

Análisis del ruido producido por el hombre (*made man noise*) dentro de la banda de HF en determinadas ubicaciones geográficas

Juan Carlos Sánchez¹, Patricio Marco¹, Sebastián Verrastró²

¹ Armada Argentina, Dirección de Investigación de la Armada (DIIV) Laprida 555, (CP 1638) Vicente López, Buenos Aires, Argentina

² Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Electrónica, Av. Medrano 951, (C1179AAQ) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

juancsanchez@fibertel.com.ar

Recibido el 22 de noviembre de 2018, aprobado el 22 de diciembre de 2018

Resumen

Esta investigación se centra en especial en el análisis del ruido producido por acción del hombre (encendido de motores, tendido eléctrico, equipos electrónicos, etc.) en la banda de HF (3 a 30 MHz). De los distintos tipos de ruidos producidos por el hombre, se estudió el ruido Blanco Gaussiano (en inglés *White Gaussian Noise*, WGN). Se analizó su distribución y su influencia en 12 frecuencias. Para tal fin se utilizó un analizador de espectro, el cual se controló desde una PC. Se realizó una serie de mediciones en distintos lugares, las cuales fueron procesadas vía PC utilizando distintos métodos probabilísticos y estadísticos. Finalmente, se pudo establecer si en el área determinada y para las frecuencias analizadas es recomendable o no colocar un receptor.

PALABRAS CLAVE: RUIDO RADIOELÉCTRICO - RUIDO BLANCO - RUIDO HECHO POR EL HOMBRE - HF - RUIDO EN LA BANDA DE HF

Abstract

This research focuses in particular on noise produced by human action (ignition of motors, power lines, electronic equipment, etc.) in the HF band (3-30 MHz).

Of the different types of noise produced by man, the Gaussian White Noise was studied (WGN). Their distribution and influence were analyzed in 12 frequencies.

For this purpose, a spectrum analyzer was used, which was controlled from a PC. A series of measurements were made in different places, which were later processed via PC using different probabilistic and statistical methods.

Finally, it was possible to establish if in the determined area and for the analyzed frequencies it is advisable or not to place a receiver.

KEYWORDS: RADIO NOISE - WHITE NOISE - MADE MAN NOISE - HF - NOISE IN THE HF BAND

Introducción

El ruido radioeléctrico proveniente de distintas fuentes introduce un nivel de RF de fondo no deseado (en inglés *background noise*) en la etapa de entrada de cualquier receptor, provocando que las señales deseadas deban superar este nivel de ruido para una recepción adecuada.

Por debajo de 1 GHz predominan las siguientes fuentes de ruido dependiendo de la frecuencia (UIT-R Rec P.372-12, 2015):

- Ruido provocado por acción del hombre (encendido de motores, tendido eléctrico, equipos electrónicos, etc.).
- Ruido galáctico (emisiones de radiadores cósmicos tales como el sol).
- Ruido atmosférico (debido a gases atmosféricos, hidrometeoros y principalmente la descarga de los rayos eléctricos).

Centrándonos en el ruido producido por el hombre, éste puede catalogarse como sigue (UIT-R Rec SM.1753-2, 2012):

- Ruido Blanco Gaussiano (WGN): Emisiones de similar amplitud y que generalmente tienen un ancho de banda igual o mayor que el del receptor. El nivel espectral de potencia crece linealmente con el ancho de banda.
- Ruido Impulsivo (en inglés *Impulsive Noise*, IN): Emisiones que se manifiestan por un cierto intervalo de tiempo que generalmente consisten en trenes de pulso (ráfagas) de corta duración y que se repiten en frecuencia (FRI). El nivel espectral de potencia crece con el cuadrado del ancho de banda.
- Ruido por Tono de Portadora: Emisiones con una amplitud más o menos constante y con un ancho de banda inferior al del receptor.

Los siguientes parámetros son de interés en la medición del ruido producido por el hombre (UIT-R SM.2155, 2009):

- Para el WGN es suficiente medir el nivel r.m.s. durante un período de tiempo suficientemente largo.
- En el caso del IN, si bien la forma gráfica del ruido impulsivo real no es rectangular, a fines de la medición pueden tomarse una serie de

impulsos muy cortos que pueden considerarse como ráfagas.

Relación Señal a Ruido (S/N)

Se define la relación señal a ruido (S/N) como la relación entre la potencia de la señal (S) y la potencia del ruido superpuesto (N), generalmente se expresa en dB (Lathi, B., 2001):

$$\frac{S}{N} = 10 \times \log\left(\frac{S(W)}{N(W)}\right) \text{ [dB]} \quad (1)$$

Esta relación indica la pureza de la señal (o del nivel relativo de la señal y del ruido).

Figura de Ruido (F)

La figura de ruido de un sistema (también llamada cifra de ruido) se define como (Lathi, B., 2001):

$$f = \frac{S/N(IN)}{S/N(OUT)} \quad (2)$$

donde:

f = figura de ruido [veces]

S/N(IN) = relación señal a ruido en la entrada [veces]

S/N(OUT) = relación señal a ruido en la salida [veces]

Expresándola en dB que es su forma más común:

$$F = 10 \times \log(f) \quad (3)$$

De esta manera vemos que la figura de ruido representa que tanto se degrada la S/N al pasar por el sistema.

Haciendo énfasis en el ruido externo ambiental que afecta los componentes de un sistema receptor, se define la figura de ruido atmosférico (fa) como (Spaulding y Washburn, 1985):

$$fa = \frac{P_N}{k \cdot T_o \cdot B} \quad (4)$$

donde:

f_a = figura de ruido atmosférico [veces]

P_N = potencia de ruido medida [W]

k = constante de Boltzmann (1,38x10⁻²³ [J/K])

T_o = temperatura de referencia en Kelvin [K]

B = ancho de banda de la medición [Hz]

Potencia Mínima Detectable:

Para un determinado sistema de modulación, existe un cierto nivel de potencia recibida (P_m) a la entrada del receptor tal que para potencias menores la relación señal ruido (S/N) se degrada rápidamente y para potencias mayores tiene valores significativos. A esta potencia se la llama potencia mínima detectable y se la define de la siguiente forma (Spaulding y Washburn, 1985):

$$P_m[\text{dBW}] = (S/N)_m [\text{dB}] + F[\text{dB}] + 10 \cdot \log(k \cdot T_o \cdot b) \quad (5)$$

donde:

P_m = potencia mínima detectable [dBW]

$(S/N)_m$ = relación señal ruido mínima según el tipo de servicio [dB]

b = ancho de banda del servicio [Hz]

F = figura de ruido del sistema [dB]

k = constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ [J/K])

T_o = temperatura de referencia en grados kelvin [K]

Lo dicho se puede apreciar con mayor claridad en la figura 1:

Parte Experimental

a) Selección de las frecuencias

Las frecuencias utilizadas en este trabajo se seleccionaron dentro de la banda de HF teniendo en cuenta su baja tasa de ocupación y descartando las frecuencias asignadas para la utilización en forma permanente por la ENACOM (Ente Nacional de Comunicaciones).

