

# Sistemas de Telecomunicación

3º Ingeniería de Telecomunicaciones — UPV/EHU  
"Under-promise and over-deliver."

Javier de Martín – 2016

## Unidades Logarítmicas

**dB** es una unidad que describe una **relación** entre magnitudes.

$$L(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \\ = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_2}{V_1} \right) + 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{R_1}{R_2} \right)$$

## Unidades Derivadas del dB

- dBm**: Potencia de la señal en un punto cualquiera de un circuito referida a una potencia de  $1mW$ .

$$L(dBm) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P(mW)}{1mW} \right)$$

- dBW**: Potencia de la señal referida a una potencia de  $1W$ .

$$L(dBW) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P(W)}{1W} \right)$$

- dBmV**: Nivel de un voltaje comparado con  $1mV$  sobre una carga de  $75\Omega$ .

$$L(dbmV) = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{V(mV)}{1mV} \right)$$

- dBV**: Nivel de un voltaje comparado con  $0,0775V$  (tensión eficaz) sobre una carga de  $600\Omega$ .

$$L(dBm) = dBV + 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{600}{R} \right)$$

Estas medidas están relacionadas por:

$$L(dBm) = L(dBV) + 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{600}{R} \right)$$

## Niveles

- dB<sub>r</sub>**: Expresa el nivel relativo en un punto con respecto a otro punto; es una medida en **dB** sin sufijo, **r** se incluye para denotar que se trata de un valor relativo a un cierto punto de referencia.

$$L(dBr) = 10 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}}$$

- dBm0**: Indica la potencia en **dBm** presente en el punto de nivel relativo cero.

$$L(dBm0) = L_A(dBm) - L_A(dBr)$$

Si se emite un tono de prueba ( $0dBm$ )  $\rightarrow L_A(dBm) = L_A(dBr)$ .

## Perturbaciones y Medios de TX

### Distorsión Lineal

- de amplitud:  $k \neq cte$ ,  $k = k(f)$
- de fase:  $t_o \neq cte$ ,  $t_o = t_o(f)$

### Distorsión No Lineal o Armónica

$$y(t) = f(x(t)) \underset{\text{Serie de Taylor}}{=} \underbrace{a_0}_{\text{C.C}} + \underbrace{a_1 x(t)}_{\text{Término Lineal}} + \underbrace{a_2 x^2(t)}_{\text{Término Cuadrático}} + \underbrace{a_3 x^3(t)}_{\text{Término Cúbico}} + \dots + a_n x^n(t)$$

El grado del polinomio a la salida del sistema no lineal indica cuántas frecuencias nuevas van a ser generadas por dicho sistema.

- Coefficiente de Distorsión del Armónico n-ésimo  $d_n$** :

$$d_n = \frac{V_{d_n}}{V_1} \quad n = 2, 3, \dots, k$$

$$D_n = 20 \cdot \log_{10} \frac{V_{d_n}}{V_1}$$

- Atenuación del Armónico n-ésimo  $A_n$** :

$$A_n = 20 \cdot \log_{10} \frac{V_1}{V_{d_n}} = -D_n$$

- Coefficiente de Distorsión Total  $d$** :

$$d = \sqrt{\sum_{n>1} d_n^2}$$

- Total Harmonic Distortion (THD)**:

$$THD(\%) = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n>1} V_{d_n}^2} \cdot 100\%$$

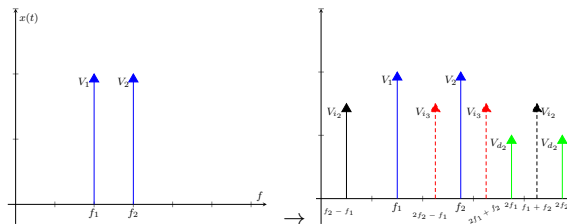
Si  $V_1$  aumenta  $\Delta(dB) \rightarrow V_{d_n}$  aumenta  $n \cdot \Delta(dB)$ .

### Intermodulación

$$x(t) \xrightarrow{h(t)} y(t) = a_0 + a_1 \cdot x(t) + \dots + a_n \cdot x^n(t)$$

A la salida del sistema aparecen nuevas frecuencias:

- Armónicos:  $2 \cdot f_1$ ,  $2 \cdot f_2$ ,  $3 \cdot f_1$ ,  $3 \cdot f_2$ , ...,  $n \cdot f_1$ ,  $n \cdot f_2$
- Combinación lineal de las frecuencias de  $x(t)$ :
  - Segundo orden:  $f_1 + f_2$ ,  $f_1 - f_2$ , ...
  - Tercer orden:  $2f_1 + f_2$ ,  $f_1 - 2f_2$ , ...



