

3º Ingeniería de Telecomunicaciones — UPV/EHU

"Under-promise and over-deliver."

Javier de Martín – 2016

1. Ingeniería del Espectro Radioeléctrico

Radiocomunicación: Telecomunicación basada en ondas de radio.

Telecomunicación: Cualquier transmisión o recepción de información por aire, radio, cable o cualquier otro sistema de electromagnetismo.

Radio: Término general aplicado al uso de ondas de radio.

Ondas de Radio: Ondas EM con frecuencias arbitrariamente menores a 3000 GHz (excepto la luz), que se propaga en el espacio sin necesidad de guías artificiales.

El espectro de radio varía desde los 3kHz hasta los 300GHz

Bandas de frecuencia según EBU (European Broadcasting Union)

Banda I	41-68MHz
Banda II	87,5-108MHz
Banda III	162-230MHz
Banda IV	470-582MHz
Banda V	582-960MHz
Banda VI	12 GHz

Bandas según ITU, nomenclatura de Radar

L	1-2 GHz
S	2-4 GHz
C	4-8 GHz
X	8-12 GHz
Ku	12-18 GHz
K	18-27 GHz
Ks	27-40 GHz
mm	40-300 GHz

El espectro de radiocomunicación es un recurso natural limitado pero reutilizable. La limitación es debida a las características de propagación de las ondas de radio, disponibilidad de la tecnología y equipamiento para diferentes aplicaciones y disponibilidad de bandas de frecuencias adecuadas para aplicaciones específicas. La demanda del espectro siempre ha sido mayor que su disponibilidad.

Sólo hay un único espectro de radio, es únicamente expandible hasta las ondas de longitud de onda milimétrica o empleando métodos de codificación. Las ondas de radio no respetan las fronteras internacionales, edificios u otros.

Gestión del Espectro

La ITU (International Telecommunication Union) atribuye el espectro global y órbitas de satélite, desarrollar estándares técnicos que aseguren la interconexión de redes y tecnologías y forzar la mejora del acceso a ICTs en comunidades subdesarrolladas.

Las WRC (World Radiocommunication Conferences) de la ITU se celebran cada tres años en Ginebra, revisan las regulaciones de radio, el uso del espectro y cualquier otro aspecto.

La ETSI (European Telecommunication Standards Institute) crea estándares para tecnologías de radio. Fundada inicialmente para cubrir las necesidades europeas ha crecido para ser respetada como un estándar mundial.

	English	Spanish
Servicios	Allocation	Atribución
Áreas/Países	Allotment	Adjudicación
Estaciones	Assignment	Asignación

- **Allocation** (of a frequency band): Entrada en la tabla de atribución de frecuencias de una banda de frecuencia dada para el propósito por uno o más servicios de radiocomunicación terrestres o espaciales. Este término también se aplica a la banda de frecuencias afectada.
- **Allotment** (of a radio frequency or radio frequency channel): Entrada de un canal de frecuencias en un plan acordado, es adoptado por una conferencia competente, para usarlo en uno o más administraciones para radiocomunicación terrestre o espacial un uno o más países o áreas geográficas bajo unas condiciones especificadas.
- **Assignment** (of a radio frequency or a radio frequency channel): Autorización proporcionada por una administración para que una estación de radio pueda utilizar una frecuencia o un canal de radio-frecuencia bajo unas condiciones especificadas.