Teniendo en cuenta esto último se adoptaron las siguientes frecuencias: 2 MHz, 3 MHz, 4 MHz, 5 MHz, 6 MHz, 8 MHz, 10

MHz, 12 MHz, 15 MHz, 18 MHz, 21 MHz, 24 MHz.

b) Verificación de canal libre de comunicaciones

Como las mediciones estuvieron automatizadas por software, no puede suponerse que siempre la frecuencia seleccionada contiene sólo ruido radioeléctrico.

Se utilizó el método matemático de descomposición en valores singulares (en inglés *Singular Value Decomposition* o simplemente SVD) para verificar que el canal estuvo libre de emisiones en el momento de la medición.

De esta forma, si dicho método pone en evidencia que la exploración contiene principalmente WGN, puede emplearse los datos obtenidos.

Este proceso supone la construcción de una matriz de autocorrelación estimada a partir de la señal recibida y la evaluación posterior de los resultados obtenidos aplicando la SVD a dicha matriz.

Se utilizaron los valores de señal medidos y se armó un vector $x(n)$ de longitud N , donde x es el vector que contiene las mediciones, N es el número total de mediciones y n es el elemento en cuestión del vector.

Se adoptó un valor de $p=19$ como orden del tamaño de la matriz de autocorrelación R_x (UIT-R Rec. SM.1753-2, 2012). De esta manera puede determinarse el tamaño de la matriz como $(p+1) \times (p+1)$ donde se define $M=p+1$ como la cantidad total de elementos de la matriz (UIT-R Rec. SM.1753-2, 2012).

Con estos datos se construyó la matriz estimada de la matriz de autocorrelación de la siguiente forma (UIT-R Rec. SM.1753-2, 2012):

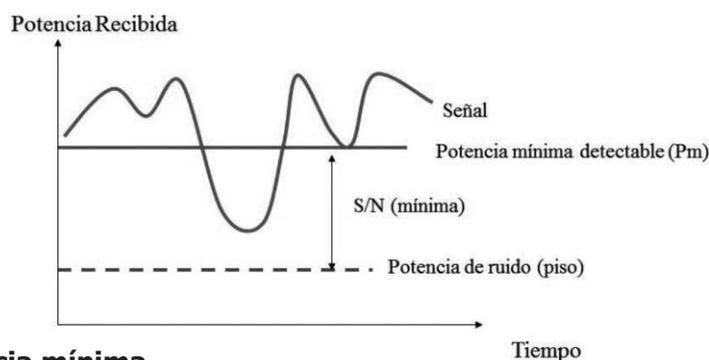


Fig. 1. Potencia mínima

$$\hat{R}_x = \begin{bmatrix} \hat{r}_x(0) & \hat{r}_x(1) & \hat{r}_x(2) & \cdots & \hat{r}_x(p) \\ \hat{r}_x(1) & \hat{r}_x(0) & \hat{r}_x(1) & \cdots & \hat{r}_x(p-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{r}_x(p) & \hat{r}_x(p-1) & \hat{r}_x(p-2) & \cdots & \hat{r}_x(0) \end{bmatrix}$$

donde:

$$\hat{r}_x(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} x(n+m)x^*(n) \quad (7)$$

siendo:

R_x = matriz estimada de la matriz de autocorrelación, posee $p+1$ elementos.

r_x = elemento en cuestión de la matriz x .

m = entero que representa la posición de un elemento en particular

dentro de la matriz y varía de 0 a p (en este caso $p=19$).

x = vector de longitud N que contiene todas las mediciones.

N = número total de mediciones.

n = elemento en cuestión del vector x ($n=0, \dots, N-1$).

Nótese que como R_x es una matriz de autocorrelación se utilizaron $p+1$ valores únicos para rellenar la matriz según la ecuación (7).

Cabe aclarar que cada uno de estos valores representa hasta N mediciones.

En nuestro caso se tomó $N=9015$ mediciones como consecuencia de hacer el producto entre los 601 datos obtenidos de un barrido del analizador de espectro por los 15 barridos que representan una muestra del analizador.

O sea:

$$N = 601 \times 15 = 9015 \text{ datos}$$

A continuación, se aplicó el método SVD a la matriz R_x de la siguiente forma (UIT-R Rec. SM.1753-2, 2012):

$$\hat{R}_x = U \Sigma V^H \quad (8)$$

U = matriz unitaria auxiliar del mismo orden que R_x

V = matriz unitaria auxiliar del mismo orden

que R_x

Σ = matriz diagonal del mismo tamaño que R_x

V^H = matriz traspuesta conjugada de V .

Lo que implica que hay $p+1$ valores singulares σ_k de la matriz Σ que son cero o positivos. Nótese que como Σ es una matriz diagonal, los valores singulares σ_k son simplemente los valores de la diagonal.

Posteriormente, se calculó la métrica $v(k)$ y su índice k en base a los valores singulares con la siguiente expresión (UIT-R Rec. SM.1753-2, 2012):

$$v(k) = \frac{\|\hat{R}_k^{(k)}\|_F}{\|\hat{R}_k\|_F} = \left[\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_k^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_{p+1}^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

donde:

$v(k)$ = métrica de los valores singulares σ_k .

$\|R\|_F$ = norma de Frobenius de la matriz

σ_k = valores singulares de la diagonal de la matriz Σ .

k = elemento en cuestión de v ($k=1, \dots, p+1$).

