

## **INTRODUCCIÓN**

Un enlace de radio, establece un vínculo o puente entre dos puntos distantes, esto permite enlazarlos a fin de poder trasladar a través de este medio la información deseada.

El elemento de transmisión es una onda electromagnética de alta frecuencia (radiofrecuencia), a esta onda se la llama “portadora”, porque lleva o transporta la información (modulante). Esta información tiene distintos orígenes, y de acuerdo a ellos será el tipo de modulación a utilizar y el lugar que esta información ocupará en el espectro de radiofrecuencia.

Algunas señales típicas a transmitir son las “vocales” (Telefonía, música, cuadros de televisión, datos, etc.), transmitir una de estas señales no es lo mismo que transmitir otra, ya que sus anchos de banda son diferentes. En el caso de señales de telefonía, estas deben ser “inteligibles”, es decir, conservar el tono y el timbre. El ancho de banda de un canal de telefonía para redes de buena calidad va de 0,3 KHz - 3,4 KHz y uno de calidad inferior va de 0,3 KHz - 3 KHz. Las normas para equipos de comunicación existentes indican el valor del ancho de banda (B.W.) que deberá ocupar la señal que se desea transmitir.

Otro ejemplo de información que se puede transmitir es: datos provenientes de computadoras, la que dependerá de la velocidad de transmisión deseada, también se pueden transmitir cuadros de televisión, los que pueden emitirse en distintas bandas, por ejemplo los canales del 2 al 6 se transmiten por debajo de los 88 MHz y los canales del 7 al 13 están por encima de los 174 MHz.

**Modulación** : Es la modificación de algún parámetro de la portadora de RF por medio de la información que se desea transmitir.

**Sistemas de Modulación**: Existen diversas formas mediante las cuales se puede modular la información a transmitir. Mencionaremos algunas de estas que pueden ser usadas individualmente o combinada en sistemas más complejos:

- ◆ Modulación de amplitud (AM).
- ◆ Modulación en banda lateral única (BLU).
- ◆ Modulación angular la que se divide en :
  - modulación en frecuencia (FM)
  - modulación en fase (PM)
- ◆ Modulación Digital.

A su vez la FM o la PM puede ser modulada en Banda Ancha o en Banda Angosta. Una característica fundamental de la onda electromagnética a transmitir es su propagación y la dependencia de esta con la frecuencia. En base a estas dos características se proyectan enlaces a distintas distancias.

**Espectro**: Este término hace referencia a como se divide en bandas el universo de frecuencias, esto se puede ver en la siguiente tabla:

Banda	Denominación	frec. mínima	frec. máxima	$\lambda$ máxima	$\lambda$ mínima
ELF	Extremely Low Frequency	-	3 kHz	-	100 km
VLF	Very Low Frequency	3 kHz	30kHz	100 km	10 km
LF	Low Frequency	30 kHz	300 kHz	10 km	1 km
MF	Medium Frequency	300 kHz	3 MHz	1 km	100 m
HF	High Frequency	3 MHz	30 MHz	100 m	10 m
VHF	Very High Frequency	30 MHz	300 MHz	10 m	1 m
UHF	Ultra High Frequency	300 MHz	3 GHz	1 m	10 cm
SHF	Super High Frequency	3 GHz	30 GHz	10 cm	1 cm
EHF	Extremely High Frequency	30 Ghz	300 GHz	1 cm	1 mm

En la banda de HF la propagación de la señal se produce a través de dos componentes: una terrestre y otra aérea que viaja a la ionosfera, en esta por rebote la señal regresa a la tierra (rebote Ionosferico) recorriendo cientos o miles de Km.

Una característica de tipo de enlaces radica en que según sea la frecuencia de operación será el alcance de la señal, por ejemplo con 3 Mhz se pueden establecer enlaces entre 100 km. y 150 km., con frecuencias de 6 Mhz. se pueden alcanzar aproximadamente hasta 600 Km. y con frecuencias de 20 Mhz. hasta 10.000 ó 15.000 Km. A partir de 30 Mhz ya no se producen rebotes ionosfericos, la onda electromagnética atraviesa la ionosfera, quedando nada más que la componente terrestre disponible para efectuar comunicaciones en la superficie terrestre.

Al implementar un sistema de comunicaciones, se debe establecer la confiabilidad en la comunicación requerida, esta es la probabilidad real de comunicación en la banda deseada. La banda de VHF y frecuencias más altas se utilizan para enlaces visuales, esto es por encima de los 30 Mhz donde no existe rebote ionosferico, las distancias que se pueden cubrir son de 30 a 50 km. aproximadamente, esto dependerá por supuesto del tipo de antenas con las que se realice el enlace, de la altura de la misma, de las características del terreno entre ellas, de la curvatura de la tierra, de la frecuencia de operación, etc.

