



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.**

SOINTELSA

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Ciudad de México

División de Ingeniería y Arquitectura

Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Simulación de Ruido Electromagnético

Autores:

**Rodolfo Torrea Durán
José Antonio García Ruiz
Víctor Hugo Ortiz Hernández
Daniel Eduardo Flores Góngora**



Asesor(es):

**M. C. Benjamín Millán
Dr. Jorge Eduardo Brieva
Dr. José Ramón Álvarez Bada**

México D.F. a 12 de noviembre de 2004.



ITESM

CAMPUS CI

BIBLIOTECA

Índice

Simulación de ruido electromagnético	
1. Introducción	1
2. Contexto	3
2.1. Problemática y motivación	3
2.2. Objetivo	3
2.3. Justificación	3
2.4. Sistema propuesto	3
2.5. Determinación de la intensidad de ruido	4
3. Ruido electromagnético: teoría y modelos	6
3.1. Ruido atmosférico	6
3.2. Ruido cósmico	9
3.3. Ruido térmico	12
3.3.1. Introducción	12
3.3.2. Caracterización del ruido térmico	13
3.4. Ruido provocado por el hombre	15
3.4.1. Introducción	15
3.4.2. Naturaleza física del ruido impulsivo	17
3.4.3. Parámetros que es necesario conocer	18
3.4.4. Una posible implementación	19
3.4.5. Ruido impulsivo en las líneas eléctricas de alta potencia	25
4. Resultados	27
4.1. Simulaciones gráficas	27
4.1.1. Resultados preliminares del ruido atmosférico	27
4.1.2. Resultados preliminares del ruido térmico	31
4.1.3. Resultados preliminares del ruido cósmico	33
4.1.4. Presentación del simulador	34
5. Validación y Mediciones	43
6. Conclusiones, perspectivas y recomendaciones, trabajo a futuro	59
Bibliografía	60
Anexos	61

Simulación de ruido electromagnético

1. Introducción

El ruido electromagnético se define como cualquier energía eléctrica indeseable que se presenta dentro de la banda de frecuencias que utiliza la señal que se quiere transmitir. Sin embargo, este proyecto se enfoca al ruido proveniente de fuentes externas al medio de comunicación, y no al ruido que es producto de la interferencia de alguna señal de información.

Es bien conocido que en cualquier sistema de comunicación, el ruido impone un límite a su desempeño. Por ello, la potencia del ruido recibida por el receptor, así como la distribución probabilística de su amplitud, son parámetros adecuados para definir la calidad de la señal en estos sistemas.

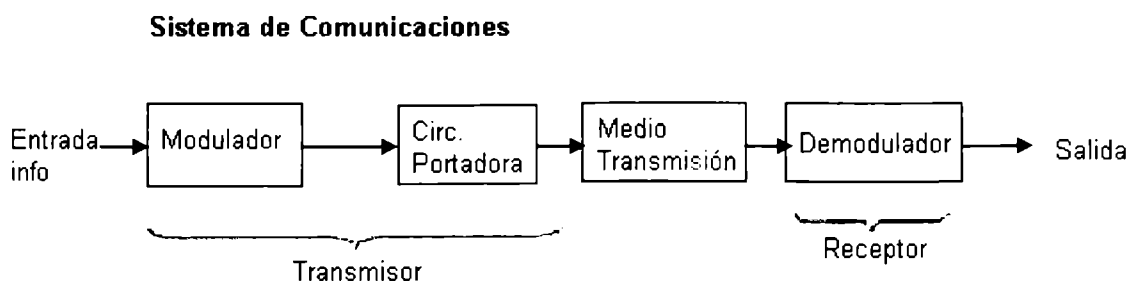


Figura 1.1 La gráfica muestra el diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones (Tomado de SCHWARTZ, MISHA; *Transmisión de Información, Modulación y Ruido*; 3ª ed; Mc Graw Hill; 1983).

También se conoce que existen diversas fuentes de ruido de radio

- Radiación de descargas eléctricas provenientes de las tormentas eléctricas
- Radiación de maquinaria eléctrica, de las líneas de transmisión o de la ignición de máquinas de combustión interna.

- ↗ Emisiones de gases atmosféricos o hidrometeoros
- ↗ Radiación de fuentes celestiales

Para fines de este proyecto, no se considera el ruido de transmisiones de canales cercanos o emisiones falsas de otros sistemas de transmisión.

Muchos de estos tipos de ruido tienen características aleatorias, por lo que para determinar el desempeño de cualquier sistema ante el ruido son necesarias ciertas descripciones probabilísticas.

Por otra parte, se sabe que hay ocasiones en las que más de un tipo de ruido necesita ser considerado porque dos o más tipos se encuentran presentes. Esto puede ser cierto para cualquier frecuencia, pero ocurre con mayor regularidad en la banda de alta frecuencia (HF), donde el ruido atmosférico, galáctico y el provocado por el hombre tienen dimensiones y proporciones considerables. Un método apropiado para obtener los valores promedio y la distribución de la suma de dos o más ruidos consiste en tomar el ruido resultante como una distribución logarítmica. De este modo, la potencia media del ruido resultante está dada por la suma de las potencias medias de los ruidos individuales.

2. Contexto

2.1 Problemática y motivación

Al analizar la transmisión de señales por un sistema de comunicación inalámbrico, el ruido deteriora la señal que viaja desde el transmisor hasta el receptor. El rendimiento de cualquier sistema de comunicaciones está limitado por el ancho de banda y por la presencia de ruido en el sistema. El ruido electromagnético establece un límite a la funcionalidad de los sistemas de comunicaciones inalámbricas. Surge entonces la pregunta: para un sistema de radiocomunicación, ¿cuál es el nivel de ruido que se va a encontrar? Este nivel se puede predecir dentro de cierto umbral tomando modelos de los diferentes tipos de ruido.

