

## Uso de sistemas radio en ATC



# Uso de la radio en ATC (I)

Las comunicaciones a través de radio en ATC se denominan “Aeronautical Mobile Service” (AMS), más comúnmente conocidas como comunicaciones tierra-aire (G/A).

Para este tipo de comunicaciones se utilizan las bandas de frecuencia HF, VHF y UHF, con modos de propagación directo (no se utiliza onda ionosférica).

## Consideraciones:

- Las estaciones ATS necesitan escuchar continuamente las frecuencias asignadas durante las horas de servicio publicadas, a menos que se notifique lo contrario. (Disponibilidad, Continuidad).
- Las aeronaves deben comunicarse con las estaciones ATS en tierra que controlan el área o sector en el que están volando. (Cobertura).
- La aeronave debe escuchar continuamente la frecuencia apropiada de las estaciones ATS y no debe abandonarla, excepto en caso de emergencia. (Canales, Cobertura).

## Uso de la radio en ATC (II)

- Las comunicaciones por radio son la base del sistema ATS, por lo que su disponibilidad debe ser muy alta. Para mantener estos niveles de disponibilidad es necesario establecer sistemas redundantes. (Redundancia, mayor disponibilidad)
- El factor más importante en las comunicaciones piloto-controlador es la comprensión del mensaje, para ello ambos actores deben conocer el alfabeto aeronáutico. Una buena fraseología mejora la seguridad y es distintivo de un piloto profesional.
- Es esencial que los pilotos reconozcan cada comunicación por radio con ATCo utilizando el distintivo de la aeronave “Call sign” y el uso conciso y exacto de la fraseología. Tanto el piloto como el controlador deben conocer lo que el otro quiere realizar para poder tomar las decisiones correctas.

# Principios de funcionamiento de los sistemas radio (I)

Las comunicaciones radio incluyen la transmisión de voz y datos, ambos tipos de mensajes utilizan técnicas de modulación.

La modulación es necesaria para poder emitir energía electromagnética en el espacio libre con la información de audio o datos.

Se puede definir la modulación como el proceso por el que se modifica una o varias propiedades de una onda periódica (onda electromagnética de alta frecuencia, onda portadora) en función de las características de la señal a transmitir (señal moduladora). Las modulaciones más características modifican la amplitud de la portadora (modulaciones lineales AM) o la frecuencia instantánea de la portadora (modulaciones no lineales, FM, PM).

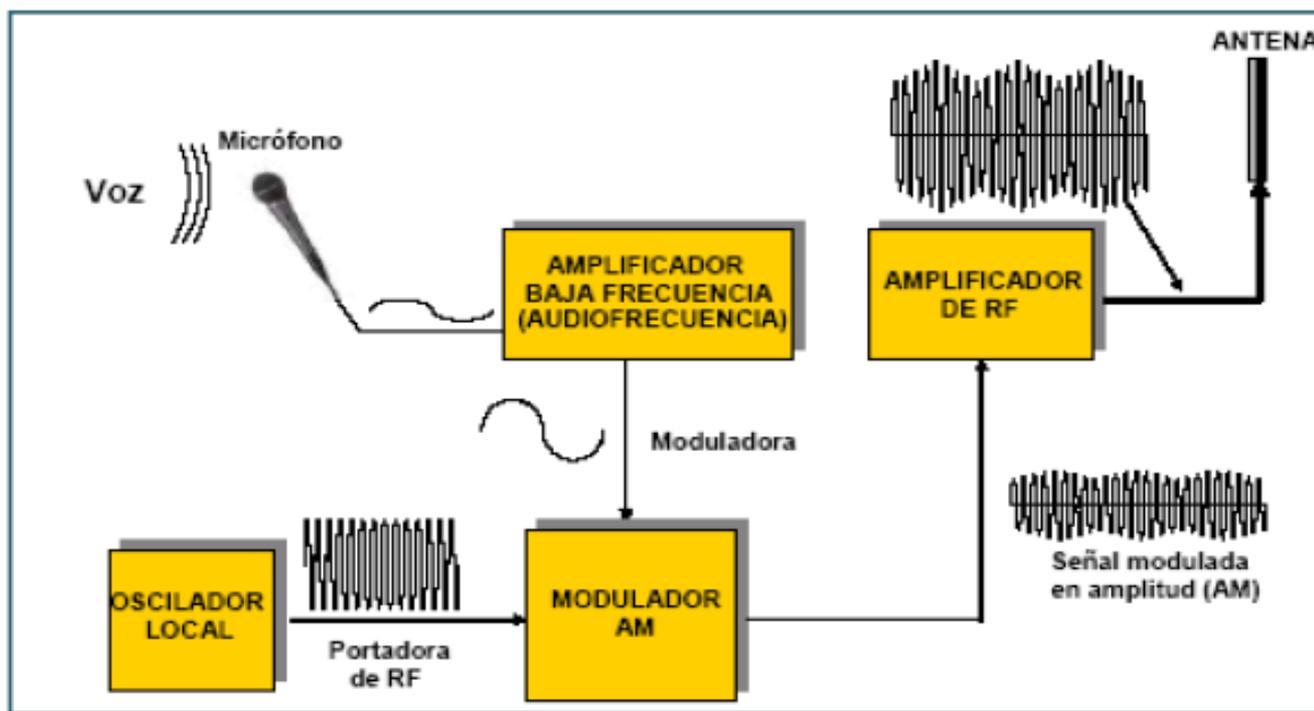
- Portadora (Carrier): Es la onda que se modifica en función de la señal a transmitir, siempre de frecuencia muy superior a la de la onda moduladora.
- Moduladora (modulating signal): Señal de baja frecuencia que contiene la información (voz, datos).
- Modulador: Circuito electrónico que realiza el proceso de modulación, del cual se obtiene la onda modulada.

## Principios de funcionamiento de los sistemas radio (II)

En CNS se utilizan principalmente los siguientes tipos de modulaciones:

- AM: Amplitude modulation: Se modifica la amplitud de la portadora. (Comunicaciones voz, ILS, VOR, NDB, SSR, etc.).
- FM: Frequency modulation: Se modifica la frecuencia de la portadora. (VOR, modems, Radar, etc.).
- PM: Phase modulation: Se modifica la fase de la portadora. (Señales GNSS, SSR modo S, etc.).