**Transmisor:** Genera la onda de radiofrecuencia que se desea transmitir. Esta señal se hace llegar al irradiante o antena la que entrega la energía recibida al medio, para esto el medio le presenta una determinada resistencia de carga. Normalmente el dipolo de  $1/2 \lambda$  presenta al alimentador una impedancia de aproximadamente 75 Ohms. Para que la antena funcione correctamente deberá estar en resonancia lo que significa que se deberá tener adaptación de impedancia entre la antena y el medio, obteniéndose la máxima transferencia de energía.

La ganancia de una antena se miden respecto de una antena de referencia llamada isotrópica. El tamaño de la antena es directamente proporcional a la longitud de onda, siendo la ganancia directamente proporcional a la cantidad de elementos, obteniéndose un haz mas direccional con un menor lobulo de irradiación. Por esto cuanto menor es la frecuencia mayor es la longitud de onda, esto hace mayor el tamaño de la antena, por lo que no se pueden obtener grandes ganancias. A mayores frecuencias el tamaño de la antena disminuye por lo que se

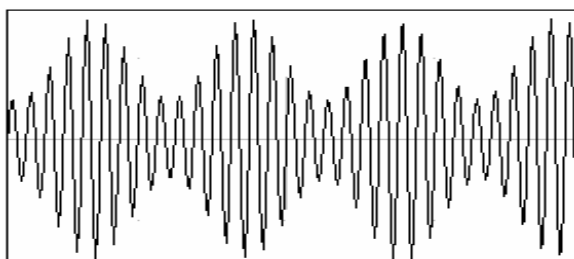
pueden construir antenas de gran ganancia, un dato ilustrativo es por ejemplo que se puede obtener 10 dB de ganancia en el receptor, utilizando una antena que tenga 10 dB de ganancia, esto equivale a aumentar la potencia de salida del transmisor en 10.

Esto nos da una idea del por que se pueden transmitir señales en alta frecuencia a grandes distancias (señales satelitales) con poca potencia (por ejemplo 5 W), La razón de esto es la gran ganancia de las antenas utilizadas.

Otro punto a tener en cuenta es la pérdida en el alimentador de la antena utilizado, los cables coaxiales presentan una determinada pérdida que depende de las características del este y muy especialmente de la frecuencia., por ejemplo el cable coaxial RG-58 (6 mm de diámetro), el que con una frecuencia de 100 Mhz. cada 100 m de longitud pierde aproximadamente 10 dB. Otros ejemplos son el RG-213, el que en 400 Mhz pierde de 12 o 13 dB por cada 100 m. También se dispone de cables coaxiales de bajas pérdidas, por ejemplo el de 1/2" de diámetro o más, con dieléctico de FOAM el que a 400 Mhz. cada 100 m pueden presentar una pérdida de 5 a 6 dB o menos según el tipo.

### **SISTEMAS DE MODULACIÓN:**

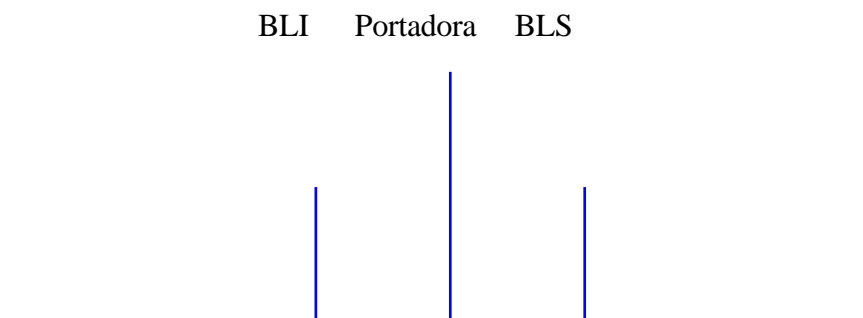
**Modulación de Amplitud:** se modula la amplitud de la onda de salida con la señal de información útil que se desea transmitir. En este sistema es muy fácil recuperar la información (demodulación). Por esta razón los receptores son baratos y de buena calidad. Las señales de AM ocupan un espacio en el espectro relativamente grande, dependiendo este de la señal modulada y del tipo de servicio. El rendimiento del espectro no es muy bueno, por esto se lo utiliza solamente en radiodifusión, esto se ve en la fig. N° 1-1.



