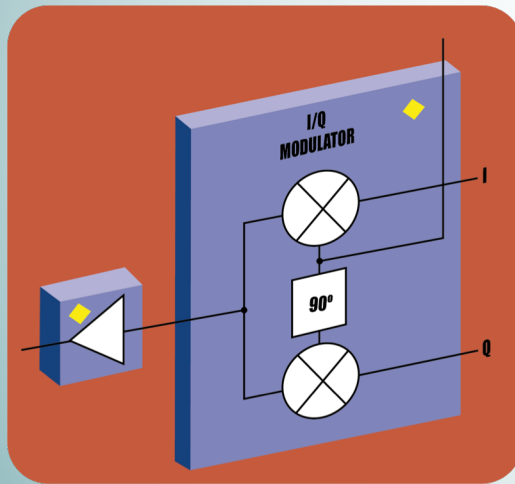


Electrónica de Radiofrecuencia

TEMA 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ARQUITECTURAS



Juan Pablo Pascual Gutiérrez

Enrique Villa Benito

Luisa María de la Fuente Rodríguez

José Ángel García García

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES

Este material se publica bajo la siguiente licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



Contenidos

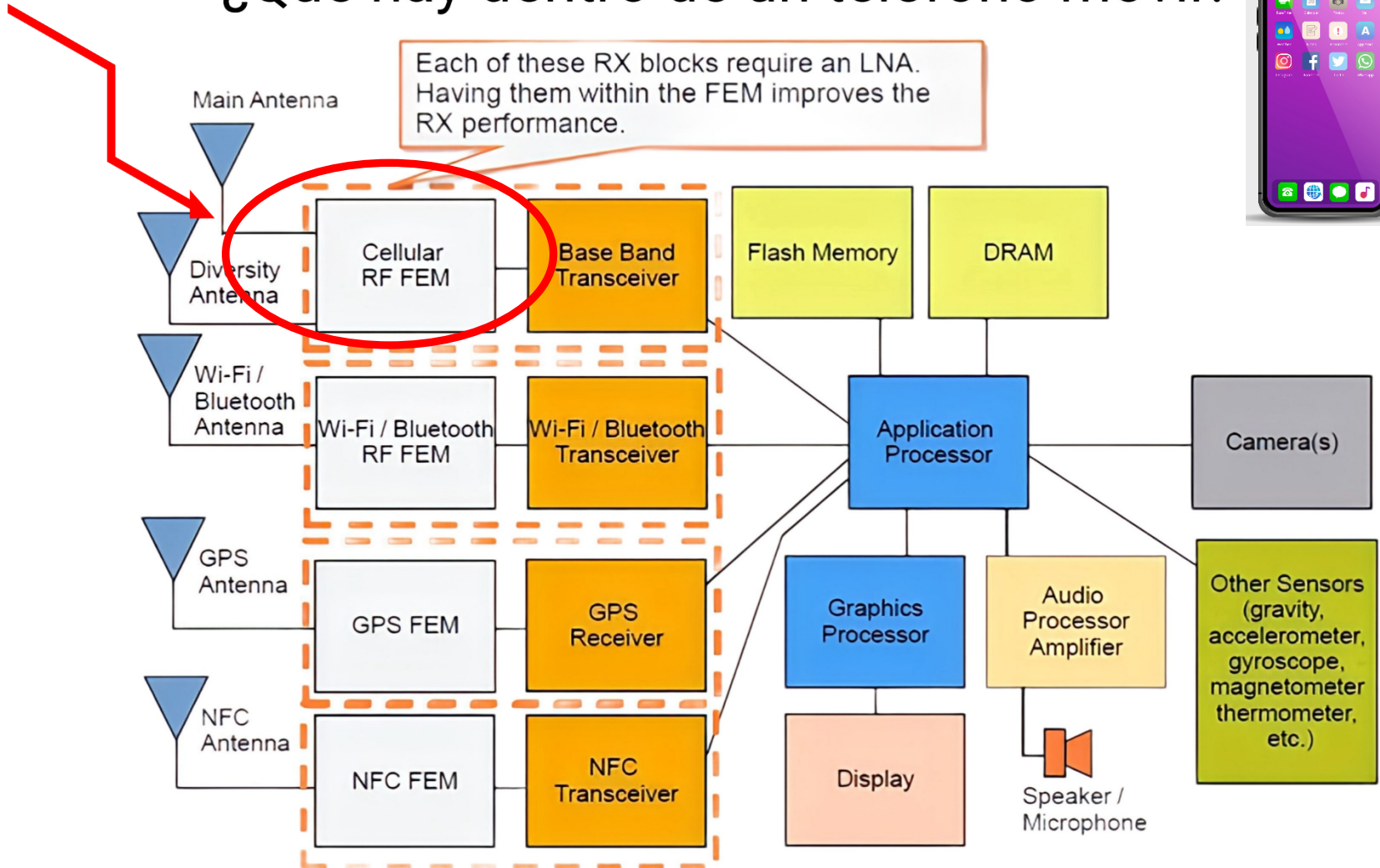
Índice de la presentación:

- Introducción: Situar el objeto de la asignatura: los subsistemas básicos de transmisores y receptores (amplificadores, osciladores y mezcladores) dentro de sistemas electrónicos más complejos.
- Índice de temas de la asignatura
- Presentación ejercicios y prácticas
- Bibliografía
- Introducción a la hipótesis localizada
- Espectro y bandas de RF y de Microondas
- Aplicaciones de circuitos de RF y microondas
- Arquitecturas de receptores y transmisores

Introducción

Desmenuzar los componentes elementales de las partes de "Radio" de los Sistemas Electrónicos

¿Qué hay dentro de un teléfono móvil?



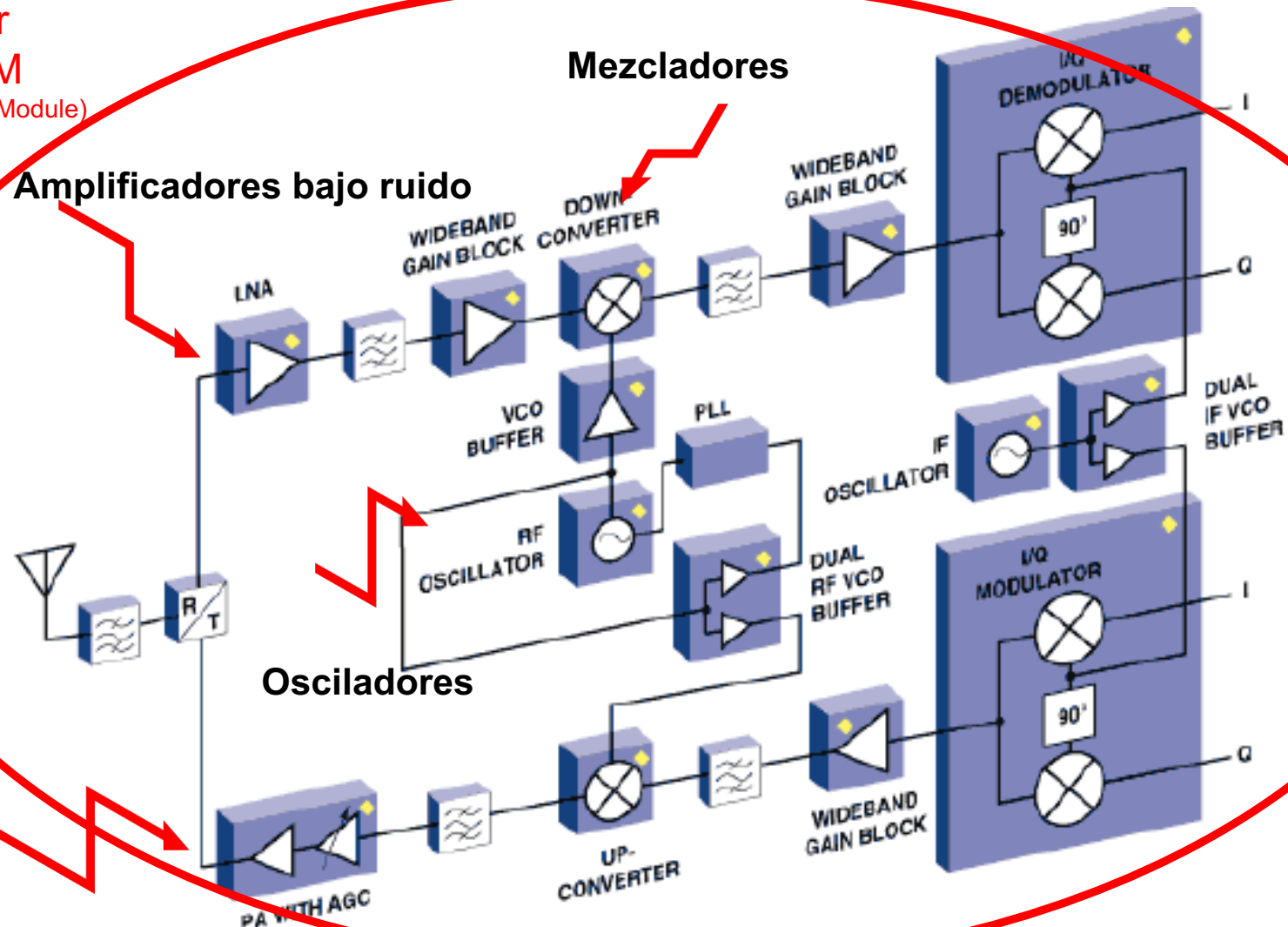
Introducción

Desmenuzar los componentes elementales de las partes de "Radio" de los Sistemas Electrónicos

Cellular
RF FEM
(Front End Module)

Amplificadores bajo ruido

Mezcladores



Amplificadores potencia

Índice asignatura

CONTENIDOS ASIGNATURA:

- **Tema 1**

Introducción: Principios de RF. Sistemas Electrónicos distribuidos.

Bandas del espectro y Aplicaciones. Arquitecturas de los sistemas de RF. Teoría de líneas de transmisión. Carta de Smith. Parámetros S. Amplificadores RF pequeña señal y bajo ruido.

