E1214 Fundamentos de las Comunicaciones
E0311 Comunicaciones
E0214 Comunicaciones

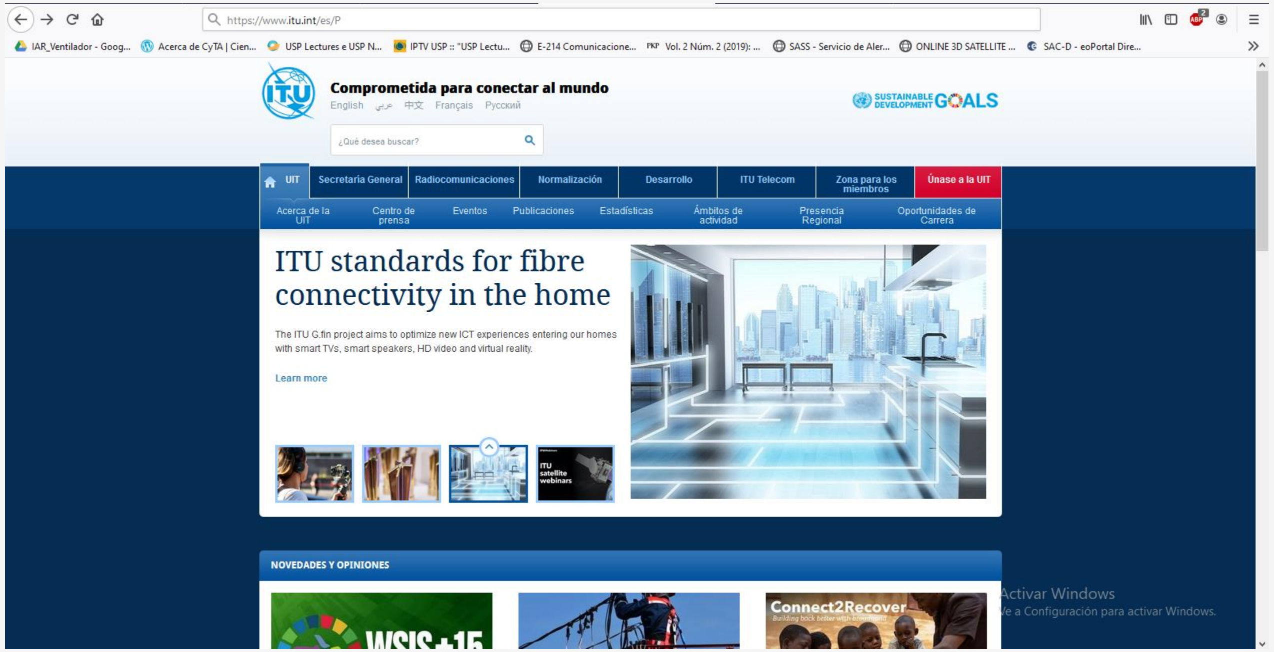
Curso 2023

Adrián Carlotto

comunica@ing.unlp.edu.ar

Coordinación y Regulación

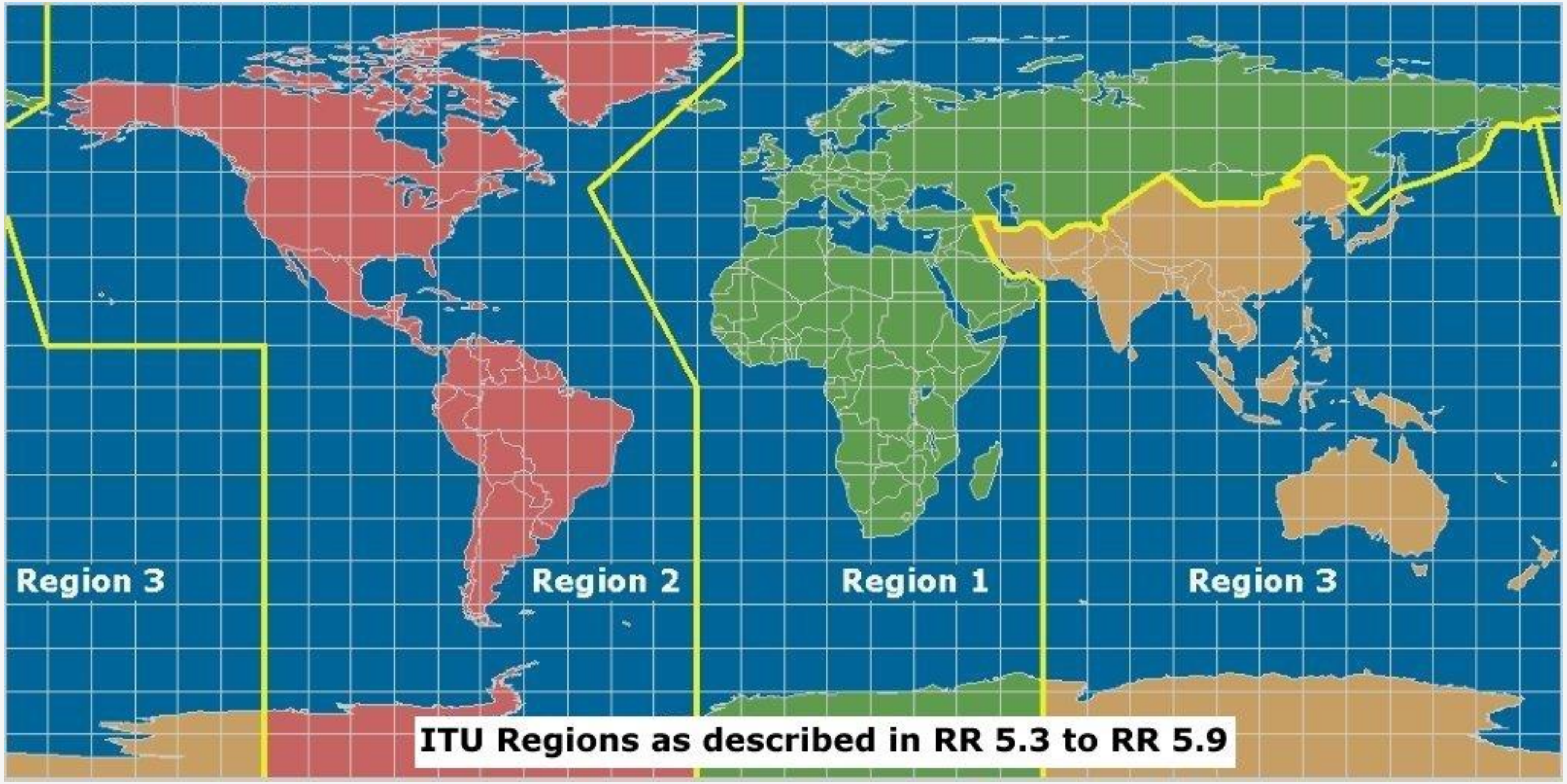
UIT (ITU) Unión Internacional de las Telecomunicaciones



www.itu.int

Radiocomunicaciones **Normalización** **Desarrollo**

ITU - Regiones

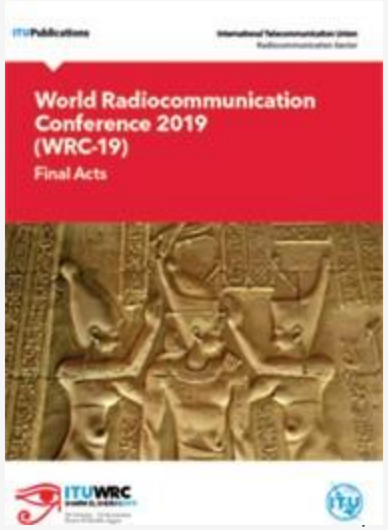


El Sector de Radiocomunicaciones UIT-R

Gestión global del espectro de radio-frecuencias
y la órbita de satélites

- Estableciendo:
  - Reglamentación Internacional
  - Normas, Recomendaciones, Informes, Manuales…
  - Asistencia a los miembros

MIFR
Registro Internacional de Frecuencias



Grupos de Estudio (UIT-R)

Comisiones de Estudio

- Comisión de Estudio 1 (CE 1)
  Gestión del espectro
- Comisión de Estudio 3 (CE 3)
  Propagación de las ondas radioeléctricas
- Comisión de Estudio 4 (CE 4)
  Servicios por satélite
- Comisión de Estudio 5 (CE 5)
  Servicios terrenales
- Comisión de Estudio 6 (CE 6)
  Servicio de radiodifusión
- Comisión de Estudio 7 (CE 7)
  Servicios científicos

Grupos Conexos

- Comité de Coordinación del Vocabulario (CCV)
- Reunión Preparatoria de Conferencias (RPC)
- Chairmen and Vice-Chairmen Meeting (CVC)

En Argentina – ENACOM (Ente Nacional de Comunicaciones)

www.enacom.gob.ar

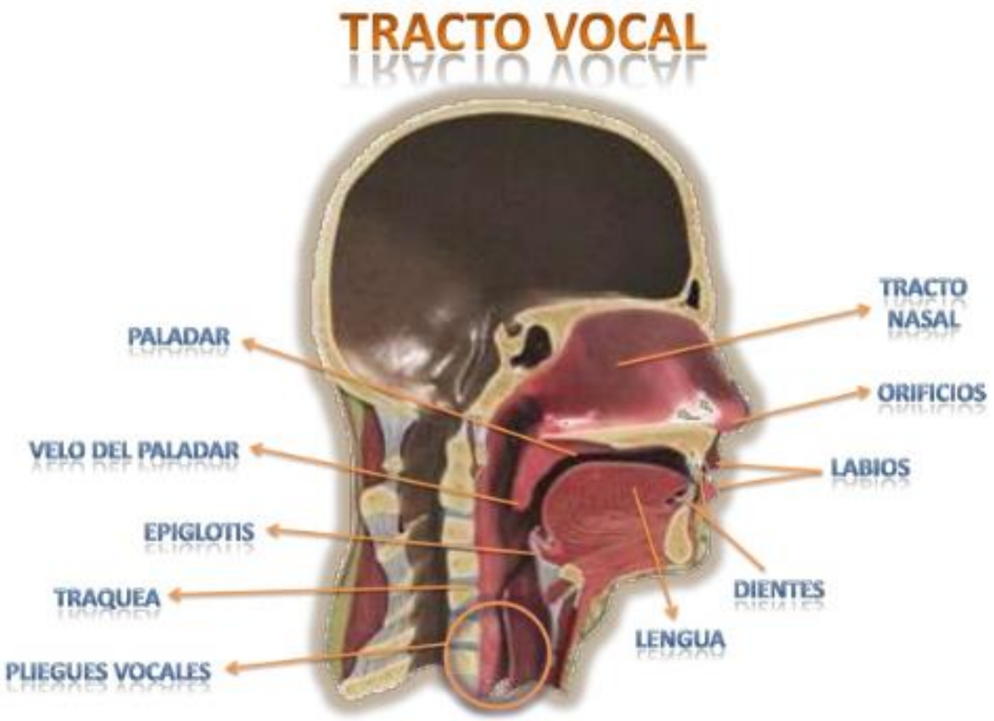
Cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencias de la República Argentina (CABFRA)