2.2 Objetivo

Implementar un programa en Matlab que simule en forma gráfica y analítica parámetros como el nivel de ruido electromagnético esperado, la varianza y la potencia promedio para un punto con características ambientales determinadas y parámetros frecuenciales deseados, validado en el rango de frecuencias de 0 a 2GHz, medidos justo a la entrada de cualquier receptor.

2.3 Justificación

El nivel de ruido se podrá predecir dentro de cierto umbral:

- Tomando en cuenta los modelos matemáticos de los diferentes tipos de ruido (este proyecto se enfoca en 4 de los más significativos).
- Dependiendo de las características del lugar (temperatura, tormentas eléctricas, eventos solares y actividad "ruidosa" producida por el hombre) y de la frecuencia y el ancho de banda con el que se desee trabajar.

Los fabricantes podrán utilizar esta simulación como un apoyo para la construcción de sistemas transmisores y receptores inalámbricos, mejorando así la razón señal a ruido (SNR) y por ende la calidad de la transmisión y la recepción. También la pueden aprovechar para el diseño de redes y otros sistemas en los que el ruido electromagnético afecte su rendimiento.

2.4 Sistema propuesto

Este proyecto consiste en realizar una exhaustiva investigación sobre los modelos de diversos tipos de ruido, específicamente ruido térmico, atmosférico, cósmico y producido por el hombre que son los cuatro tipos más significativos de ruido para el rango de frecuencias que nos atañe. Paralelamente procedemos a realizar la adquisición experimental de datos (niveles de ruido) a través de un analizador de espectros. Los datos que éste arroje se comparan con aquellos datos que se obtengan a partir de nuestros modelos mediante una distancia estadística. El nivel de ruido que se adquiera experimentalmente, será general; mientras que nuestros modelos, se particularizan en algún tipo de ruido, por lo que será necesario proponer un modelo teórico – experimental, que tome en cuenta ambas instancias. Dicho modelo será el algoritmo a seguir por el programa a realizar, por lo que deberá predecir el nivel de ruido considerando varios

parámetros como la frecuencia, el ancho de banda, temperatura, las descargas eléctricas, la existencia de eventos solares y la actividad "ruidosa" producida por el hombre. Cada una de las diferentes etapas del proyecto, es explicada con detalle en la figura 2.1.

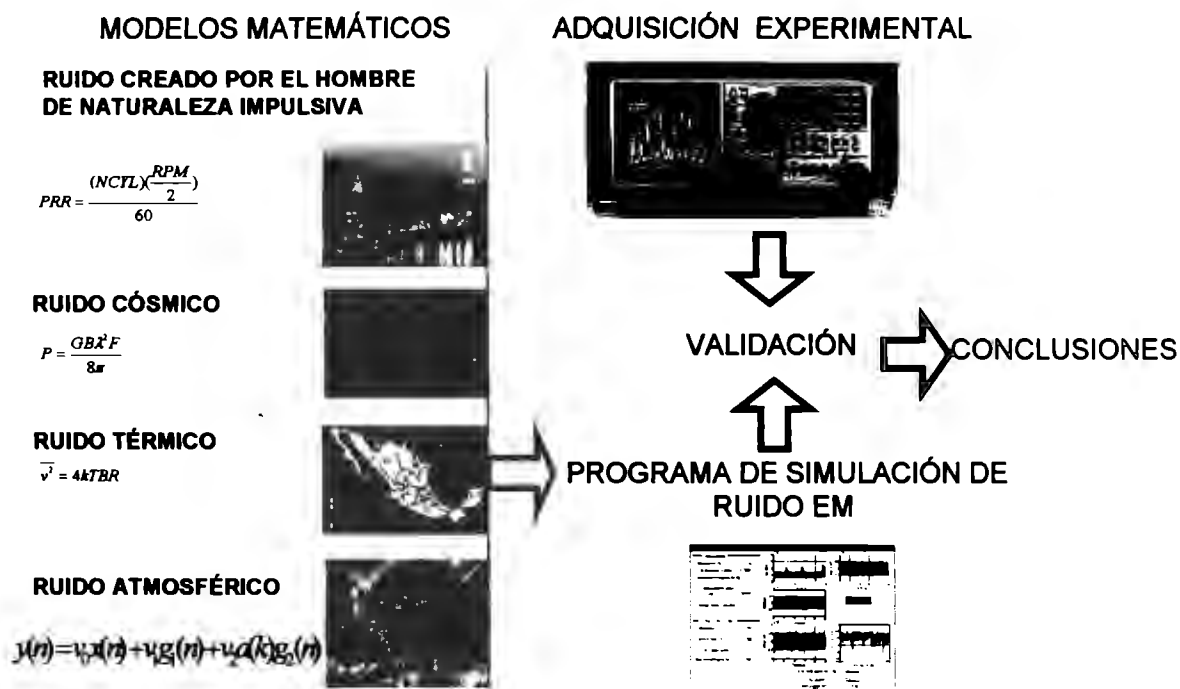


Figura 2.1 La gráfica muestra el diagrama de bloques del sistema propuesto en este proyecto

2.5 Determinación de la intensidad de ruido

Para ello se utiliza el factor de ruido f . Éste se compone de un gran número de fuentes en la terminal receptora del sistema. Es necesario considerar el ruido interno y externo. No obstante, el único punto de referencia apropiado es la entrada de una antena receptora con una señal equivalente, pero libre de pérdidas. El factor de ruido queda definido como:

$$F = f_a + (f_c - 1) + l_c(f_t - 1) + l_c l_t(f_r - 1) \quad (2.1)$$

Donde

f_a es el factor de ruido externo

f_c es el factor de ruido asociado con las pérdidas de la antena

f_t es el factor de ruido asociado con las pérdidas de la línea de transmisión

f_r es el factor de ruido del receptor

l_c es la pérdida de la antena

l_t es la pérdida de la línea de transmisión

Y además:

$$f_a = \frac{P_n}{k t_0 b} \quad (2.2)$$

Donde:

P_n es la potencia disponible desde una antena equivalente libre de pérdidas

k es la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)

t_0 es la temperatura de referencia en Kelvin
Y la figura de ruido externa es

$$F_a = 10 \log f_a \quad (2.3)$$

Estas fórmula por sí solas son insuficiente para determinar el desempeño del sistema ante el ruido (el ruido blanco gaussiano es la única excepción). Por ello son necesarias ciertas descripciones probabilísticas.