- **Tema 2**

Osciladores: Osciladores RF: VCOs, Lazos de enganche en fase (PLL), Sintetizadores, Ruido de Fase.

- **Tema 3**

Mezcladores: Mezcladores, Dispositivos, figuras de mérito, Topologías. Moduladores. Modulación IQ

- **Tema 4**

Amplificadores: Amplificadores de Potencia RF (HPA), Figuras de Mérito, Eficiencia, Linealidad, Clases de Operación.

Ejercicios y prácticas

- Se propondrán hojas de ejercicios en cada parte para practicar los conceptos
- Se plantearán ejercicios para resolver de modo analítico y/o mediante simulaciones usando el software **ADS** (disponible en versiones demo-temporal y estudiante)

<https://www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html>

- Alternativamente existe el software libre **QUCs**: <https://qucs.sourceforge.net/> y **LTspice**: Incluye librerías RF, es gratuito y potente

(<https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>).

Ejercicios y prácticas

- Se han recopilado una serie de videos sobre los temas de la asignatura en la lista de reproducción:

https://youtube.com/playlist?list=PLFAU7o8_2yKCY53bhikbCaSfrxQ6ryf0R&si=cu-sQBm-UF0SEgE4

que se irán recomendando en el momento oportuno

Bibliografía

BIBLIOGRAFIA BÁSICA:

- “Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design”, Guillermo Gonzalez. Prentice Hall, 1984.
- "Microwave Devices, Circuits and Systems for Communications Engineering", Ed. I.G. Glover, S.R. Pennock y P.R. Shepherd, Wiley, 2005.
- "RF Power Amplifiers", Marian K. Kazimierczuk, Wiley 2008.
- “Microwave Mixers”, Stephen A. Maas, 2nd Ed., Artech House, 1993.
- "The RF and Microwave Circuit Design Cookbook", S. A. Maas, Artech House, 1998.

BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

- "Microwave circuit design using linear and nonlinear techniques", George D. Vendelin, Anthony M. Pavio, Ulrich L. Rohde,
- "Microwave Engineering", D. M. Pozar, J. Wiley & Sons 1998.
- "The design of CMOS RF Integrated Circuits", Thomas H. Lee, Cambridge Press, 2006.
- "Non Linear Microwave and RF Circuits", S. A. Maas, Artech House, 2003.
- "Practical RF Circuit Design for Modern Wireless Systems", Rowan Gilmore, Les Besser, Artech House, 2003.
- "Manual práctico de Radiofrecuencia", Ian Hickman, Ed. Paraninfo, 1995.
- “Foundations for Microwave Engineering”, R. Collin, Mc. Graw Hill. 1992.
- Apuntes Electrónica de Alta Frecuencia. Dep. Ing. Audiovisual y Com. UPM.
- "RF Microelectronics" de Behzad Razavi
- "Introducción a la Radiofrecuencia" de E. García

Tema 1

- Introducción: Principios de RF. Sistemas Electrónicos distribuidos.
- Bandas del espectro y Aplicaciones
- Arquitecturas de los sistemas de RF
- Teoría de líneas de transmisión
- Carta de Smith
- Parámetros S
- Amplificadores RF pequeña señal y bajo ruido.

Introducción: la hipótesis localizada

Baja frecuencia vs. alta frecuencia: ¿Qué tienen de particular los circuitos de altas frecuencias para requerir un tratamiento diferente a uno de DC o de AC de baja frecuencia?

- Circuitos electrónicos: medios físicos por los que circulan y en los que se procesan señales eléctricas (ondas electromagnéticas)
- Contenido espectral señales eléctricas $f \leftrightarrow \lambda$

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Introducción: la hipótesis localizada

Hipótesis localizada: dimensiones circuito $\ll \lambda$

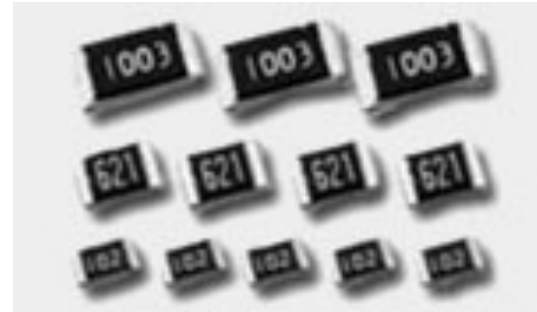
- En ese caso se desprecia la propagación
- Sino: hay que considerar que un voltaje de alta frecuencia aplicado en un punto de una línea conductora no se transmite instantáneamente a toda la línea, sino que se propaga a una cierta velocidad \rightarrow PROPAGACIÓN DE ONDA

Introducción: la hipótesis localizada

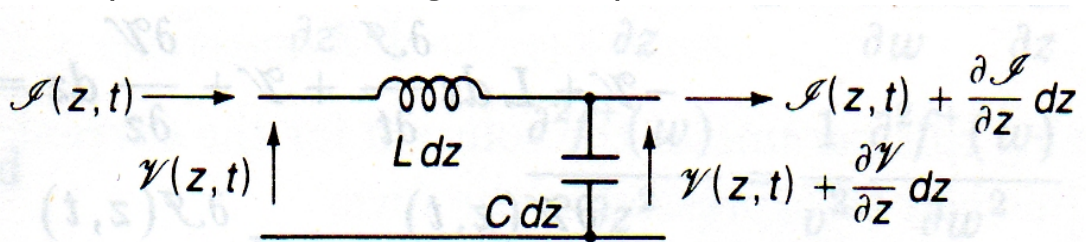
Ley de Ohm vs. Ecuación del Telegrafista



$$I = \frac{V}{R}$$



- Para que se cumpla la ley de Ohm el tamaño de R no importa... siempre que sea pequeño comparado con λ
- Pero... ¿si tamaño $R \sim \lambda$? \rightarrow Teoría de las líneas de transmisión (Ec. del Telegrafista)



$$\frac{\partial^2 V(t, z)}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 V(t, z)}{\partial t^2}$$

(Ecuación caso sin pérdidas)

Introducción: la hipótesis localizada

Longitud de onda sobre substrato de AsGa ($\epsilon_r \sim 13$, w y h dadas):

λ (mm)	f (GHz)
106.000	0,001
106	1
10	10
5,3	20
2,6	40
1	100

- Tamaño típico circuito MMIC de AsGa ~ 2 mm x 2 mm
- Tamaño típico componente MMIC de AsGa ~ 0.05 mm
- Diseño MMICs hipótesis localizada $f < 10$ GHz

Introducción: la hipótesis localizada

Longitud de onda sobre substrato CuClad ($\epsilon_r \sim 2.17$, w y h dadas):

λ (mm)	f (GHz)
220.000	0,001
220	1
22	10
11	20
5,5	40
2,2	100

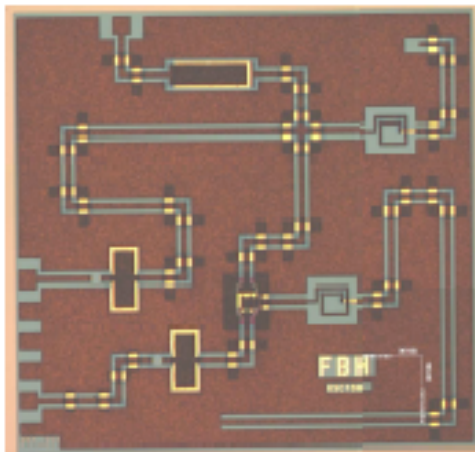
- Valores ϵ_r menores \rightarrow λ mayor
- Misma dimensión física del circuito, más validez hipótesis localizada

Introducción: la hipótesis localizada

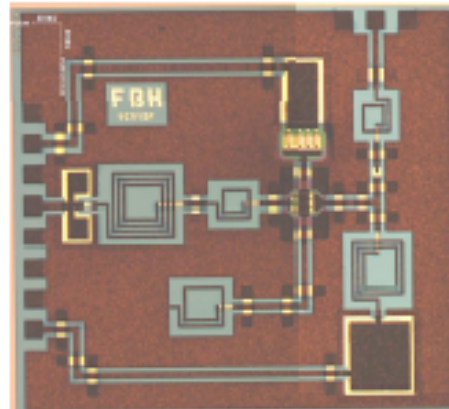
Umbral de validez de la hipótesis localizada:

Tres osciladores MMIC para una misma frecuencia 19 GHz (HBT 4'' FBH):

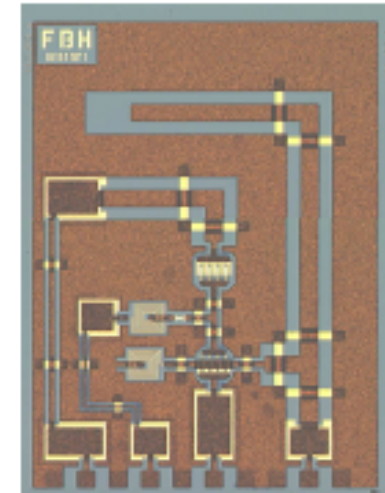
$\lambda/4$ CPW L-coupling
at open end



Lumped LC



$\lambda/4$ CPW magn. coupling
near short



1mm



$\lambda/4$



$\lambda_{EL} = 6.2\text{mm}$; 19 GHz CPW

En estos diseños las longitudes de las líneas son del orden de la longitud de onda, por lo que sería crítico simular las líneas con el modelo de líneas de transmisión