Intermodulación orden  $n >$  Armónico orden  $n$

- Coefficiente de Intermodulación enésimo ( $i_n$ )**:

$$i_n = \frac{V_{d_1}}{V_1} = n \cdot d_n$$

$$I_n = 20 \cdot \log_{10} \frac{V_{i_n}}{V_1} = 20 \cdot \log_{10} n \cdot \frac{V_{d_1}}{V_1} = D_n + 20 \cdot \log_{10} n$$

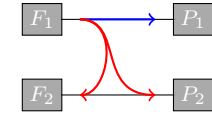
Si  $x(t)$  cambia y ahora tiene  $\Delta(dB)$  menos:

$$D'_n = D_n + (n-1) \cdot \Delta$$

$$I'_N = D_n + 20 \cdot \log_{10} n$$

$$I'_n = D'_n + 20 \cdot \log_{10} n = D_n + (n-1)\Delta + 20 \cdot \log_{10} n = I_n + (n-1) \cdot \Delta$$

### Diafonía



El circuito **perturbador** es el circuito en el que se genera la perturbación y el circuito **perturbado** es en el que se recibe la diafonía.

**Clasificación** de la diafonía:

- Según como sea percibida la señal perturbadora en el circuito perturbado:

- Inteligible
- Ininteligible

- Según el número de circuitos que atraviesa la señal perturbadora:

- Directa: No se atraviesan circuitos intermedios
- Indirecta: Se atraviesan uno o más circuitos intermedios

- Transversal
- Longitudinal

- Según el extremo que recibe la perturbación

- Paradiafonía: Perturbación recibida en el mismo extremo que se genera la señal, conocida como **NEXT** (Near End Cross Talk).
- Telediafonía: Recibida en el extremo opuesto. Conocida como **FEXT** (Far End Cross Talk).

Parámetros de medida de la diafonía:

- $P_1$ : Potencia de la señal en un punto del circuito perturbador.
- $P_2$ : Potencia de la señal perturbada medida en un punto equivalente del circuito perturbado.
- Relación de Diafonía ( $R_d$ ):

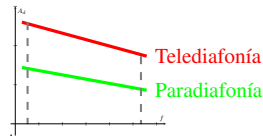
$$R_d = 10 \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right)$$

- Atenuación de Diafonía ( $A_d$ ):

$$A_d = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) = -R_d$$

- Cross Talk Unit (CU):

$$CU = 20 \log_{10} \left( \frac{V_2}{V_1} \cdot 10^6 \right) = 120 - A_d$$



## Ruido

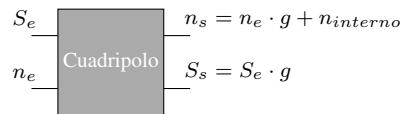
### Ruido Térmico

$$n = k \cdot t \cdot B$$

$$N = 10 \cdot \log_{10}(ktB)$$

- $k$ : Constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} W/K/Hz$ )
- $t$  (Kelvin): Temperatura
- $b$  (Hz): Ancho de banda

### Ruido en un Cuadripolo



Parámetros de caracterización del ruido:

- **Temperatura Equivalente de Ruido ( $T_{eq}$ )**: Temperatura a la que tendría que estar la entrada del circuito para que a la salida se vea el mismo ruido que se produce suponiendo que el cuadripolo es ideal.

$$n_{int} = k \cdot t_{eq} \cdot b \cdot g$$

- **Factor de Ruido en un Cuadripolo ( $f$ )**: Cociente entre la potencia de ruido a la salida comparada con la potencia de ruido que habría a la salida si la entrada estuviera a temperatura estándar y el cuadripolo no añadiera ruido térmico.

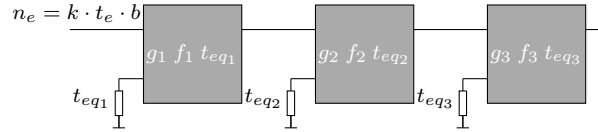
$$f = \frac{n_s}{k \cdot t_o \cdot b \cdot g} = 1 + \frac{t_{eq}}{t_o} \quad f = \left( \frac{S}{N} \right)_e \left( \frac{S}{N} \right)_s$$

$$F = 10 \cdot \log_{10}(f) = \left( \frac{S}{N} \right)_e - \left( \frac{S}{N} \right)_s$$

Relación entre  $t_{eq}$  y  $f$ :

$$t_{eq} = t_o \cdot (f - 1) \quad f = 1 + \frac{t_{eq}}{t_o}$$

## Asociación de Cuadripolos



$$n_s = k \cdot b \cdot g_1 \cdot g_2 \cdot g_3 \left( t_o + t_{eq1} + \frac{t_{eq2}}{g_1} + \frac{t_{eq3}}{g_1 \cdot g_2} \right)$$

Fórmula de Friis:

$$f_T = f_1 + \frac{f_2 - 1}{g_1} + \frac{f_3 - 1}{g_1 \cdot g_2} + \dots + \frac{f_n - 1}{g_1 \cdot g_2 \cdot \dots \cdot g_{n-1}}$$

## Tráfico

### Tráfico Telefónico

El **tráfico** es una medida del conjunto de peticiones de uso y de ocupación de los recursos de un determinado sistema de telecomunicaciones.