Hay ocasiones en las que más de un tipo de ruido necesita ser considerado porque dos o más tipos se encuentran en proporciones comparables. Esto puede ser cierto para cualquier frecuencia, pero ocurre con mayor regularidad en las altas frecuencias (HF), donde el ruido atmosférico, galáctico y el provocado por el hombre tienen dimensiones y proporciones considerables. Un método apropiado para obtener los valores medios y la distribución de dos o más ruidos consiste en tomar el ruido resultante como la suma de los ruidos individuales.

3. Ruido Electromagnético: Teoría y Modelos

3.1 Ruido atmosférico

El ruido atmosférico es causado por las descargas eléctricas en el ambiente y domina a otras fuentes de ruido por debajo de los 30MHz, sobretodo en las bandas de frecuencia muy baja, baja, media y alta (VLF, LF, MF y HF). La potencia del ruido atmosférico alcanza un máximo en las regiones de bajas latitudes donde la actividad de las tormentas eléctricas y los relámpagos son mayores, por ejemplo: África Central, Brasil y el sudeste de Asia. Por tanto, este tipo de ruido depende en gran medida de la hora del día y del clima.

En forma general, el ruido atmosférico se presenta como un fenómeno Gaussiano de baja potencia que cubre una banda ancha de frecuencias y con impulsos de alta potencia debidos a descargas eléctricas cercanas. Estas descargas provocan que la distribución Gaussiana de este ruido sufra un esparcimiento.

La **figura 3.1** nos muestra los niveles de ruido medidos para el rango de frecuencias de 0.1 a 10kHz. Estas mediciones se llevaron a cabo tomando en cuenta un promedio de la superficie entera de la tierra, en todas las estaciones y horas del día. La curva sólida muestra los valores mínimos de F_a (factor de ruido) esperados y la curva punteada los valores máximos. Gracias a esta gráfica podemos ver que el ruido atmosférico domina a bajas frecuencias.

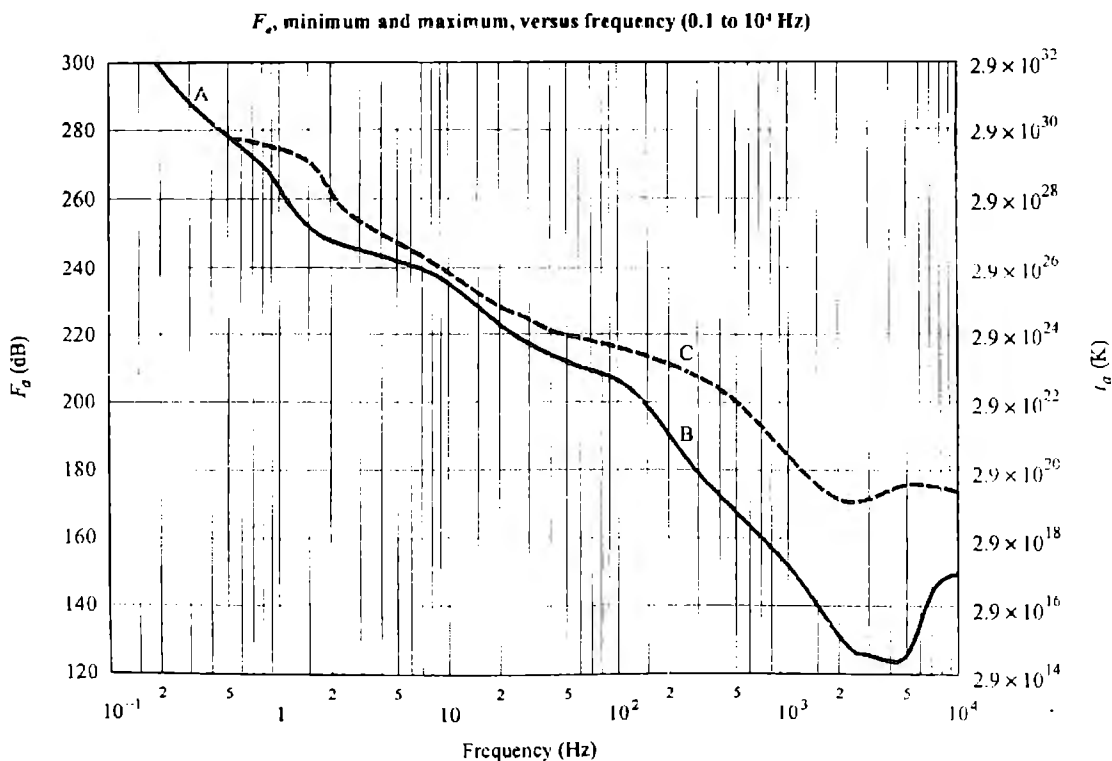


Figura 3.1 La gráfica muestra los niveles de ruido en el rango de 0.1Hz a 10kHz. A: micropulsaciones, B: valor esperado mínimo de ruido atmosférico, C: valor esperado máximo de ruido atmosférico (Tomado de Radio Noise Recommendation ITU-R P.372-8, 2003).

La **Figura 3.2** y la **Figura 3.3** muestran los niveles de los cuatro principales tipos de ruido para diferentes rangos de frecuencias. Podemos notar que a frecuencias mayores el ruido atmosférico va disminuyendo, mientras que otros tipos de ruido aparecen.