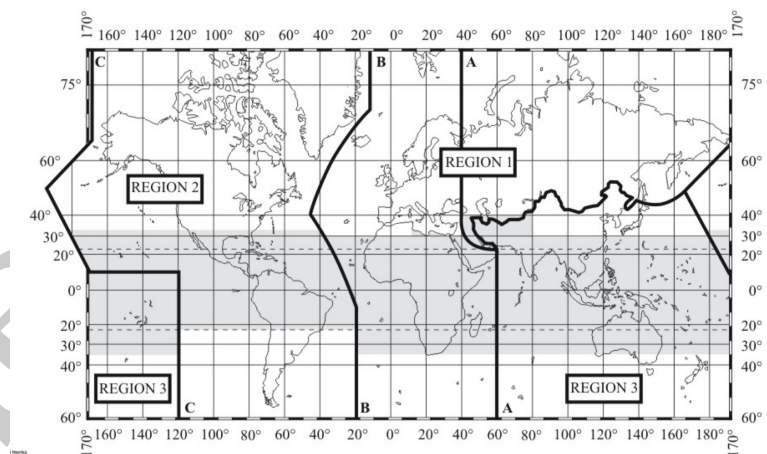


Figura 1: Regiones de frecuencias

Hay varios **tipos** de atribuciones de frecuencias:

- **Exclusiva:** Atribución para un servicio de radio.
- **Compartido:** Atribución para varios servicios de radio.

Categorías de servicios:

- **Primarios:** Prioridad en la elección de las frecuencias, escrito en mayúsculas.
- **Secundario:** No pueden producir interferencias a estaciones primarias. No pueden reclamar protección por interferencia a estaciones de servicios primarios. Pueden reclamar protección contra interferencias de estaciones del mismo servicio u otros servicios secundarios.

La **gestión del espectro** refleja muchas actividades: Planificación del uso del espectro, atribución y asignación de licencias del espectro, interacción con organizadores regionales e internacionales... Históricamente, los reguladores han asignado las frecuencias emitiendo licencias a usuarios específicos para usos específicos → Método Administrativo. Hay formas más flexibles de licencia, las bandas se pusieron a disposición de varios usos en vez de sólo para uno y se introdujeron subastas para asignar los espectros a los usuarios.

El **modelo administrativo** es el utilizado por la mayoría de reguladores en el mundo. Los reguladores son las autoridades centrales para la asignación del espectro y decisiones de uso. Las decisiones de asignación son a menudo estáticas en dimensiones temporales y espaciales, es decir, son válidas para períodos de tiempo muy largos y para grandes regiones geográficas por lo que no resulta muy eficiente.

El **modelo de mercado** dice que los recursos del espectro de radiocomunicación debería ser tratado como propiedad privada. La asignación debe de ser implementada por las fuerzas de mercado. Los propietarios del espectro deberían ser capaces de comerciar esas partes en mercados secundarios. Los propietarios de espectro podrán utilizar su banda de la manera que quieran a través de cualquier tecnología.

La **teoría del espectro libre** proporciona acceso libre a cualquier espectro para cualquier uso, está necesitada de regulaciones para poner orden.

A vistas de **futuro** se prevé una mayor demanda del espectro disponible, planes centrados en incrementar la compartición del espectro entre servicios, planes centrados en la liberación del espectro no utilizado o no utilizado eficientemente.

Las **licencias** se asignan a estaciones de radio para usuarios específicos con usos específicos y asignadas en subastas. El espectro **sin licencia** tiene frecuencias para aplicaciones ISM y SDR, limitando la potencia emitida, cualquiera puede transmitir sin una licencia mientras cumpla con las reglas para limitar/evitar interferencias, las principales bandas sin licencias fueron aquellas diseñadas como industriales, científicas y médicas (ISM). En los últimos 15 años ha crecido la demanda en el uso del espectro sin licencia.

2. Tecnologías Básicas de Radio

Bloques de un sistema de radiocomunicación genérico

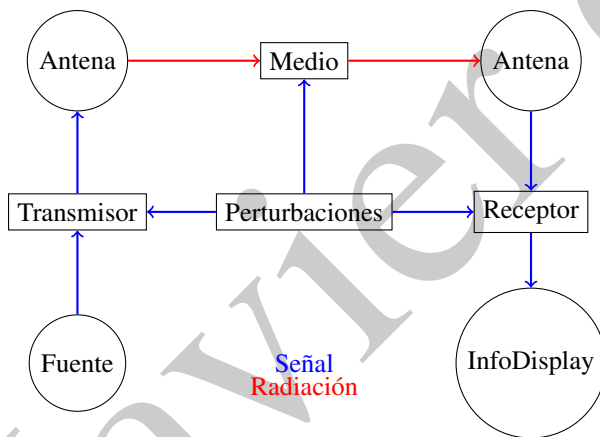


Figura 2: Esquema general

Codificación, Entrelazado y Modulación

Codificación: En cualquier comunicación digital surgen errores cuando algunos de los bits son recibidos con el valor incorrecto. La codificación de canal o FEC (Forward Error Correction) permiten detectar y corregir bits erróneos añadiendo bits redundantes a los bits de datos.