Se adoptó un valor de confianza de 0,95 y se halló el k que satisface la igualdad (UIT-R Rec. SM.1753-2, 2012):

$$v(k) = 0,95 \quad (10)$$

Finalmente, si $k > \frac{p+1}{2}$

solamente existe WGN, caso contrario, existen señales más ruido. El máximo valor posible de k es $p+1$. Téngase en cuenta que a medida que aumenta k en la ecuación (9) $v(k)$ converge a 1.

c) Tipos de medición

Para las mediciones de ruido radioeléctrico se

Tabla 1. Resumen de los tipos de medición recomendados (se encuentran subrayados)

Rango de frecuencias	Mediciones en exteriores	Mediciones en interiores
9 kHz – 300 kHz (ondas kilométricas)	A, <u>B</u>	A, <u>B</u>
300 kHz – 3 MHz (ondas hectométricas)	A, B, <u>C</u>	A, <u>B</u>
3 MHz – 30 MHz (ondas decamétricas)	A, B, <u>C</u>	A, <u>B</u>
30 MHz – 300 MHz (ondas métricas)	A, <u>B</u>	A, <u>B</u>
300 MHz – 3 GHz (ondas decimétricas)	A, <u>B</u>	A, <u>B</u>
> 3 GHz (ondas centimétricas)	<u>A</u>	<u>A</u>

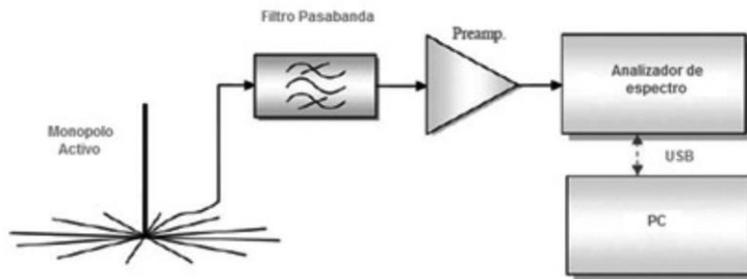


Fig. 2. Setup de la medición

recomiendan 3 tipos de metodologías a saber (UIT-R Rec. SM.1753-2, 2012):

- Tipo A: Sólo para WGN, requiere únicamente realizar mediciones del valor r.m.s en una frecuencia con baja tasa de ocupación. La evaluación de los datos es muy sencilla.
- Tipo B: Puede utilizarse para WGN y para IN. Requiere un muestreo de datos rápido y la evaluación de los datos es mucho más compleja, generalmente asistida por PC.
- Tipo C: Es similar a la Tipo B pero con la diferencia que se lleva a cabo en 2 emplazamientos distintos cuyos equipos deben ser idénticos y además deben estar sincronizados.

Si bien se aprecia en la Tabla 1 que para las ondas decamétricas (3 MHz – 30 MHz) se recomienda la medición para exteriores tipo C, en este trabajo se utilizó la medición para exteriores tipo B por no disponerse de 2 dispositivos iguales.

d) *Setup* de la medición

Se utilizó un analizador de espectro el cual fue controlado desde una PC que capturó los datos por medio de un programa desarrollado para tal fin.

El sistema (*setup*) completo de la medición que se utilizó fue el siguiente (UIT-R SM.2155, 2009; Nowosielski y colaboradores, 2012; Skomal, 1969; Dornetto, 1989):

Se detalla a continuación el instrumental utilizado con sus principales características técnicas:

- Analizador de espectro
 - Marca: RIGOL
 - Modelo: DSA815
 - RBW específico para EMI: 200 Hz, 9 kHz, 120 KHz.
 - Detectores: pico positivo, pico negativo, cuasi-pico, valor medio (AV), valor cuadrático medio (RMS), muestra (SAMPLE), normal.
 - Barrido rápido para frecuencias elevadas (hasta 50000 muestras/seg).

- Antena monopolo
- Marca: ROHDE & SCHWARZ
- Modelo: HFH2-Z1
- Rango de frecuencia: de 9 kHz a 30 MHz.
- Factor de antena (k): seleccionable, 10/20 dB.
- Impedancia de referencia: 50 Ω
- Máxima tensión de salida (50 Ω): 1 V

El procedimiento a seguir para la medición fue el siguiente (UIT-R Rec. P.845-3, 1997; UIT-R Rec. SM.1753-2, 2012; UIT-R Rec. SM.2155, 2009; Giesbrecht, 2008; IEEE ANSI C63.4-2014, 2014):

- Disposición de la antena y determinación del Área de validez de la medición
- Se posicionó la antena como indica la figura 3.
- Se adoptaron los siguientes valores:

- R = 3 m
- Gap = 0,30 m

Se calculó el radio de la circunferencia efectiva y el área de validez de la medición de la siguiente manera (IEEE ANSI C63.4-2014, 2014):

$$P = R - \text{Gap} = 3 \text{ m} - 0,30 \text{ m} = 2,7 \text{ m} \quad (11)$$

$$\text{ÁREA} = 2 \times P \times k \times P = 2 \times 2,7 \text{ m} \times 1,73 \times 2,7 \text{ m} = 25,22 \text{ m}^2 \quad (12)$$

Donde:

$k=1,73$ es una constante de proporcionalidad (IEEE ANSI C63.2-2016, 2016; IEEE ANSI C63.5-2017, 2017).

Con estos datos se procedió a rotar la antena por las cinco posiciones como indica la Figura 3.

El tiempo de permanencia del monopolo en cada posición es de 4 horas y 48 minutos, que se obtiene de fraccionar equitativamente el período de duración de la medición de 24 horas para cada una de las cinco posiciones que son equidistantes entre sí.

El objetivo del gap es asegurar un margen de cobertura para la validez de la medición, ya que de no existir el mismo las posiciones de ubicación de la antena estarían sobre el perímetro de la circunferencia de $R = 3 \text{ m}$ provocando una incerteza en la medición.

e) Seteo del analizador de espectro

Se fijaron 12 frecuencias de interés, las cuales estén libres de comunicaciones (con el nivel de señal más pequeño posible) según los siguientes seteos:

- N° de elementos por barrido: 601 elementos
- N° de barridos: 15
- Tamaño del Paquete de Datos: 9015 elementos

• Span

El Span es el ancho de barrido en frecuencia, se lo expresa en kHz.

Existe un modo de funcionamiento en el cual el barrido en frecuencia del oscilador local se ajusta a cero, a este modo se lo llama barrido cero (en inglés *zero span* o como figura en los instrumentos SPAN ZERO). Permite efectuar medidas de nivel a frecuencias fijas y también poder representar una señal en el dominio del tiempo.