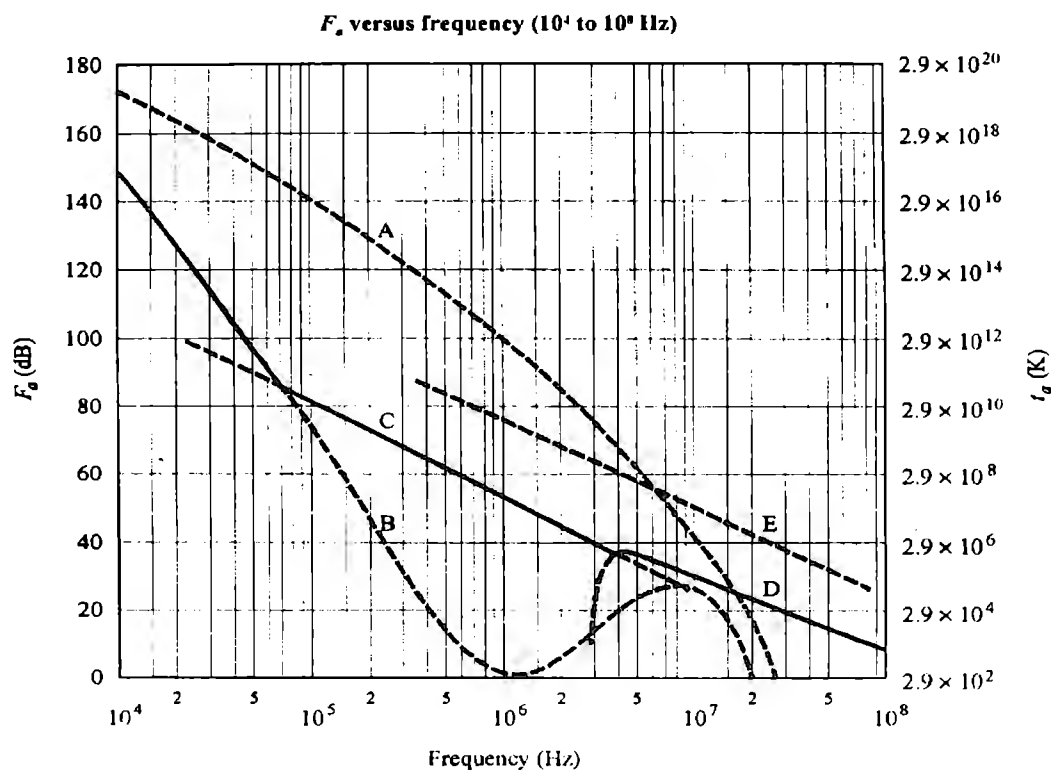


Figura 3.2 La gráfica muestra los niveles de ruido en el rango de 10kHz a 100MHz. A: ruido atmosférico, valor excedido 0.5% del tiempo; B: ruido atmosférico, valor excedido 99.5% del tiempo; C: ruido hecho por el hombre en un sitio de poca actividad humana; D: ruido cósmico; E: ruido hecho por el hombre en una zona de mediana actividad humana (Tomado de Radio Noise Recommendation ITU-R P.372-8, 2003).

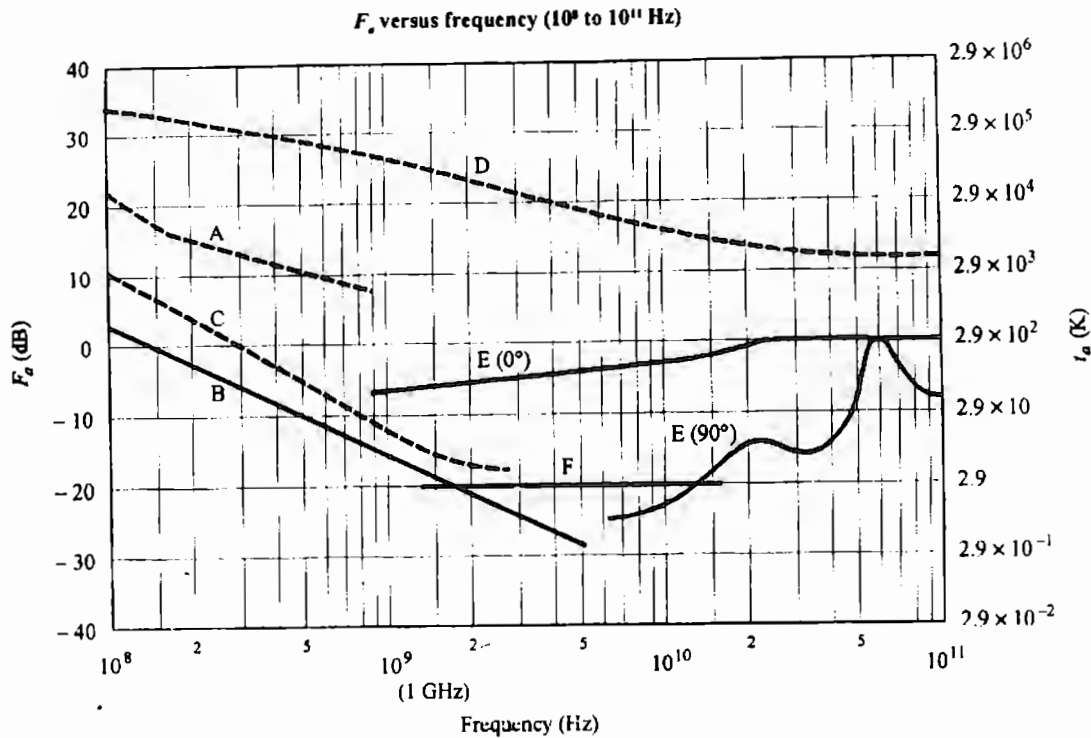


Figura 3.3 La gráfica muestra los niveles de ruido en el rango de 100MHz a 100GHz. A: ruido hecho por el hombre en una zona de mediana actividad humana; B: ruido cósmico; C: ruido cósmico (hacia un centro galáctico con un ancho de haz muy pequeño); D: ruido del Sol (0.5° ancho de haz dirigido al Sol); E: ruido del cielo (debido al vapor de agua y al oxígeno); F: ruido de cuerpo negro, 2.7K (Tomado de Radio Noise Recommendation ITU-R P.372-8, 2003).