# Esquema transmisor AM



Block diagram of an AM transmitter

# Transmisor AM

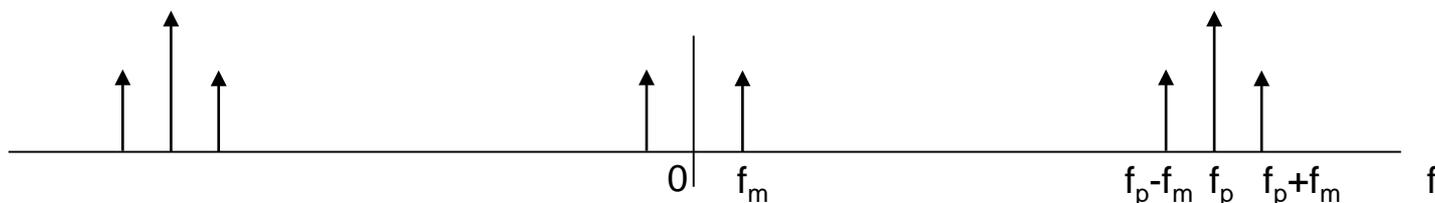
1. La información a transmitir (voz o datos) se convierte en una señal eléctrica (la onda) utilizando un sensor (por ejemplo, un micrófono).
2. La onda (portadora) que va a transmitir la señal de banda base, se genera en un oscilador.
3. La "portadora" es modulada por la onda que contiene la información (moduladora) dentro del modulador, subiendo las frecuencias de la señal moduladora a unas frecuencias mucho más altas, a las cuales es posible la transmisión de una onda electromagnética.
4. En el proceso de modulación se modifica la amplitud de la señal portadora según la señal moduladora. La envolvente de la señal modulada, por tanto, tiene la forma de la señal moduladora.
5. El transmisor es un amplificador de potencia en RF, que proporciona a la antena el nivel de potencia para satisfacer la cobertura necesaria.
6. La antena convierte corrientes eléctricas en una onda electromagnética. La longitud de ésta varía según su rendimiento teniendo longitudes de fracciones de la longitud de onda de la señal portadora.

# Modulación en amplitud con un tono

Ecuación onda modulada:

$$x_m(t) = A_m \cos(\omega_m t) \quad x_{AM}(t) = A_p [1 + m \cdot \cos(\omega_m t)] \cos(\omega_p t)$$

$$x_{AM}(t) = A_p \cos(\omega_p t) + \frac{mA_p}{2} [\cos((\omega_p - \omega_m)t) + \cos((\omega_p + \omega_m)t)]$$

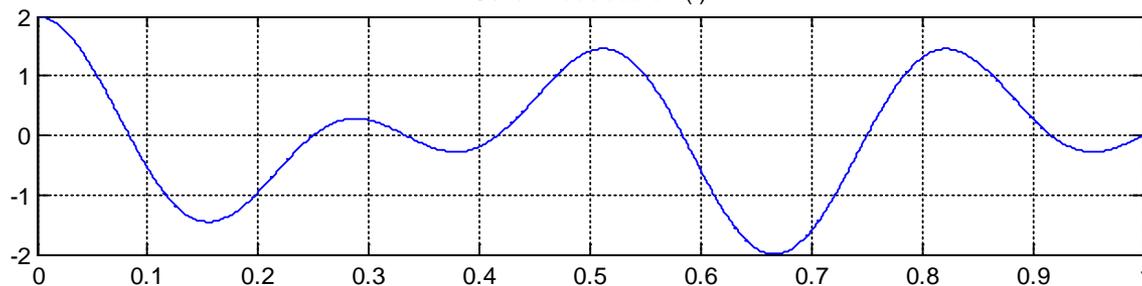


Potencia onda modulada:

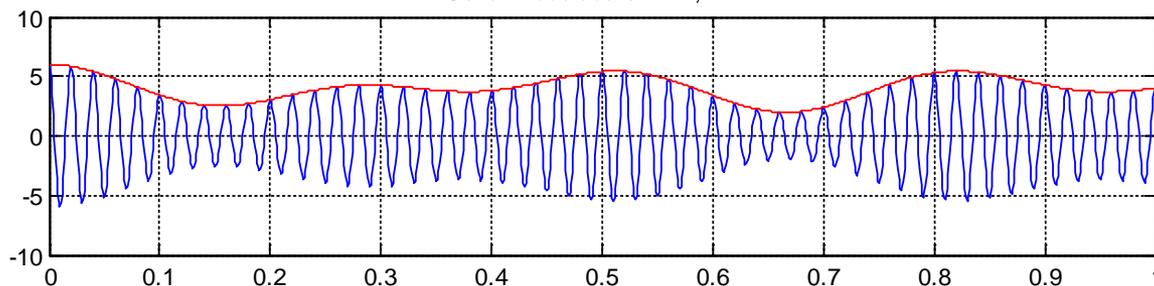
$$P_T = \frac{A_p^2}{2} \left[ 1 + m^2 \frac{1}{2} \right] \quad P_{Pico} = \frac{(A_p + A_m)^2}{2} = \frac{A_p^2}{2} (1 + m)^2$$