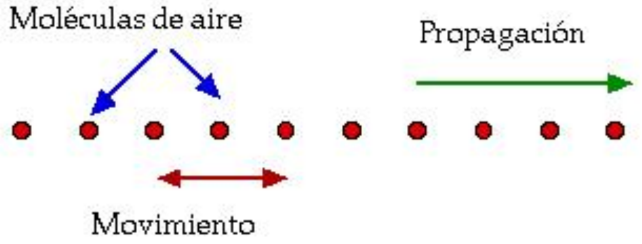
RANGO DE FRECUENCIA
401 - 401,75
OBSERVACIONES GENERALES

SERVICIO (T10)	TIPO DE SERVICIO	CARACTERÍSTICAS	NORMATIVA
Servicio de Ayudas a la Meteorología - SAM	FIJO/MOVIL		RR UIT/R2 – Art. 5
Servicio de Operaciones Espaciales - SOS	FIJO/MOVIL		RR UIT/R2 – Art. 5
Serv. de Exploración de la Tierra por Sat. - SETS	FIJO/MOVIL		RR UIT/R2 – Art. 5
Servicio de Meteorología por Satélite - SMES	FIJO/MOVIL		RR UIT/R2 – Art. 5
Sistema de Radiocom. para uso Médico - SRMED	FIJO/MOVIL	Categoría Secundaria (401 – 406 MHz)	4479ENACOM17 4665ENACOM17

RR UIT/R2 Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, Región 2

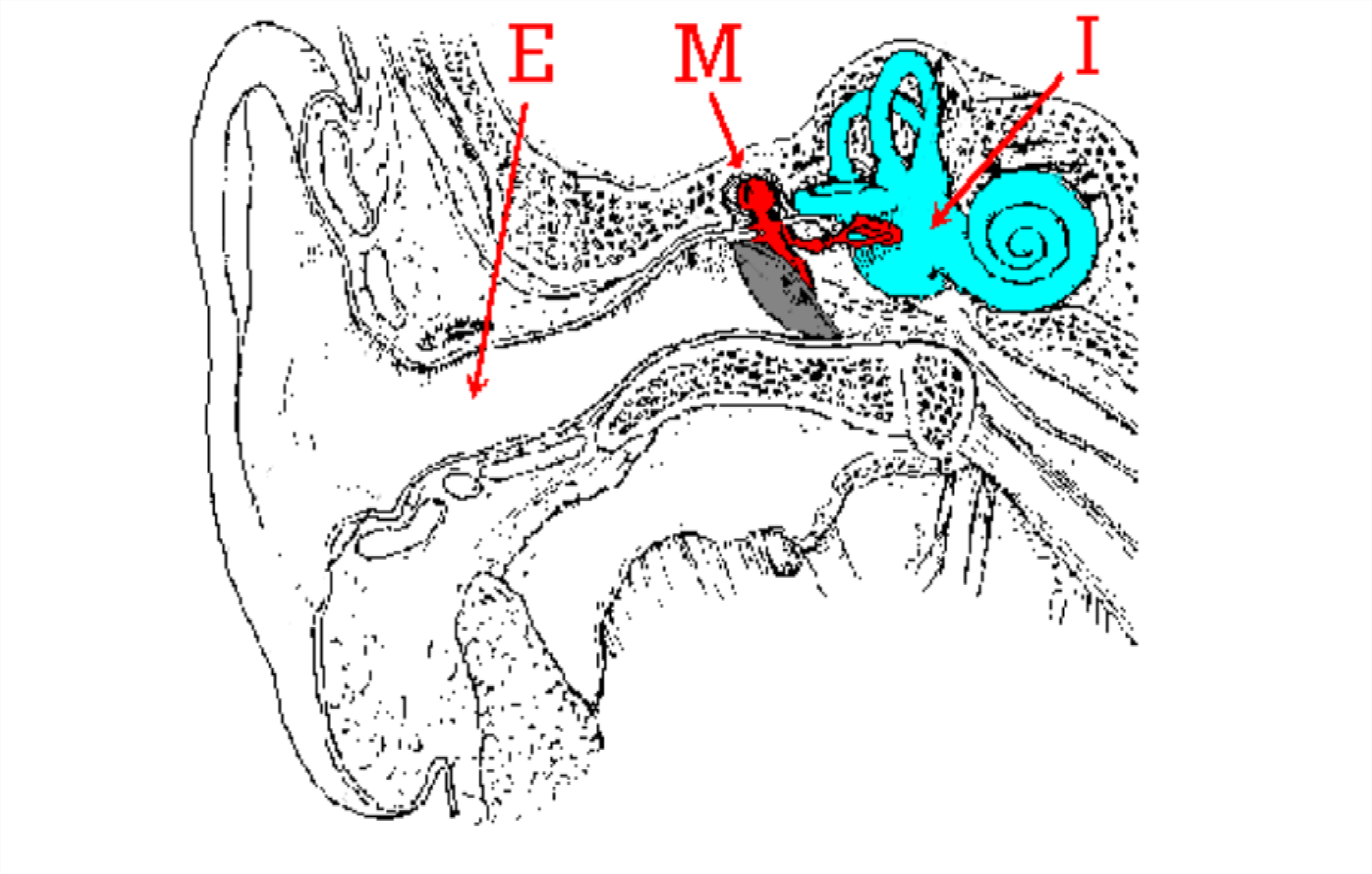
Comunicaciones Humanas



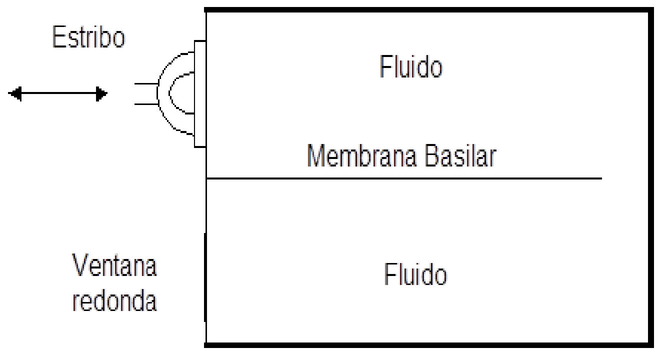


Nuestro receptor

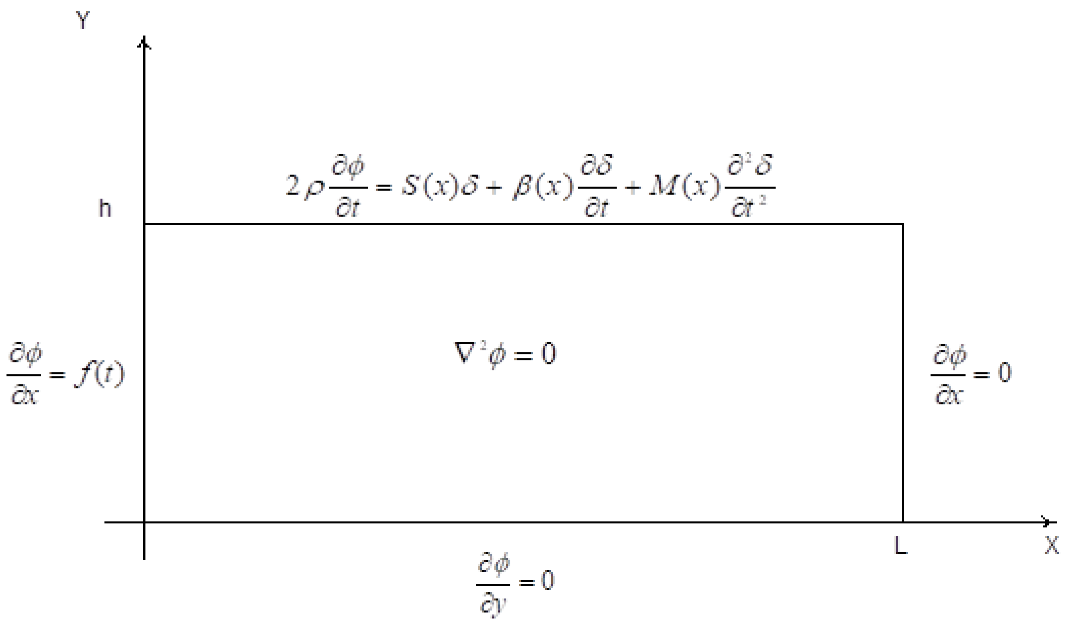
- **E** Oído Externo.
- **M** Oído Medio
- **I** Oído Interno