Señal modulada en amplitud

**Fig. N° 1 - 1**

Toda señal modulada en amplitud (AM) espectralmente está compuesta de la siguiente manera:

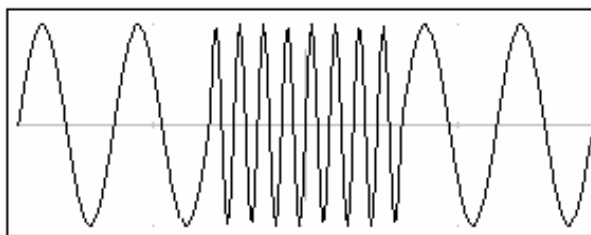


**Fig. N° 1 - 2**

**Modulación Angular:** recordemos que se divide en frecuencia modulada y en fase modulada. Las señales de FM, por ejemplo en telefonía ocupan un BW mucho mayor que la señal de AM, por ejemplo en FM banda angosta el BW es de 15 KHz, en BLU es de 3 KHz y en AM es de 6 KHz.

Al ocupar un BW grande, la modulación en FM se utiliza en alta frecuencia (30 Mhz o más). El hecho de que en FM el BW sea grande es una gran ventaja porque se transmite la señal con gran calidad. En FM se mejora también la relación señal ruido.

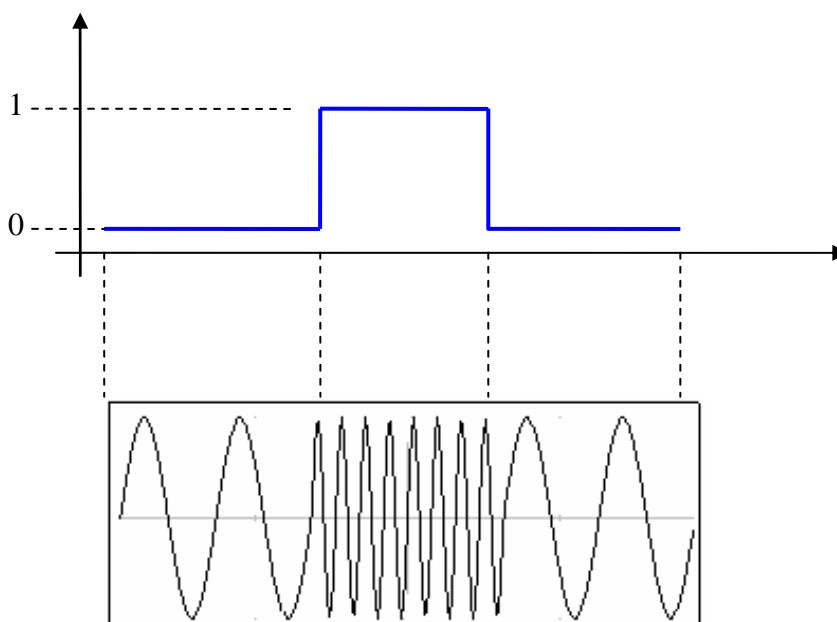
En la fig. N° 1-3 se observa la forma típica de una onda modulada angularmente. Como puede observarse la amplitud de la portadora se mantiene constante y para distintos valores de tiempo la frecuencia de la portadora varía, trasladando de esta forma la información útil. Cuando se modula en FM obtiene una señal de buena calidad, bajo ruido, pero de alcance reducido.



**Señal modulada angularmente**

**Fig. N° 1 - 3**

Por un canal analógico se puede transmitir una señal digital, para esto se la debe convertir para poder ser aplicada al medio de transmisión, una forma es generar con la señal digital un tono de frecuencia variable ( **FSK** ) en este caso el uno lógico genera un tono de una frecuencia y el cero lógico de otra frecuencia., esto se puede ver en la siguiente figura:



**Fig. N° 1 - 4**

## **RUIDO ELÉCTRICO.**

Cualquiera que haya observado imágenes borrosas producidas por una señal de televisión débil o que haya escuchado una estación de radio distante con un fondo de chasquidos de estática, conoce los ruidos electrónicos. El ruido siempre está presente en los sistemas de comunicación y fundamentalmente se agrega a la señal en el medio de comunicación, aunque en condiciones normales de operación no se percibe, en virtud de que los niveles de señal son más altos que los de ruido. Sin embargo cuando el nivel del ruido se hace comparable con los de la señal útil, de nada sirve que se amplifique la señal, pues en este caso amplificaremos tanto el ruido como la señal deseada. Además al ruido indicado se le agraga el ruido generado por el propio receptor.

Para simplificar el análisis matemático se supondrá que la señal deseada es senoidal o un grupo de sinusoides que contienen la información deseada. A esta señal suele llamársela determinística. El ruido se define como una perturbación eléctrica que tiende a interferir con la recepción normal de la señal transmitida y se pueden producir por señales determinísticas procedentes de fuentes indeseables, y además las fluctuaciones aleatorias de voltajes y corrientes originadas por fenómenos físicos.

La finalidad del diseño de sistemas de comunicación es conservar la relación de potencia de señal promedio (o pico) a la de ruido promedio, tan alta que el ruido no afecte la operación del sistema.