El Instituto para Ciencias de la Telecomunicación (ITS) ha desarrollado un modelo de ruido atmosférico (Mastrangelo, 1993). A diferencia de otros modelos de ruido, éste describe la forma de onda del ruido, no sólo sus estadísticas. Esta forma de onda tiene 2 componentes: una secuencia de ruido blanco gaussiano (WGN) aditivo de varianza constante y otra secuencia de ruido impulsivo. El primero corresponde al ruido de fondo del canal y el segundo, a los impulsos generados por las descargas eléctricas.

El modelo de ruido atmosférico se define por la siguiente ecuación:

$$y(n) = v_0 x(n) + v_1 g_1(n) + v_2 a(k) g_2(n) \quad (3.1)$$

Donde

- x(n)= secuencia de la señal de entrada
- y(n)= secuencia de la señal de salida
- g₁(n), g₂(n)= secuencias WGN de varianza unitaria y media cero
- a(k)= función envolvente del disparo
- n= es el índice de tiempo discreto
- k= índice de bloque (n/longitud del bloque)
- v₀= factor de escalamiento de la entrada
- v₁= nivel de ruido de fondo
- v₂= nivel de ruido atmosférico

La señal de entrada $x(n)$ se procesa en bloques uniformes. Para un bloque k , el valor de $a(k)$ es constante. El término v_1g_1 corresponde al ruido de fondo mientras que el término $v_2a(k)g_2(n)$ corresponde al ruido impulsivo. Este modelo utiliza un nivel constante de ruido gaussiano.

La componente de ruido impulsivo lo forman 2 estados. Un estado de disparo y otro de silencio. Durante el primero, los disparos de ruido los forman las descargas eléctricas que llegan a la entrada. Mientras que durante el estado de silencio, no se añade ningún ruido. Las longitudes de cada estado son variables aleatorias obtenidas en base a mediciones, sin embargo, sus distribuciones de probabilidad están bien definidas.

La duración de las descargas siguen la siguiente distribución de probabilidad:

$$f(x) = (C_1 e^{-C_1 x} + C_3) \exp \left[-\frac{C_1}{C_2} (1 - e^{-C_1 x}) - C_3 x \right] \quad (3.2)$$

Se cree que C_3 está asociado a la frecuencia de las descargas individuales y $C_1 e^{-C_2 x}$ se piensa que se debe a los disparos dentro de una misma descarga (Fishman, 1991). Los valores utilizados en el ejemplo de Fishman son $C_1 = 18.62$, $C_2 = 16.62$ y $C_3 = 1.49$. Sin embargo, cada descarga puede tener decenas o centenas de impulsos eléctricos.

3.2 Ruido Cósmico

En la actualidad, se tiene una radiación de fondo de 2.7 K en el universo, producto de lo que se considera fue el origen del universo. Esta radiación de fondo va a ir disminuyendo conforme se vaya expandiendo el universo, hasta llegar a 0 K. Sin embargo, para fines prácticos, esta radiación de fondo se considera constante tanto en lugar como en tiempo.

La radiación de fondo del universo presenta muy poca relevancia en lo que respecta a los sistemas de comunicaciones, sin embargo, la radiación producida por nuestra estrella, el Sol, juega un papel importante en el desempeño de las comunicaciones terrestres y espaciales.

El ruido electromagnético solar se origina en procesos físicos del plasma en la fotosfera y en la corona solar. Los electrones acelerados son la fuente de emisiones de radio, siendo los mecanismos principales la radiación girósincrotrónica del movimiento electrónico alrededor de las líneas de campo magnético o la radiación de plasma estimulado por electrones penetrando en el plasma preexistente. La girofrecuencia del electrón está dada por:

$$v_B = \frac{eB}{2\pi m_e c} \quad (3.3)$$

La frecuencia del plasma está dada por:

$$v_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\pi m_e}} \quad (3.4)$$

en donde e y m_e son la carga y masa del electrón, B la densidad de campo magnético, n_e el número de densidad de los electrones de plasma, y c la velocidad de la luz. Debido a que este ruido se genera en la fotosfera y la corona solares y no es una simple radiación de cuerpo negro, las emisiones pueden ocurrir en un rango distinto de frecuencias y no son estacionarias, ni tienen una distribución Gaussiana.

Los efectos del Sol en VHF son relativamente bajos y pocos sistemas de comunicación son afectados a menos que tengan un extenso ancho de banda o un gran destello solar esté ocurriendo mientras el Sol esté en el haz de la antena. Sin embargo, la radiación de fondo del Sol se incrementa con la frecuencia. A los 4 GHz la emisión de radio solar es hasta 20 dB en exceso de la señal típica de radio recibida por señales de televisión de transmisión satelital.

En la siguiente gráfica se muestran los días cercanos al equinoccio en los que la interferencia solar, debida solamente por la proximidad orbital (conjunción), es maximizada por satélites geosíncronos. El tiempo del año varía de acuerdo con la latitud de la estación terrestre observadora. La interferencia puede ocurrir hasta una semana después en cualquier sitio donde se presentase el efecto máximo. La interferencia puede durar unos cuantos minutos hasta una hora, dependiendo del ancho de haz de la antena receptora. La hora del día en el cual la interferencia de contacto directo con el Sol ocurra depende en la posición relativa del satélite, siendo que los satélites que se encuentren en el lado occidental sufrirán de interferencia en la tarde, mientras que los del lado oriental lo sufrirán en la mañana.