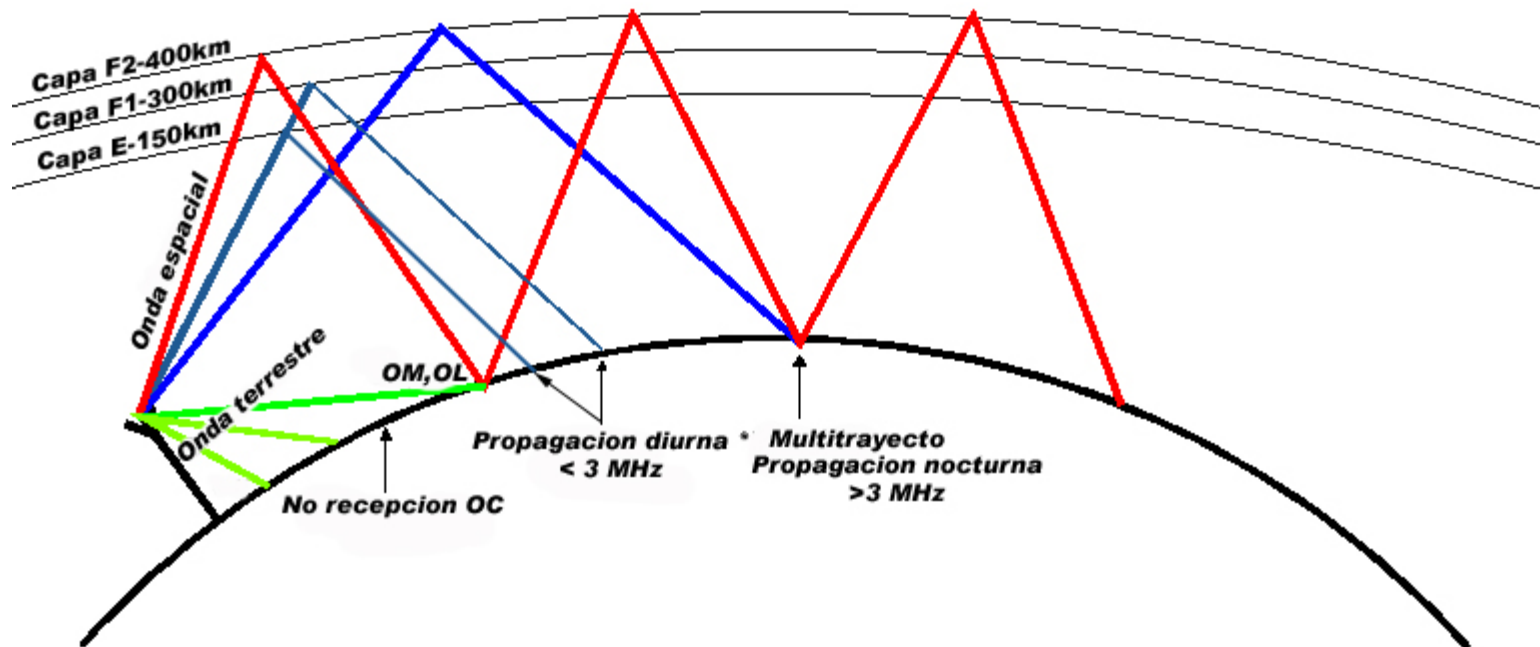
Espectro

Denominaciones de las bandas de frecuencia del Espectro:

Banda	Longitud de onda	Frecuencia	Energía
Rayos gamma	< 10 pm	> 30 EHz	> $20 \cdot 10^{-15}$ J
Rayos X	< 10 nm	> 30 PHz	> $20 \cdot 10^{-18}$ J
Ultravioleta extremo	< 200 nm	> 1,5 PHz	> $993 \cdot 10^{-21}$ J
Ultravioleta cercano	< 380 nm	> 789 THz	> $523 \cdot 10^{-21}$ J
Luz visible	< 780 nm	> 384 THz	> $255 \cdot 10^{-21}$ J
Infrarrojo cercano	< 2,5 μ m	> 120 THz	> $79 \cdot 10^{-21}$ J
Infrarrojo medio	< 50 μ m	> 6 THz	> $4 \cdot 10^{-21}$ J
Infrarrojo lejano/submilimétrico	< 1 mm	> 300 GHz	> $200 \cdot 10^{-24}$ J
Microondas	< 30 cm	> 1 GHz	> $2 \cdot 10^{-24}$ J
Ultra alta frecuencia – Radio	< 1 m	> 300 MHz	> $19,8 \cdot 10^{-26}$ J
Muy alta frecuencia – Radio	< 10 m	> 30 MHz	> $19,8 \cdot 10^{-28}$ J
Onda corta – Radio	< 180 m	> 1,7 MHz	> $11,22 \cdot 10^{-28}$ J
Onda media – Radio	< 650 m	> 650 kHz	> $42,9 \cdot 10^{-29}$ J
Onda larga – Radio	< 10 km	> 30 kHz	> $19,8 \cdot 10^{-30}$ J
Muy baja frecuencia - Radio	> 10 km	< 30 kHz	< $19,8 \cdot 10^{-30}$ J

Espectro

Representación de la propagación de ondas en la atmosfera:
Permite utilizar la atmosfera como una “guía de ondas” a ciertas
frecuencias para transmitir más allá del horizonte (Line of Sight: LoS)



* En OM es preponderante la reflexión en la capa E aunque puede darse reflexión en capa F1, en las frecuencias más altas de la banda, sobre todo con baja actividad solar.

Bandas de RF

Nombre	Abreviatura inglesa	Banda ITU	Frecuencias	Longitud de onda
			< 3 Hz	> 100000 km
Extra baja frecuencia	ELF	1	3 – 30 Hz	100000 km – 10000 km
Super baja frecuencia	SLF	2	30 – 300 Hz	10000 km – 1000 km
Ultra baja frecuencia	ULF	3	300 – 3000 Hz	1000 km – 100 km
Muy baja frecuencia	VLF	4	3 – 30 kHz	100 km – 10 km
Baja frecuencia	LF	5	30 – 300 kHz	10 km – 1 km
Media frecuencia	MF	6	300 – 3000 kHz	1 km – 100 m
Alta frecuencia	HF	7	3 – 30 MHz	100 m – 10 m
Muy alta frecuencia	VHF	8	30 – 300 MHz	10 m – 1 m
Ultra alta frecuencia	UHF	9	300 – 3000 MHz	1 m – 100 mm
Super alta frecuencia	SHF	10	3 – 30 GHz	100 mm – 10 mm
Extra alta frecuencia	EHF	11	30 – 300 GHz	10 mm – 1 mm
			> 300 GHz	< 1 mm

Bandas de Microondas

Bandas Microondas EEUU:

Banda	Rango de frecuencia	Origen del nombre
I	< 0,2 GHz	
G	0,2 – 0,25 GHz	
P	0,25 – 0,5 GHz	'Previous', dado que los primeros radares del Reino Unido utilizaron esta banda, luego pasaron a más altas frecuencias
L	0,5 – 1,5 GHz	Long wave
S	2 – 4 GHz	Short wave
C	4 – 8 GHz	Compromiso entre S y X
X	8 – 12 GHz	Usada en II Guerra Mundial por los sistemas de control de fuego, X de cruz (retícula de puntería)
K _u	12 – 18 GHz	Kurtz-unten (alemán)
K	18 – 26 GHz	Kurz (alemán)
K _a	26 – 40 GHz	Kurz-above (alemán)
V	40 – 75 GHz	Very high frequency
W	75 – 111 GHz	

Nombre	P	L	S	C	X	K _u	K	K _a	Q	U	V	E	W	F	D
Banda (GHz)	0,2 – 1	1 – 2	2 – 4	4 – 8	8 – 12	12 – 18	18 – 26,5	26,5 – 40	30 – 50	40 – 60	50 – 75	60 – 90	75 – 110	90 – 140	110 – 170

Bandas de Microondas

Bandas Microondas UE, OTAN:

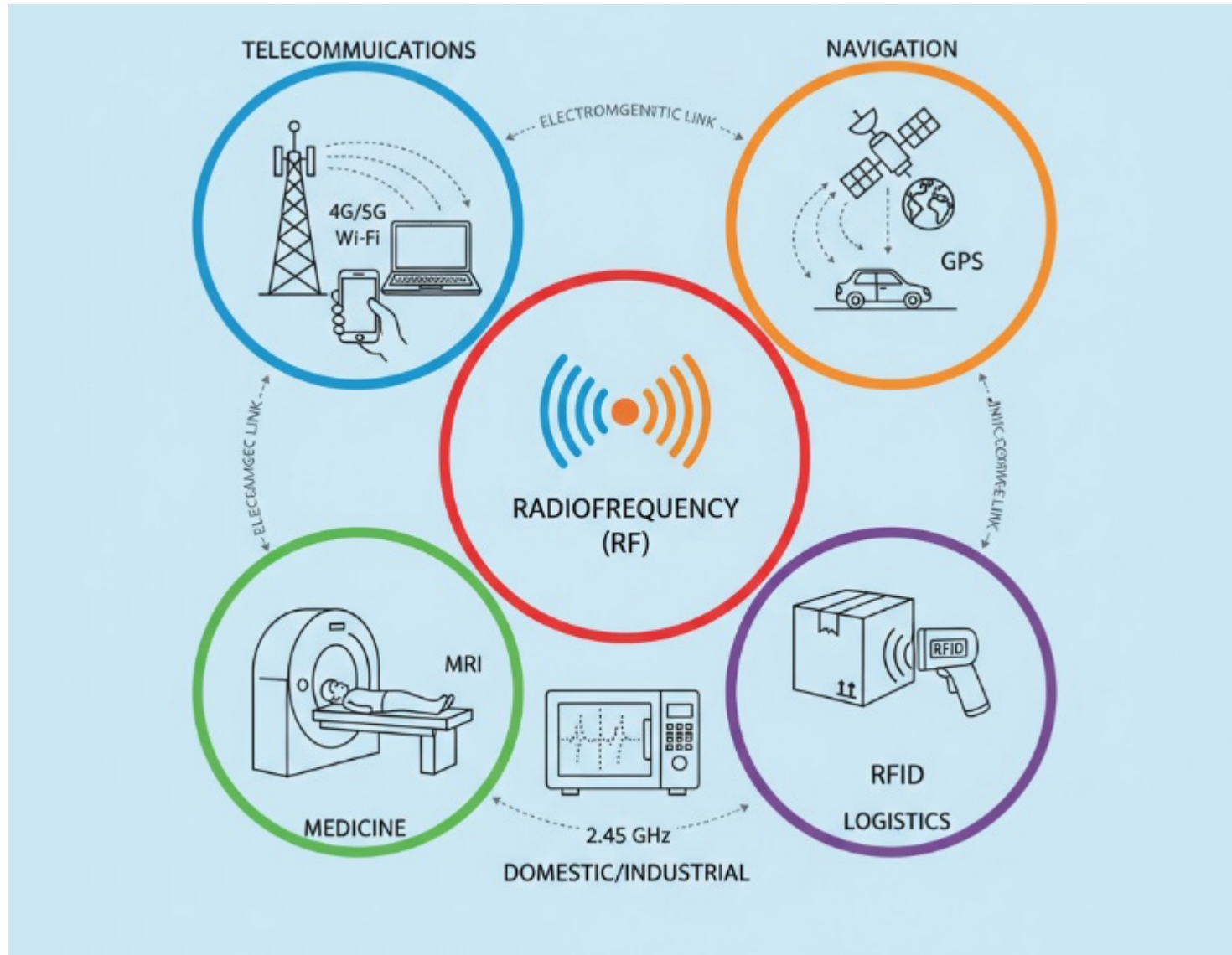
Banda	Rango de frecuencia
A	< 0,25 GHz
B	0,25 – 0,5 GHz
C	0,5 – 1 GHz
D	1 – 2 GHz
E	2 – 3 GHz
F	3 – 4 GHz
G	4 – 6 GHz
H	6 – 8 GHz
I	8 – 10 GHz
J	10 – 20 GHz
K	20 – 40 GHz
L	40 – 60 GHz
M	60 – 100 GHz