Esto se puede lograr de varias formas:

- a) por el uso de transmisores poderosos y antenas de alta ganancia para obtener señales fuertes en el receptor.
- b) circuitos amplificadores y mezcladores diseñados tal suerte que introduzcan una cantidad mínima de ruido adicional al procesar las señales.
- c) utilizar modelos de modulación o codificación que faciliten la separación de señales y ruidos.

Podría agregarse una cuarta opción que consiste en eliminar (suprimir) el ruido en su origen con filtros, derivaciones o rediseño.

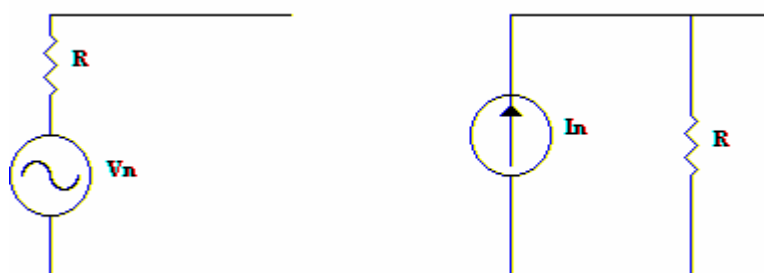
Una de las características del ruido es su naturaleza no determinística, es decir no se puede predecir una forma de onda exacta del ruido. Solo es posible obtener un valor del mismo en términos de valor promedio, pico, promedio rectificado, o corrientes o voltajes rms verdaderos realizando mediciones con instrumentos adecuados. El voltaje rms o la corriente, se puede usar para medir la potencia de ruido promedio entregada a una carga resistiva, y se demuestra que depende del espectro de la fuente de ruido y de la respuesta en frecuencia del instrumento de medida. La caracterización del ruido en el dominio de la frecuencia se puede dar mediante una curva de densidad espectral de potencia y sus unidades son (W/Hz).

### **Ruido Térmico en Resistores y Redes**

Este tipo de ruido se debe al movimiento aleatorio de portadores de carga en un medio conductor, cuya temperatura está arriba del cero absoluto. La velocidad de este movimiento aumenta con la temperatura en forma tal, que la densidad de potencia de ruido térmico producida es proporcional a la resistencia del conductor y a su temperatura absoluta, de donde proviene el nombre de ruido térmico. Se le llama también ruido blanco, pues se ha demostrado teórica y

experimentalmente que tiene un espectro uniforme hasta frecuencias del orden de  $10^{13}$  Hz (del mismo modo que la luz blanca está compuesta de todos los colores del espectro visible).

Un resistor metálico se puede representar por un circuito equivalente como el que se muestra en la figura N° 1-5



**Fig. N° 1 – 5**

El voltaje y corriente cuadrático medio, están dados por las siguientes ecuaciones:

$$V_n^2 = 4kTRB$$

$$I_n^2 = 4kTGB$$

en donde  $G=1/R$  es la conductancia,  $T$  la temperatura absoluta del resistor,  $k$  es la constante de Boltzmann y  $B$  es el ancho de banda en Hz dentro del cual se observa el ruido. En bajas frecuencias los resistores prácticos exhiben también ruido por exceso de corriente.

Como la potencia de ruido que se transmite por un circuito es proporcional al ancho de banda del circuito, nunca se debe utilizar un ancho de banda mayor que el necesario para transmitir la señal deseada, si se pretende tener una relación señal /ruido máxima.

### **Ejemplo:**

Calcular el voltaje de ruido cuadrático medio producido en un resistor de 100K en un ancho de banda de 1 Mhz a una temperatura  $T=293^\circ$  K.

$$4kT = 1,62 \cdot 10^{-20}$$

$$V_n^2 = 1,62 \cdot 10^{-20} \cdot 10^5 \cdot 10^6 = 16,2 \cdot 10^{-10} \text{ volts}^2$$

$$\text{El voltaje de ruido rms es: } V_n = 40,3 \text{ } \mu\text{V}$$

Si este resistor estuviera en el circuito de entrada de un voltímetro electrónico con un ancho de banda de 1 Mhz, ninguna cantidad de ganancia desarrollada en el voltímetro lo capacitaría para medir con exactitud señales bajo 1 mV.

Los circuitos que posean más de una resistencia se pueden analizar reduciéndolos a una resistencia equivalente (Thévenin) y haciendo los cálculos como se indicó. Cuando hacemos esto estamos combinando los voltajes de ruido cuadrático medios de los mismos resistores para obtener el voltaje de ruido cuadrático medio neto. Esto es consistente con el principio estadístico de que si dos o más procesos estadísticos se combinan, se obtiene el valor cuadrático medio de la resultante sumando el valor cuadrático medio de cada proceso. Resumiendo: El voltaje cuadrático medio de

ruido de un grupo de resistores conectados en serie es la suma de los voltajes de ruido cuadráticos medio de cada resistor.