- **Ritmo de afluencia de las llamadas** ( $\lambda$ ,  $\frac{\text{Número de Llamadas}}{\text{Tiempo}}$ )
- **Tiempo medio de duración** de las llamadas ( $T_m$ )
- **Volumen de Tráfico**: Tiempo de ocupación de los recursos, para  $N$  circuitos:

$$V(N) = \sum_i V_i$$

Se mide en:

- LLR: Llamadas reducidas - 120 segundos  $\rightarrow 1(E) = 30 \frac{LLR}{H}$
- CCS: *Century Call Seconds* - 100 segundos  $\rightarrow 1(E) = 30 \frac{LLR}{H}$
- **Intensidad de Tráfico ( $A$ )**: Volumen a lo largo de un periodo de observación, se mide en *Erlangs*.

$$A = \frac{t_{ocupación}}{t_{observación}} = \lambda \cdot t_{medio}$$

- **Tiempo de Observación para las medidas del tráfico ( $A$ )** El tráfico depende tanto de la duración como de la distribución de llegada de las llamadas

## Bloqueo - Llamadas Perdidas - GoS - Disponibilidad

- **Tráfico Ofrecido ( $A_O$ )**: Tráfico que soportaría la red si fuera capaz de servir todas las solicitudes de servicio.
- **Tráfico Bloqueado ( $A_B$ )**: Tráfico rechazado por ocupación de todos los circuitos  $B \cdot A_O$ .
- **Tráfico Cursado ( $A_C$ )**: Tráfico servido por la red  $A_O(1 - B)$ .
- En un sistema sin pérdidas:  $A_O = A_C$ .
- En un sistema con pérdidas:  $A_O = A_C + A_B$ .
- Con  $N$  circuitos o servidores,  $\rho = \frac{A}{N}$  será el tráfico, ofrecido/cursado, por circuito o servidor.

Un **conmutador tiene disponibilidad total** cuando cada entrada tiene acceso a cada una de las salidas.

## Distribuciones Estadísticas para Fuentes de Tráfico

- Duración de llamada constante: redes de conmutación de paquetes
- Duración de llamadas exponencial negativa: conversación telefónica

## Modelo de Llamadas Perdidas Despejadas

### Modelo LLC $\rightarrow$ Erlang-B

Distribución Erlang B para el cálculo de la probabilidad de bloqueo

$$B(N, A) = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{i=0}^N \frac{A^i}{i!}}$$

$B(N, A)$ : Probabilidad de Bloqueo

$N$ : Número de órganos

$A$ : Tráfico ofrecido

### Sistemas con Retardo - LCD

Las solicitudes de servicio que encuentran todos los servidores ocupados son puestas en una cola. Los servidores verán un ritmo constante de llegadas.

Parámetros:

- Tiempo de Servicio o Tiempo de Ocupación ( $T_O$ ).
- Tiempo de Espera ( $T_w$ ).
- Tiempo total en el sistema ( $T_s = T_m + T_w$ ).

### Sistemas M/M/N (Erlang-C)

Llegadas aleatorias, tiempo de servicio exponencial y  $N$  servidores.

$$p(t_w > t) = C(N, A) \cdot e^{-\frac{(N-A)t}{T_m}}$$

$$T_w = \frac{C(N, A) \cdot T_m}{N - A}$$

Número medio de usuarios en cola:

$$u_w = \lambda \cdot T_w$$

### Sistemas M/M/1

Llegadas aleatorias, tiempo de servicio exponencial y 1 servidor.

$$C(N, A) = A = \rho$$

$$p(t_w > t) = A \cdot e^{-\frac{(1-A)t}{T_m}}$$

$$T_w = \frac{\rho \cdot T_m}{1 - \rho}$$

### Sistemas M/D/1

Llegadas aleatorias, tiempos de servicio fijos y 1 servidor.

$$T_w = \frac{\rho \cdot T_m}{2 \cdot (1 - \rho)}$$

$$p(t_w > 0) = A = \rho$$