Aplicaciones

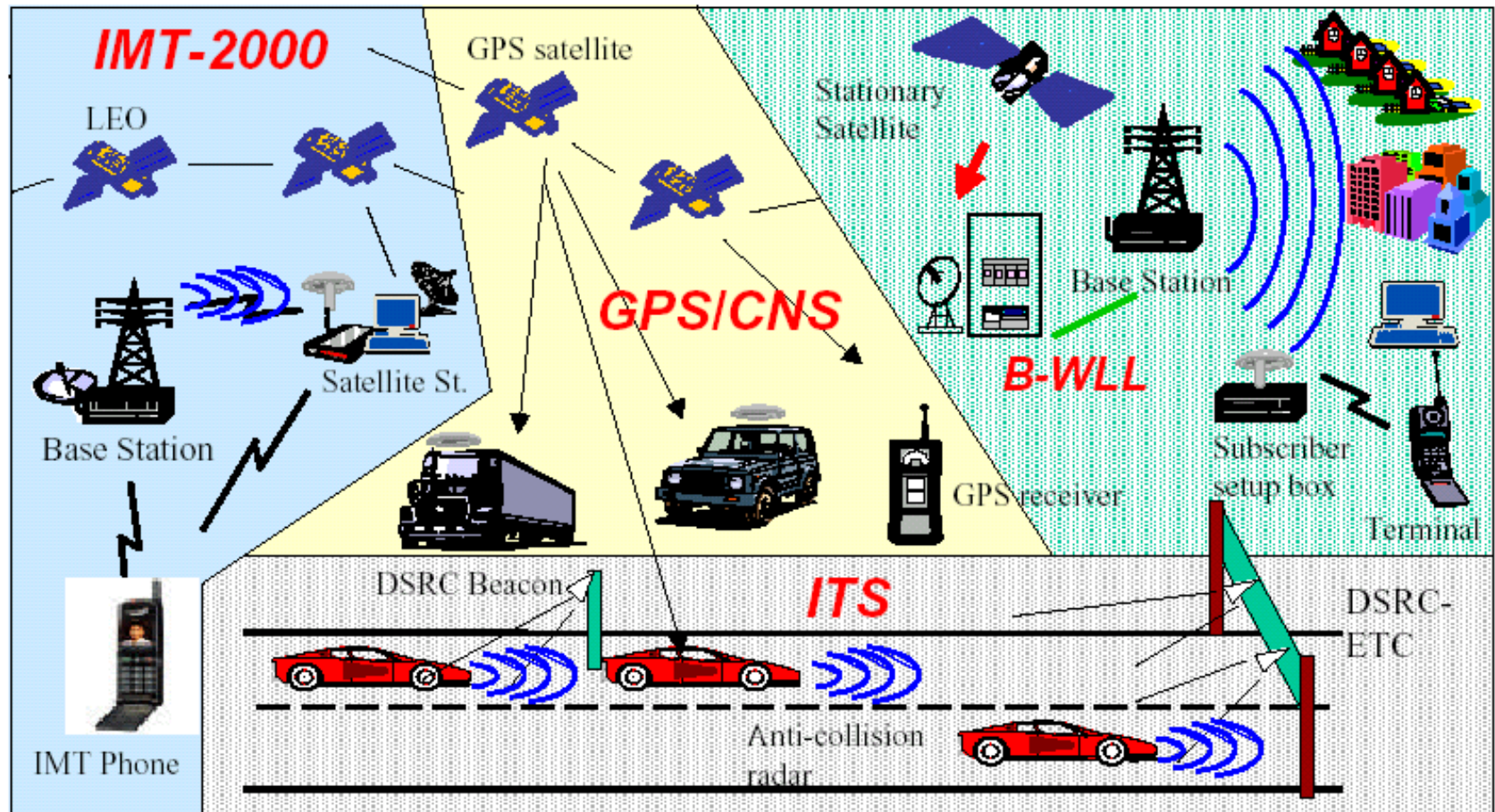
Las aplicaciones de los circuitos de RF y microondas son muy diversas:

- Comunicaciones vía radio
- Difusión de señal de radio y TV (terrestre y satélite)
- Sistemas de navegación vía satélite (GNSS, GPS, GALILEO, etc...)
- Acceso a internet (WIFI, datos móviles, Starlink,...)
- Sistemas de RADAR, seguridad y Guerra Electrónica (EW)
- Aplicaciones médicas (“imaging”, terapias)
- Aplicaciones Industriales (calentamiento, secado)
- ...

Aplicaciones



Aplicaciones



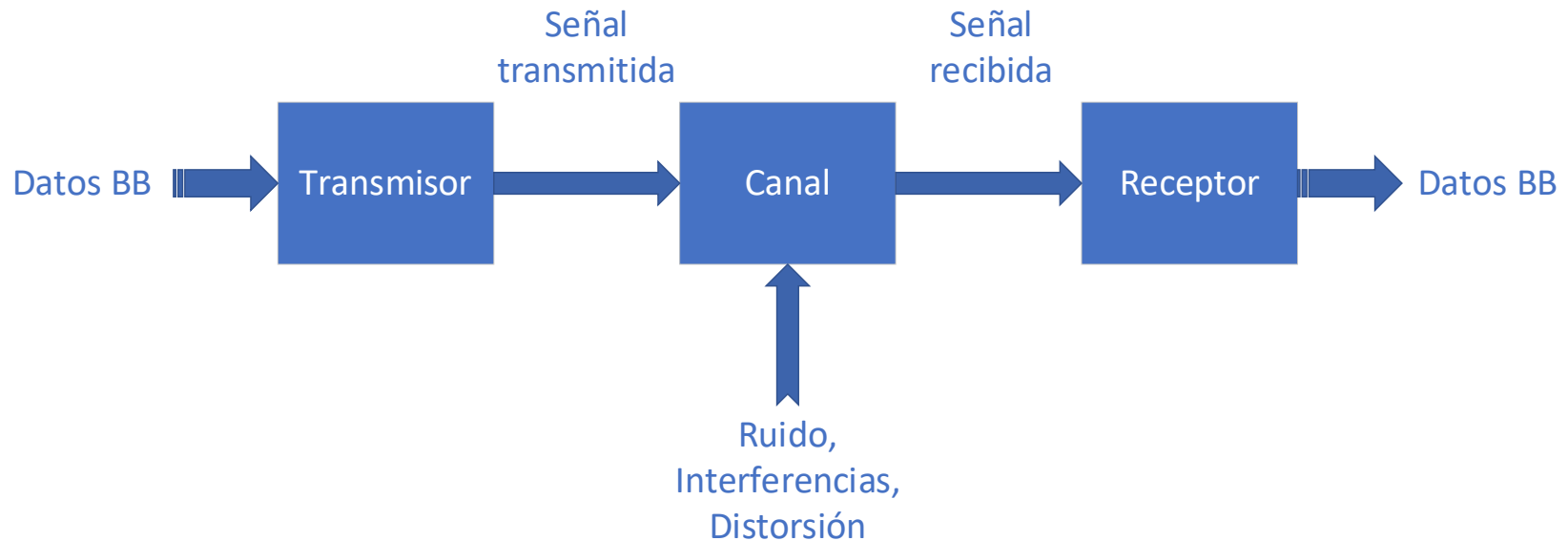
GPS(Global Positioning System), CNS(Car Navigation System), B-WLL(Broadband Wireless Local Loop), ITS(Intelligent Transportation System), DSRC(Dedicated Short Range Communication)