# Señales en la modulación de amplitud

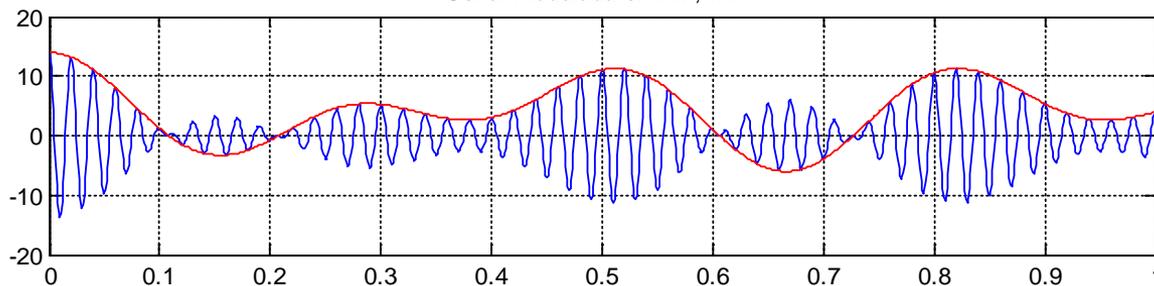
Señal moduladora  $x(t)$



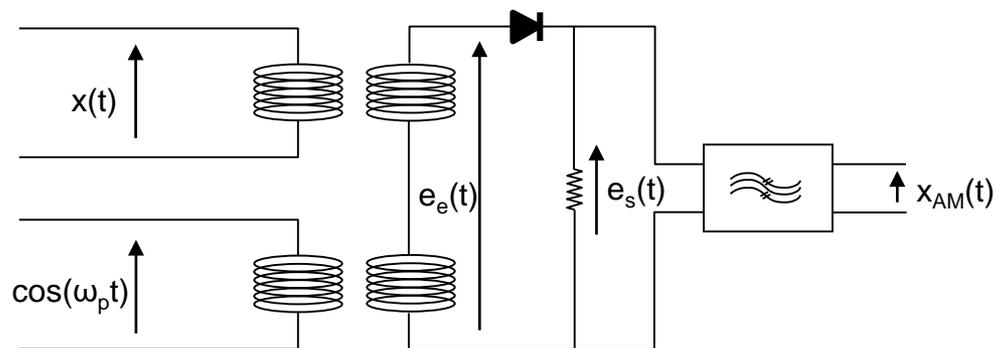
Señal modulada en AM,  $m < 1$



Señal modulada en AM,  $m > 1$



# Modulador AM

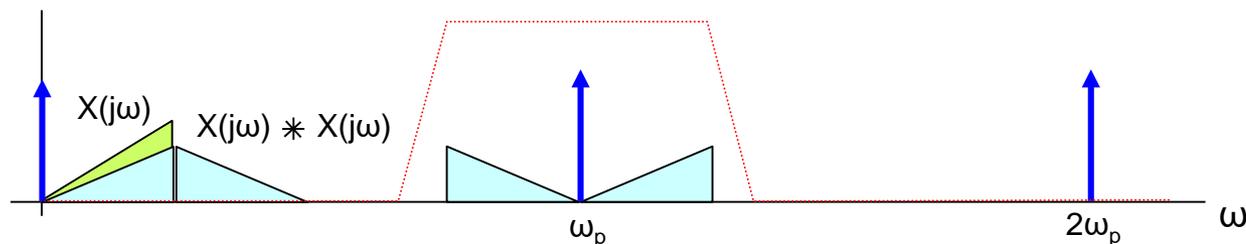


$$e_e(t) = x(t) + \cos(\omega_p t)$$

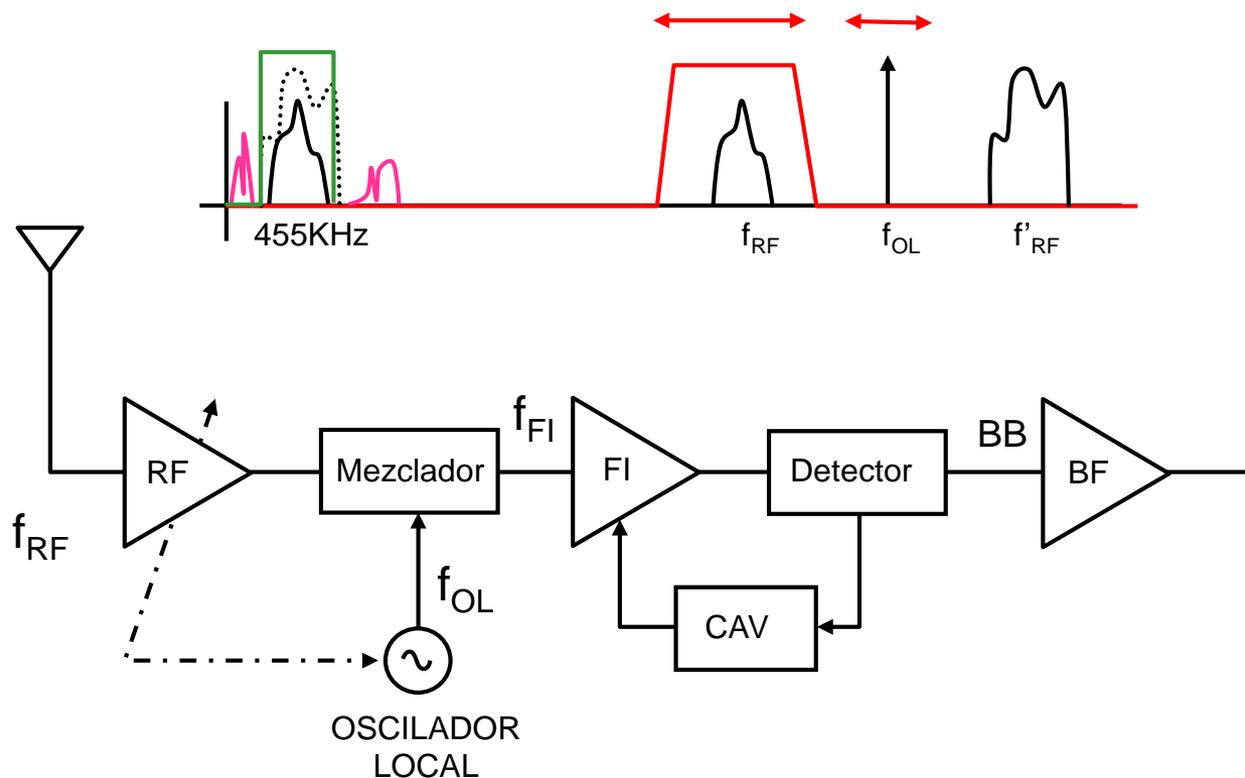
$$e_s(t) = a_1 [x(t) + \cos(\omega_p t)] + a_2 [x(t) + \cos(\omega_p t)]^2$$

$$e_s(t) = a_1 x(t) + a_1 \cos(\omega_p t) + a_2 x^2(t) + a_2 \cos^2(\omega_p t) + 2a_2 x(t) \cos(\omega_p t)$$

$$e_s(t) = a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_2 \cos^2(\omega_p t) + a_1 [1 + (2a_2/a_1)x(t)] \cos(\omega_p t)$$