Se dividió a las frecuencias adoptadas en 3 ran-

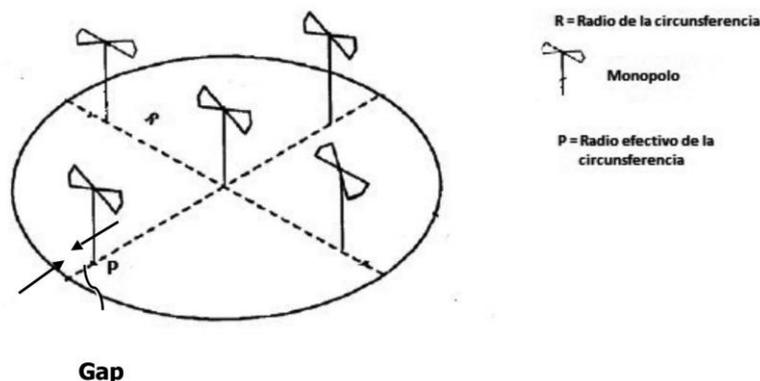


Fig. 3. Área de validez de la medición

Tabla 2. Span sugeridos para los 3 rangos de frecuencias adoptados

Rango de Frecuencias (MHz)	Span (kHz)
2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 8 - 10	288
12 - 15	795
18 - 21 - 24	1430

Tabla 3. RBW sugeridos según el tipo de medición y los distintos rangos de frecuencias

Rango de frecuencias	RBW para la medición de Tipo A (sólo WGN)	RBW para mediciones de Tipo B y C (WGN e IN)
300 kHz – 30 MHz	100 Hz	10 kHz
30 MHz – 450 MHz	1 kHz	100 kHz
450 MHz – 1 GHz	1 kHz	300 kHz
1 GHz – 3 GHz	10 kHz	5 MHz
> 3 GHz	10 kHz	10 MHz

gos y se les asignó un *span* según la Tabla 2 (UIT-R Rec. SM.2155, 2009).

- Ancho de banda de resolución

El Ancho de Banda de Resolución (en inglés Resolution Bandwidth o simplemente RBW como figura en los instrumentos) en nuestro caso es de 10 kHz según la Tabla 3 (UIT-R Rec. SM.1753-2, 2012). Se adoptó 10 kHz para el tipo de medición utilizado.

- Ancho de banda de video

Es el Ancho de Banda de Video (en inglés *Video Bandwidth* o VBW como figura en el instrumental), proporciona una constante de tiempo al análisis nivel/amplitud con lo cual produce un filtrado (promedio) de las componentes de ruido de la señal medida.

En nuestro caso es de 100 kHz según el siguiente cálculo (UIT-R Rec. SM.1753-2, 2012):

$$VBW = 10 \times RBW = 10 \times 10 \text{ kHz} = \mathbf{100 \text{ kHz}}$$

(13)

- Atenuador

El atenuador (en inglés *attenuator* o ATT como figura en el instrumental) ajusta el nivel de la señal que entra en el primer mezclador para obtener un margen dinámico máximo sin interferencias y una buena relación S/N.

Se tomó un nivel de atenuación de 30 dB por necesidad de la medición.

Proceso de la Medición

Para cada una de dichas frecuencias se tomó un entorno reducido (un *span*) según la Tabla 2.

Se determinó la frecuencia para la cual el nivel de señal es mínimo. Si el proceso SVD revela que los datos obtenidos contienen mayormente ruido blanco entonces puede adoptarse esa frecuencia como la "frecuencia libre" del intervalo en cuestión y se coloca el *span* en 0 (*span zero*).

Una vez confirmada la "frecuencia libre", se procedió a la captura de datos (adquisición de muestras) en dicha frecuencia, tomada como frecuencia central de la medición. Este procedimiento se realizó para las 12 frecuencias seleccionadas cada un lapso de 15 minutos.

En caso de que el SVD indique que el canal está ocupado se descarta esa toma de datos y se realiza un pequeño corrimiento en frecuencia.

Se adoptó un corrimiento o paso de frecuencia (en inglés *step size*) para ir desplazando el intervalo en caso de que el canal esté ocupado.

Dicho paso de frecuencia se calculó de la siguiente forma:

$$\text{step size} = f_{\text{central}} + \frac{\text{span}}{2} \quad (14)$$

El esquema de la medición es el siguiente:

Se midió el ruido blanco con el detector del analizador seteado en r.m.s. durante 7 segundos (para cada frecuencia). Una vez tomados los datos para las 12 frecuencias se repitió el proceso durante 10 minutos.

Transcurridos los 10 minutos se adoptó un tiempo de espera de 5 minutos para el cual se detuvo completamente el proceso de medición. Esto se realizó para verificar si hay una variación en la ocupación de los canales debido a la utilización de estos. Se repitió el procedi-

miento para una duración total de la medición de 24 h.

Resultados y Discusión

A los valores obtenidos se los representó con un gráfico de cajas (en inglés *boxplot*) en el cual se indicaron los valores máximos, mínimo, el percentil superior (90% de los valores medidos), el percentil inferior (10% de los valores medidos) y la mediana de la figura de ruido atmosférico (UIT-R Rec. SM.2155, 2009).

La figura se realizó colocando sobre el eje de abscisas el horario verdadero de la medición en un período de 24 horas. Por lo tanto, en el origen se colocó el horario de comienzo de la medición.