Arquitecturas

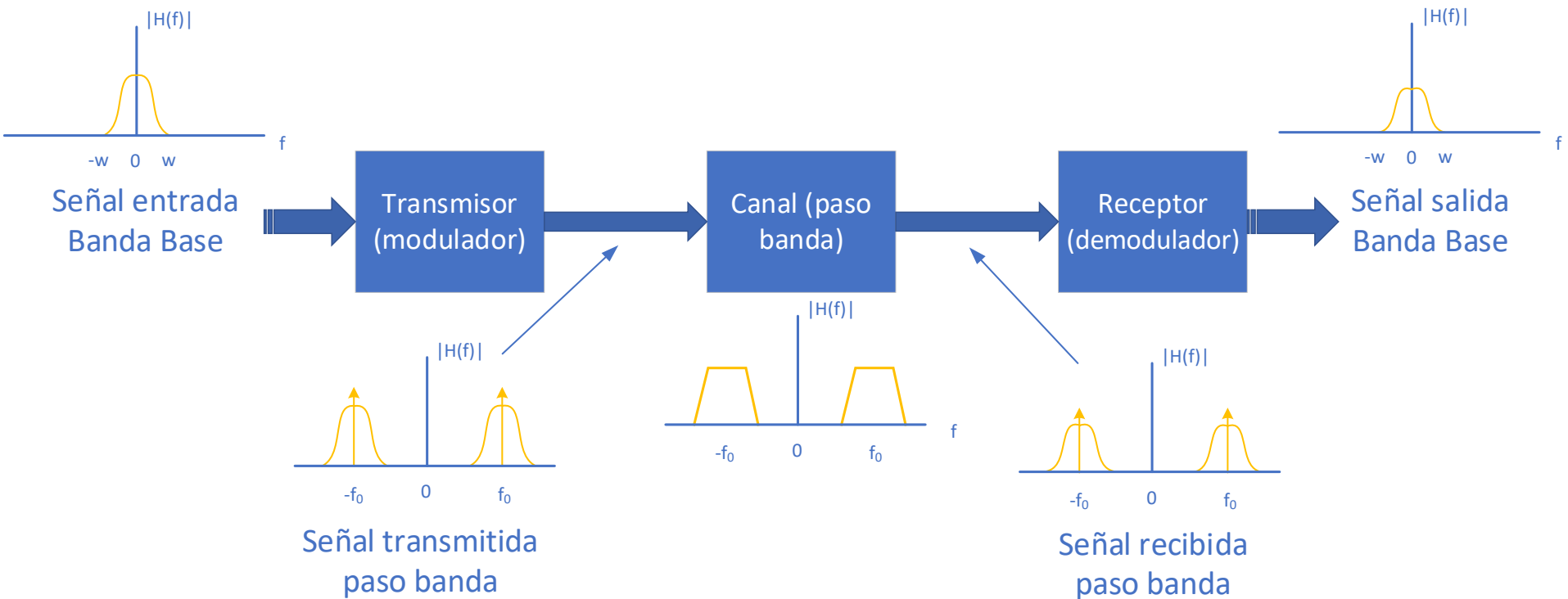
- Datos a transmitir/recibir: analógicos o digitales con un ancho de banda original en banda base (BB) (ejemplo: audio 15 kHz)
- Para la transmisión es necesario trasladar la información para canalizarla en las frecuencias de RF asignadas (ejemplo: FM 88.5 MHz)
- En la recepción se vuelve a trasladar la información a su espectro original para ser recibida por el destinatario.
- Hay diferentes posibilidades para trasladar la información entre BB y RF → diferentes arquitecturas de sistemas de RF

Arquitecturas

- Datos analógicos o digitales
- Transmisor: datos en BB \rightarrow RF
- Receptor: RF \rightarrow datos en BB
- Transmisor+Receptor=Transceptor

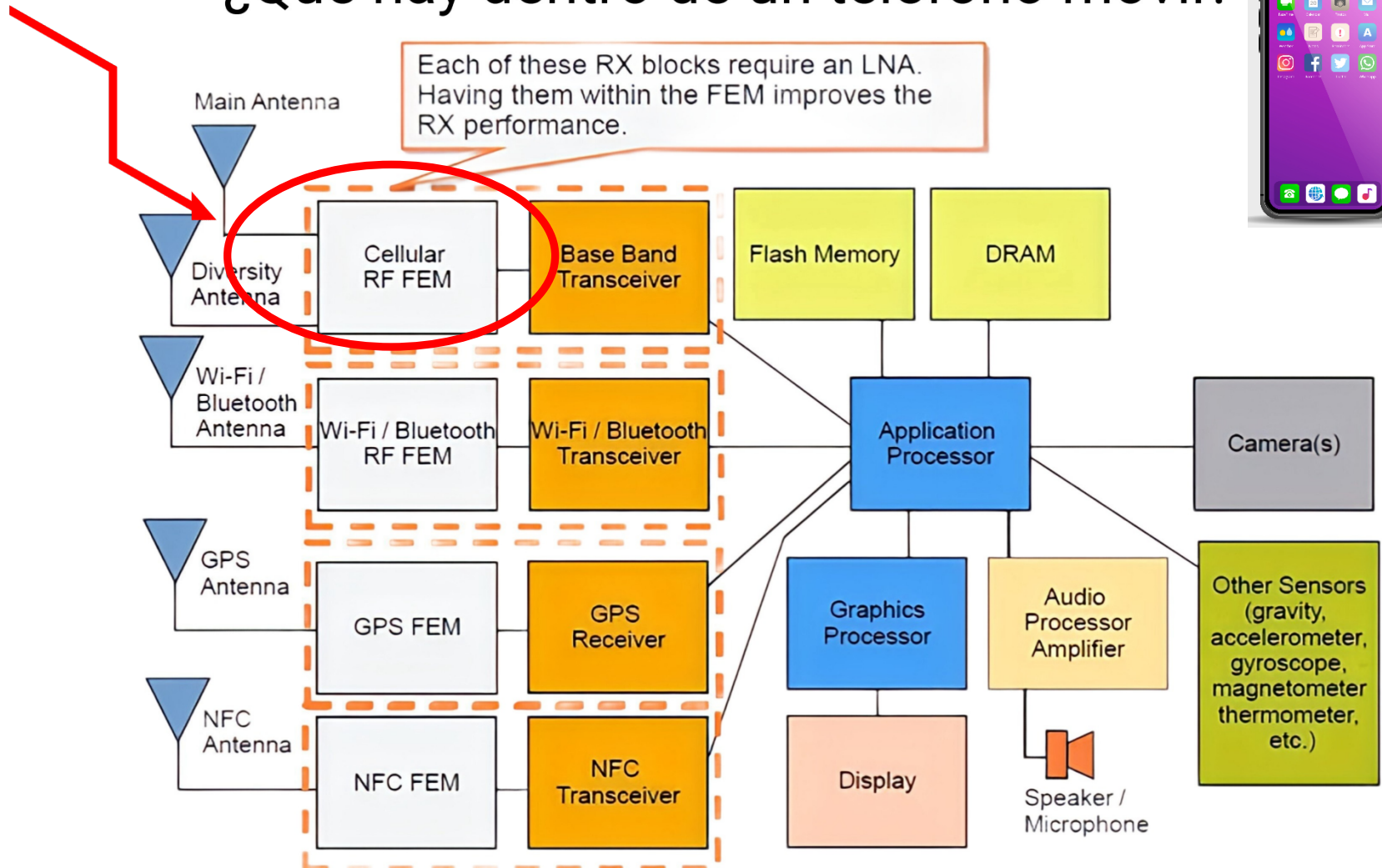


Arquitecturas



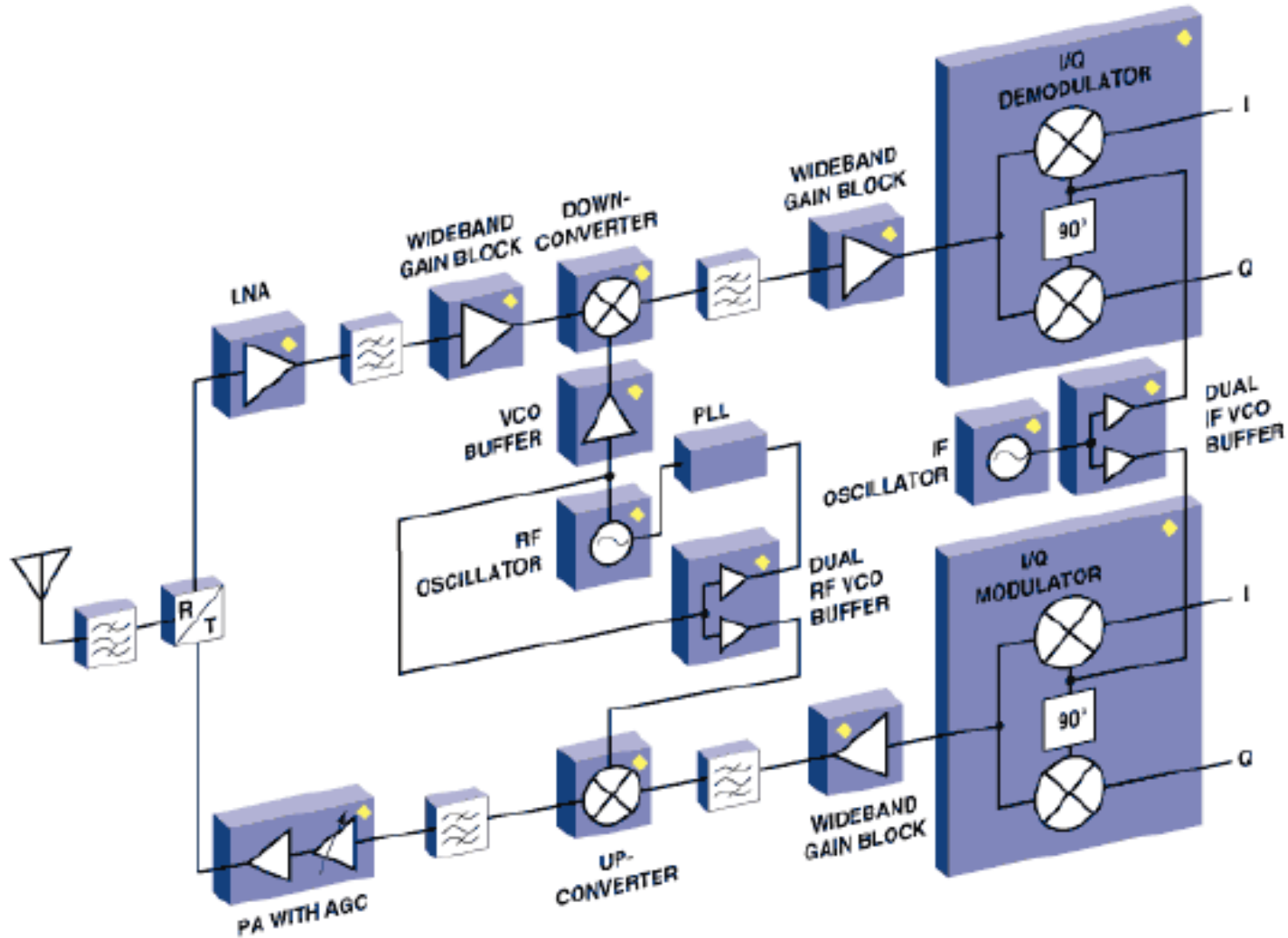
Arquitecturas

¿Qué hay dentro de un teléfono móvil?