### **Ruido en Antenas Receptoras.**

La resistencia medida en las terminales de una antena es del orden de 70 Ohms (dipolo de media onda) hasta 300 Ohms (dipolo plegado). Este valor de resistencia es básicamente la “resistencia de radiación”, a la cual se le entrega la potencia que deberá irradiar la antena. La "resistencia óhmica", formada por las resistencias de los conductores de la antena, por lo común es despreciable en comparación con la resistencia de radiación. Una antena receptora exhibe ruido en sus terminales a causa de dos fuentes:

- 1- el ruido térmico generado en su resistencia óhmica (generalmente despreciable)
- 2- el ruido proveniente de fuentes externas (cualquier cuerpo con temperatura mayor que 0 °K radia energía).

El ruido recibido se representa como si fuera térmico generado en una resistencia ficticia igual a la resistencia de radiación a una temperatura  $T_A$ , que toma en cuenta el ruido realmente medido. A esta temperatura se le llama **Temperatura de Ruido de la Antena**.

### **RUIDO EN DIODOS, TRANSISTORES y FETs.**

#### **Ruido en diodos.**

En estos el ruido generado depende de diversos factores, tales como la temperatura, el punto de operación, de los terminales de entrada y salida, etc. En los diodos, al ruido generado se lo llama **Ruido de Disparo**, este se origina en el hecho de que los portadores de carga se emiten al azar desde la región emisora, variando su número constantemente. La distribución espectral de potencia de este ruido es plana, por lo que se lo trata como ruido térmico. Este ruido se evalúa mediante la corriente de ruido cuadrática media, representada por un generador de corriente, cuyo valor se expresa mediante la siguiente expresión:

$$I^2 = 2qI_{DC}B$$

donde  $q$  es la carga del electrón,  $I_{DC}$  es la corriente del diodo en amperes y  $B$  es el ancho de banda en Hz, dentro del cual se mide el ruido. Este modelo no es válido para diodos que operan en la región de ruptura inversa o de avalancha, donde se genera un ruido impulsivo de gran amplitud, llamado ruido de microplasma. Este ruido es importante en la construcción de generadores de ruido a diodo.

#### **Ruido en transistores bipolares.**

Las fuentes de ruido en transistores de unión son: el ruido de disparo en cada unión de diodo y el ruido térmico en la resistencia de esparcido de base  $r_b$  o  $r_{bb}$ . Como la corriente de emisor se divide entre el colector y la base, la ruta seguida por cada portador de carga se selecciona al azar y resulta una fluctuación estadística en las corrientes de colector y base. A esto se le denomina ruido de partición. Otro ruido, llamado ruido  $1/f$ , ruido de fluctuación o ruido de exceso, se observa en bajas frecuencias y es la fuente principal de ruido en amplificadores de c.c.

El ruido de fluctuación se origina principalmente por una recombinación superficial de portadores minoritarios en la región de agotamiento del emisor-base.

### **Ruido en FETs.**

Los JFETs y MOSFETs exhiben ruido de varias fuentes, esto es:

- 1 - Ruido térmico generado en la resistencia de canal.
  - 2 - Ruido térmico de canal acoplado a la compuerta a través de la capacitancia canal-compuerta.
  - 3 - Ruido  $1/f$ , que tiene importancia abajo de 100 Hz en FETs o de 10 KHz en los MOSFETs.
- Además, los JFETs presentan ruido de disparo en virtud de la corriente inversa pequeña en la unión de compuerta.

### **Definiciones de Terminología de ruido.**

Se usan varios términos para definir y comparar las cantidades relativas de ruidos producido en los sistemas eléctricos. Las siguientes definiciones y comentarios, sustentan las bases para comprender la nomenclatura de las especificaciones de los fabricantes y calcular el efecto global del ruido en un sistema.

### **Relación señal a ruido (SNR).**

En un ancho de banda especificado, la relación señal a ruido se define como la razón entre la potencia de señal y la potencia de ruido en un puerto.

$$SNR = \frac{P_s}{P_N} = \frac{V_s^2}{V_n^2}$$

donde  $V_s$  y  $V_n$  son los voltajes medios de señal y de ruido cuadráticos respectivamente. Expresado en decibeles es:

$$SNR(dB) = 10 \log \frac{P_s}{P_N}$$

Mientras mayor sea la SNR, menor será la "corrupción" de la señal por el ruido. El valor mínimo permisible de la SNR depende de la aplicación. Algunos valores mínimos aproximados son los siguientes: 10 dB en la entrada del detector para un receptor de AM, 12 dB en la entrada del detector de FM y 40 dB en la entrada del detector de un aparato de televisión. En la mayoría de los sistemas, el ruido de salida amplificado se debe principalmente a:

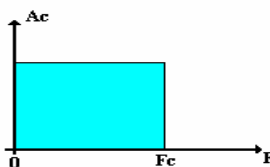
- 1 - el ruido que acompaña a la señal de entrada al receptor.
- 2 - el que aportan las dos primeras etapas tales como las del amplificador RF y la etapa mezcladora del receptor.