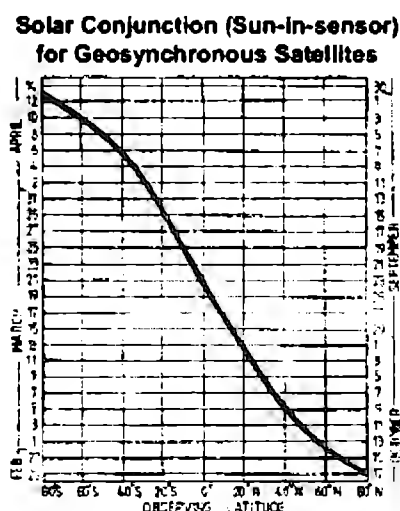


Figura 3.4 Conjunción Solar para Satélites Geosíncronos (Tomado de LANZEROTTI, L., *Solar and Solar radio effects on technologies*; Bell Laboratories, Lucent Technologies; 2002).

Las pulsaciones solares con suficiente fuerza para interferir con las observaciones de radar y comunicaciones satelitales generalmente ocurren durante las llamaradas solares. Para causar tal interferencia, el Sol debe ser geoméricamente visible por el radar o receptor satelital, y en línea con su haz de operación durante la pulsación solar. La pulsación solar debe ser cercana a la misma frecuencia y mayor en intensidad de salida que la señal recibida por el radar o el satélite para causar interferencia, siendo que esta interferencia sólo afecta al retorno de radar y transmisión del satélite a tierra. A tal interferencia se le conoce como *desvanecimiento solar*.

La razón señal a ruido (SNR) es la mejor forma de medir qué tan bien una estación en tierra recibe una señal satelital. Entre mayor sea la señal comparada con el nivel de ruido, mejor será la recepción. El decremento en la SNR producida por un pulso solar en un enlace de comunicación satelital está dada por:

$$\Delta SNR(dB) = 10 \log_{10} \left[1.0 + \frac{S_b G c^2}{4\pi f^2 k T_s} \right] \quad (3.5)$$

en donde S_b es el componente de pulso solar, G la ganancia de la antena, c la velocidad de la luz, f la frecuencia, k la constante de Boltzmann y T_s la temperatura de ruido del sistema.

Las frecuencias de salida de las pulsaciones solares están en lo que corresponde a VHF (30 a 300 MHz), UHF (0.3 a 3.0 GHz) y SHF (3 a 30 GHz), usándose para la medición de potencia las *unidades de flujo solar SFU* ($1 \text{ SFU} = 10^{-22} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$).

Durante cuarenta años se han recopilado datos acerca de las pulsaciones de radio solar, siendo procesadas y reformateadas para análisis estadísticos. A continuación se muestran histogramas del número de eventos por día por frecuencia en el periodo 1960 – 1999 y por los tres ciclos solares (ciclos 20, 21 y 22). En las gráficas sólo hay pulsaciones con intensidad mayor a 1000 SFU.

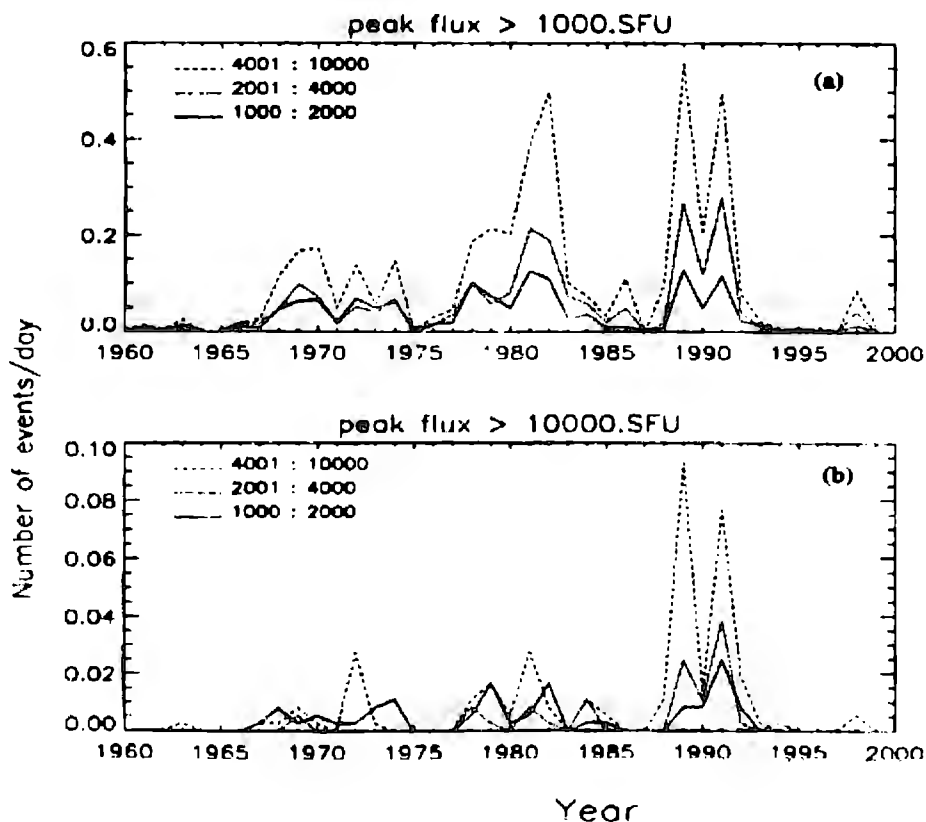


Figura 3.5 Número total de eventos anuales como una función del tiempo en años (a) para flujos pico > 1000 SFU y (b) para flujos pico > 10000 SFU. Los rangos de frecuencias son 1-2, 2-4 y 4-120 GHz (Tomado de LANZEROTTI, L., *Solar and Solar radio effects on technologies*; Bell Laboratories, Lucent Technologies; 2002).

Sin embargo, este modelo no se acomoda a las necesidades de nuestro simulador ya que sólo nos da una relación señal a ruido, cuando lo que se quiere es una señal de voltaje en el dominio del tiempo. Es por eso que es necesaria encontrar otra relación que involucre al ruido solar. A continuación se muestra otro modelo que se ajusta mejor a nuestro proyecto.

