

Los ruidos molestos. los cálculos...

(Última actualización 21/01/04)

Por Miguel R. Ghezzi (LU 6ETJ)

www.lu6etj.org.ar

SOLVEGJ Comunicaciones

www.solred.com.ar/solvegj

En la suposición de que ya conoce todo lo vertido en el artículo: "[Los ruidos molestos...](#)" y "[Los ruidos molestos, lo básico...](#)" en este avanzaremos más sobre los detalles técnicos relacionados con su caracterización.

ESPECIFICACIONES DE LOS RECEPTORES

Un aficionado avanzado, seguramente querrá poseer dispositivos de recepción más perfectos y aptos para sus experiencias particulares, en ese momento encontrará útiles algunas especificaciones que suelen acompañar a los manuales de los equipos. Esas especificaciones emplean el idioma de las matemáticas para enunciar características físicas del dispositivo pues el lenguaje corriente resulta insuficiente para expresar exactamente estas características. Conocer "algo" de ese idioma lo facultará para discernir la mejor opción para un objetivo especial. El presupuesto es que el fabricante le dará a Ud. un dato numérico que caracterice verazmente al dispositivo en cuestión, por un lado y por otro, todos los datos numéricos que representan su capacidad operativa en este sentido.

Para que estos datos sean realmente útiles **han de tenerse en cuenta todos simultáneamente**, lo que quiere decir que de poco servirá una sensibilidad superlativa si no está acompañada por un rechazo a la modulación cruzada excelente si Ud. habita en el centro de Buenos Aires...

La sensibilidad o capacidad para captar señales de un receptor le informa acerca de cuál será la más débil que podrá recuperar. Siendo una cifra que se encuentra íntimamente ligada al ruido en muchas de nuestras aplicaciones, así, es habitual que se busquen receptores que otorguen un máximo de sensibilidad, lo que nos lleva a caracterizar este dato en particular.

FACTOR DE RUIDO

En inglés lo encontrará como $F = \text{"Noise Factor"}$ y se define como:

$$F = \frac{\text{Relación señal-ruido de ENTRADA}}{\text{Relación señal-ruido de SALIDA}} \quad (\text{ec-2})$$

o lo que es lo mismo:

$$F = \frac{\frac{\text{Señal de entrada}}{\text{Ruido de entrada}}}{\frac{\text{Señal de salida}}{\text{Ruido de salida}}} \quad (\text{ec-3})$$

Cuando a esta relación se la expresa en decibeles recibe el nombre "FIGURA DE RUIDO" (Noise Figure o NF en inglés). Es decir:

$$NF = 10 \log F$$

Nótese que en la práctica siempre la Relación señal-ruido de **entrada** es un número mayor que la relación-señal ruido de **salida**, pues el receptor no es perfecto y agrega un "exceso de ruido", de manera que este número **siempre será mayor que 1 (uno)** en la realidad. **La bondad del receptor, en este sentido, será mayor cuanto más bajo sea este número.** El denominador de la ecuación incorpora el ruido producido por el receptor.

Es evidente que cuanto mayor sea la relación señal-ruido de entrada (Señal de entrada/Ruido de entrada), mayor será la probabilidad de rescatar la información. La señal de entrada dependerá de la potencia del emisor y demás condiciones de propagación, pero **¿cuál sería el mínimo ruido de entrada posible teóricamente?** Pues bien: es el "RUIDO DE AGITACION TERMICA". Aunque suprimamos los estáticos, los ruidos industriales, etc. quedará EL RUIDO DE AGITACION TERMICA, que es el "RUIDO MOLESTO" que por ahora nos ocupa. Los físicos nos dan una forma de conocerlo o calcularlo y es =>

$$\text{Potencia de ruido térmico} = k * T_o * B \quad (\text{ec-4})$$

donde:

- **k** es la denominada "Constante de Boltzmann" ($1,38 * 10^{-23}$ W/°K*Hz o Joules/°K)

- **To** es la temperatura en grados Kelvin (0 °C = 273 °K) a la que se encuentra la resistencia de radiación de la antena.
- **B** ancho de banda efectivo en Hz del receptor (el de su filtro de FI).

Suponiendo que la resistencia de ruido sea la misma a lo largo de **B**.