$$\text{Code Rate} = \frac{\text{Bits de datos}}{\text{Bits totales}}$$

Entrelazado: Mezclar los bits en el codificador para reordenarlos en el receptor. Si los errores ocurren en ráfagas, los bits erróneos están menos uniformemente distribuidos al entrelazarlos. El inconveniente que tienen

es el tiempo de latencia ya que el receptor tiene que esperar a que todos los bits lleguen para decodificarlos.

Modulación: Proceso de transferencia de información en banda base a la frecuencia del canal generada por el oscilador. Puede ser modulación en amplitud, fase o frecuencia.

Filtrado del Canal: Controlar el solape de los espectros adyacentes y reducir la interferencia entre símbolos (ISI), producida por la limitación del ancho de banda. Esto se consigue haciendo que la función de transferencia del filtro del canal es lo más cercana posible a la respuesta en frecuencia de Nyquist.

Filtrado de Canal: Por el teorema de Nyquist se requiere, teóricamente, un mínimo de ancho de banda para detectar R símbolos/s, sin ISI, es $R/2$ Hz. Esto ocurre cuando la función de transferencia del sistema es rectangular y constante entre 0 y $1/2 \cdot T$.

TERMINAR

Transmisor

Toma la señal IF modulada y la lleva al canal de RF y la amplifica para llegar al nivel de potencia requerido para ser transmitida. Normalmente se añade un filtro de canal RF en la etapa final para evitar radiar señales indeseadas. Los amplificadores de potencia son muy sensibles a la potencia reflejada por lo que es necesaria una adaptación de impedancias la antena transmisora. Hay sensores que miden la potencia reflejada y en el caso de la desadaptación de impedancias el transmisor se apaga para evitar daños. También los amplificadores de potencia son responsables de la degradación de la señal transmitida debido a la no linealidad. A la hora de diseñar transmisores hay que jugar con la eficiencia y la degradación de la señal.

Antenas

Son los elementos que adaptan las ondas guiadas, que son transmitidas por cable o guías a las ondas de radio que se propagan por el espacio, añadiendo características direccionales. Son las partes en los sistemas de telecomunicación encargadas de radiar o recibir las ondas electromagnéticas.

Normalmente las antenas son clasificadas de acorde a su geometría:

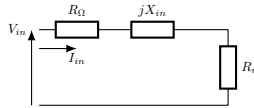
- **Antenas Lineales o de Cable:** Formadas por una varilla o cables. Los campos radiados se calculan por la corriente que circula por el cable.
- **Antenas de Apertura:** Formadas por una abertura en la cual se produce la radiación. Los campos radiados se calculan por los campos en la abertura. Dependiendo de cómo son generados los campos en la abertura se distinguen 5 antenas: bocinas, reflectoras, lentes, slots y parches.
- **Array de Antenas:** Formadas por un grupo de antenas operando como si fueran una única. Los patrones de radiación dependen principalmente en la disposición del array en lugar del diagrama de radiación de cada antena. Normalmente, las antenas son iguales pero en algunos casos pueden ser diferentes (Yagi o logperiódicas).

Para analizar los **parámetros** que definen las características de una antena hay que tener en cuenta el **teorema de reciprocidad** que dice que las antenas tienen las mismas características estén transmitiendo o recibiendo.