# Receptor Superheterodino



$$f_{FI} = f_{OL} - f_{RF}$$

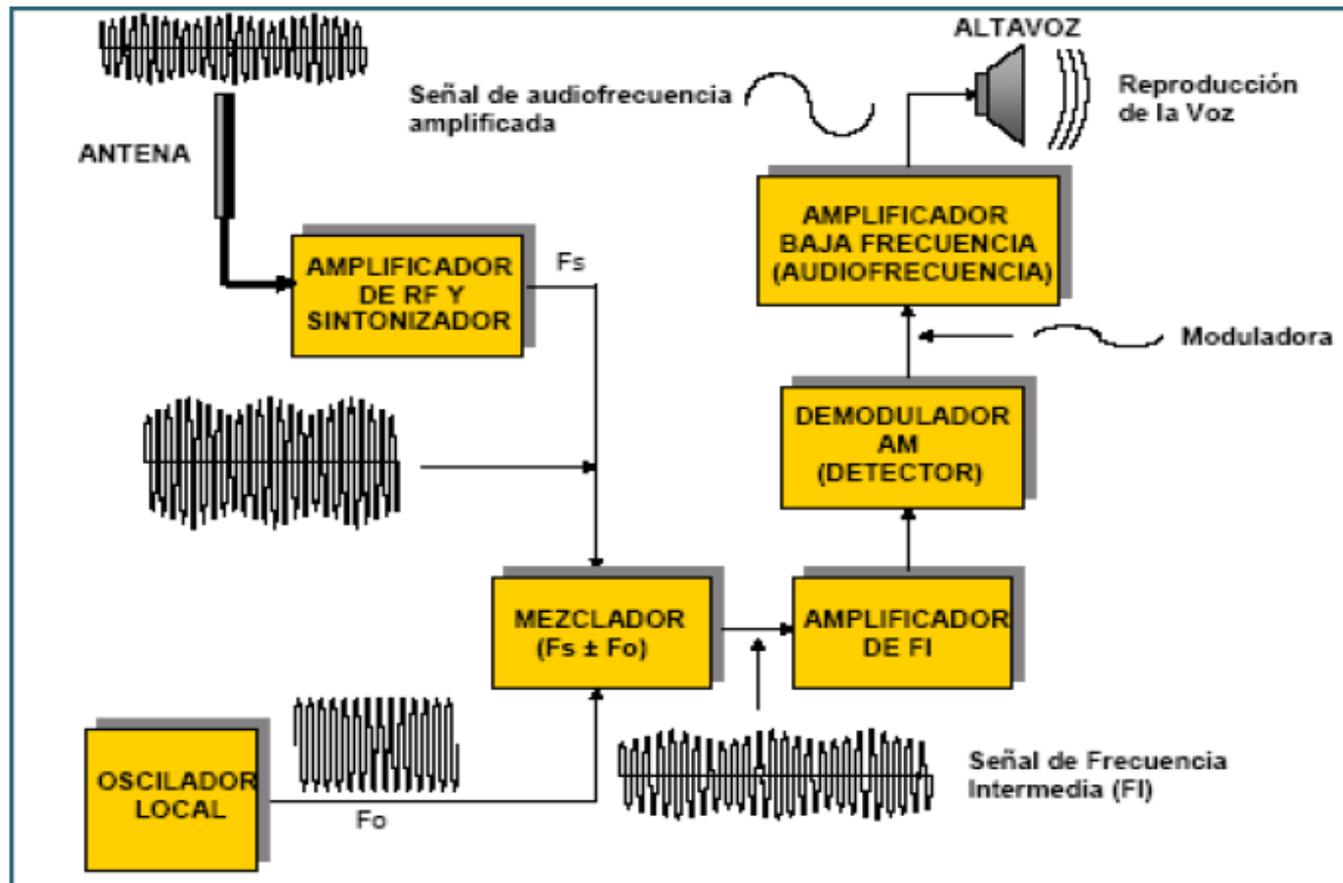
Para la frecuencia imagen también se cumple:

$$\begin{cases} f_{FI} = f'_{RF} - f_{OL} \\ 2f_{FI} = f'_{RF} - f_{RF} \end{cases}$$

# Receptor superheterodino

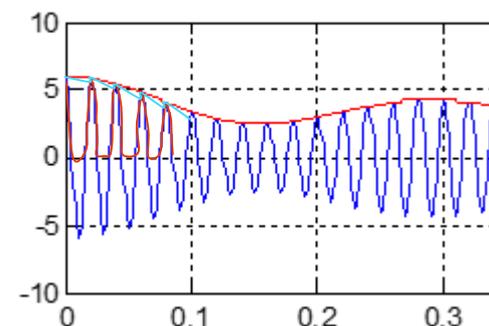
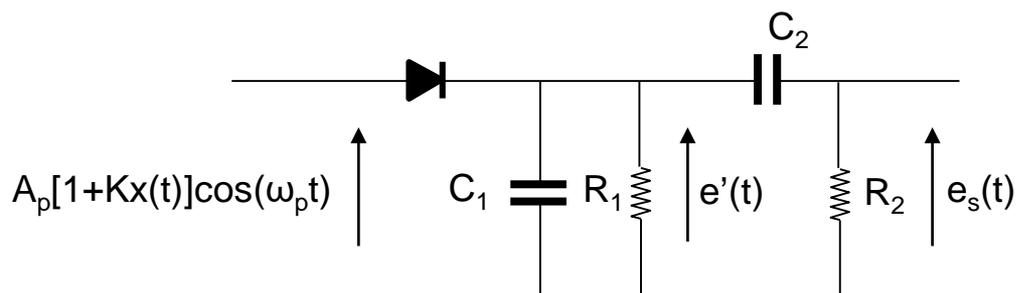
1. La tensión inducida en la antena a partir de la onda electromagnética se introduce en el receptor.
2. Como inicialmente la potencia de la señal recibida es muy baja se amplifica, a la vez se le aplica un filtrado paso banda para amplificar únicamente el canal deseado. Esta etapa determina la sensibilidad del receptor.
3. En una segunda etapa se multiplica la señal recibida (RF) por una señal senoidal procedente del oscilador local (OL). La frecuencia del oscilador local se ajusta 455KHz por encima de la frecuencia a recibir. Al multiplicar la RF con la señal OL se obtienen sumas y restas de frecuencias, de las cuales interesa únicamente la resta, la cual tiene una frecuencia de 455KHz (FI).
4. En la siguiente etapa se amplifica y filtra la señal FI de forma que se eliminen las componentes de los canales adyacentes. Esta etapa determina la selectividad del receptor.
5. Después de la etapa FI se demodula la señal (bien con un demodulador de AM, FM o PM) y se extrae una muestra de la señal.
6. Por último se amplifica la señal moduladora que proporciona el demodulador.
7. El CAV es un circuito que produce una realimentación, de forma que cuando la señal de salida es baja aumenta la ganancia de los amplificadores de FI.