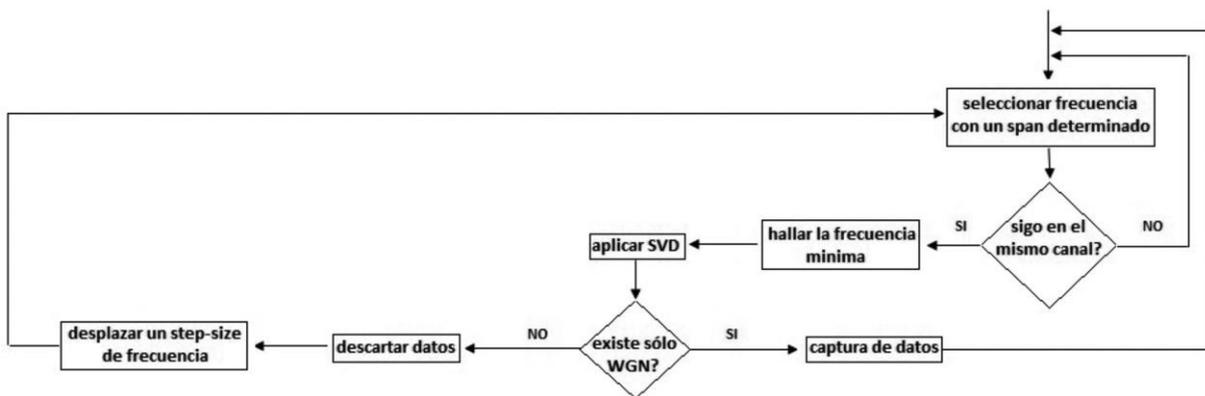


Fig. 4. Diagrama en bloques del proceso de medición

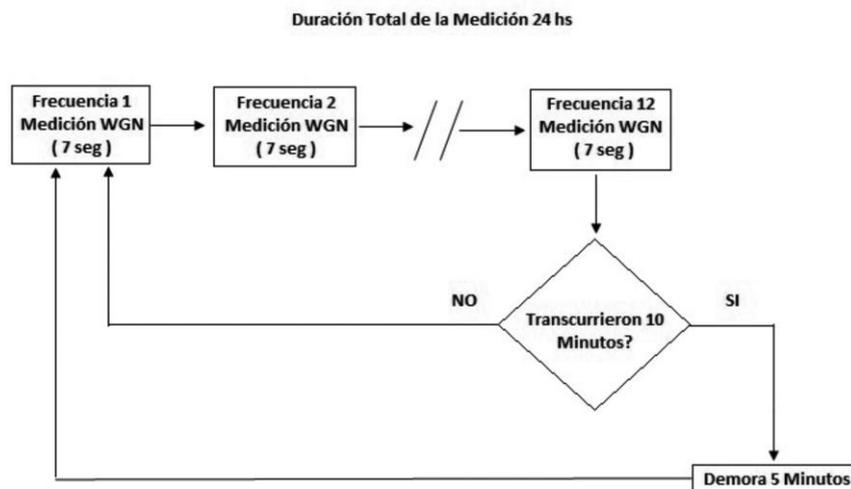


Fig. 5. Duración total de la medición 24 h

En el eje de ordenadas se colocó la figura de ruido atmosférico obtenida en base a la medición y calculada de la siguiente forma (UIT-R Rec. SM.1753-2, 2012; Spaulding y Washburn, 1985):

$$F_a = P + AF - 20 \log(f) - 10 \log(b) + 202,5 \quad [\text{dB}] \quad (15)$$

donde:

Fa: figura de ruido atmosférico [dB]
 P: nivel r.m.s. del ruido blanco gaussiano me-

dido [dB]

AF: factor de antena [dB]

f : frecuencia de medición [Hz]

b: ancho de banda de la medición [Hz].

En la Figura 7 se puede visualizar que, si bien tenemos una caja para cada hora, existen huecos o zonas sin captura de datos. Esto se debe a que en esa franja horaria el canal estaba ocupado por radiocomunicaciones y allí no pudo determinarse la "frecuencia libre".

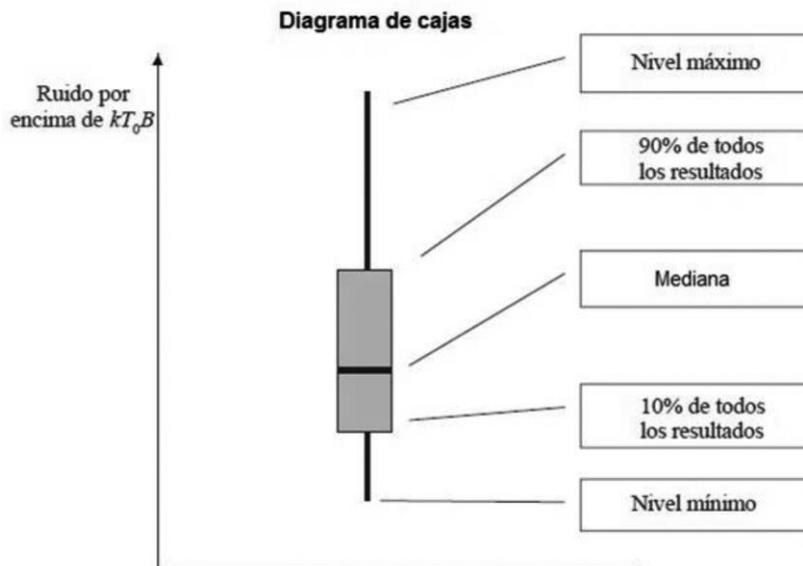


Fig. 6. Modelo de diagrama de caja

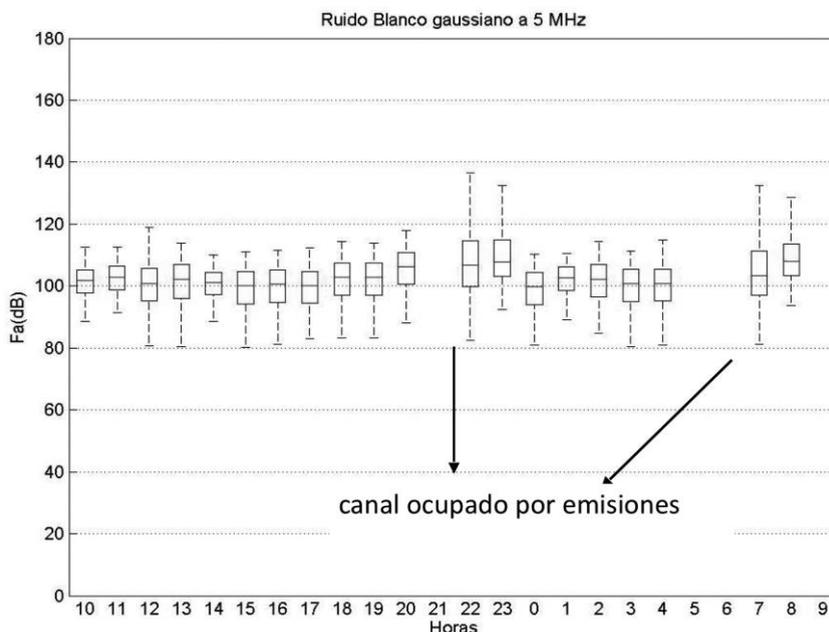


Fig. 7. Zona Céntrica

La medición correspondiente a este gráfico se realizó en una zona categorizada como "zona céntrica" debido a su nivel de contaminación espectral ambiental (UIT-R Rec. SM.2155, 2009; OTAN RTO-TR-IST-050, 2003; IEEE ANSI C63.4-2014, 2014).

De forma similar se representó para otros 2 lugares, uno con menor (Figura 8) y otro con mayor (Figura 9) nivel de contaminación espectral que el caso anterior. Asimismo, se indicó la clasificación zonal correspondiente (UIT-R Rec. SM.2155, 2009; OTAN RTO-TR-IST-050, 2007)

De la misma forma, la tabla siguiente muestra en forma resumida la variación de la Fa con respecto a las distintas zonas para los diferentes rangos de frecuencia:

Figura de Ruido del Sistema

Se representa un diagrama en bloques para determinar la figura del ruido del sistema (UIT-R Rec. P.372-12, 2015; Spaulding y Washburn, 1985):

La figura de ruido total del sistema se calculó de la siguiente forma:

$$f = f_a + (l_c - 1) \cdot \frac{T_c}{T_o} + l_c \cdot (l_t - 1) \cdot \frac{T_t}{T_o} + l_c \cdot l_t \cdot (f_r - 1) \quad [\text{veces}] \quad (16)$$

donde:

f_a = figura de ruido atmosférico[veces]

l_c = pérdida disipada en el circuito de la antena (potencia disponible en la entrada/potencia dis-