### **Ancho de banda equivalente en ruido.**

Las fuentes más comunes de ruido (térmico y de disparo) tienen una distribución espectral esencialmente uniforme, de tal suerte que el ruido transmitido a través de un



amplificador se determina por el ancho de banda del amplificador. Si éste tiene una ganancia “A” hasta cierta frecuencia  $f_c$  y después de alcanzarla baja a cero, tal como muestra la siguiente figura:

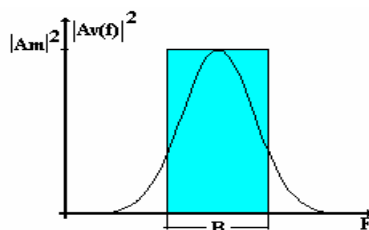


**Fig. N° 1- 6**

El ancho de banda B será obviamente  $f_c$ . Sin embargo, por lo general la respuesta en frecuencia, queda limitada por la capacitancia en paralelo o por un circuito sintonizado, de tal manera que no se logra un corte abrupto de la respuesta en frecuencia. Por esto, la ganancia se expresa de la siguiente forma:

$$A_v(f) = \frac{V_2}{V_1}$$

Si calculamos el área del módulo de la ganancia en función de la frecuencia, cuyo valor máximo es  $|A|^2$  nos dará un valor k determinado. Si ahora formamos un espectro rectangular con la misma altura máxima y con un ancho de banda B de tal forma que tenga el mismo área k, entonces llamaremos a B ancho de banda equivalente en ruido.



**Fig. N° 1-7**

Este valor de B se calcula con una integral que no siempre es de fácil resolución. No obstante, en muchos amplificadores de RF, el ancho de banda se establece por circuitos RLC sintonizados, para los que el ancho de banda de ruido dependerá del ancho de banda del circuito sintonizado, de donde se puede obtener:

$$B = \frac{\pi f_r}{2Q} \quad \text{donde } Q = \frac{\omega_r L}{R}$$

### **Potencia de ruido disponible.**

La potencia disponible  $P_a$  de una fuente es la potencia máxima que se puede extraer de ella. Si la fuente tiene una impedancia interna “  $Z = R + j X$  “, la potencia máxima se entregará a una carga acoplada conjugada “  $Z = R - jX$  “. Si el voltaje en circuito abierto de la fuente es V, el teorema de la máxima transferencia de potencia da:

$$\text{potencia de la fuente} = P_v = \frac{V^2}{2R} \quad \text{potencia máxima en la carga} = P_a = \frac{V^2}{4R}$$

Si R es una fuente de ruido térmico,  $V_n^2$  está dado por  $V_n^2 = 4kTRB$  y

$$P_a = kTB$$

La potencia de ruido disponible en un ancho de banda de 1 Hz es  $P_a = kT$ . Como  $P_a$  no depende de R, la potencia de ruido disponible en todas las resistencias no nulas ni infinitas es la misma.

**Temperatura de ruido:** La temperatura de ruido en cualquier puerto de una red se define de la manera siguiente: Una fuente de ruido que tiene una potencia disponible  $P_a$  en un pequeño intervalo de frecuencias, tiene una temperatura de ruido equivalente igual a  $T_e = P_a/k\Delta f$ . Si el espectro de potencia de ruido de la fuente no es plano,  $T_e$  y  $P_a$  dependen de la frecuencia.

**Temperatura de ruido excesivo:** Los generadores de ruido utilizados para probar amplificadores, se calibran a menudo en términos de temperatura de ruido excesivo:

$$T_x = T - T_o$$

donde T es la temperatura de ruido de la fuente y  $T_o = 290$  °K es la temperatura normal de referencia.

**Temperatura de ruido de entrada efectiva de una red:** Si una fuente de ruido térmico de temperatura T se conecta a una red sin ruido con ancho de banda  $\Delta f$  pequeño y ganancia disponible  $G_a(f)$ , la potencia de ruido disponible en la fuente es

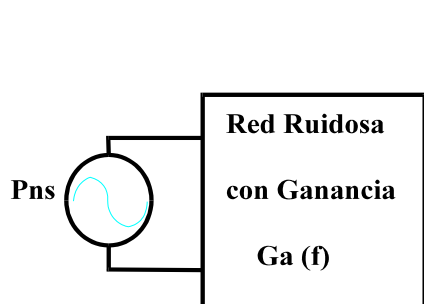
$$P_{ns} = k\Delta f T \quad \text{watts}$$

y la potencia de ruido disponible a la salida de la red es:

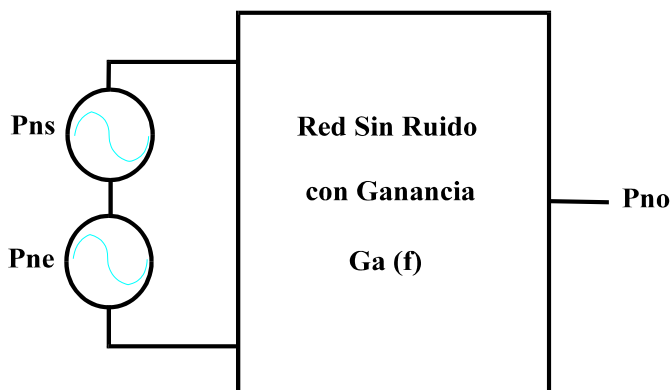
$$P_{no} = G_a(f)k\Delta f T$$

Si la red es ruidosa, producirá una potencia de ruido adicional  $P_{ne}$  a la salida. Con el mismo ruido de entrada que antes, la potencia de ruido de salida será:

$P_{no} = G_a(f)k\Delta f T + P_{ne}$ , como se observa en las siguientes figuras:



**Fig. N° 1- 8a**



**Fig. N° 1-8b**

**En el caso a** - se observa una red ruidosa con ganancia de potencia  $G_a(f)$ , además el ruido interno produce una  $P_{ne}$  debida a fuentes de ruido internas. La entrada es el ruido disponible proveniente de la fuente es  $P_{ns} = k\Delta f T$  y la salida será entonces  $P_{no} = G_a(f)kT\Delta f + P_{ne}$ .

**En el caso b** - sustituimos la red ruidosa “a” por una sin ruido, que tenga la misma ganancia de potencia disponible y tomando en cuenta el ruido de salida  $P_{ne}$  mediante una fuente de ruido adicional a la entrada, esto significa que la  $P_{ne}$  que se coloca en la entrada deberá tener en cuenta la ganancia de la red  $G_a(f)$ , esto es: ( $P_{ne} = G_a(f)kT_e\Delta f$ ), como se muestra en la figura. La temperatura de ruido  $T_e$  de esta fuente adicional, se ajusta para producir una  $P_{ne}$  a la salida:

$$T_e = \frac{P_{ne}}{G_a(f)k\Delta f}$$

$$y \quad P_{no} = G_a(f)k\Delta f (T + T_e)$$

Al valor  $T_e$  se le llama **Temperatura de ruido efectivo** de la red. Como se demostrará, esta manera de representar un ruido de red es muy útil para determinar las relaciones globales de señal a ruido y otras de amplificadores en cascada.

### Cifra de ruido.

El comportamiento con el ruido se mide con la cifra de ruido. Este mide la degradación de la SNR de un cuadripolo entre los puertos de entrada y los de salida. La cifra de ruido se define dentro de un ancho de banda especificado como:

$$NF = \frac{SNR_{entrada}}{SNR_{salida}} = \frac{P_{si} / P_{ni}}{P_{so} / P_{no}} = \frac{P_{no}}{G_a P_{ni}} = 1 + \frac{P_{ne}}{G_a P_{ni}}$$

como es  $P_{no} = G_a P_{ni} + P_{ne}$ , donde  $P_{ne}$  es la potencia de ruido de salida generada internamente en la etapa, la figura de ruido se podrá expresar por:

$$NF = 1 + \frac{P_{ne}}{G_a \cdot P_{ni}}$$

El valor de NF se expresa a menudo en dB por la relación:

$$NF \text{ (dB)} = 10 \log NF$$

Para una red libre de ruido, las SNR de entrada y salida serán iguales y será  $NF = 1$ . Los circuitos prácticos tienen siempre cifras de ruido mayores que éstas. NF varía con la frecuencia por ser  $P_{si} / P_{so} = 1/G_a(f)$ , y  $G_a(f)$  depende de la frecuencia. Además, la potencia de entrada de la fuente de señal es función de la temperatura. Con el objeto de obtener un valor normal para la NF, se considera como temperatura de la fuente normal al valor de 290 °K.

### Cifra de ruido para redes en cascada

El calculo de la cifra de ruido para redes en cascada, se efectúa para un determinado ancho de banda, si se considera a la temperatura de la fuente **T<sub>o</sub>** como el valor normal ( 290 K ), la potencia de ruido de salida  $P_{no}$  de una etapa vendrá dada por:

$$P_{no} = G_a(f) k \Delta f (T_o + T_e) \quad (1)$$

donde  $T_e$  es la temperatura de ruido que colocada en la entrada produce en la salida una potencia de ruido  $P_{ne}$ , que se debe al ruido generado por la etapa.

y como la figura de ruido es  $NF = \frac{P_{no}}{G_a \cdot P_{ni}} = \frac{P_{no}}{G_a \cdot k \cdot T_o \cdot \Delta f}$  de donde despejando será:

$P_{no} = NF \cdot G_a(f) \cdot K \cdot T_o \cdot \Delta f$  igualando a esta con la expresión (1) se obtiene que:

$$NF = \frac{T_o + T_e}{T_o} \Rightarrow T_e = T_o(NF - 1)$$

donde NF es la figura de ruido referida a una fuente de temperatura normal ( $T_o = 290K$ )

### Cifra de ruido real

Por definición la figura de ruido NF es la relación entre la SNR en la entrada y la SNR en la salida con una fuente de entrada a temperatura de ruido normal (290 K), muchas veces la temperatura de ruido de entrada es distinta de 290K, por lo que la NF indicada no definiría exactamente la degradación producida a la señal. Por esto muchas veces es más conveniente trabajar con la cifra de ruido real, la que se define como:

$$(3) \quad NF_R = \frac{P_{no}}{G_a \cdot P_{ni}} = \frac{T_s + T_e}{T_s}$$

Donde:  $T_s$  = temperatura de ruido real de la fuente y es distinta de  $T_o$ .

$T_e$  = Temperatura de ruido generada por la etapa.

Cuanto mayor es la temperatura de ruido de la fuente respecto de la temperatura de ruido generada por la etapa, menor será la cifra de ruido real. Esto mismo ocurre con la NF, ya que en esta cuanto mayor es la  $T_o$  respecto de la  $T_e$  menor será la cifra de ruido, en el caso de la NFR cuando mayor es el ruido de la fuente  $T_s$  respecto del ruido generado por la etapa  $T_e$ , menor será la NFR, esto se puede ver también si a la ecuación (3) se la expresa de la siguiente forma:

$$NF = \frac{T_o - T_e}{T_o} \Rightarrow T_e = T_o(NF - 1) \Rightarrow NF_R = \frac{T_s + (NF - 1)T_o}{T_s} = 1 + (NF - 1) \frac{T_o}{T_s}$$

### Cifra de ruido promedio

Dentro de anchos de banda amplios en los que  $G_a(f)$  varía considerablemente, la cifra de ruido promedio está dada por:

$$NF = \frac{P_{no}}{G_{má} \times k T_o \cdot B}$$

donde  $P_{no}$  es la potencia de ruido total entregada a la terminación de salida en un ancho de banda de ruido B y  $G_{má}$  es el valor máximo de  $|G_a(f)|$ .

En la práctica, el valor de  $P_{no}$  se mide dentro de un ancho de banda  $\Delta f$  pequeño que excede a 1 Hz, debido a las limitaciones del ancho de banda filtrado. La ecuación para la NF se hace entonces:

$$NF = \frac{P_{no}}{G_{máx} \cdot kT_o \cdot \Delta f}$$

### **CONSIDERACIONES SOBRE EL RUIDO DE LOS AMPLIFICADORES.**

Para calcular la NF o Te de un sistema que tenga una o más etapas, es necesario conocer los siguientes parámetros:

- 1 - el ruido procedente de la fuente de señal,
- 2 - el ancho de banda B equivalente de ruido,
- 3 - el ruido térmico generado en varias resistencias del circuito,
- 4 - el ruido generado dentro de los dispositivos de estado sólido.

El ruido producido en diodos y transistores se puede predecir mediante circuitos equivalentes. Sin embargo el ruido producido en transistores depende del punto Q, de la frecuencia y de los parámetros del transistor, son tantas las variables que deben tenerse presentes, que tales predicciones se realizan mejor con programas de análisis por computadora.

Los fabricantes de transistores dan, por lo general, información de catálogo acerca de la cifra de ruido de mancha o cifra de ruido promedio para diversas condiciones de operación. La cifra de ruido depende de la corriente de colector, de la resistencia de fuente y estas variaciones deben tomarse en cuenta en el diseño del amplificador, cuando es importante un funcionamiento de bajo ruido.

Como la variación de la cifra de ruido con la frecuencia es casi plana dentro del rango de operación útil del transistor, debe tenerse cuidado al relacionar una resistencia de fuente que minimice la cifra de ruido para una corriente de colector dada. El amplificador se puede diseñar con redes de acoplamiento adecuadas, de tal forma que el resistor “vea” esta resistencia de fuente a la frecuencia de operación. Desafortunadamente el valor de la resistencia de fuente que da la ganancia máxima, no coincide con el que minimiza la cifra de ruido. Así un amplificador diseñado para dar la cifra de ruido mínima, tendrá una ganancia menor que la posible con los transistores seleccionados. Por lo general, se reduce la ganancia de su máximo valor en solo unos pocos dB, cuando se cumplen las condiciones de cifra de ruido mínima, y esta reducción se puede compensar en una etapa siguiente de alta ganancia.