- **Impedancia:** La antena será la última parte del sistema de transmisión y el amplificador de transmisión la verá como una carga. La antena es equivalente a una impedancia que disipa potencia generada en el generador. Esa potencia no es disipada sino radiada. Para maximizar la potencia transmitida, la impedancia de la antena

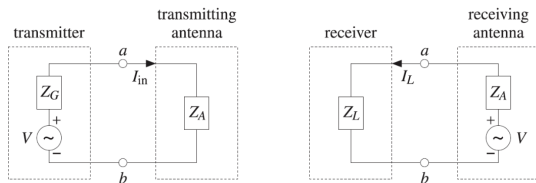
y el transmisor de potencia deben estar adaptadas. La impedancia de entrada de la antena (Z_{in} , Z_a o Z_{en}) es definida en los terminales de la antena como el cociente entre voltaje y corriente. En general, consiste en una parte real $R_{in}(f)$ y una parte imaginaria $X_{in}(f) \rightarrow Z_{in}(f) = R_{in}(f) + j \cdot X_{in}(f)$. Si $Z_{in}(f)$ no tiene parte reactiva en alguna frecuencia en concreto ($X_{in} = 0$) se conoce a la antena como antena resonante para esa frecuencia.

$$\eta_l = \frac{P_r}{P_{in}} = \frac{R_r}{R_r + R_\omega}$$



$$P_{in} = |I_{in}|^2 (R_r + R_\omega) \quad P_r = |I_{in}|^2 R_r$$

El circuito equivalente para TX y RX de la antena es



En RX, V es la tensión en circuito abierto de la antena receptora. V es la tensión en circuito abierto de la antena receptora, depende del campo E o densidad de potencia en la localización de la antena y características de ésta. Si $Z_A \neq Z_L$ las pérdidas por desadaptación reducen la potencia en Z_L .

- **Impedancia:** Indica si un dispositivo puede ser utilizado como antena o no. La impedancia se puede calcular mediante el coeficiente de reflexión:

$$\rho = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}$$

Los analizadores de espectros dan el valor de Z_{in} directamente. Otras medidas relacionadas con Z_{in} y ρ son las **pérdidas de retorno**:

$$-20 \cdot \log |\rho|$$

COE (Coeficiente de Onda Estacionaria):

$$COE = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

Pérdidas por desadaptación:

$$10 \log(1 - |\rho|^2)$$

En transmisión, una desadaptación entre el transmisor y la antena puede causar grandes daños en el equipamiento debido a la potencia reflejada.

- **Far field radiation region:** A una distancia suficientemente grande de la antena la energía se radia de forma esférica y los frentes de onda pueden ser considerados planos, los campos \vec{E} y \vec{H} son mutuamente **perpendiculares**, perpendiculares a la dirección de propagación $\wedge r$ y sus módulos están en fase y relacionados con la impedancia intrínseca del medio:

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \eta$$

La distancia a la cual los campos radiados son considerados como ondas planas y los parámetros de radiación son constantes dependen de la antena y frecuencia. Esta región del espacio se llama far field radiation region. Un valor aproximado para la mínima distancia que asegura la condición far field es:

$$r > \frac{2D^2}{\lambda} \text{ D: Largest dimension of the antenna}$$

Densidad de Flujo por Unidad de Área: O Densidad de potencia obtenida del campo eléctrico y magnético como (rms):

$$\vec{W}(\theta, \phi) = \vec{S}(\theta, \phi) = \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}) \text{ W/m}^2$$

$$\vec{S}(\theta, \phi) = \frac{1}{\eta} \left[|\vec{E}_\theta(\theta, \phi)|^2 + |\vec{E}_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \hat{r}$$

Este vector es el valor RMS del vector Poynting. La potencia radiada puede ser calculada como la integral del flujo de potencia a través de una superficie que engloba a la antena:

$$P_r = \iint_S \vec{S}(\theta, \phi) \cdot \partial \vec{s} = \int_0^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\phi=\pi} \vec{S}(\theta, \phi) \hat{r} \cdot \sin^2 \theta \cdot \partial \theta \cdot \partial \phi$$

- **Patrón de Radiación o Patrón de Antena:** Gráfico tridimensional de una de las siguientes magnitudes.

$$\text{Intensidad de Campo Eléctrico Normalizada : } 20 \cdot \frac{|\vec{E}(\theta, \varphi)|}{|\vec{E}_{\max}|}$$

$$\text{Densidad de Potencia Radiada Normalizada : } 10 \cdot \log \frac{S_{rad}(\theta, \varphi)}{S_{rad_{max}}}$$

Debido a las propiedades de las ondas planas ambos diagramas son iguales y el campo magnético puede ser usado con el mismo resultado. El patrón de radiación es un gráfico que ayuda a visualizar dónde transmite/recibe potencia la antena.