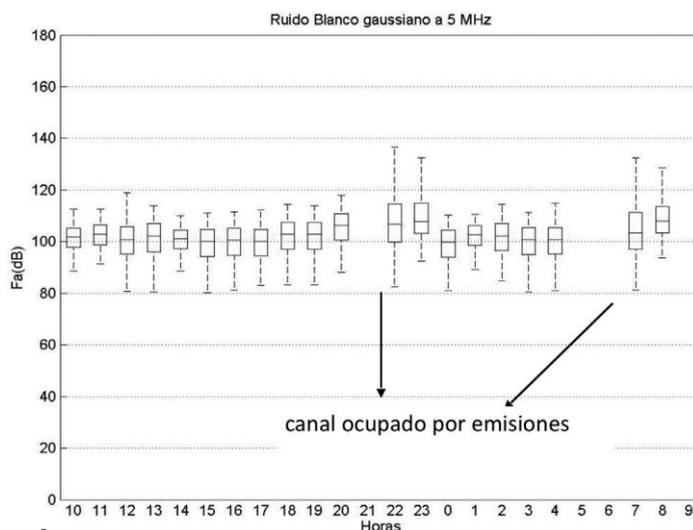


Fig. 7. Zona Céntrica

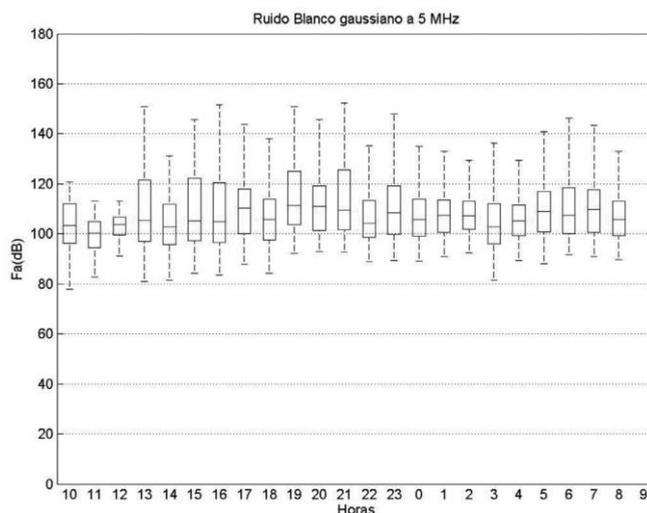


Fig. 8. Zona Urbana

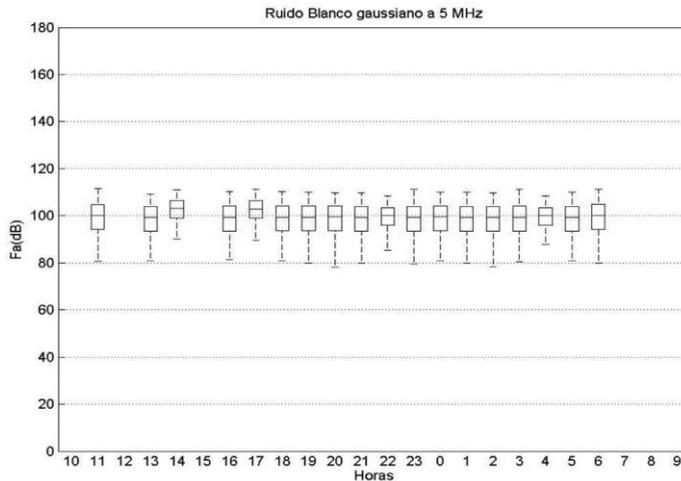


Fig. 9. Zona Industrial

ponible a la salida) [veces]

T_c = temperatura real de la antena y de la superficie circundante [K]

l_t = pérdida en la línea de transmisión (potencia de entrada disponible/potencia de salida disponible) [veces]

T_t = temperatura real de la línea de transmisión [K]

f_r = figura de ruido del receptor [veces]

T_o = temperatura de referencia [K]

Se consideró que todo el sistema se encontraba a temperatura ambiente ($T_c=T_o=T_t$) por lo

tanto la (16) queda:

$$f = f_a \cdot l_t \cdot f_r \quad \text{[veces]} \quad (17)$$

Junto a la figura de ruido total del sistema se representaron las figuras de ruido de 2 receptores a saber:

Ionosonda

Una ionosonda es un radar que opera en la banda de HF (2- 30 MHz) con el lóbulo principal de la antena dirigido hacia la ionósfera, permite medir las frecuencias críticas de los distintos es-

Tabla 4. Variaciones en F_a según el rango de frecuencias y la zona bajo análisis

Rango de Frecuencias	Zona (*)	F_a [dB] (**)
2 MHz – 10 MHz	Céntrica	115
	Urbana	110
	Industrial	150
12 MHz– 15 MHz	Céntrica	100
	Urbana	98
	Industrial	120
18 MHz – 24 MHz	Céntrica	100
	Urbana	98
	Industrial	115

(*) (UIT-R Rec. SM.2155, 2009; OTAN RTO-TR-IST-050, 2003; IEEE ANSI C63.4-2014, 2014.

(**) Se tomó el valor máximo de todos los boxplot para las 13 h (a título de ejemplo).

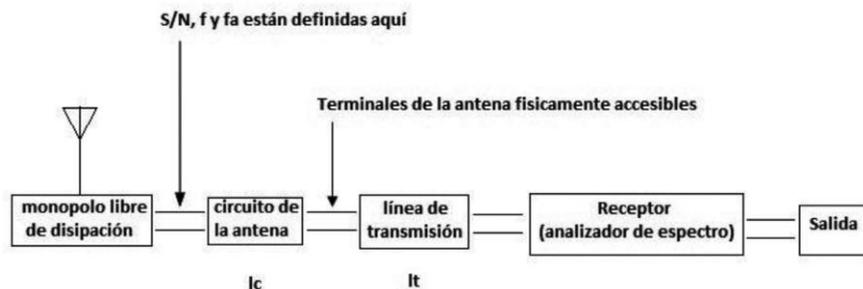


Fig. 10. Diagrama en bloques de la figura de ruido

tratos ionosféricos y sus correspondientes alturas virtuales. Las especificaciones de interés de la ionosonda utilizada son las siguientes:

- Marca: KEL AEROSPACE
- Modelo: IPS-42
- Rango de Frecuencia: 1 MHz – 22,6 MHz

Receptor de Interferencia Electromagnética (EMI)

Las especificaciones son las siguientes:

- Marca: ROHDE & SCHWARZ
- Modelo: ESHS-20
- Rango de Frecuencia: 9 kHz – 30 MHz

La figura de ruido en los receptores se calculó de la siguiente manera (*Keysight-Application Note 150*, 2013):

$$NF = [\text{ruido medido en dBm}] - 10 \cdot \log(\text{RBW}/1) - 174 \text{ dBm} \quad (18)$$

Con la información obtenida de los diagramas de cajas se realizó un gráfico similar, pero de dispersión y se reordenó el eje de abscisas de tal manera que ahora ya no representa el horario verdadero en el que se realizó la medición, sino que se estandarizó haciendo coincidir el origen con cero y a lo largo de 24 h.