# Diagrama de bloques de un receptor AM



Block diagram of an AM receiver

# Demodulador AM



## Detector de envolvente:

(1) La Cte de tiempo de  $R_1, C_1$  tiene que ser mayor que  $1/f_p$

(2)  $e'(t) = K'_D A_p [1 + mx(t)]$       $e_s(t) = K_D x(t)$

## Detector de ley cuadrática:

$$e_d(t) = a_1 A_p [1 + mx(t)] \cos(\omega_p t) + a_2 A_p^2 [1 + mx(t)]^2 \cos^2(\omega_p t) =$$

$$a_1 A_p \cos(\omega_p t) + a_1 A_p mx(t) \cos(\omega_p t) + (a_2 A_p^2 / 2) \cdot [1 + m^2 x^2(t) + 2mx(t)] [1 + \cos(2\omega_p t)]$$

$$e_s(t) = (a_2 A_p^2 / 2) \cdot [m^2 x^2(t) + 2mx(t)]$$

# Modulación de fase (PM) y frecuencia (FM)

Modulación de fase:

$$\phi_c(t) = K_p m(t) \quad \theta_i(t) = 2\pi f_c t + K_p m(t)$$

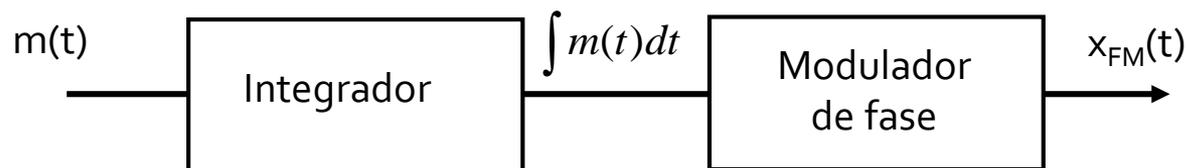
$$s(t) = A_c \cos[\omega_c t + K_p m(t)]$$

Modulación de frecuencia:

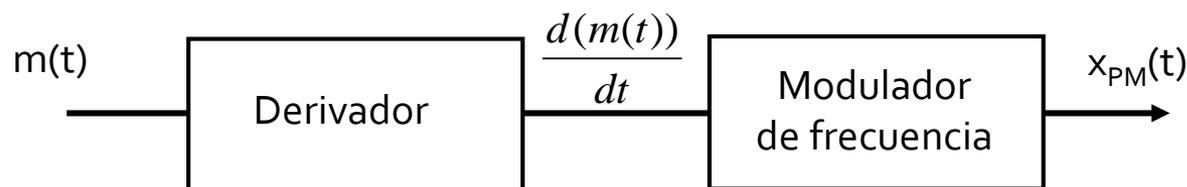
$$f_i(t) = f_c + K_f m(t) \quad \theta_i(t) = 2\pi f_c t + 2\pi K_f \int_0^t m(t) dt$$

$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + 2\pi K_f \int_0^t m(t) dt] \quad P_m = \frac{1}{2} A_c^2$$

# Moduladores de frecuencia y fase



Modulador de Frecuencia



Modulador de Fase

## Modulación en frecuencia con un tono

$$m(t) = A_m \cos(\omega_m t) \quad f_i(t) = f_c + K_f A_m \cos(\omega_m t)$$

$$s(t) = A_c \cos\left[2\pi f_c t + 2\pi K_f A_m \int_0^t \cos(\omega_m t) dt\right] \quad \beta = \frac{2\pi K_f A_m}{\omega_m} = \frac{K_f A_m}{f_m}$$
$$s(t) = A_c \cos[\omega_c t + \beta \sin(\omega_m t)]$$

$$s(t) = A_c [\cos(\omega_c t) \cos(\beta \sin(\omega_m t)) - \sin(\omega_c t) \sin(\beta \sin(\omega_m t))]$$

## FM con un tono (Banda ancha, $\beta > 0.2$ rad.) I

$$\cos[\beta \sin(\omega_m t)] \quad \sin[\beta \sin(\omega_m t)]$$

Son funciones periódicas (la primera par y la segunda impar) con frecuencia fundamental  $f_m$ , por lo que se pueden desarrollar por series de Fourier de la forma:

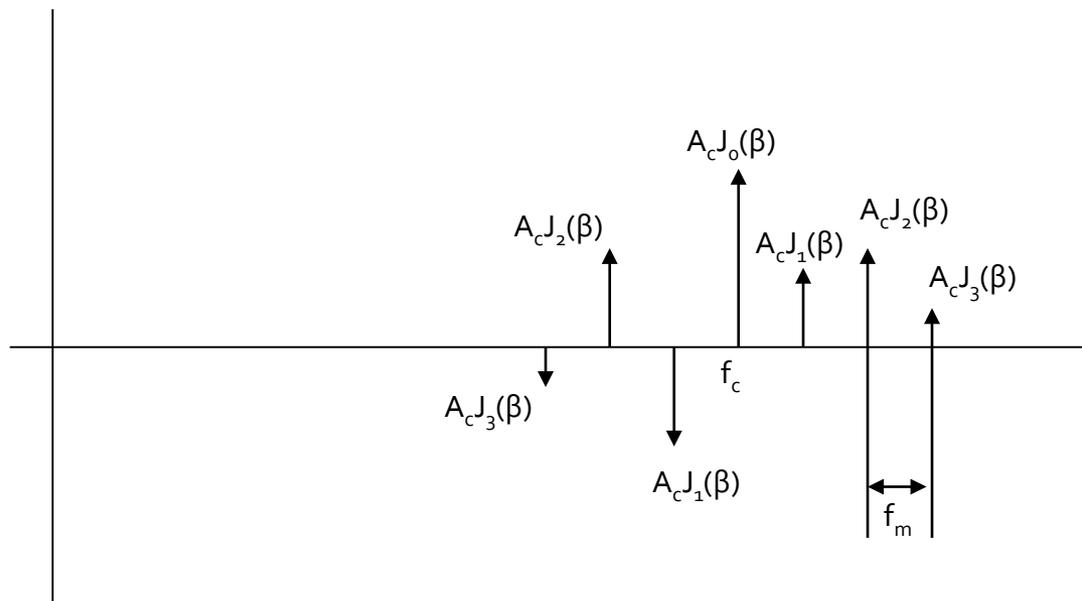
$$\begin{aligned} \cos[\beta \sin(\omega_m t)] &= J_0(\beta) + 2J_2(\beta) \cos(2\omega_m t) + 2J_4(\beta) \cos(4\omega_m t) + \dots \\ &+ 2J_{2n}(\beta) \cos(2n\omega_m t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin[\beta \sin(\omega_m t)] &= 2J_1(\beta) \sin(\omega_m t) + 2J_3(\beta) \sin(3\omega_m t) + \dots \\ &+ 2J_{2n-1}(\beta) \sin((2n-1)\omega_m t) \end{aligned}$$

Los coeficientes  $J_n(\beta)$  se obtienen de las funciones de Bessel de 1ª clase de orden  $n$  y argumento  $\beta$ .