En muchos casos es mucho más sencillo y suficiente representar el patrón de radiación mediante cortes. Los más utilizados son θ constante (paralelo) y ϕ constante (meridianos). Para la mayoría de antenas (antenas polarizadas linealmente) hay dos planos principales:

- **Plano E:** Definido por la dirección de la radiación máxima y el vector campo eléctrico en esa dirección.
- **Plano H:** Definido por la dirección de la radiación máxima y el vector campo magnético en esa dirección.

Los dos planos son perpendiculares y su intersección es la dirección de máxima ganancia. Una onda está polarizada según su plano \vec{E} . Si la antena no está polarizada correctamente hay pérdidas de despolarización. Los cortes pueden representarse en coordenadas cartesianas o polares.

- **PIRE** (*Potencia Isotrópica Radiada Efectiva*): Potencia que tendría que radiar una antena isotrópica para obtener la misma densidad de potencia que produciría una antena direccional en la dirección de máxima radiación. El efecto de la direccionalidad es que en algunas direcciones hay una ganancia de potencia relativa al radiador isotrópico.

$$\begin{aligned} \text{PIRE} &= D \cdot P_r \\ &= G \cdot P_{in} \end{aligned}$$

- **PRA** (*Potencia Radiada Aparente*) es la potencia que tendría que radiar una antena dipolo de media onda para obtener la misma densidad de potencia que produciría una antena direccional en la dirección de máxima radiación. Es la misma definición que PIRE pero utilizando un dipolo de media onda en lugar de una antena isotrópica.

$$\text{PIRE} = \text{PRA} + 2,15(\text{dB})$$

Falta dónde poner esto:

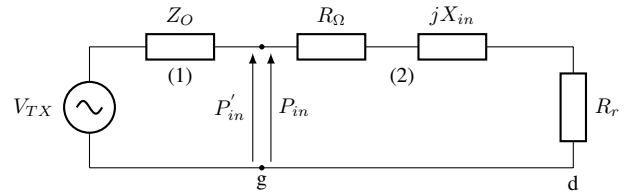


Figura 3: Antena Transmisora

Las **pérdidas por desadaptación** (1) se producen en el generador del transmisor y las **pérdidas de desadaptación** en la antena transmisora.

$$\begin{aligned} Z_{in} &= R_{in} \\ X_{in} &= R_R + R_\Omega + j \cdot X_{in} \end{aligned}$$

La potencia

$$\begin{aligned} P_{in} &= P'_{in}(1 - |\rho|^2) \\ P_R &= \eta \cdot P_{in} = I^2 \cdot R_R \end{aligned}$$

Donde:

$$\rho = \frac{Z_{in} - Z_O}{Z_{in} + Z_O} \quad \eta = \frac{R_R}{R_R + R_\Omega}$$

En el aire se trabaja con densidad de potencia:

$$DyS \rightarrow S = \frac{P_r}{4\pi r^2} \cdot D = \frac{P_{in}}{4\pi r^2} \cdot G = \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$\begin{aligned} S &= E \cdot H \\ \left(\frac{W}{m^2} \right) &= \left(\frac{V}{m} \right) \cdot \left(\frac{A}{m} \right) \end{aligned}$$

$$G \cdot P_{in} = D \cdot P_r$$

Onda plana (campo lejano): $E = H \cdot \eta_0$ con $\eta_0 = 120\pi(\Omega)$.

Antena Receptora: La energía la da la antena receptora, no es un generador pero actúa como él.