Imaginemos un receptor típico de BLU que tuviera una ganancia total de potencia de señal de **170 dB**, un ancho de banda de **2.700 Hz** con una resistencia de **50 Ohms** conectada en su entrada a temperatura ambiente (unos **18 °C = 291 °K**). Aplicando la formula tenemos:

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de ruido de agitación termica} &= k * T_o * B \\
 &= 1.38 * 10^{-23} * 291 * 2700 \\
 &= 0,00001 \text{ pW (pW = picoWatts)} \\
 &= -140 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

Si el receptor fuera perfecto o ideal, multiplicando la potencia de ruido en la resistencia (0,00001 pW) por la ganancia del receptor (**170 dB o 10 a la diecisieteava potencia**), la potencia de ruido en el parlante debería ser: **1 W**

Supongamos ahora que procedemos a medir el ruido en el parlante **del receptor real**, en las mismas condiciones, y al hacerlo, sobre el parlante medimos una potencia de ruido de, digamos **5 W**.

Puesto que la ganancia del receptor es de **170 dB** para una señal dada, **podemos decir que para el ruido la ganancia fue mayor** pues obtuvimos en el parlante un valor mayor que el previsto para un receptor ideal!, el cociente entre los **5 W reales** y el **1 W teórico** representa el "**Factor de Ruido del receptor**", en este caso = **5**. La **Figura de Ruido** sería, como dijimos, el factor de ruido expresado en dB es decir:

$$NF = 10 * \log 5 = 7 \text{ dB}, \text{ que es un valor típico para los buenos receptores de la banda de HF.}$$

Podemos realizar las cuentas al revés, con el objeto de averiguar cuál sería la menor señal discernible en este receptor (denominada en inglés "noise floor"). Asumamos que esta condición se presenta cuando la señal en el parlante tiene la misma intensidad que el ruido debido a la agitación térmica. Si dividimos la potencia de ruido real por la ganancia del receptor obtendremos:

$$\frac{5W \text{ (potencia de ruido a la salida)}}{10^{17} \text{ (ganancia del receptor)}} = 0,00005 \text{ pW (-133 dBm)} \quad (\text{ec-5})$$

esta potencia de ruido representa (aplicando la ley de Joule) :

$$P_i = \frac{e_i^2}{R_i} \quad \text{de donde: } e_i = \sqrt{P_i * R_i} = \sqrt{0,00005 \text{ pW} * 50 \text{ Ohms}} = 0,05 \text{ } \mu\text{V}$$

una tensión de 0,05 μV en los bornes de entrada del receptor. En estas condiciones, una señal de entrada de **0,5 μV** (diez veces mayor) nos proveería de una confortable escucha, con una relación señal-ruido de 20 dB, si no olvidamos que:

$$\text{Relación-síñal ruido en dB} = 20 * \log (0,5\mu\text{v} / 0,05\mu\text{v}) \quad (\text{ec-6})$$

Nótese de la ec-5 que la potencia de ruido **es directamente proporcional al ancho de banda "B"**, de manera que una vez más podemos advertir que la reducción del ancho de banda es una solución que conviene emplear toda vez que sea posible, ya sea reduciendo un exceso del mismo o cambiando de modo de trasmisión. Por ejemplo si Ud. está empleando un filtro de BLU de **2,7 Khz** para recibir una señal de telegrafía, mejorará mucho los resultados si lo cambia por uno de **250 Hz** y, si la comunicación en BLU le está resultando imposible, icambie a CW **pero con el filtro adecuado**...!

Un detalle interesante para considerar es que, hasta ahora, estamos juzgando el asunto desde un punto de vista estrictamente técnico-matemático. Quien tenga amigos muy entrenados en CW, habrá notado que ellos "*sacan*" señales que a veces son iguales o inferiores al ruido y Uno, que es más "duro de oreja", se muerde los codos de envidia. Eso sucede porque existe en el sistema **otra clase de filtro MUCHO MAS COMPLEJO y que no hemos considerado: La combinación Oído - Cerebro** de ellos. Ese maravilloso instrumento tiene capacidades de adaptación y aprendizaje que se han especializado a lo largo de millones de años... El sistema auditivo está compuesto por una gran cantidad de receptores que constituyen filtros de alto Q (ancho de banda menor que 30Hz ⁽¹⁾).