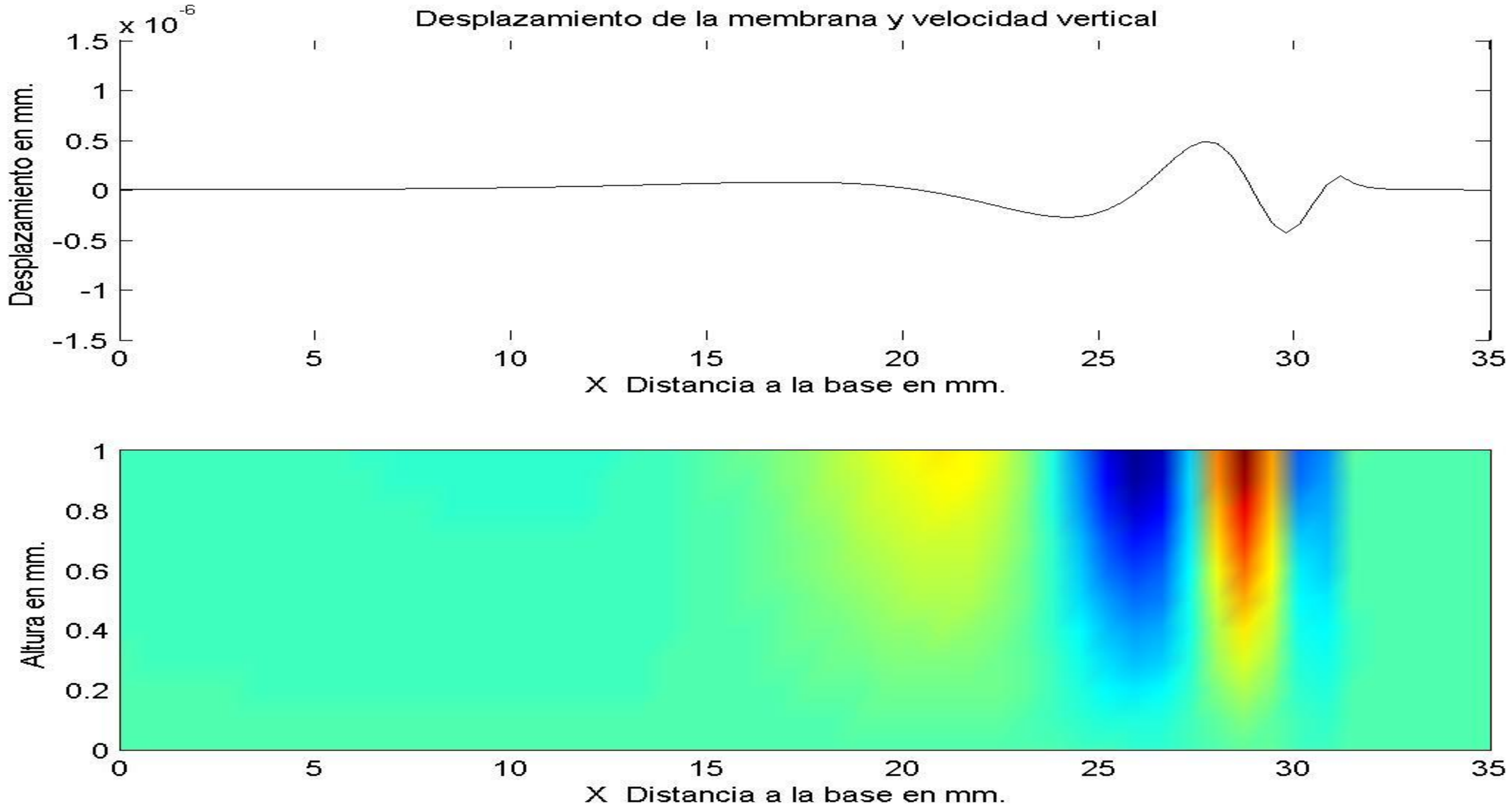
Modelo Lineal



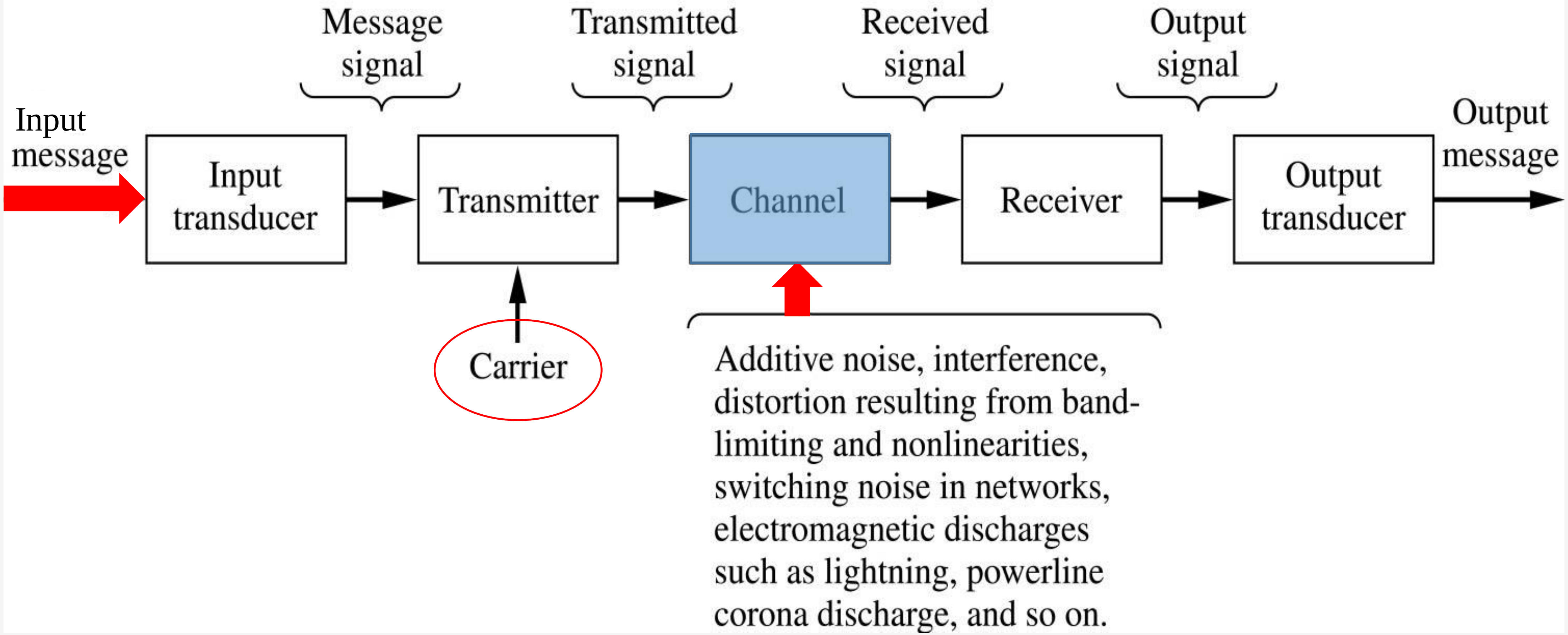
Modelo Lineal



Modelo Lineal



Simple Modelo de un Sistema de Comunicaciones

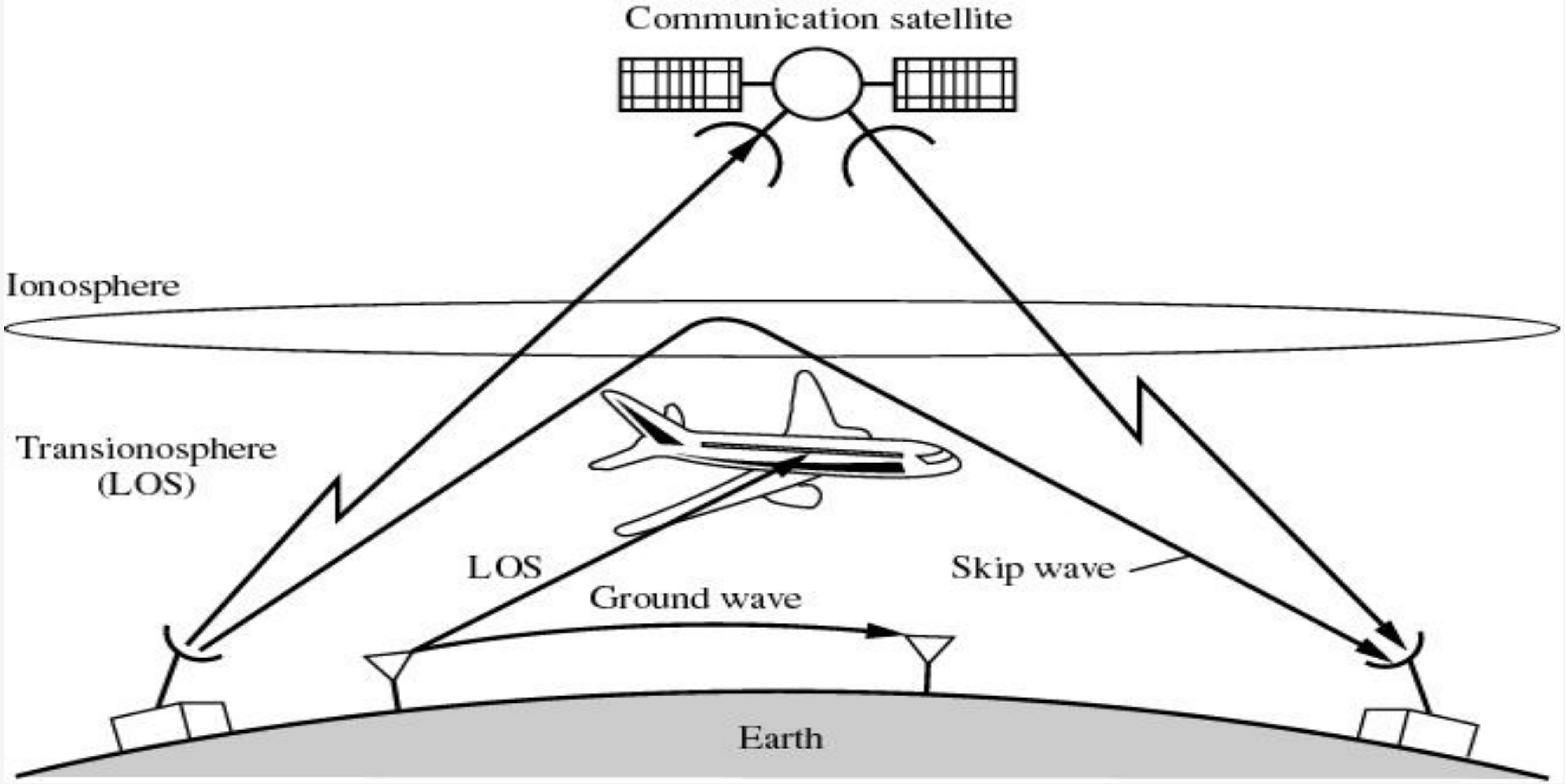


Principles of Communications, 5/E by Rodger Ziemer and William Tranter, John Wiley & Sons. Inc.