Una antena receptora en un sistema de comunicaciones inalámbrico inmersa en un medio isótropo con flujo solar F tiene una potencia recibida dada por:

$$P = \frac{GB\lambda^2 F}{8\pi} \quad (3.6)$$

en donde P es la potencia recibida del ruido electromagnético provocado por el sol, G la ganancia de la antena, B el ancho de banda, λ la longitud de onda de la portadora y F el flujo solar equivalente (en unidades del SI).

El ruido electromagnético solar tiene un comportamiento muy similar al ruido térmico. Se puede definir una temperatura equivalente en la cual el ruido térmico, a dicha temperatura, igualaría al ruido solar, i.e.

$$kTB = \frac{GB\lambda^2 F}{8\pi} \quad (3.7) \text{ y } (3.8)$$
$$T = \frac{G\lambda^2 F}{8\pi k}$$

siendo k la constante de Stefan Boltzmann. Al igual que el ruido térmico que se verá a continuación, el ruido solar es de naturaleza gaussiana, con media cero y varianza que es función de la temperatura:

$$\sigma^2 = 4kTBR \quad (3.9)$$

3.3 Ruido térmico

3.3.1 Introducción

El ruido térmico está asociado con el movimiento aleatorio de partículas en un ambiente libre de influencias externas. Por ejemplo, la presión del aire de una habitación cualquiera la da la suma de los efectos de incontables moléculas de aire que se mueven en forma caótica en todas direcciones. Las moléculas están en movimiento turbulento continuo, chocando y rebotando entre ellas. Entonces, cuando se habla de la "presión" en un punto se refiere de hecho a la fuerza resultante por unidad de área de todas las moléculas que chocan con una superficie localizada en el punto en cuestión. Esta fuerza fluctúa o varía en el tiempo según menos o más moléculas choquen con el obstáculo de tiempo en tiempo. Como el número de moléculas implicado es normalmente muy alto para las superficies de tamaño normal, la fuerza promedio en el tiempo permanece constante en tanto que el promedio de energía molecular continúe constante. Empero, la fuerza instantánea, como una función del tiempo, variará en forma aleatoria alrededor de este valor promedio. Aumentando la temperatura se incrementa la energía molecular y la presión promedio se eleva, e igualmente las fluctuaciones alrededor del promedio.

La termodinámica y la teoría cinética del calor aplicada a este problema indican que para un gas ideal (aquel en el cual las fuerzas intermoleculares pueden despreciarse) la energía cinética promedio del movimiento de las partículas en cualquier dirección es $kT/2$, donde $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K es la constante de Boltzmann y T es la temperatura absoluta en grados Kelvin. Por esta razón se ha encontrado que el ruido térmico cuadrático promedio es proporcional a kT .

En el trabajo eléctrico se encuentran fluctuaciones similares que se introducen térmicamente. Los conductores contienen una gran cantidad de electrones "libres" y de iones fuertemente enlazados por las fuerzas moleculares. Sin embargo, los iones vibran en forma aleatoria alrededor de sus posiciones normales (promedio); siendo estas vibraciones una función de la temperatura. Las colisiones entre los electrones libres y los iones que están vibrando en forma continua se producen normalmente, por lo que hay una continua transferencia de energía entre los electrones y los iones. Esto es el origen de la resistencia del conductor. Los electrones que se mueven libremente constituyen una corriente, que tiene un valor promedio de cero para grandes periodos de tiempo, puesto que en promedio se mueven tantos electrones en un sentido como en otro. (Se trata de un caso análogo al de la presión que se ha mencionado arriba, en el cual la velocidad molecular promedio es cero, aunque exista un movimiento caótico.) Se presentan, sin embargo, fluctuaciones aleatorias alrededor de este promedio, y de hecho se verá que las fluctuaciones cuadráticas medias de corriente son proporcionales a kT .

Ambos casos anotados —las fluctuaciones de presión y de corriente— se refieren al movimiento caótico de partículas (moléculas o electrones) que poseen energía térmica. No hay fuerzas presentes que "organicen" este movimiento en una dirección preferente. Ambos casos pueden por lo tanto tratarse por medio del equilibrio termodinámico, con las fluctuaciones cuadráticas medias encontradas proporcionales a kT .

3.3.2 Caracterización del ruido térmico

El ruido térmico fue estudiado profundamente primero por J. B. Johnson, de Bell Laboratories, en 1928. Sus experimentos, junto con los estudios teóricos complementarios de H. Nyquist, demostraron que un resistor metálico podría considerarse como la fuente de fluctuaciones espontáneas de voltaje con un valor cuadrático medio

$$\overline{v^2} = 4kTRB \quad (3.10)$$

donde T es la temperatura del resistor en grados Kelvin, R es la resistencia de éste en ohms, k la constante de Boltzmann ya mencionada (1.38×10^{-23} J/K) y B es un ancho de banda arbitrario. Johnson fue capaz de medir el valor de k en forma muy precisa usando esta ecuación, y así demostró su validez. También demostró que $\overline{v^2}$ es proporcional a la temperatura.

Esta expresión para el ruido térmico cuadrático medio debido al resistor R implica que el ruido es blanco. Esta ecuación es válida hasta frecuencias extremadamente elevadas del orden de 10^{13} Hz. En estas frecuencias tan elevadas se establecen los efectos mecánicos cuánticos. (Esto supone, por supuesto, que R es independiente de la frecuencia en este inmenso intervalo.)