También demuestra la enorme diferencia que representa respecto de los sistemas digitales de comunicaciones a nuestro alcance, que por ahora, apenas arriman al potencial de decodificación que posee Don José, con su oreja y su viejo manipulador ferrocarrilero... (**Nota del autor:** El artículo fue escrito mucho antes de la aparición de sistemas tales como el PSK31, que representan una considerable mejora al alcance del aficionado corriente)

¿ QUE ES "LA SENSIBILIDAD" DEL RECEPTOR ?

En muchas ocasiones hemos oído hablar de "la sensibilidad" de los receptores. Quien más quien menos tendrá una idea de su significado, más o menos correcta. Lo cierto es que los científicos, ingenieros y técnicos tienen la manía de medir todo lo que se atraviesa en su camino; es así que "la sensibilidad", palabra que proviene del "sentir", es hurtada por la razón para encuadrarla en sus propias reglas.

Se define a la sensibilidad como: **"La potencia (o tensión, según el modo de definirla) que aplicada a la entrada del receptor produzca en su salida un aumento de la potencia de salida total de 10 dB"**. Este aumento potencia de salida total, que medimos sobre el parlante, por ejemplo, es la señal **más** el ruido presente. La manera matemática de expresarlo es:

$$10 \log \frac{\text{Señal de Salida} + \text{Ruido de Salida}}{\text{Ruido de Salida}} = 10 \text{ dB} \quad \begin{array}{l} \leq \text{ Con el generador} \\ \text{(ec-7)} \\ \leq \text{ Sin el generador} \end{array}$$

Si escribimos la ec-7 de otra manera

$$10 \log \frac{\text{Señal de Salida}}{\text{Ruido de Salida}} + \frac{\text{Ruido de Salida}}{\text{Ruido de Salida}} = 10 \text{ dB} \quad \text{simplificando...}$$

$$10 \log \frac{\text{Señal de Salida}}{\text{Ruido de Salida}} + 1 = 10 \text{ dB} \quad \text{(ec-8)}$$

De esa última podemos conocer cual es la relación señal-ruido a la salida en estas condiciones, despejando:

$$\frac{\text{Señal de Salida}}{\text{Ruido de Salida}} = 10 - 1 = 9 \quad \text{que expresada en dB es: } \mathbf{9,54 \text{ dB}} \quad \text{(ec-9)}$$

Con esta podríamos averiguar cuál es la señal de entrada que **aplicada sobre un receptor ideal** produciría ese aumento, por ende la sensibilidad de un *receptor ideal*. Sabemos que la salida es igual a la entrada multiplicada por la ganancia del receptor, entonces:

$$\text{Señal de salida} = G * \text{Señal de Entrada [W]} \quad \text{y}$$

$$\text{Ruido de salida} = G * F * \text{Ruido de Entrada [W]} \quad \text{pero recordando que por la ec-4:}$$

$$\text{Ruido de Entrada} = \mathbf{k * T_o * B} \quad \text{reemplazando todo esto en la ec-9 obtenemos}$$

$$\frac{G * \text{Señal de Entrada}}{G * F * k * T_o * B} = 9 \quad \text{despejando Señal de Entrada tenemos}$$

$$\text{Señal de Entrada [W]} = 9 * F * k * T_o * B \quad \text{(ec-10)}$$

En nuestro ejemplo será:

$$\text{Señal de Entrada [W]} = 9 * 5 * 1,38 * 10^{-23} * 291 * 2700 = 4,88 * 10^{-16} \text{ W}$$

Que siendo la resistencia de entrada 50 Ohm, representa una tensión de:

$$\text{Señal de Entrada [V]} = \sqrt{\text{Señal de Entrada [W]} * 50 \text{ Ohms}}$$

$$\mathbf{\text{Señal de Entrada [V]} = \sqrt{4,88 * 10^{-16} \text{ W} * 50 \text{ Ohms}} = 1,57 * 10^{-7} \text{ V} = 0,157 \mu\text{V}}$$

De aquí vemos que la sensibilidad del receptor ideal en estas condiciones es de **0,157 μV**

Pero **ATENCIÓN** esta es la tensión medida sobre los bornes del receptor cuya impedancia de entrada es igual a la resistencia de ruido. Esto significa que la tensión de ruido a circuito abierto es el doble y así es tomada frecuentemente como referencia en las mediciones de sensibilidad, de manera que no debe confundirse.