Bandas de Frecuencia

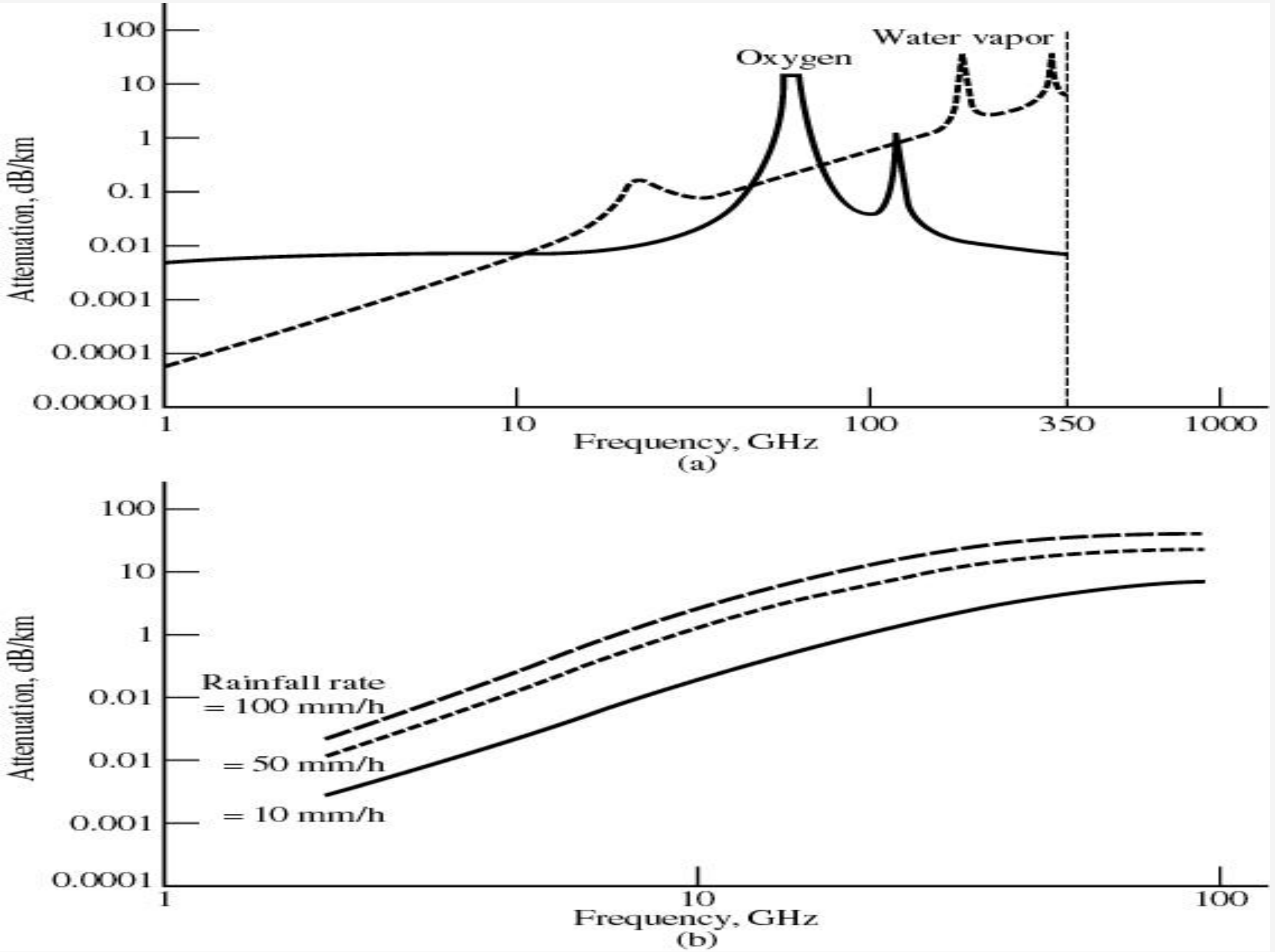
Banda	Nombre	Banda (GHz)	Denominación	
3--30 kHz	Very low frequency (VLF)			
30--300 kHz	Low frequency (LF)			
300--3000 kHz	Medium frequency (MF)			
3--30 MHz	High frequency (HF)			
30--300 MHz	Very high frequency (VHF)			FM comercial
0.3--3 GHz	Ultrahigh frequency (UHF)	1.0--2.0	**L**	SAOCOM, DCS, ADS-B
		2.0--3.0	**S**	
3--30 GHz	Super high frequency (SHF)	3.0--4.0	**S**	
		4.0--6.0	**C**	ARSAT 2
		6.0--8.0	**C**	
		8.0--10.0	**X**	
		10.0--12.4	**X**	
		12.4--18.0	**Ku**	Transponders ARSAT 1 y 2
		18.0--20.0	**K**	
		20.0--26.5	**K**	
30--300 GHz	Extremely high frequency (EHF)	26.5--40.0	**Ka**	
43--430 THz	Infrared (0.7--7 μm)			
430--750 THz	Visible light (0.4--0.7 μm)			
750--3000 THz	Ultraviolet (0.1--0.4 μm)			

Canales



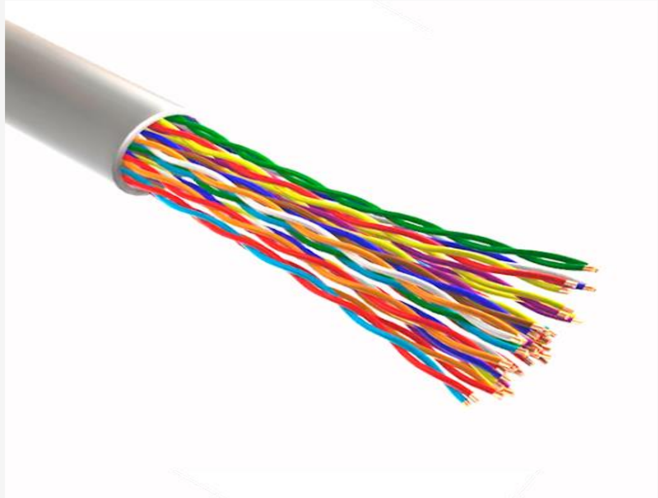
Principles of Communications, 5/E by Rodger Ziemer and William Tranter, John Wiley & Sons. Inc.

Atenuaciones

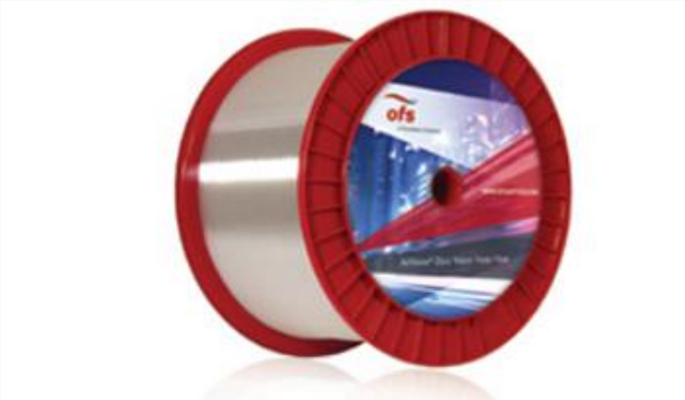


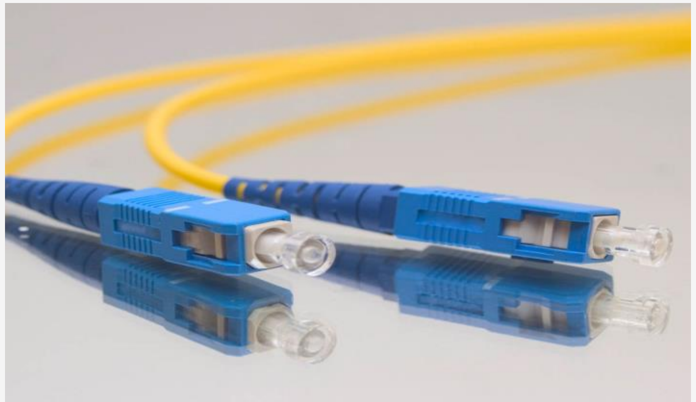
Principles of Communications, 5/E by Rodger Ziemer and William Tranter, John Wiley & Sons. Inc.