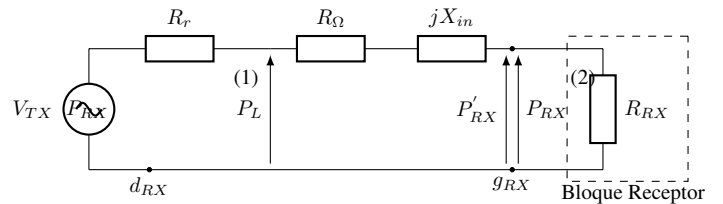


Figura 4: Antena Receptora

Las **pérdidas óhmicas** (1) se producen en el generador y las **pérdidas por desadaptación** (2) se producen en el bloque receptor.

P_L es la potencia generada de la antena, no tiene en cuenta las pérdidas óhmicas. Se reciben $\left(\frac{W}{m^2} \right)$, para pasarlo a W multiplicar S por el área efectiva de la antena:

$$S \cdot A_{ef} = \left(\frac{W}{m^2} \right) \cdot m^2$$

Donde:

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot D_{RX}(m^2)$$

¿Qué potencia llega a R_{RX} ?:

$$P_{Ohmicas} : P'_{RX} = P_L \cdot \eta_{RX} \quad \eta_{RX} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega}$$

$$P_{Desadaptacion} : P_{RX} = P'_{RX}(1 - |P_{RX}|^2) \quad \rho_{RX} = \frac{Z_{RX} - Z_{ANT_{RX}}}{Z_{RX} + Z_{ANT_{RX}}}$$

$$p_L = \frac{P_R \cdot D_{TX}}{4\pi r^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot D_{RX}$$

$$= P_R \cdot D_{TX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot D_{RX}$$

$$P_L = 10 \cdot \log \left(P_R \cdot D_{TX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot D_{RX} \right) = 10 \cdot \log p_L$$

$$P_L = 10 \cdot \log \left(P_R \cdot D_{TX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot D_{RX} \right) = 10 \cdot \log p_L$$

$$= 10 \cdot \log P_r + 10 \cdot \log D_{TX} + 20 \cdot \log \frac{\lambda}{4\pi r} + 10 \cdot \log D_{RX}$$

$$= P_R(dB) + D_{TX}(dB) - 20 \log \frac{4\pi r}{\lambda} + D_{RX}(dB)$$

$$= P_R(dB) + D_{TX}(dB) + L_{FS} + D_{RX}(dB) \quad \text{Ecuación de Propagación en el Espacio Libre de FRIIS}$$

$$= P_{in}(dB) + G_{TX}(dB) + L_{FS} + D_{RX}(dB)$$

Donde $-20 \log \frac{4\pi r}{\lambda}$ son las **LFS** pérdidas de espacio libre.

Si se coge P'_{RX} en lugar de P_L :

$$P'_{RX} = P_{in} + G_{TX} - L_{FS} + G_{RX}$$

$$= P_r + G_{TX} - L_{FS} + D_{RX}$$

$$P_r + D_{TX} - L_{FS} = P_L D_{RX}$$

¿Por qué D_{RX} es de signo negativo en la expresión de arriba al despejar?. Al estar trabajando en unidades logarítmicas, una resta en lineal sería una división por lo que p_L/d_{RX} . Una antena transmisora se le entrega P_{TX} y la concentra $x \cdot d_{TX}$, una antena receptora recibe P_{RX} y la desconcentra x/d_{RX} de ahí el signo negativo de la expresión.

¿Por qué L_{FS} es de signo negativo?

$$L_{FS} = -20 \cdot \log \frac{4\pi r}{\lambda}$$

$\frac{4\pi r}{\lambda}$ siempre será mayor que uno (condición de campo lejano) por lo que el logaritmo dará valores positivos y el resultado con el menos será negativo.

Unidades de D_{TX} :

$$D_{TX} = \frac{S_{max}}{S_{iso}} = \frac{\frac{W}{m^2}}{\frac{W}{m^2}} = \text{adimensional}$$

Según la referencia que se tome las unidades de D son unas u otras:

- Referencia antena isotrópica: dBi
- Referencia dipolo: dBd .