$$\begin{aligned} s(t) &= A_c J_0(\beta) \cos(\omega_c t) - A_c J_1(\beta) [\cos(\omega_c - \omega_m)t - \cos(\omega_c + \omega_m)t] \\ &+ A_c J_2(\beta) [\cos(\omega_c + 2\omega_m)t + \cos(\omega_c - 2\omega_m)t] \\ &- A_c J_3(\beta) [\cos(\omega_c - 3\omega_m)t - \cos(\omega_c + 3\omega_m)t] \\ &+ A_c J_4(\beta) [\cos(\omega_c + 4\omega_m)t + \cos(\omega_c - 4\omega_m)t] \\ &- \dots \end{aligned}$$

## FM con un tono (Banda ancha, $\beta > 0.2$ rad.) II



Si se transmiten  $(\beta_F + 1)$  pares de rayas espectrales el porcentaje de potencia transmitida es superior al 98%.

Regla de Carson:  $\Delta B = 2(\beta_F + 1)f_m = 2(\Delta f + f_m)$

## Modulación en frecuencia con un multitono

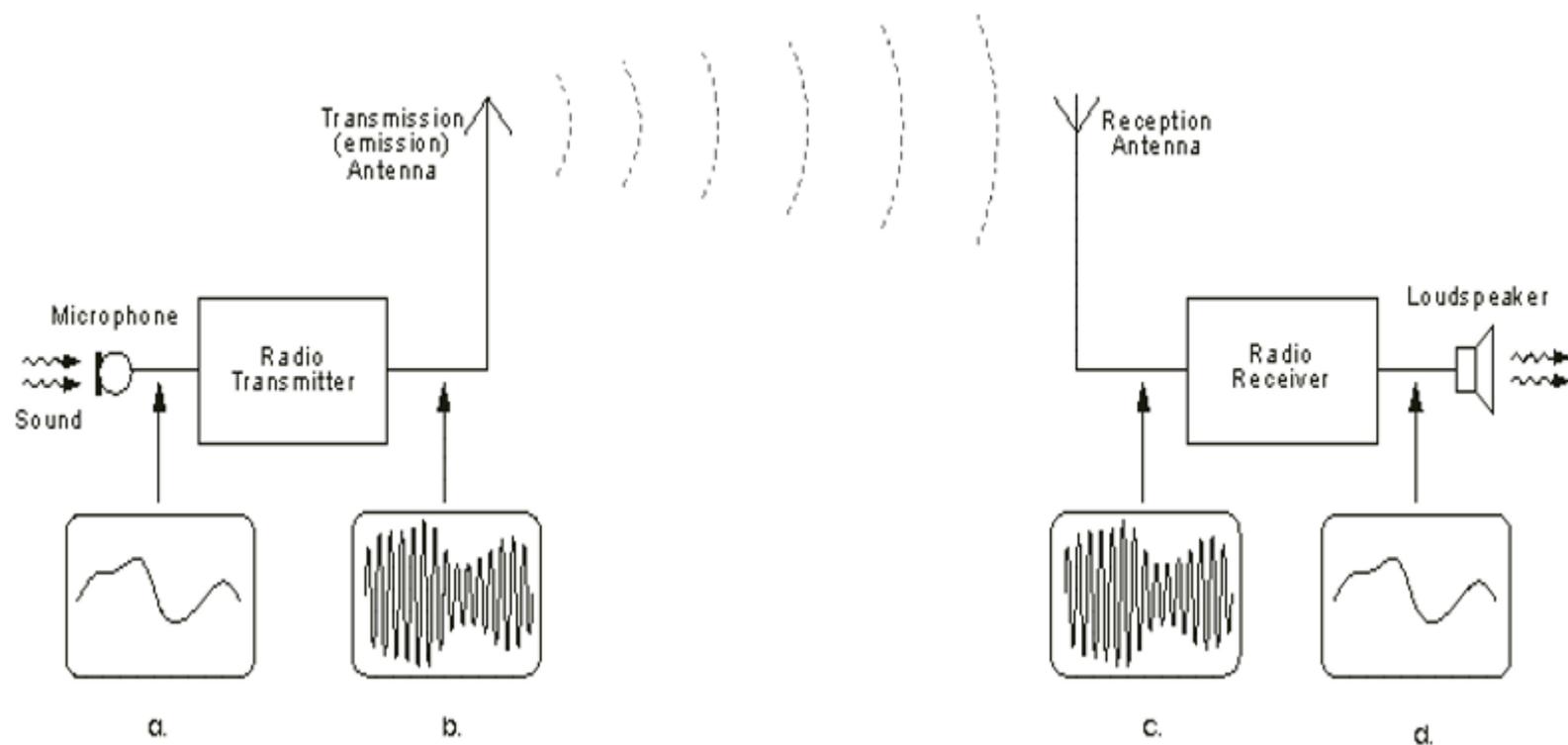
$$m(t) = A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t) \quad f_i(t) = f_c + K_f [A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t)]$$

$$s(t) = A_c \cos\left[2\pi f_c t + 2\pi K_f A_1 \int_0^t \cos(\omega_1 t) dt + 2\pi K_f A_2 \int_0^t \cos(\omega_2 t) dt\right]$$
$$s(t) = A_c \cos[\omega_c t + \beta_1 \sin(\omega_1 t) + \beta_2 \sin(\omega_2 t)]$$

$$s(t) = A_c [\cos(\omega_c t) [\cos(\beta_1 \sin(\omega_1 t)) \cos(\beta_2 \sin(\omega_2 t)) - \sin(\beta_1 \sin(\omega_1 t)) \sin(\beta_2 \sin(\omega_2 t))] - \sin(\omega_c t) [\sin(\beta_1 \sin(\omega_1 t)) \cos(\beta_2 \sin(\omega_2 t)) + \cos(\beta_1 \sin(\omega_1 t)) \sin(\beta_2 \sin(\omega_2 t))]]$$

$$s(t) = A_c \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_n(\beta_1) J_m(\beta_2) \cos(\omega_c + n\omega_1 + m\omega_2)t$$