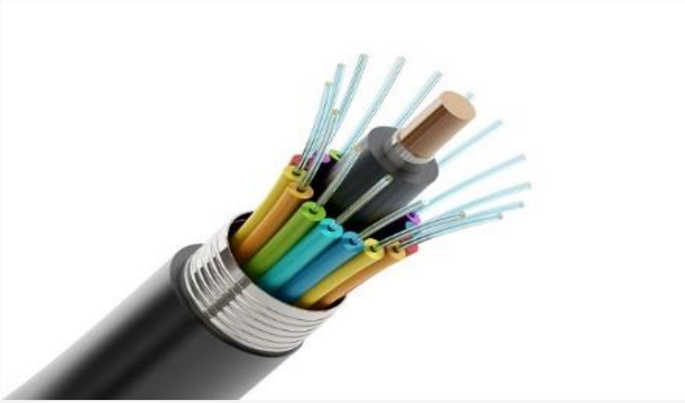
Canales

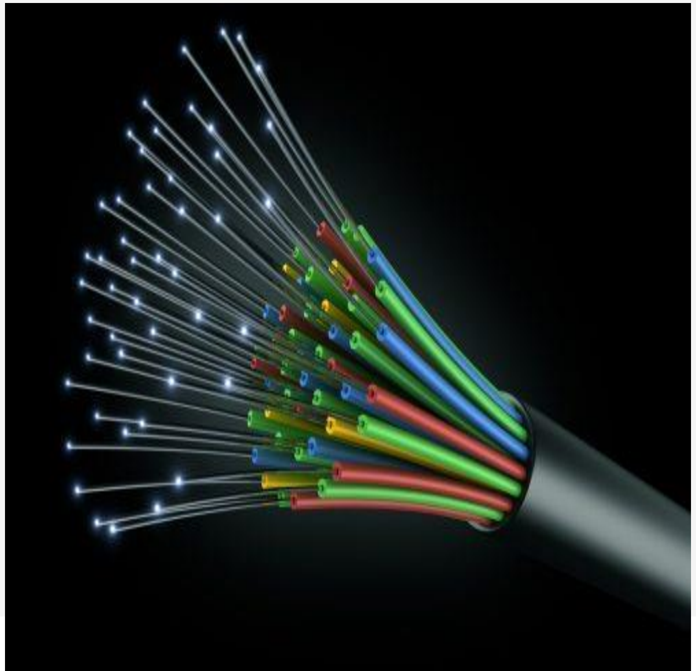


Canales

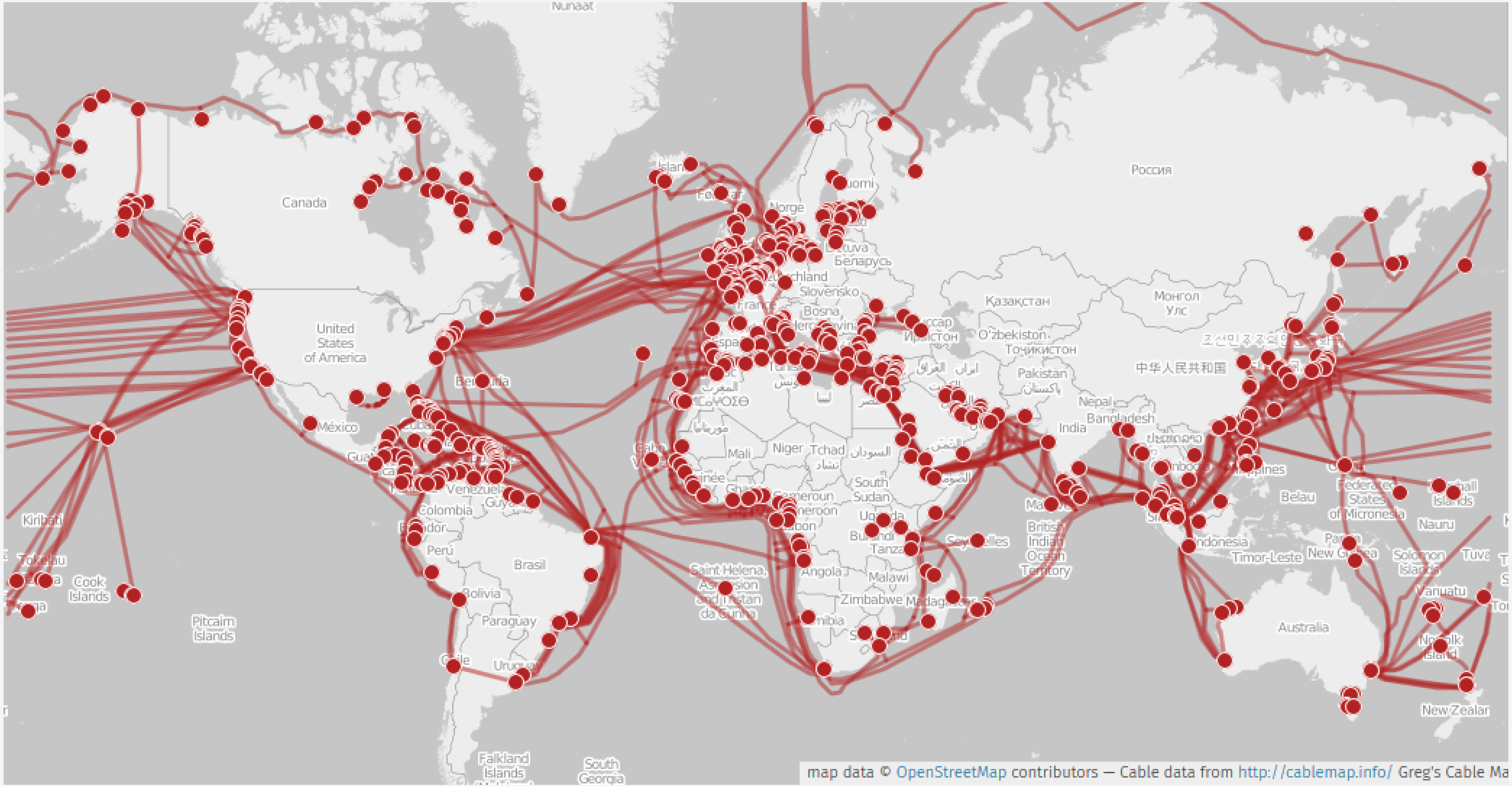








Canales



Canada
United States of America
México
Colombia
Perú
Brasil
Bolivia
Paraguay
Pitcairn Islands
Cook Islands
Kiribati
Falkland Islands
South Georgia
Norge
Slovensko
Беларусь
Mali
Niger
Tchad
South Sudan
Angola
Malawi
Zimbabwe
Saint Helena, Ascension and Tristan da Cunha
Россия
Казақстан
O'zbekiston
Тоҷикистон
Pakistan
Nepal
Bangladesh
India
Монгол Улс
中华人民共和国
British Indian Ocean Territory
Belau
Federated States of Micronesia
Nauru
Timor-Leste
Solomon Islands
Vanuatu
Australia
map data © OpenStreetMap contributors — Cable data from http://cablemap.info/ Greg's Cable Ma

Temas a tratar

- Notación según modelo para la señal
- Energía y Potencia de una señal
- Caso: señal periódica
- Correlación
- Densidad Espectral
- Correlación y SLITs
- dB, dBm, dBW …
- Modelos de canal

SAOCOM 1B

Modelos para la señal

VID	**VIC**	
$x[n]$	$x(t)$	Modelo de señal DETERMINÍSTICO
$X[n]$	$X(t)$	Modelo de señal ALEATORIO

<u>Modelo DETERMINÍSTICO</u>

- Valor medio de una señal

$$\overline{x[n]} = < x[n] > = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^{N} x[n]$$

$$\overline{x(t)} = < x(t) > = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t)\, dt$$

¿Cómo se refleja en el dominio de la frecuencia el hecho que una señal tenga valor medio no nulo?

MATLAB

- `sum(x)./N;`
- `mean(x);`

Señales de Energía

Modelo DETERMINÍSTICO (cont.)

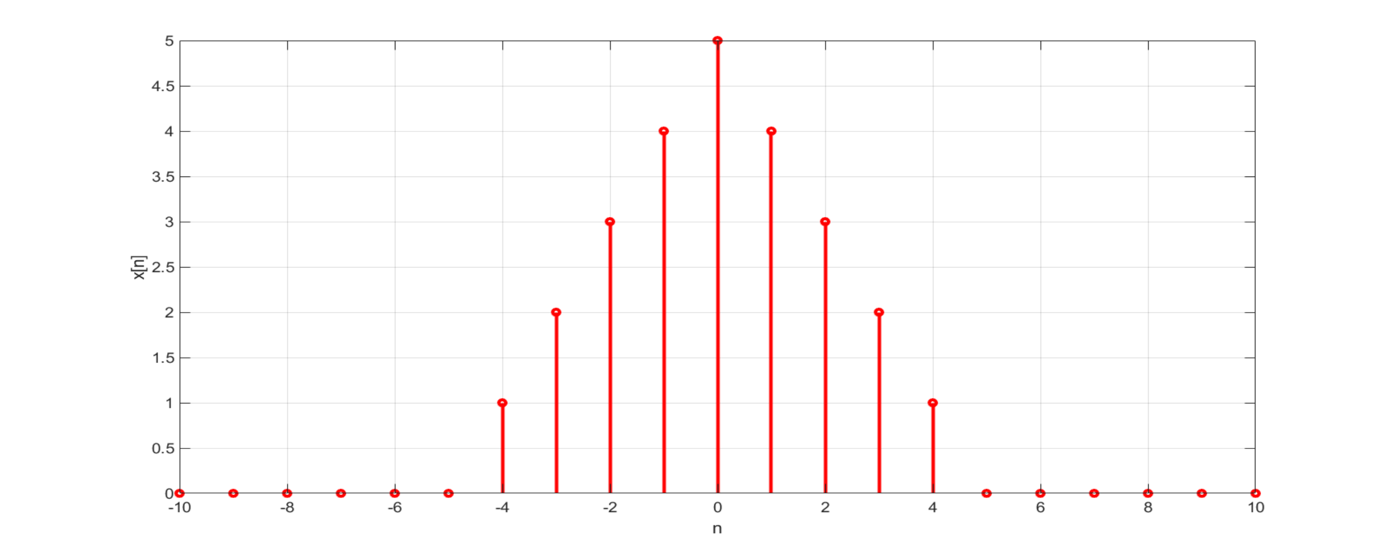
- Energía de una señal

$$\varepsilon_x = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x[n]|^2$$

$$\varepsilon_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 \, dt$$

MATLAB

- `sum(x.^2);`



Si la señal tiene valor medio no nulo … ¿puede ser una señal de energía?

```
>> Ex=sum(x.^2);

>> Ex = 85
```

Señales de Potencia

- Potencia de una señal

¿Qué característica tiene el contenido en frecuencia de una señal de potencia?

$$P_x = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^{N} |x[n]|^2 = < |x[n]|^2 >$$

$$P_x = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} |x(t)|^2 \, dt = < |x(t)|^2 >$$

$$P_x = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x_N[n]|^2$$

$$P_x = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-\infty}^{\infty} |x_T(t)|^2 \, dt$$

$$P_x = \lim_{N\to\infty} \frac{\varepsilon_{x_N}}{2N+1}$$

$$P_x = \lim_{T\to\infty} \frac{\varepsilon_{x_T}}{2T}$$

$|x(t)|^2$ Potencia instantánea

P_x: Potencia MEDIA NORMALIZADA

¿Cuál es el valor de potencia de una señal de energía?

MATLAB

- `sum(abs(x).^2)./N;`
- `mean(abs(x).^2);`

Señales de potencia (señal periódica)

- Potencia de una señal periódica $\exists\, T \varepsilon \mathbb{R}\ / y(t) = y(t+T)\ \forall t$

$$y(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{j\,2\,\pi \frac{k}{T} t}$$

$$C_k = \frac{1}{T}\mathcal{F}\{y_p(t)\} \text{ en } f = \frac{k}{T}\ ,\ \ k \in \mathbb{Z}$$

$$C_0 =< y(t) >$$

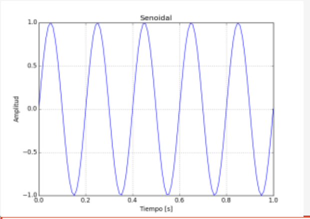
$$P_y =< |y(t)|^2 > =< y(t)y^*(t) >$$

$$P_y = < \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{j\,2\,\pi \frac{k}{T} t} \sum_{l=-\infty}^{\infty} C_l^* e^{-j\,2\,\pi \frac{l}{T} t} >$$

$$P_y = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} C_k C_l^* < e^{j\,2\,\pi \frac{(k-l)}{T} t} >$$

$$\boxed{P_y = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |C_k|^2}$$

¿Cuál es la característica notoria del contenido en frecuencia de una señal periódica?



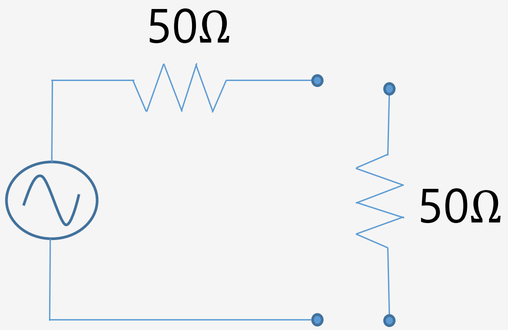
¿Cómo extendería este análisis en el caso de una señal periódica de VID?