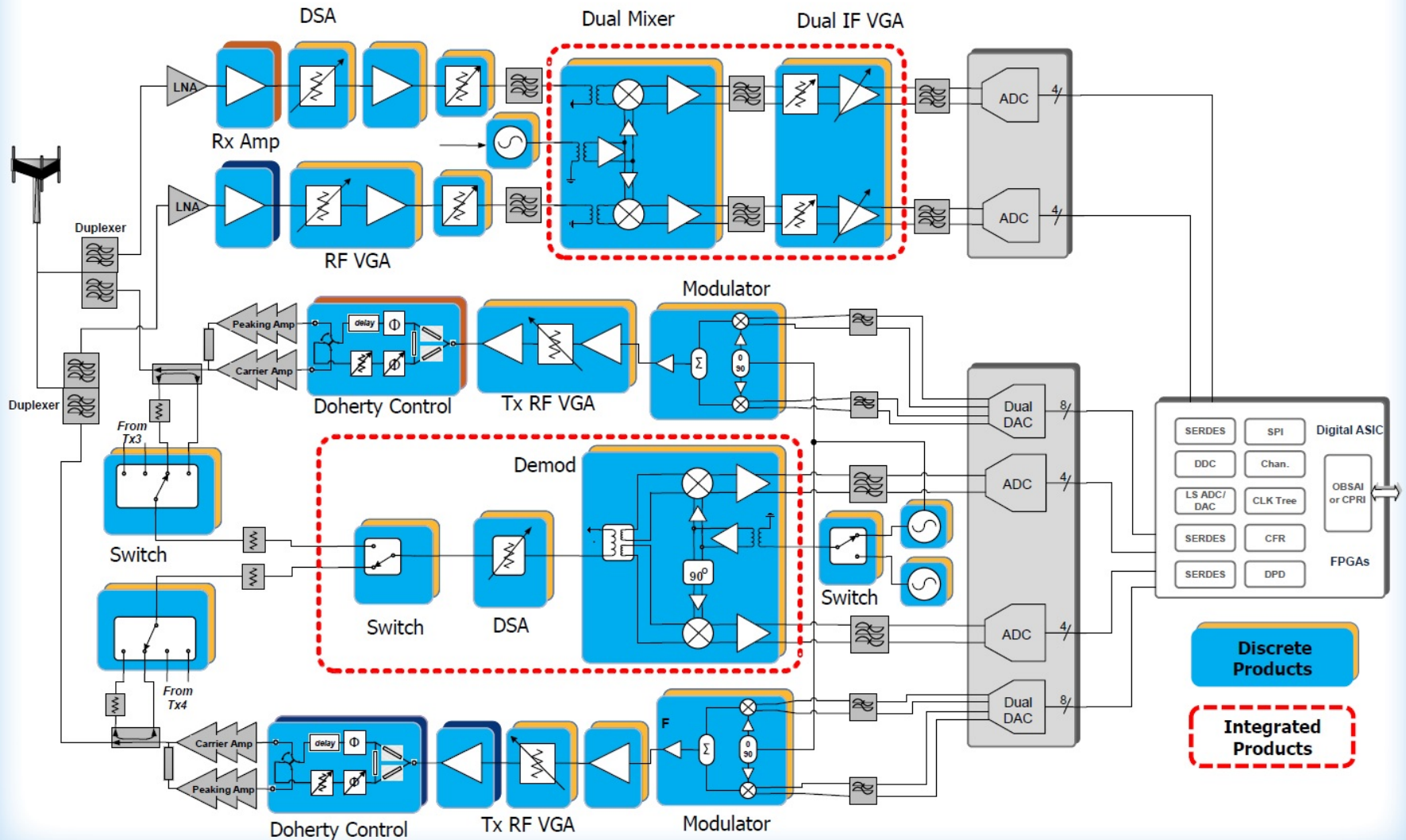
Arquitecturas

Hybrid Design



Arquitecturas

BTS System Block Diagram



Arquitecturas

TECNOLOGIAS DE INTEGRACIÓN usadas por los sistemas de comunicaciones:

- **Mixed Signal IC:** Tamaño mediano y pequeño (<250000 transistores, sino SoC). Funciones Analógicas y Digitales.
- **Radio Frequency IC (RFIC):** Alta frecuencia + mod/demod + DSP. Típica tecnología para “wireless”.
- **Microwave Monolithic IC (MMIC):** Parte más alta del espectro (>10GHz hasta 100-300GHz). Tecnologías desde Si (baja frec.) hasta SiGe, InP, GaN, GaAs (altas frecuencias).
- **System On Chip (SoC):** Máximo nivel de complejidad con combinación de varias tecnologías (ejem: microprocesador + memorias + RF analógico)
- **System on Package (SoP):** Varios Chips en un empaquetado.

Arquitecturas

Papel fundamental RFICs / MMICs:

Subsistemas básicos en Transmisores y

Receptores:

- Amplificadores (AMP)
- Mezcladores (MIX)
- Osciladores (OSC)

Arquitecturas

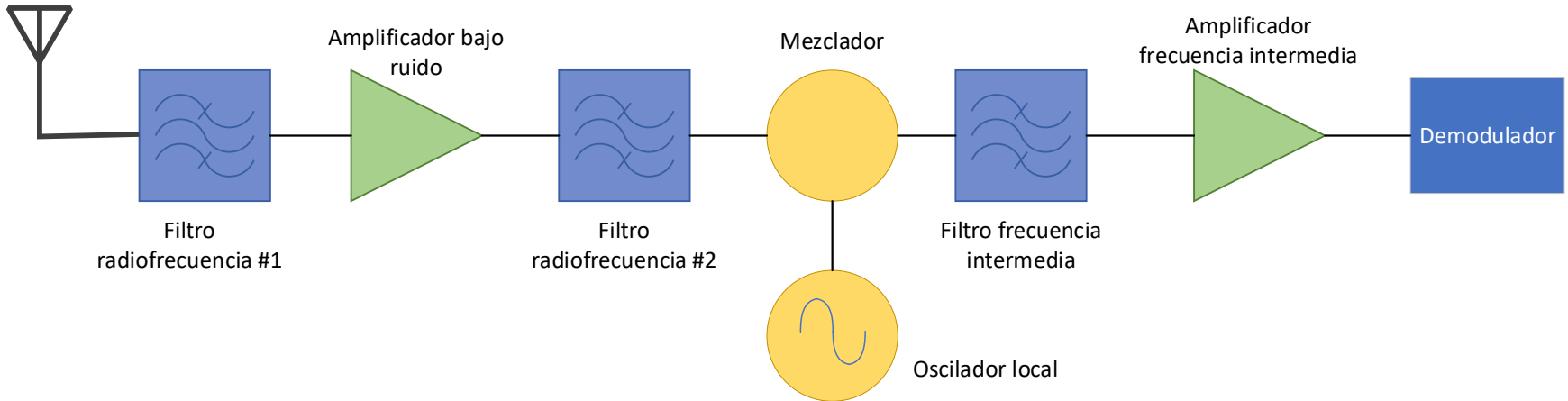
Diversas topologías:

- Heterodino (una sola conversión a frecuencia intermedia - IF)
- Doble conversión (dos IFs)
- Cero FI (ZIF)
- Baja FI (LIF)
- Receptor digital con muestreo directo

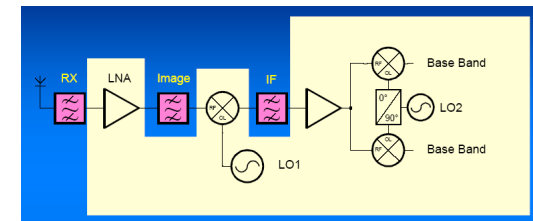
Arquitecturas

RECEPTOR HETERODINO (SUPERHETERODINO):

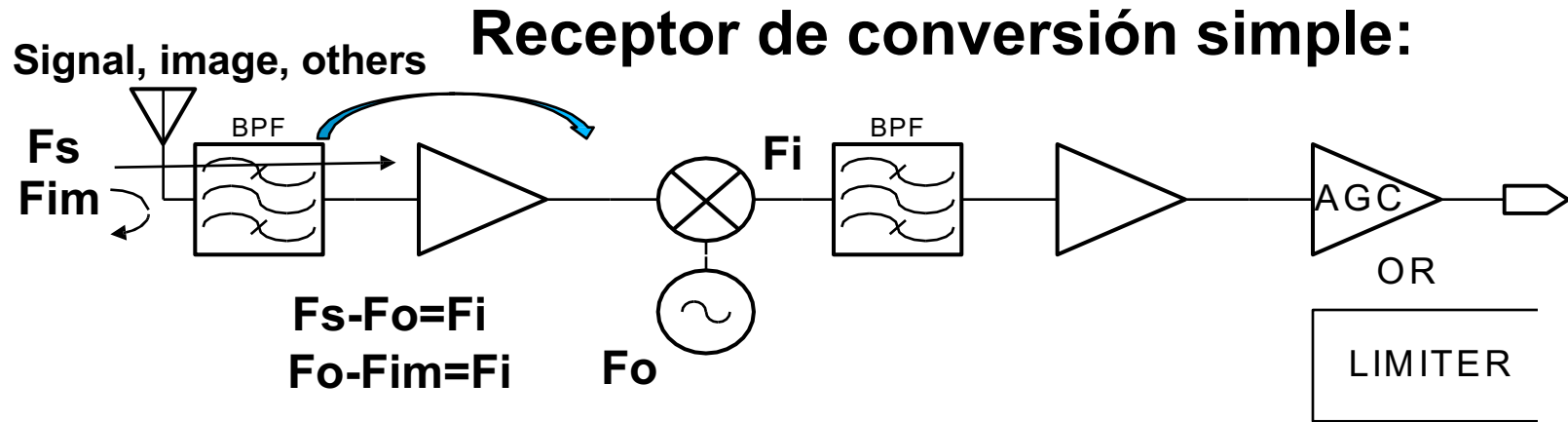
Antena receptora



Ventajas	Inconvenientes
Solución conocida	Alto costo y consumo
Fugas de LO a antena despreciables	Filtros de alta calidad
Filtro externo para rechazo de imagen	Pérdidas de RF
No hay offset DC	Adaptación de impedancias