# Esquema del proceso de comunicación por radio



# Transmisor AM

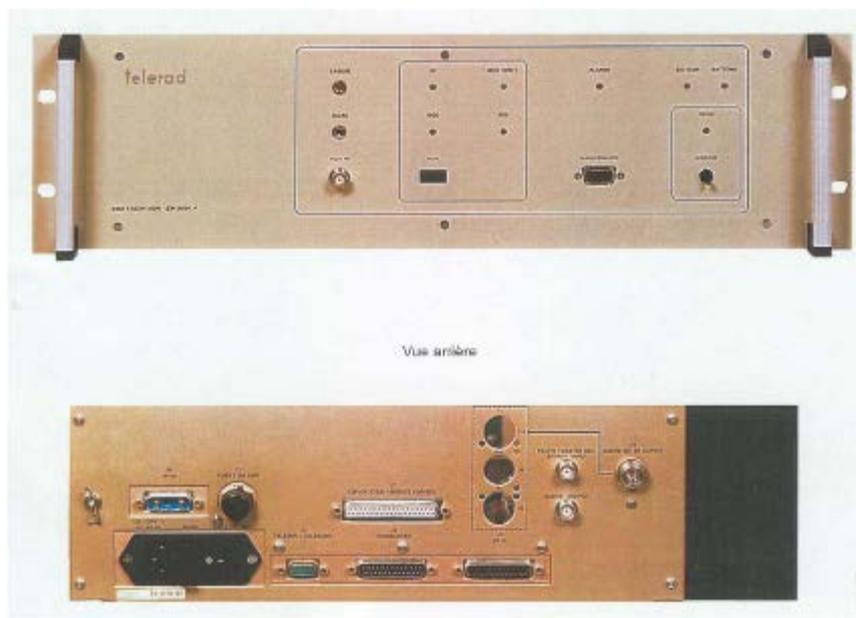


Figura A3.1.- VISTA FRONTAL Y TRASERA DEL TRANSMISOR TELERAD EM 9000 A

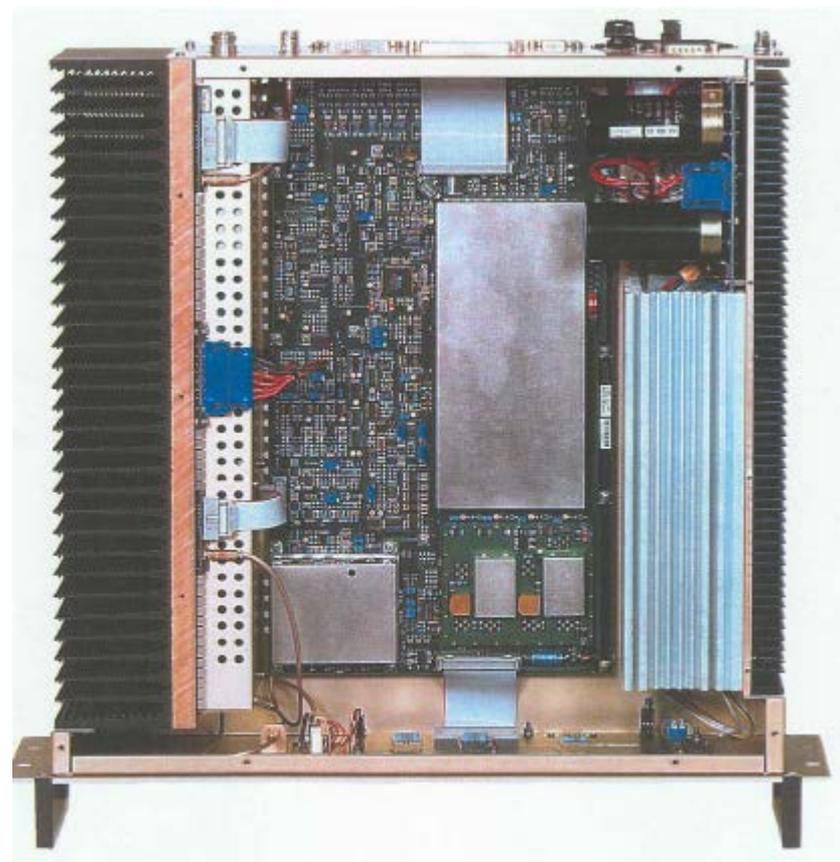


Figura A3.2.- VISTA POR ARRIBA DEL TRANSMISOR TELERAD EM 9000 A

# Receptor AM

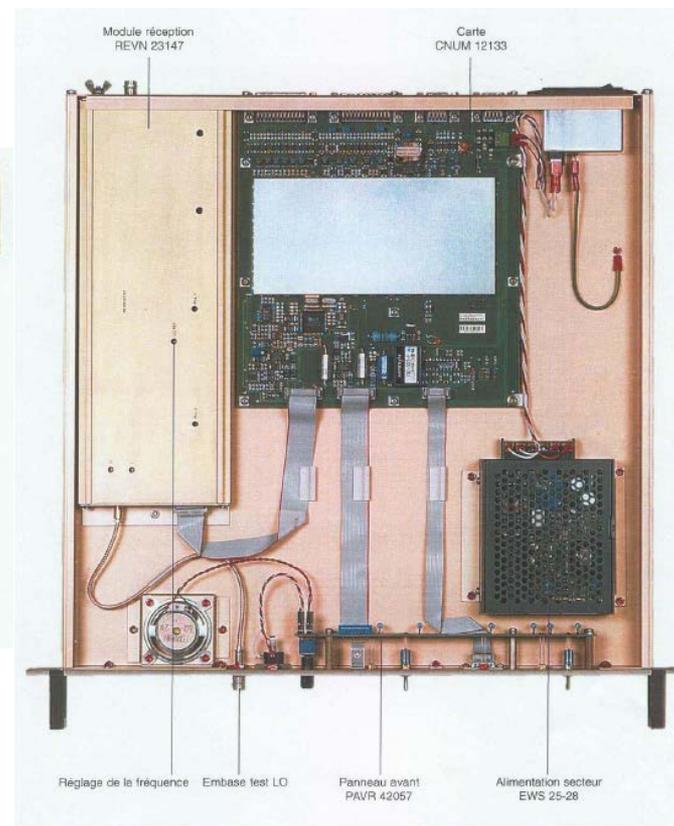
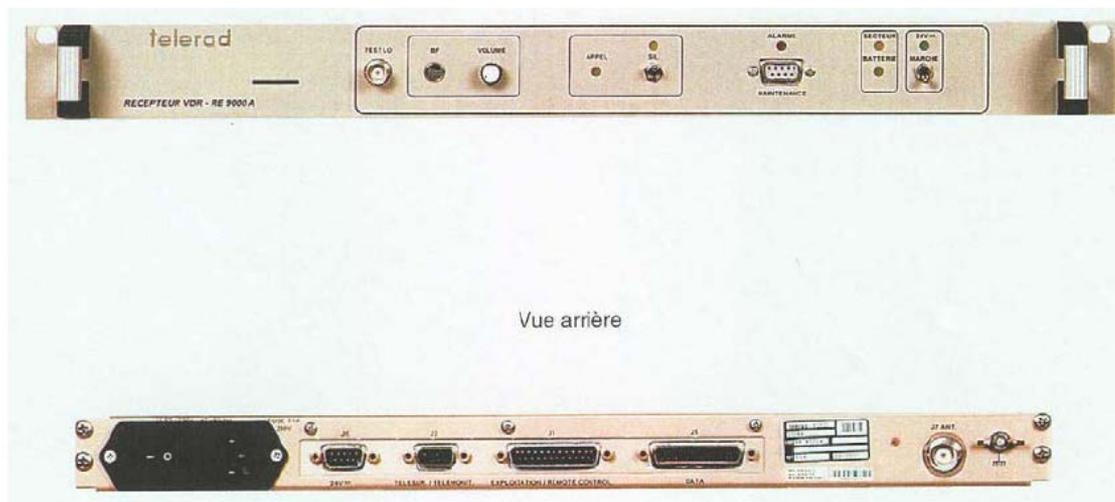