MATLAB

Generar muestras de una señal sinusoidal de frecuencia fo arbitraria y amplitud unitaria . ¿Por qué es probable que el valor medio calculado de la señal no resulta ser exactamente cero? ¿Cuánto vale su potencia media normalizada?

Ejemplo

Suponga la salida de un generador de señales de RF (en el ATEI pueden experimentar ...)



$$x(t) = A\ \sin(2\pi f_p t + \theta) \quad [\,\mathrm{V}\,]$$

$$T = 1/f_p$$

$$P_x = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |C_k|^2$$

$$|C_1| = |C_{-1}| = A/2$$

$$P_x = A^2/2 \quad [\,\mathrm{V}^2\,]$$

$$P_x = A^2/(2R) \quad [\,\mathrm{V}^2/\,\Omega\,] : [\,\mathrm{W}\,]$$

Si R=50Ω

$$A[\mathrm{V}] = \sqrt[2]{100[\Omega]\ P_x[\mathrm{W}]}$$

¿Por qué el valor de P_x no es función de la fase inicial θ?

Correlación (modelo determinístico)

Función de Inter-correlación:

$$r_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau)\, y^*(t)\, dt$$

p/ señales de energía

$$r_{xy}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t+\tau)\, y^*(t)\, dt$$

p/ señales de potencia

$$r_{xy}(\tau) = < x(t+\tau)\, y^*(t) >$$

Función de Auto-correlación:

$$r_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau)\, x^*(t)\, dt$$

$$r_{xx}(0) = \varepsilon_x$$

$$r_{xx}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t+\tau)\, x^*(t)\, dt$$

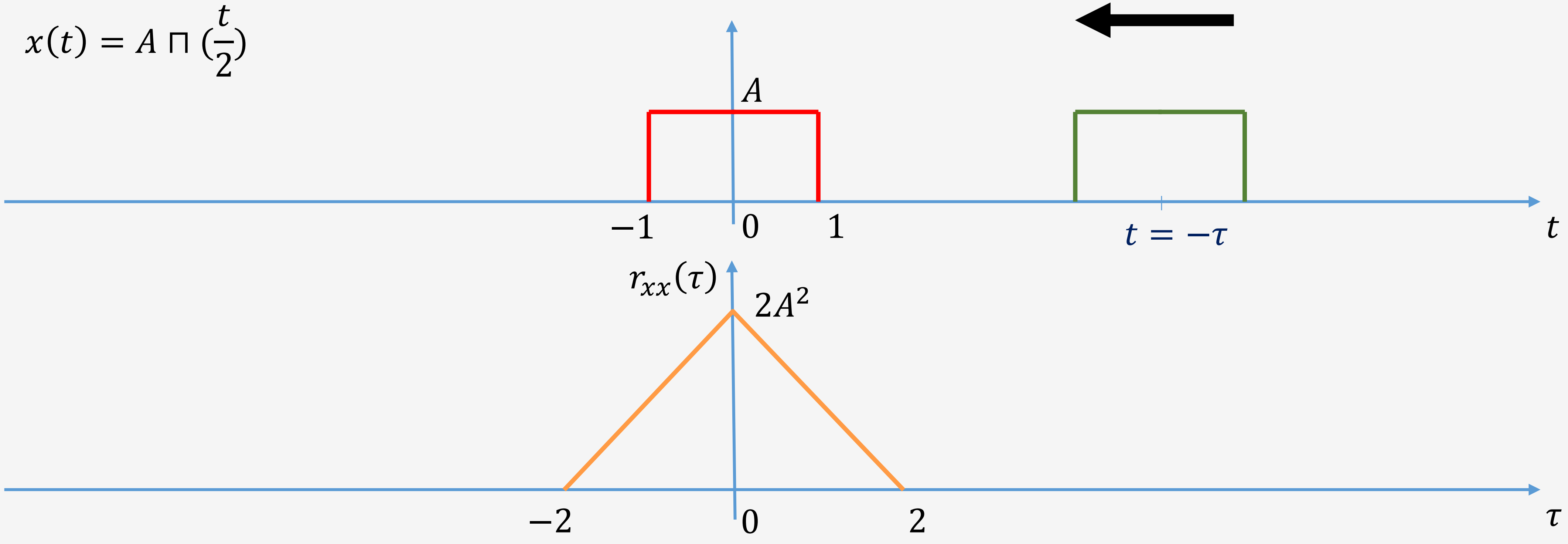
$$r_{xx}(0) = P_x$$

$$r_{xx}(\tau) = < x(t+\tau)\, x^*(t) >$$

Correlación (cont.)

$$r_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau)\, x^*(t)\, dt \overset{\lambda = t+\tau}{=} \int_{-\infty}^{\infty} x(\lambda) x^*(-(\tau-\lambda)\, d\lambda = \{x * x^{\bar{*}}\}(\tau)$$

$$x(t) = A \sqcap \left(\frac{t}{2}\right)$$



Correlación (cont.)

- Propiedades de la función de auto-correlación

$$r_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau)\, x^*(t)\, dt$$

- $r_{xx}(0) = \varepsilon_x$
- $|r_{xx}(\tau)| \leq r_{xx}(0)$
- $r_{xx}(\tau) = r_{xx}{}^*(-\tau)$
- $\lim_{|\tau|\to\infty} r_{xx}(\tau) =< x(t) >^2$
- $\mathcal{F}\{r_{xx}(\tau)\} \geq 0$
- Si $x(t)$ es periódica de período To en t , entonces $r_{xx}(\tau)$ es periódica de período To en τ.

dee y dep

densidad espectral de energía: (dee)

$$r_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau)\, x^*(t)\, dt \qquad r_{xx}(0) = \varepsilon_x$$

T. de Parseval

$$\varepsilon_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2\, dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2\, df$$

$$\boxed{s_{xx}(f) \triangleq |X(f)|^2}$$

densidad espectral de potencia: (dep)

$$r_{xx}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t+\tau)\, x^*(t)\, dt \qquad r_{xx}(0) = P_x$$

$$P_x = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} |x(t)|^2 dt = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-\infty}^{\infty} |x_T(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{T\to\infty} \frac{|X^T(f)|^2}{2T}\, df$$

$$X^T(f) = \mathcal{F}\{x_T(t)\} \qquad \boxed{s_{xx}(f) \triangleq \lim_{T\to\infty} \frac{|X^T(f)|^2}{2T}}$$

¿TF (TFTD) / dee y dep? Ejemplo

$$s_{xx}(f) \triangleq \lim_{T\to\infty} \frac{|X^T(f)|^2}{2T} \quad \text{donde} \quad X^T(f) = \mathcal{F}\{x_T(t)\}$$