EL PISO DE RUIDO (NOISE FLOOR)

Alguna vez habremos leído en el handbook mencionar el "Noise Floor". De manera parecida a la definición de Sensibilidad, representa aquella señal cuyo valor sea igual al ruido del receptor. La cuestión es simple, realizamos el mismo cálculo sin el factor 9 en la ec-10. Al Piso de Ruido también se lo denomina más precisamente la **"Señal Mínima Discernible"** (MDS en inglés).

LA TEMPERATURA DE RUIDO

Otra forma con la que se suele especificar la calidad de un receptor en cuanto a su capacidad intrínseca para generar poco ruido es la denominada "**Temperatura efectiva de ruido**". Es más usual en microondas donde son necesarios los más bajos niveles de ruido y de figura de ruido, empleándose esta manera de describir a los receptores más frecuentemente que el Factor de Ruido.

En el ejemplo anterior introdujimos las ideas que permiten comprender esta noción. Decíamos que, "**si el receptor fuera perfecto**", multiplicando el ruido en la resistencia (0,00001 pW) por la ganancia del receptor **deberíamos** obtener a su salida una potencia de ruido generada exclusivamente por el ruido de agitación térmica correspondiente a la resistencia de radiación de la antena, en este caso **1W**.

En la medida que el ruido real sobre el parlante que medimos que fue de 5W, se puede deducir que los 4W restantes los produce el receptor por si mismo, estos 4W polizones se suman al legítimo Watt de ruido (inevitable por las leyes físicas), resultando en los 5W medidos.

Ahora bien, recordando que la fórmula para el ruido de agitación térmica era $K * T_o * B$, si imaginamos que a la temperatura de la resistencia (responsable de nuestro "inevitable ruido de agitación térmica"), **se le suma otra** (artificial) responsable del ruido adicional y que llamaremos "**Tef**" (por "Temperatura Efectiva"), entonces el ruido a la salida sería:

Recordando que:

$$\text{Ruido de agitación a la salida} = K * B * T_o * G = 1W$$

$$\text{entonces:} \quad \text{Ruido Total} = k * B * (T_o + T_{ef}) * G = 5W$$

(Donde G es la ganancia del receptor)

Ello da lugar a expresar los ruidos de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Ruido total} &= \text{Ruido de agitación} + \text{Ruido por temperatura adicional} \\ \text{Ruido total} &= 1W + 4W \\ \text{Ruido total} &= K * T_o * B * G + K * T_{ef} * B * G \\ &\quad \text{(De origen físico)} \quad \quad \quad \text{(Originado por receptor)} \end{aligned}$$

Donde vemos que:

$$K * T_{ef} * B * G = 4W; \text{ despejando } T_{ef} \text{ obtenemos:}$$

$$T_{ef} = \frac{4W}{K * B * G} = 1.073 \text{ }^\circ\text{K} \text{ (} 800 \text{ }^\circ\text{C)}$$

Que es la contribución del propio receptor al ruido total

En el apéndice demostraremos que el Factor de Ruido de un receptor puede obtenerse a partir de la temperatura de ruido mediante la ecuación: _

$$F = 1 + \frac{T_{ef}}{T_o} = 1 + \frac{1.073}{290} = 4,7$$

$$\text{La conversión inversa es } T_{ef} = (F - 1) * T_o$$

La cuenta no dió el valor esperado de 5 (que era el factor de ruido del ejemplo), pues en el mismo se redondearon algunos valores para simplicidad, en realidad el ruido de agitación era de 1,08W, de manera que el ruido adicional sería de 3,92 W

Nótese especialmente que el segundo término de la ecuación (Originado por receptor), no depende más que del receptor, ya que "K", es una constante; "B" y "G" son característicos del receptor y "Tef" es el parámetro que caracteriza su "*ruidosidad*".

La ventaja de emplear como dato del receptor su "Temperatura Efectiva de Ruido" radica en que, a diferencia de la figura de ruido, no depende del establecimiento de una temperatura de referencia (en nuestro caso 290 °K de acuerdo a los estándares IEEE), sino que es una MEDIDA ABSOLUTA del la performance del receptor. Veremos porqué.