El eje de ordenadas representa ahora la figura de ruido total del sistema (se obtiene sumando a la figura de ruido externa medida la figura de ruido de las pérdidas del sistema de medición) y las figuras de ruido de los receptores que se evaluaron tal como se ve en la Figura 11 (UIT-R Rec. SM.1753-2, 2012; UIT-R Rec. SM.2155, 2009; Maanen, 2006; Giesbrecht, 2008).

Al igual que con los gráficos de cajas se pueden visualizar zonas horarias donde el canal estaba ocupado por emisiones y allí no hubo captura de datos.

Similarmente al caso anterior, pero en este caso para una frecuencia de 15MHz, se graficó para otras 2 ubicaciones catalogadas como "zona urbana" (Figura 12) y "zona industrial" (Figura 13) (UIT-R Rec. SM.2155, 2009; OTAN RTO-TR-IST-050, 2007; IEEE ANSI C63.4-2014, 2014).

En estas últimas gráficas podemos apreciar que los niveles de la figura de ruido de los receptores tomados como ejemplo se encuentran muy por debajo de la figura total del sistema.

Teniendo en cuenta los diagramas de cajas de las figuras, se calculó a continuación la potencia mínima detectable según la ecuación (5) para un horario determinado a título de ejemplo.

Determinación de la Incertidumbre

En las Figuras 11, 12 y 13 se puede apreciar que la mediana de F queda acotada entre el percentil superior y el inferior, quedando determinadas 2 bandas, por encima y por debajo de la mediana respectivamente.

De las gráficas se desprende que el valor del error es:

$$\Delta F_{\text{med}} = \pm 5 \text{ dB}$$

Si bien se mencionó como ejemplo las figuras arriba citadas, este valor se mantuvo para todas las mediciones.

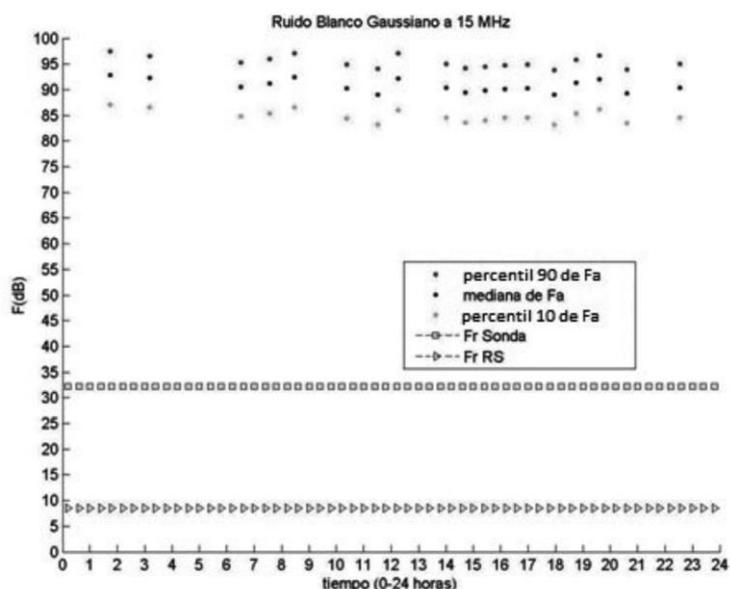


Fig. 11. Zona Céntrica

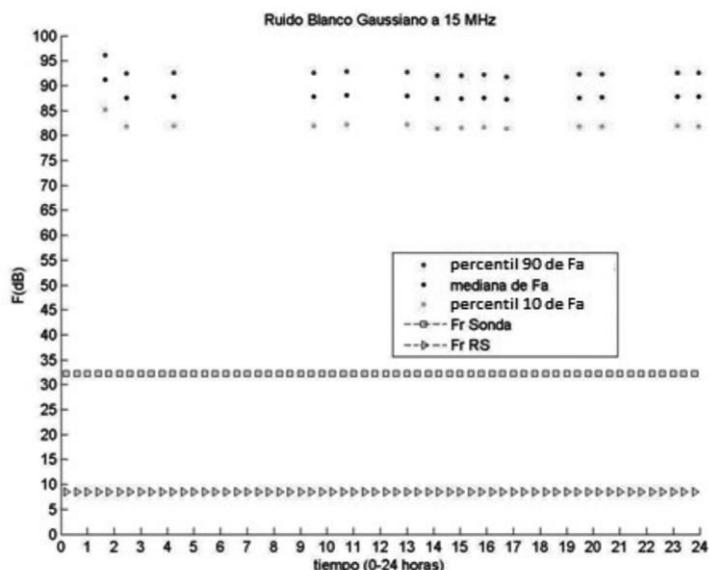


Fig. 12. Zona Urbana

Considerando las incertidumbres del instrumento (Rigol DSA815) extraídas de las especificaciones del fabricante:

- $\Delta F_{RBW} < 0,1 \text{ dB}$
- $\Delta F_{ATENUACION} < 0,5 \text{ dB}$
- $\Delta F_{AMPLITUD} < 0,4 \text{ dB}$
- $\Delta F_{NIVEL REFERENCIA} = 0,01 \text{ dB}$
- $\Delta F_{NIVEL MEDICION} < 1,5 \text{ dB}$