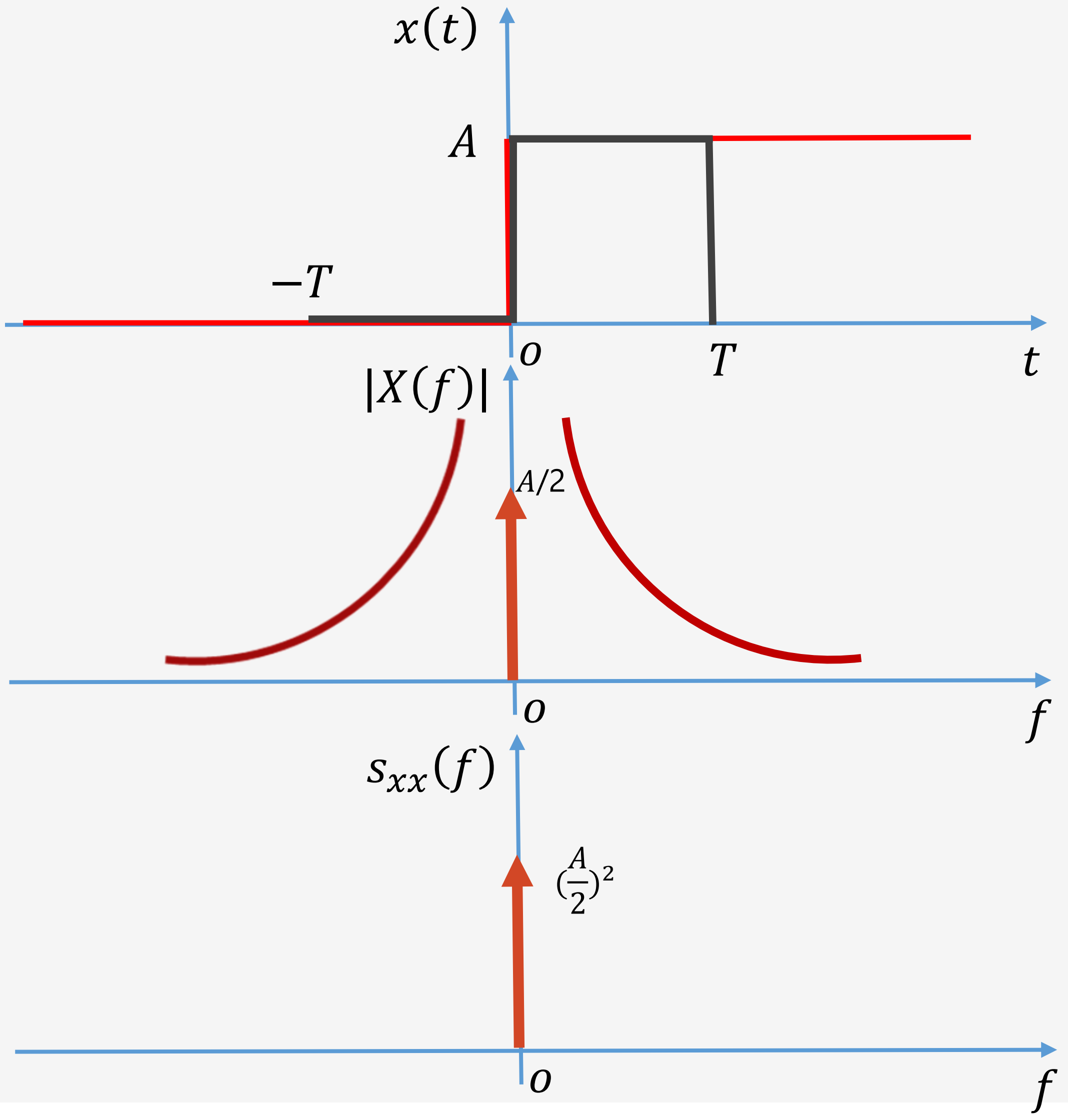
$$x(t) = A\, u(t)$$

$$X(f) = \frac{A}{j\, 2\pi f} + \frac{A}{2}\delta(f)$$

$$x_T(t) = A \sqcap \left(\frac{t - \frac{T}{2}}{T}\right)$$

$$|X^T(f)|^2 = (AT)^2\, sinc^2(Tf)$$

$$s_{xx}(f) = \frac{A^2}{4}\delta(f)$$



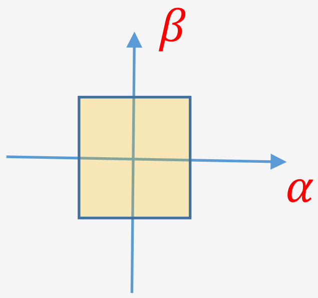
Relación de **Wiener** - Khinchin

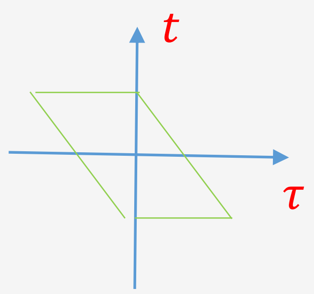
$$s_{xx}(f) \triangleq \lim_{T\to\infty} \frac{|X^T(f)|^2}{2T} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(\alpha) e^{-j2\pi f\alpha} d\alpha \int_{-T}^{T} x^*(\beta) e^{j2\pi f\beta} d\beta =$$

$$= \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \iint_{-T}^{T} x(\alpha)x^*(\beta)\, e^{-j2\pi f(\alpha-\beta)}\, d\alpha\, d\beta$$

$\tau = \alpha - \beta \qquad d\tau = d\alpha$

$t = \beta \qquad dt = d\beta$

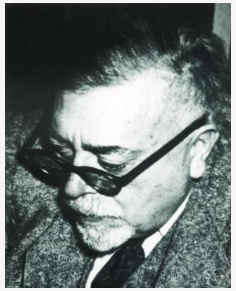


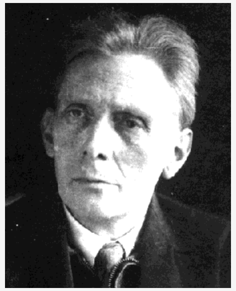


$$s_{xx}(f) = \lim_{T\to\infty} \left[\int_{-2T}^{0} \frac{1}{2T} \int_{-T-\tau}^{T} x(t+\tau)x^*(t)\, dt\, e^{-j2\pi f\tau} d\tau + \int_{0}^{2T} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T-\tau} x(t+\tau)x^*(t)\, dt\, e^{-j2\pi f\tau} d\tau \right]$$

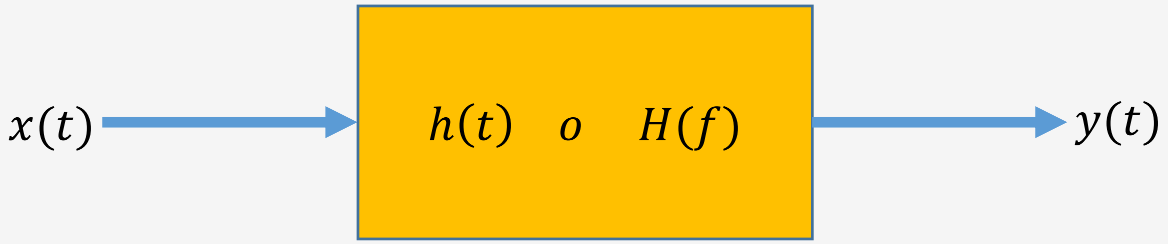
$$s_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{0} < x(t+\tau)x^*(t) > e^{-j2\pi f\tau} d\tau + \int_{0}^{\infty} < x(t+\tau)x^*(t) > e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

$$\boxed{s_{xx}(f) = \mathcal{F}\{r_{xx}(\tau)\}}$$


Norbert Wiener


Aleksandr Khinchin

Valor medio, Correlación y SLITs



$$y(t) = \{x * h\}(t)$$

$$< y(t) > = < x(t) > H(0)$$

$$r_{yy}(\tau) = \{r_{xx} * h * h^{\bar{*}}\}\,(\tau) = \{r_{xx} * r_{hh}\}\,(\mathrm{\tau})$$

$$s_{yy}(f) = s_{xx}(f)\,H(f)\,H^{*}(f)$$

$$\boxed{s_{yy}(f) = s_{xx}(f)\,|H(f)|^{2}}$$

dB, dBm, dBW …

x [dB]$= 10 \log x$ dB: adimensional (si x es adimensional) … solo indica que se usa 10 log (.)

Ventajas:
- "Compresión" de la escala de valores
- Multiplicaciones y divisiones $\xrightarrow{\log}$ Sumas y restas

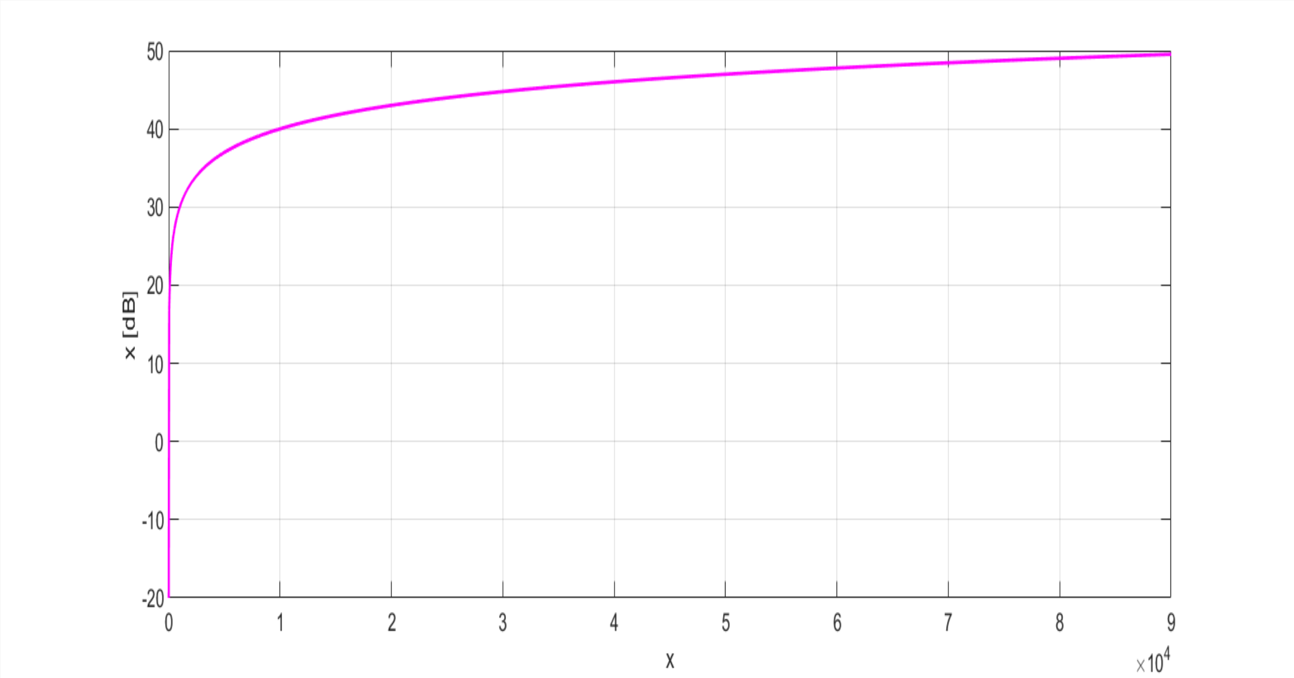
Si P es potencia en W P [dBW]$= 10 \log P$ [W]

P [mW] P [dBm]$= 10 \log P$ [mW]

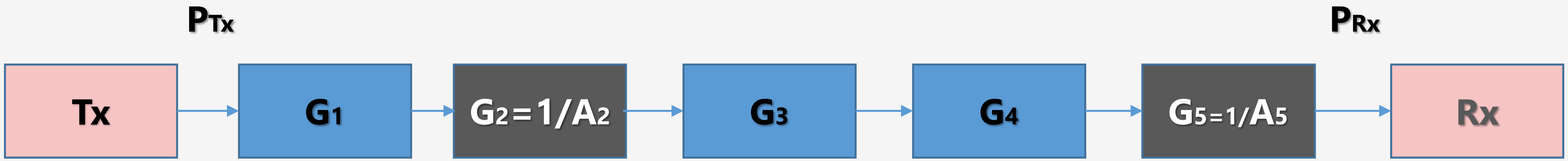
P [mW] = P [W] * 1000

P [dBm]= P[dBW]+30 [dB]

Un Rx que tiene una sensibilidad de -130dBm, implica que funciona correctamente cumpliendo todos los requerimientos para una potencia recibida de $P_R = 10^{-13}$mW =100 fW



dB, dBm, dBW …



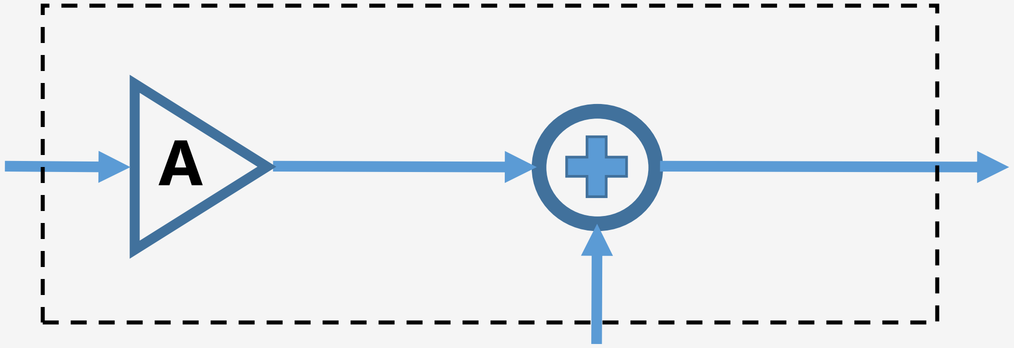
$$P_{Rx}[mW] = P_{Tx}\,[mW]\,\frac{G_1 G_3 G_4}{A_2\,A_5}$$

$$P_{Rx}[\mathrm{dBm}] = P_{Tx}\,[\mathrm{dBm}] + G_1[\mathrm{dB}] + G_3[\mathrm{dB}] + G_4[\mathrm{dB}] - A_2[\mathrm{dB}] - A_5[\mathrm{dB}]$$