Arquitecturas

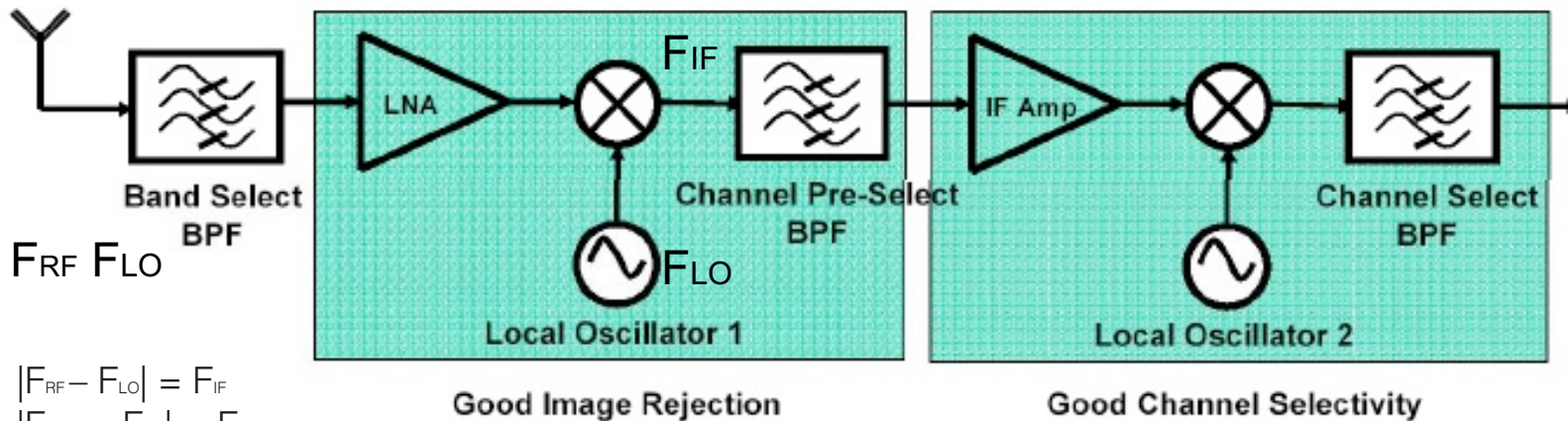


Usually F_{im} is below F_o , i.e. $F_{im} = F_s - 2 \cdot F_i$

- Antena: Convierte las ondas electromagnéticas en voltajes y corrientes.
- Filtro RF BP: Rechaza interferencias no deseadas fuera de la banda, eliminando la señal de imagen.
- Conmutador RF: Conmuta entre TX y RX.
- Amplificador RF: Refuerza la señal para evitar el ruido de fondo (expuesto a señales fuertes).
- Mezclador: Traduce la señal a una frecuencia más baja, generalmente $F_s - F_o = F_i$ (aunque $F_o - F_{im} = F_i$).
- LO: Proporciona señal de conversión de frecuencia.
- Filtro IF BP: Rechaza todas las señales interferentes, pero con una frecuencia fija.
- Amplificador IF: Refuerza la señal antes de demodularla
- Amplificador AGC: Mantiene el nivel de señal constante para la demodulación.
- Limitador: Acondiciona la señal FM para la demodulación
- Demodulador: Procesa la señal transmitida para su posterior reproducción

Arquitecturas

Receptor de doble conversión:



$$|F_{RF} - F_{LO}| = F_{IF}$$
$$|F_{image} - F_{LO}| = F_{IF}$$

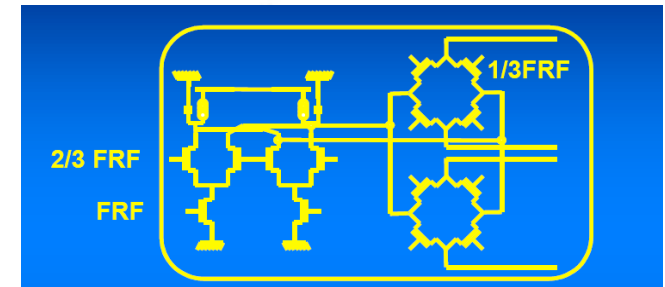
where:

F_{RF} = frequency of the RF input signal

F_{LO} = frequency of the LO signal

F_{IF} = frequency of the IF output signal

F_{image} = frequency of the image signal



Ventajas:

No DC offset

Bajo ruido $1/f$

Adecuada para implementar en CMOS (VLSI-RF)

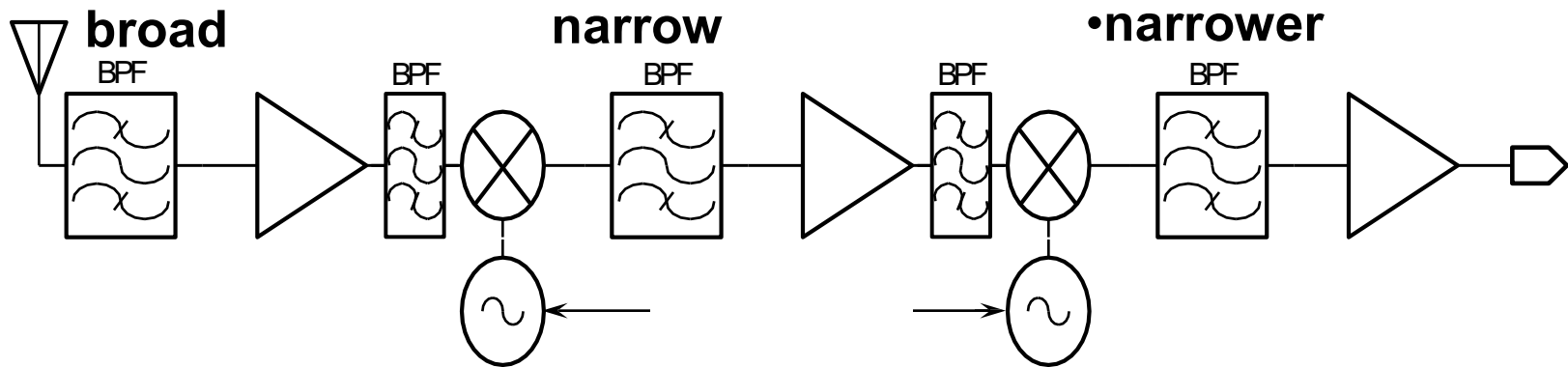
Desventajas:

Consumo de área del mezclador de rechazo de imagen

Intermodulación IP1 IP2

Arquitecturas

Receptor de doble conversión:



El primer mezclador traslada la señal para que el filtro posterior seleccione y elimine frecuencias fuera de banda para proteger a las etapas posteriores.

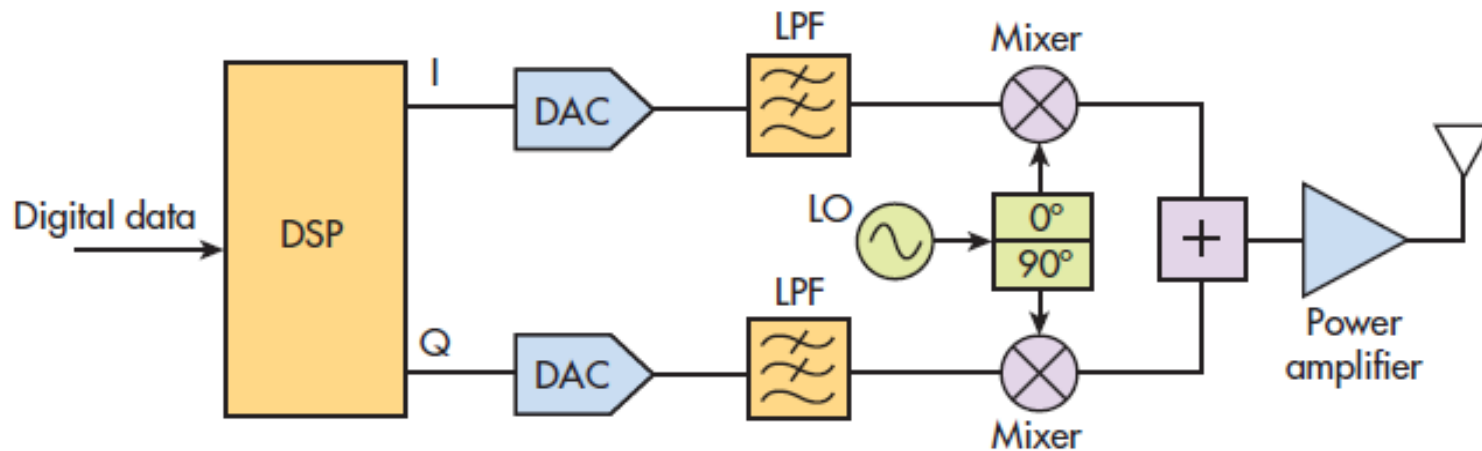
A continuación, se coloca un amplificador de FI de bajo ruido (NF), a menudo con un filtro aún más estrecho. La primera frecuencia de FI es lo suficientemente alta como para que el filtro de paso bajo (BPF) de entrada rechace fácilmente la frecuencia de imagen.

La segunda FI es de baja frecuencia, por lo que resulta práctico el filtrado estrecho con tecnología SAW, cristal o DSP.

- Existe una alta probabilidad de que aparezcan frecuencias espurias.