Por lo tanto, la incertidumbre total será (UIT-R Rec. SM.1753-2, 2012; JCGM 100, 2008):

$$\Delta F_{TOTAL} = \Delta F_{med} + \Delta F_{RBW} + \Delta F_{ATENUACION} + \Delta F_{AMPLITUD} + \Delta F_{NIVEL REFERENCIA} + \Delta F_{NIVEL MEDICION}$$

$$\Delta F_{TOTAL} = 5 \text{ dB} + 0,1 \text{ dB} + 0,5 \text{ dB} + 0,4 \text{ dB} + 0,01 \text{ dB} + 1,5 \text{ dB}$$

$$\Delta F_{TOTAL} = 7,51 \text{ dB}$$

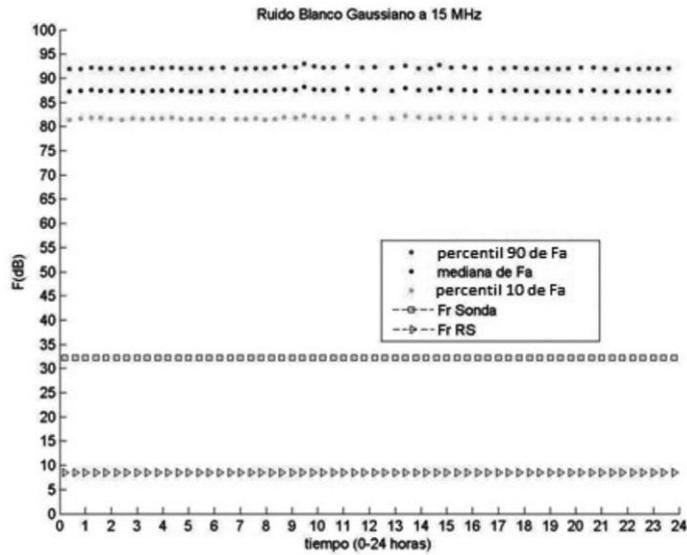


Tabla 5. Variación de Pm para 5 MHz respecto de las zonas de bajo análisis

Tipo de Comunicación (*)	Grado de Servicio (*)	(S/N) _m [dB] (**)	Zona (***)	Tipo de Receptor	Fa [dB] (****)	F [dB] (*****)	Pm [dBW]
BLU portadora suprimida (J3E)	operador – operador	38	Céntrica	Ionosonda	115	115	-51
			Céntrica	Receptor EMI		115	
		38	Urbana	Ionosonda	110	110	-56
			Urbana	Receptor EMI		110	
		38	Industrial	Ionosonda	150	150	-16
			Industrial	Receptor EMI		150	

(*) UIT-R F.339-8.

(**) (S/N) mínima para un ancho de banda de 1 Hz (UIT-R F.339-8, 2013).

(***) (UIT-R Rec. SM.2155, 2009; OTAN RTO-TR-IST-050, 2003; IEEE ANSI C63.4-2014, 2014).

(****) Se tomó el valor máximo de las Figuras 7, 8 y 9 para las 13 h (a título de ejemplo).

(*****) Figura de ruido total del sistema según el tipo de receptor.

Finalmente, el valor de la medición será:

$$F(\text{dB}) = |F| \pm 7,5 \text{ dB}$$

Nota: Se adoptó para los cálculos de la ΔF_{TOTAL} la igualdad en las incertidumbres del instrumento por ser el peor caso.

Conclusiones

De los diagramas de cajas de las Figuras 7, 8 y 9 se desprende que en la zona industrial (Figura 9) el nivel de ruido es el más alto de

las 3 zonas bajo análisis, siendo el nivel más reducido el de la zona urbana (Figura 8).

En las Figuras 11, 12 y 13 se puede apreciar claramente que en los 3 casos la figura de ruido total del sistema está muy por encima de la figura de ruido de los 2 receptores analizados como ejemplo. Esto implica que dichos receptores se ven afectados por la acción del WGN en la zona en cuestión, pues resulta que en la ecuación (17) será:

$f_a \gg -1 + l_c \cdot l_t \cdot f_r$

Esto indica que, si la zona bajo análisis tiene un nivel de contaminación espectral considerable, por más que se disminuya la figura de ruido del receptor (f_r), dicho dispositivo se verá afectado por el ruido.

En la Tabla 4 se visualiza que la figura de ruido atmosférico (f_a) decrece a medida que aumenta la frecuencia.

De la Tabla 5 se infiere, además, que para poder recibir la señal un receptor debe superar la potencia mínima detectable que allí figura.

Por lo tanto, se concluye que no se recomienda instalar un receptor si su potencia de entrada no supera la potencia mínima detectable de la zona en cuestión, viéndose esta última sumamente afectada por la figura de ruido atmosférico.

Agradecimientos

Se agradece muy especialmente al Licenciado Patricio Marco por impulsar este trabajo, y al Supervisor Raúl Alves por su amplia colaboración en el diseño del programa utilizado para controlar el analizador de espectro.

Referencias

- DORNETTO, L., (1989) IEEE. The measurement of electromagnetic (RF) noise in the HF spectrum. Columbia, EEUU.
- GIESBRECHT, J. E., (2008) Tesis. Aspects of HF Communications: HF Noise and Signal Features. Adelaida, Australia.
- IEEE ANSI C63.4-2014, (2014) American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz. Nueva York, EEUU.
- JCGM 100:2008 (BIPM member, 2008) Evaluation of measurement data/Guide to the expression of uncertainty in measurement. Cedex, Francia.
- Keysight Technologies, (2013) Application Note 150. Spectrum Analysis Basics, EEUU.
- LATHI, B., (2001) Introducción a la Teoría y Sistemas de Comunicación, Editorial Limusa, pp 278-284.
- MAANEN, E., (2006) EMC. Practical Radio Noise Measurements, Holanda.
- NOWOSIELSKI, L.; Bogdan, B.; Wnuk, M.; Przesmycki, R.; Piwowarczyk, K. y BUGAJ, M., (2012) PIERS. Ambient Electromagnetic Noise Environment Measurement, Moscú, Rusia.
- OTAN RTO-TR-IST-050, (2007) HF Interference, Procedures and Tools. Cedex, Francia.
- SKOMAL, E., (1969) IEEE. Distribution and Frequency Dependence of Incidental Man-Made HF VHF Noise in Metropolitan Areas, California, EEUU.
- SPAULDING, A. D. y WASHBURN, J. S., (1985) NTIA Report. Atmospheric Radio Noise: Worldwide Levels and Other Characteristics. Colorado, EEUU.
- UIT-R Rec. P.845-3, (1997) Medición de la Intensidad de Campo en Ondas Decamétricas, Ginebra, Suiza.
- UIT-R Rec P.372-12, (2015) Radio Noise. Ginebra, Suiza.
- UIT-R Rec SM.1753-2, (2012) Métodos para Medir el Ruido Radioeléctrico. Ginebra, Suiza.
- UIT-R SM.2155, (2009) Medición del Ruido Artificial en la Gama de Ondas Decamétricas. Ginebra, Suiza.
- UIT-R F.339-8, (2013) Anchos de Banda, Relaciones Señal/Ruido y Márgenes para el Desvanecimiento en Sistemas de Radiocomunicaciones Fijos y Móviles Terrestres en Ondas Decamétricas. Ginebra, Suiza.