Modelo lineal para el CANAL

Tx **CANAL** **Rx**

$\boldsymbol{X(t)}$



$$\boldsymbol{r(t) = A.X(t) + n(t)}$$

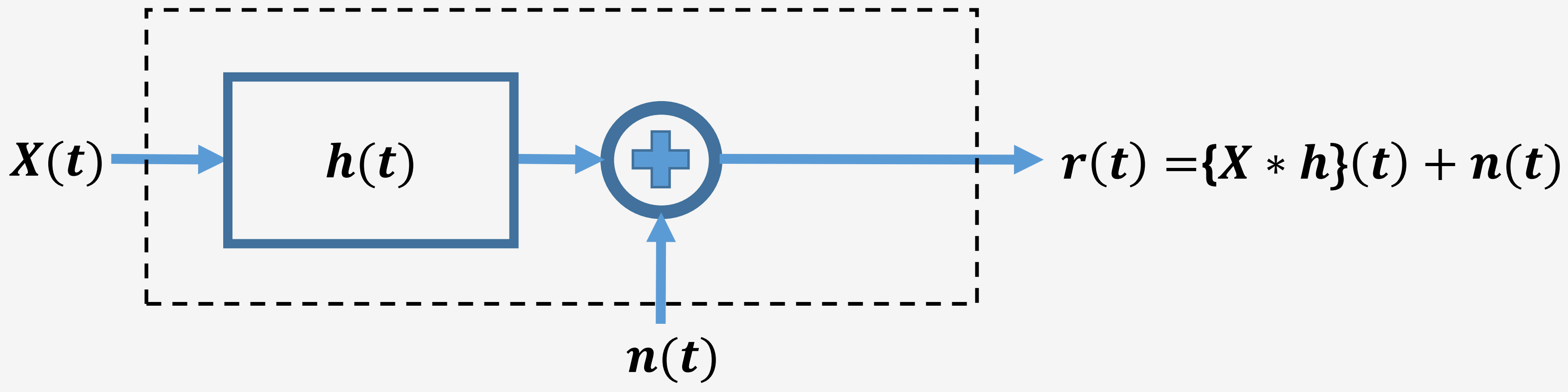
$\boldsymbol{n(t)}$

Modelo: RUIDO BLANCO GAUSSIANO

CANAL AWGN (sin limitación de ancho de banda)

Modelo lineal para el CANAL

Tx **CANAL** **Rx**

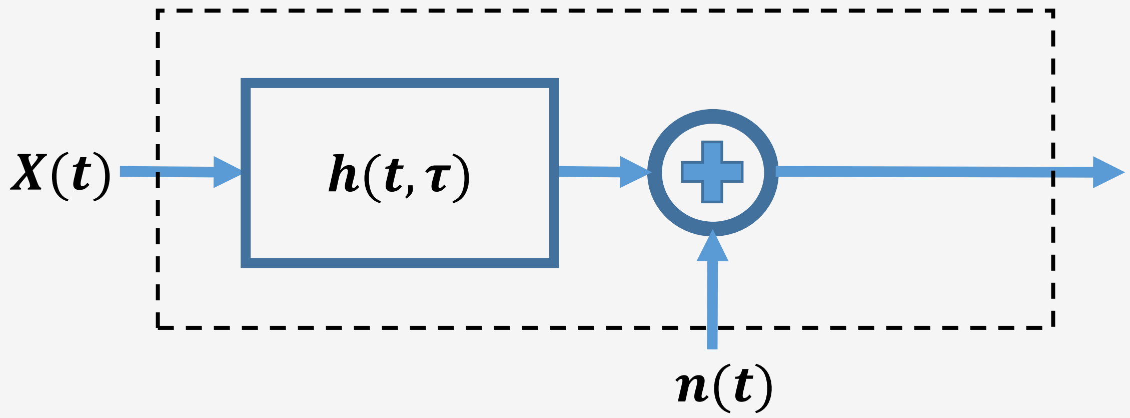


Modelo: RUIDO BLANCO GAUSSIANO

<u>**CANAL AWGN**</u> (con limitación de ancho de banda)

Modelo lineal para el CANAL

Tx **CANAL** **Rx**



$$\boldsymbol{r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\tau)\, h(t,\tau)\, d\tau + n(t)}$$

Modelo: RUIDO BLANCO GAUSSIANO

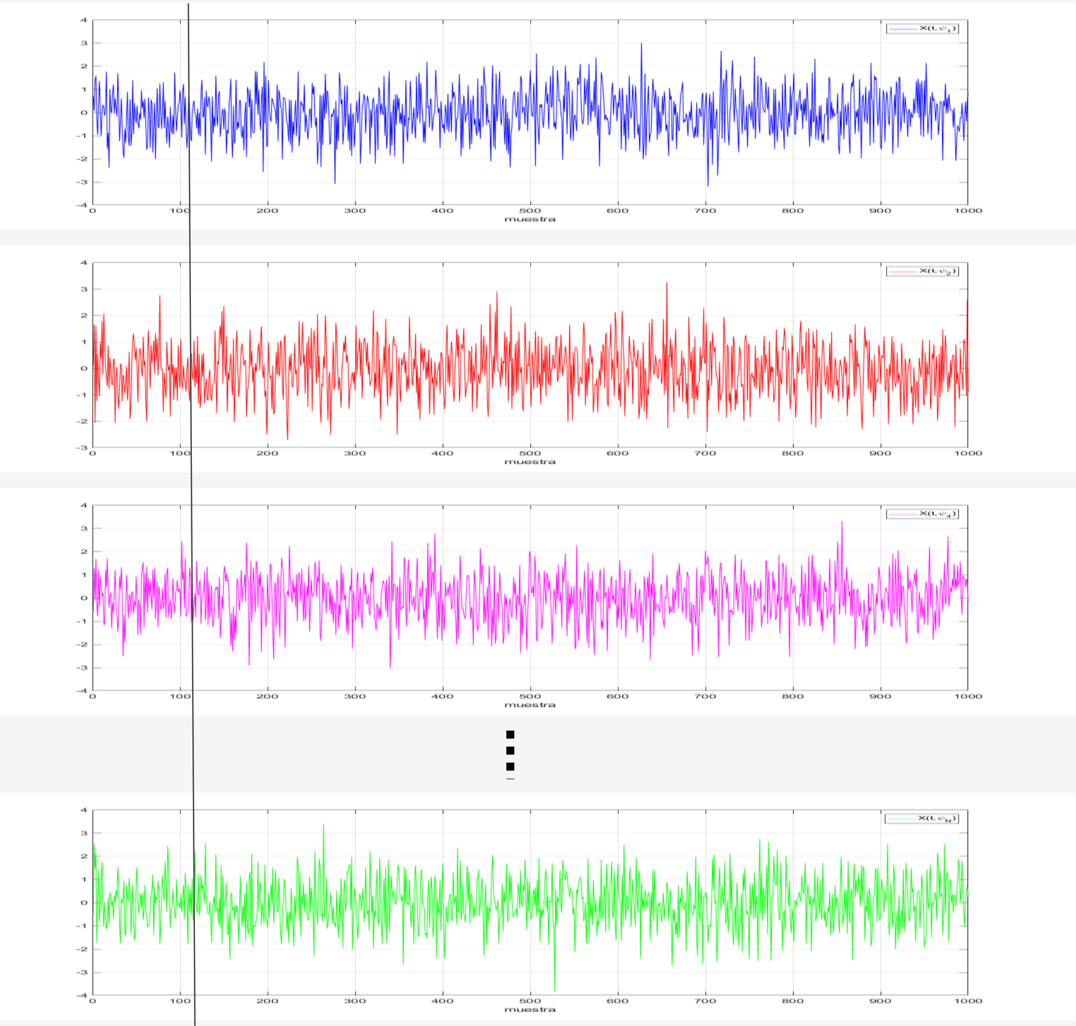
Caso Particular:

$\boldsymbol{h(t,\tau)}=\sum_{k=1}^{L} a_k(t)\, \delta(t-\tau-\tau_k(t))$

$\boldsymbol{r(t)}=\sum_{k=1}^{L} a_k(t)\, X(t-\tau-\tau_k(t)) + n(t)$

CANAL AWGN (variante en el tiempo)

Modelo de señal ALEATORIO



$X(t_1, \psi) = X_1$ **VA** $f_{X_1}(x_1, t_1) \longrightarrow$ fdp

Realización 1: $X(t, \psi_1)$

Realización 2: $X(t, \psi_2)$

Realización 3: $X(t, \psi_3)$

Realización N: $X(t, \psi_N)$

$f_{X_1}(x_1, t_1)$ fdp

$$F_{X_1}(x_1, t_1) = P\{X_1 \leq x_1\} =$$

$$= \int_{-\infty}^{x_1} f_{X_1}(\alpha, t_1) d\alpha$$

Proceso estocástico

$$X(t, \psi) = X(t)$$

$$f_{X_i}(x_i, t_i) \quad , \qquad \forall\, t_i \in \mathbb{R}$$

$$f_{X_i, X_j}(x_i, x_j; t_i, t_j) \quad , \qquad \forall\, t_i, t_j$$

$$f_{X_i, X_j, X_k}(x_i, x_j, x_k; t_i, t_j, t_k) \, , \qquad \forall\, t_i, t_j, t_k$$

$\vdots$

¿preguntas?

.

Foro en Moodle de E214 E1214

Consultas en tiempo real en reuniones virtuales

Fuentes:

- Auditory Transduction by Brandon Pletsch.
- Dancing outer hair cell. J Santos – Sacchi.
- Modelo Lineal para la precepción de la Altura Tonal. TF. FI-UNLP.
- Principles of Communications, 5/E by Rodger Ziemer and William Tranter, John Wiley & Sons. Inc.
- www.itu.int
- www.enacom.gob.ar

Fuentes:

- Principles of Communications, 5/E by Rodger Ziemer and William Tranter, John Wiley & Sons. Inc.
- Signals and Systems (Prentice-Hall signal processing series) by Alan V. Oppenheim.
- Manual generador RF Agilent.
- Fotografías desde Wikipedia.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

POR LA CIENCIA Y POR LA PATRIA

U.N.L.P.

Fi