Figura A3.4.- VISTA POR ARRIBA DEL RECEPTOR TELERAD RE 9000

## Equipos ATC

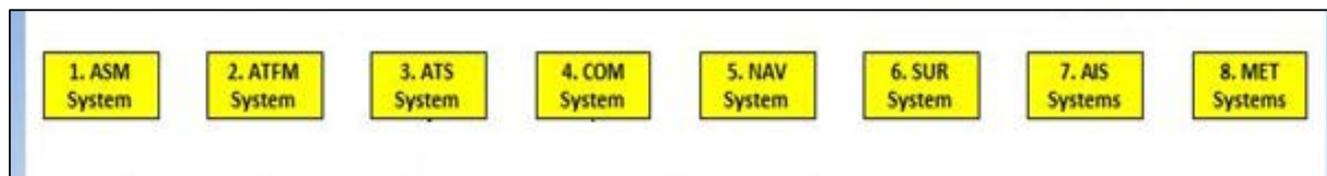
La prestación del servicio de navegación aérea se basa en el concepto CNS/ATM. La primera parte de este concepto, la forman los sistemas de comunicación, navegación y vigilancia (CNS), a los que se unen algunos tipos diferentes de equipos y sensores cuyo objetivo es distribuir la información que recopilan a las diferentes partes del sistema de navegación aérea.

El concepto CNS se divide en tres áreas diferentes donde los principales equipos y sensores son:

- Comunicaciones: Tx/Rx (G/A), VCS y G/G.
- Navegación: VOR, DME, NDB, ILS, MLS, VDF.
- Vigilancia: RADAR, ADS.

La segunda parte del concepto, conocida como Air Traffic Management (ATM), trata sobre los procedimientos, la tecnología y los recursos humanos que aseguran que:

- Las aeronaves son guiadas de manera segura por el espacio y en tierra.
- El espacio aéreo se gestiona para adaptarse a las necesidades cambiantes del tráfico aéreo a lo largo del tiempo.



## Grupos de equipos ATC (I)

Los servicios de tránsito aéreo requieren diferentes tipos de equipos para funcionar correctamente. Estos equipos pueden clasificarse en diferentes grupos: los utilizados directamente por los controladores de tránsito aéreo (ATCo) y los que respaldan la información que necesita ATCo.

El primer grupo incluye:

- Pantallas de información RADAR.
- Dispositivos meteorológicos: pantallas de rosa de los vientos y ATC MET.
- Sistemas de comunicación por voz.
- Pistolas de luz de señalización.
- Binoculares.
- Último recurso de radio y teléfono.
- Relojes.
- Panel de estado de ayudas.

Estos sistemas proporcionan a ATCo un medio para realizar su tarea principal durante la prestación del servicio de tránsito aéreo.

## Grupos de equipos ATC (II)

El segundo grupo de equipos contiene:

- Radio ayudas o ayudas a la navegación: (VOR, DME, NDB / ADF, ILS, MLS, VDF).
- Sistemas de comunicación: radio y líneas telefónicas.
- Radares (PSR, SSR).
- Satélites.
- Sistemas automatizados.
- Sistemas de gestión de flujo y espacio aéreo.

Estos sistemas proporcionan información no solo a los ATCo, sino también al resto de profesionales y partes de todo el sistema ATM. Por ejemplo, los sistemas de navegación (ayudas a la navegación) proporcionan a la aeronave información de posición a partir de las estaciones terrestres ubicadas por todo el mundo.

Estos sistemas ofrecen varios niveles de capacidad con características como información de corrección de rumbo, información automática de dirección y medición de distancia, se han desarrollado a lo largo de los años para crear un servicio eficaz de gestión del tránsito aéreo que garantice un alto nivel de seguridad y sea económicamente viable.

Estos sistemas no son utilizados directamente por ATCo, pero brindan soporte a los utilizados durante la prestación del servicio de tránsito aéreo.

## Regulaciones y Estándares (I)

Las principales regulaciones relacionadas con estos sistemas provienen de la OACI, pero también hay algunas otras organizaciones que administran los estándares, implementan reglas y medios de cumplimiento.

El Anexo 10 de la OACI es la norma más importante con respecto a los sistemas CNS. Los volúmenes que hacen referencia a los sistemas CNS son:

- Volumen I: Radioayudas para la navegación.
- Volumen II: Procedimientos de comunicación.
- Volumen III: Sistemas de comunicación.
  - Parte I: Sistemas de comunicación de datos digitales.
  - Parte II: Sistemas de comunicación por voz.
- Volumen IV: Sistemas de vigilancia y anticolisión.
- Volumen V: utilización del espectro de radiofrecuencia aeronáutico.

## Regulaciones y Estándares (II)

También hay algunos documentos de la OACI relacionados con los sistemas, uno de ellos con respecto a la gestión de la calibración de radioayudas. Documento 8071 de la OACI "Manual de prueba de radioayudas terrestres", Volumen I, "Prueba de sistemas de radionavegación basados en tierra", y Volumen II, "Prueba de sistemas RADAR de vigilancia".

Es importante para los ATCo porque define los procedimientos y las maniobras necesarias para ajustar las señales de navegación en el espacio, y este trabajo afecta el tráfico en todo el mundo. También existe una gran cantidad de regulaciones de la UE con respecto a la marca CE y la certificación que quedan fuera del alcance de este tema.