Se estableció en el ejemplo del Factor de Ruido una temperatura de 290 °K (17 °C), valor aproximadamente correspondiente a la del ambiente. Pues bien, preste mucha atención a esto:

La temperatura a la que se encuentra la antena no es exactamente la del lugar físico en que se halla emplazada, sino la de su "*entorno electromagnético*". Para una antena usual en nuestra actividad, tipo dipolo o cuarto de onda (casi omnidireccionales), la temperatura del entorno electromagnético es muy parecida a la del ambiente en que está instalada la antena es decir unos 20 °C o 293 °K, pero para una antena muy direccional, **corresponde a la temperatura del lugar al que se la apunte**, por ejemplo:

Una antena de las empleadas para la recepción de satélites de TV, puede estar dirigida (en algún momento) hacia el espacio profundo, cuya temperatura puede llegar a estar próxima a los 3 °K y que correspondería a la temperatura remanente del "Big Bang" (llamada "radiación de fondo"), además, por ser extremadamente direccional la temperatura de su entorno electromagnético será un valor intermedio entre la del espacio profundo y la de la porción de la atmósfera que abarca su haz.

Del mismo modo si dicha antena estuviera dirigida hacia el Sol, *la temperatura de su entorno electromagnético estaría relacionada con las altísimas temperaturas existentes en la superficie del astro próximas los 6000°...!*

Esta última situación es responsable de que un par de veces al año las antenas receptoras de broadcasting satelital sean incapaces de recibir la señal del satélite hacia el cual están apuntadas durante algunos minutos. En efecto, tanto en el equinoccio de Otoño como en el de Primavera, el Sol se encuentra exactamente en el Ecuador Celeste al cual recorre a lo largo del día. Puesto que los satélites describen órbitas geosíncronas, también se hallan situados sobre el Ecuador Celeste así, en algún momento del día, el satélite produce un "Eclipse de Sol", es decir que, desde nuestra perspectiva, se encuentra exactamente delante de él. En tales condiciones la temperatura del entorno electromagnético de la antena es muy alta. ***¡La ecuación $K \cdot T \cdot B$ represente un valor de ruido térmico muy superior al de la señal proveniente del satélite capaz de enmascarar totalmente la señal de éste!***

Si alguna de las nociones astronómicas involucradas le resulta desconocida, en el sitio encontrará un artículo sobre astronomía elemental (para uso de los aficionados a los satélites) en los que se explican varias cuestiones relacionadas con los movimientos celestes].

LOS RUIDOS ATMOSFERICOS Y NUESTRO RECEPTOR

El ruido atmosférico es como bien sabemos un factor limitante en las comunicaciones, pero, al mismo tiempo su misma existencia simplifica los requerimientos del receptor de nuestra estación. Efectivamente, en ausencia de ruido atmosférico, la capacidad de recibir señales débiles estará limitada por el ruido de agitación térmica y por el ruido propio del receptor. Disminuir este último al mínimo posible, es un objetivo siempre presente en el diseño de receptores para VHF, UHF y superiores. Por el contrario, en HF no es necesario ni conveniente desarrollar sistemas con figuras de ruido muy bajas y mayor sensibilidad que los hace más susceptibles a otros problemas derivados de la mayor ganancia necesaria para recibir las débiles señales artificiales de un generador de RF, pero imposibles de oír en condiciones reales, (modulación cruzada, bloqueo, etc.)

En la figura vemos un gráfico en el que se muestra el nivel de ruido medio en el espectro para un receptor con un ancho de banda de 3 KHz y una figura de ruido de 10 dB.

La curva en línea llena muestra el nivel de ruido atmosférico en función de la frecuencia en una zona y época silenciosa por naturaleza sin QRM. Puede verse claramente que, aún en estas condiciones favorables, el ruido atmosférico es mayor que el ruido del receptor a cualquier frecuencia dentro del espectro de HF. De la figuras puede verse que, inclusive con una figura de ruido de unos 15 dB el receptor sería totalmente adecuado para emplearlo en la banda de HF, tal vez podría algo objetable por encima de 20 MHz pero bueno en las bandas inferiores.

Pero, **atención**, presuponemos su conexión a una antena eficiente. Si desea construir un receptor móvil o portátil que utilizará antenas de pobre eficiencia, nuevamente será importante obtener bajas figuras de ruido, puesto que, entonces, el ruido atmosférico y la señal captado por tal antena será menor con lo cual el ruido propio será relativamente más importante.

Continuará...

Bibliografía consultada:

Referencias:

⁽¹⁾ Ham radio, Febrero 1.984, pag 34.