Arquitecturas

ZERO IF (conversión directa):

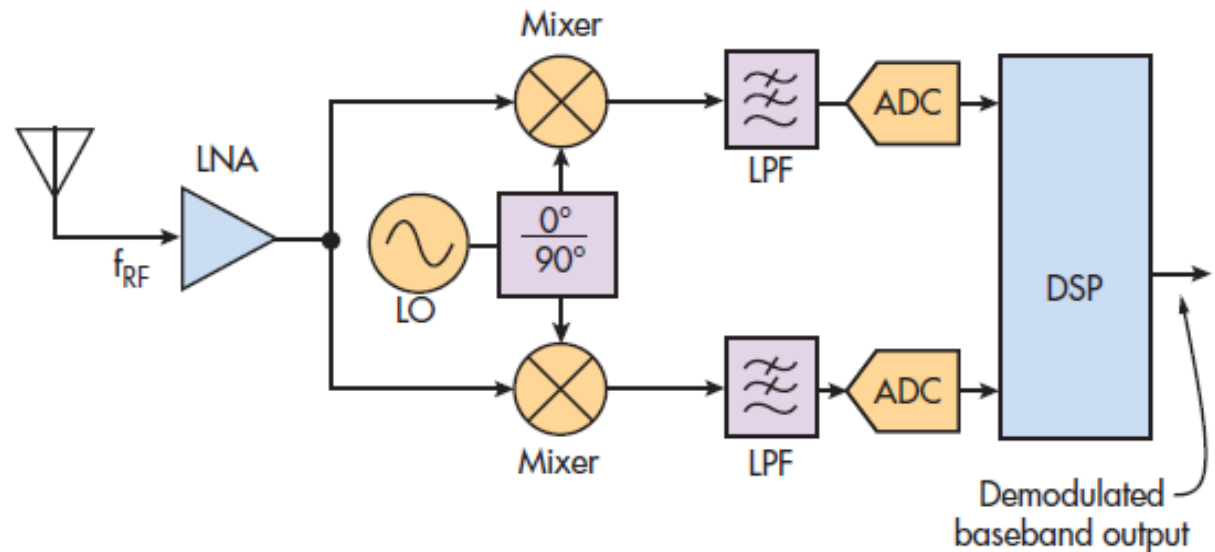


Ventajas:

- Alta capacidad de integración
- No requiere rechazo imagen
- Bajo Consumo

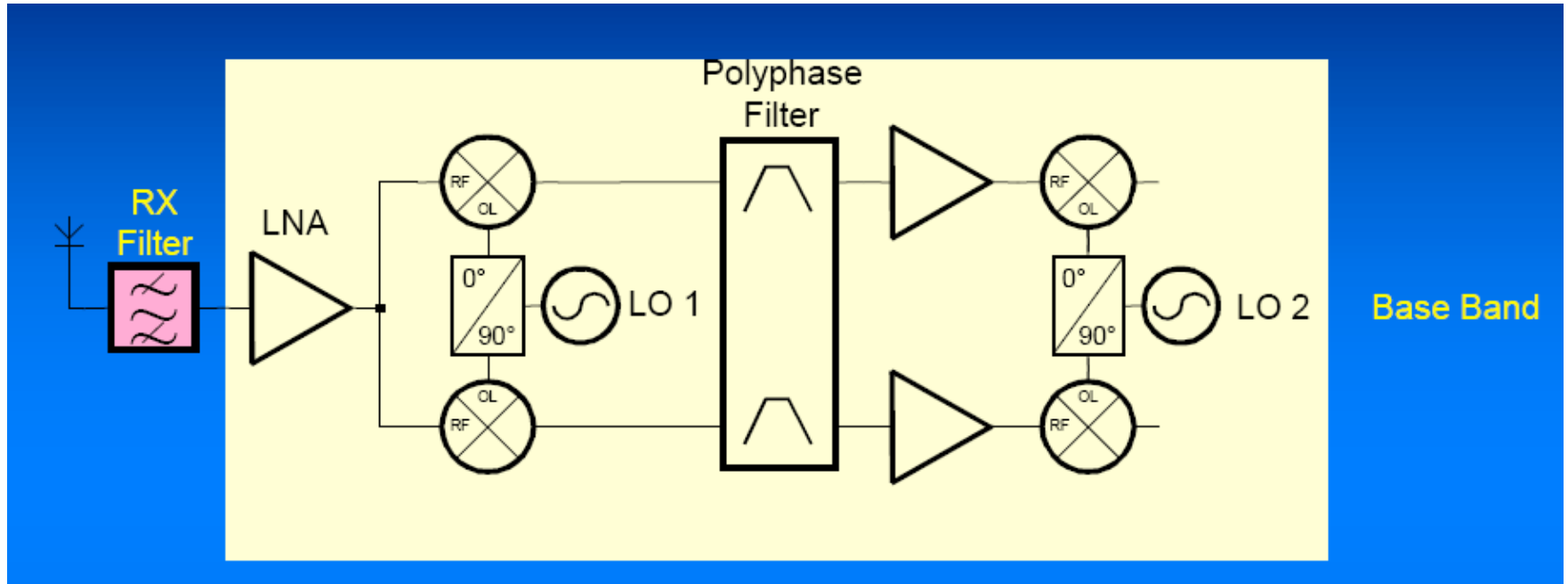
Inconvenientes:

- Offset DC muy sensible
- Ruido Flicker en banda base
- Sensible a Intermodulación 2°
- Fugas de LO



Arquitecturas

LIF (Baja Frecuencia Intermedia):



Ventajas:

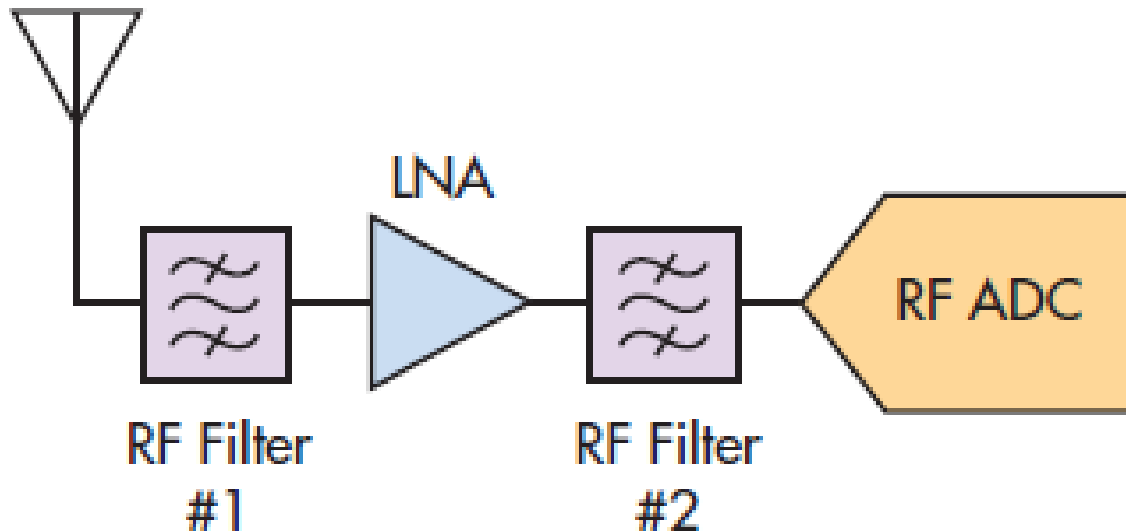
- Insensible al Offset DC y al ruido Flicker
- Filtro poli fase para rechazo de la frecuencia
- Bajo Consumo

Inconvenientes:

- Rechazo de la frecuencia imagen depende de desadaptación
- Sensible a IP2
- Fugas de LO1 a la antena

Arquitecturas

MUESTREO DIRECTO:



Ventajas:

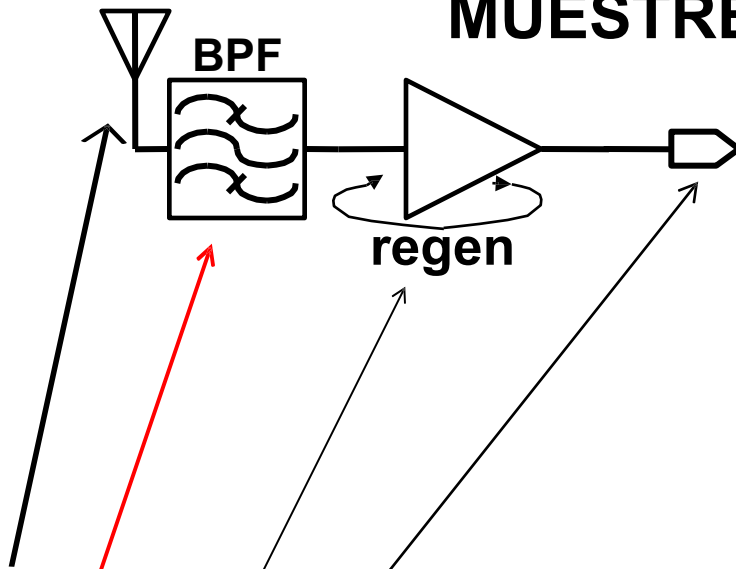
- Alta posibilidad de integración
- No requiere rechazo de imagen

Inconvenientes:

- Frecuencia de muestreo alta
- Alta linealidad
- Consumo elevado

Arquitecturas

MUESTREO DIRECTO:



- **Antena:** Convierte las ondas electromagnéticas en voltajes y corrientes.
- **Filtro RF paso banda:** Rechaza todas las señales interferentes.
- **Amplificador RF:** Refuerza la señal para evitar el ruido de fondo.
- **Demodulador:** Reproduce la señal transmitida para su posterior procesamiento.

Muy sensible a las interferencias. El filtrado se realiza a altas frecuencias, con baja selectividad. Normalmente, es necesario sintonizar la frecuencia central. Adecuado para radios de corto alcance y sintonización fija.

RFID: Las antiguas radios regenerativas funcionaban así. El entorno de señal habitual suele ser demasiado congestionado para este enfoque, a menos que se encuentre en la Antártida.