Para el ruido blanco $\overline{v^2}$ puede escribirse $n_0 B$ donde $n_0/2$ es la densidad espectral del ruido en volts^2 . A partir de la ecuación (3.10) la densidad espectral del ruido térmico en voltaje está entonces dada por la simple expresión

$$G_v(f) = \frac{n_0}{2} = \frac{\overline{v^2}}{2B} = 2kTR \quad (3.11)$$

La deducción original de Nyquist de la ecuación (3.10) está basada en un razonamiento termodinámico, suponiendo equilibrio térmico. El mecanismo real de la generación del ruido térmico —que se supone debido a la interacción aleatoria entre los electrones de conducción y los iones de un conductor metálico— no es necesario para la deducción. Aunque esto pueda parecer desconcertante en un comienzo, es realmente una ventaja disfrazada. Usando el mismo razonamiento termodinámico puede demostrarse que cualquier dispositivo pasivo lineal, ya sea mecánico, electromecánico, micrófonos, antenas, etc, tiene asociado un ruido térmico de alguna forma o de otra. En algunos casos esto puede deberse a la agitación aleatoria de las moléculas del aire; en otros, a efectos eléctricos aleatorios presentes en la ionosfera y en la atmósfera, etc. Esto se debe a que el término $\frac{1}{2} kT$ se presenta generalmente en termodinámica como la energía asociada con cualquier modo de oscilación (como cuando la temperatura aumenta, las moléculas de gas se mueven más rápidamente, los iones vibran en forma más violenta en la estructura cristalina, etc). Esto fue la base de la derivación de Nyquist.

Una representación de la ecuación (3.10) en un modelo de voltaje se muestra en la **figura 3.6(a)**. Se supone que R está libre de ruido, con el efecto del ruido concentrado en la fuente de voltaje de ruido que se muestra. Una aplicación del teorema de Norton da el equivalente de fuente de corriente de la **figura 3.6(b)**. (Como $i = v/R$, $\overline{i^2} = \overline{v^2} / R^2 = 4kTGB$; $G = 1/R$.)

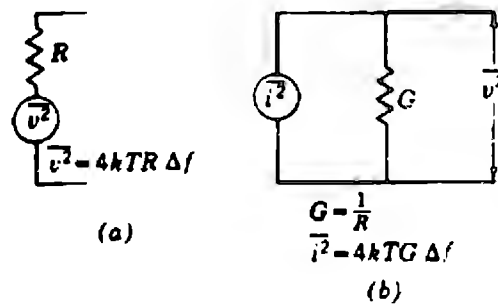


Figura 3.6 Modelo de circuitos de ruido térmico. (a) Modelo de voltaje (b) Modelo de corriente (Tomado de Schwartz, Misha; *Transmisión de Información, Modulación y Ruido*; 3ª ed; Mc Graw Hill; 1983).

Puede usarse cualquier modelo, aunque el de la fuente de corriente es con frecuencia más conveniente, especialmente cuando se calculan los voltajes de ruido a través de elementos en paralelo. Es notable que, el voltaje de ruido rms es proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia y a la raíz cuadrada del ancho de banda.

Si la temperatura aumenta, el valor de la resistencia usada se refiere a la nueva temperatura, como T. Como la deducción de la ecuación (3.10) depende del equilibrio térmico, la ecuación se aplica solamente después de que se ha alcanzado un estado estable de temperatura, no durante el periodo de calentamiento o enfriamiento.

Resumiendo, como ya se ha venido demostrando, una resistencia R a temperatura T es la fuente de un voltaje fluctuante (ruido) con un valor cuadrático medio

$$\overline{v^2} = 4kTRB \quad (3.12)$$

y una densidad espectral de voltaje

$$G_v(f) = \frac{n_0}{2} \equiv 2kTR \quad (3.13)$$

El valor cuadrático medio correspondiente y la densidad espectral para el modelo de la fuente de corriente pueden escribirse, respectivamente,

$$\overline{i^2} = 4kTGB \quad (3.14)$$

$$G_i(f) = 2kTG \equiv \frac{n_0}{2} \quad (3.15)$$

Como antes, B representa el ancho de banda de ruido equivalente del instrumento de medición o circuito utilizado para medir estas cantidades.

Dependiendo de si se trata con el voltaje o la corriente de una red se usan las formas de densidad espectrales de las ecuaciones (3.13) o (3.15). El mismo símbolo n se usa aquí para ambos casos.

Sin embargo, la distinción entre densidad espectral de voltaje o corriente desaparece por completo cuando se analiza la potencia real generada. La potencia generada depende de la impedancia de carga, lo cual es cierto para cualquier fuente de ruido. En particular, se transfiere la máxima potencia cuando la impedancia de carga está adaptada a la impedancia del generador, lo que en este caso es justamente R en la **figura 3.6(a)**. La máxima potencia disponible, en condiciones de adaptación, se llama la potencia disponible. Para la fuente de ruido de la **figura 3.6(a)**, la potencia disponible en un ancho de banda de B hertz es

$$N = \frac{\overline{v^2}}{4R} = kTB = n_0B \quad (3.16)$$

y la densidad espectral de potencia correspondiente en watts/Hz es justamente

$$G_n(f) = \frac{n_0}{2} = \frac{kT}{2} \quad (3.17)$$

y $n_0 = kT$. Ésta es, por supuesto, la expresión escrita anteriormente.

Se ha encontrado que la distribución de la energía térmica de un cuerpo es exactamente la de *la radiación del cuerpo negro*: la energía radiante emanada de muchas fuentes calentadas a T grados Kelvin (un horno, el Sol, las estrellas, la atmósfera, etc.). Es esta radiación del cuerpo negro, producida por el Sol, las estrellas, las fuentes de radiación en la atmósfera terrestre, etc., la que se presenta como ruido térmico en la entrada de una antena de cualquier receptor de radio de alta frecuencia.

3.4 Ruido provocado por el hombre

3.4.1 Introducción

El problema de las interferencias entre equipos que usan o generan energía de RF durante su funcionamiento, debe contemplarse en una doble dirección.

Por un lado están las perturbaciones radioeléctricas que un equipo eléctrico o electrónico (que originalmente no estaba destinado a generar RF) genera en instalaciones vecinas; por el otro, se tiene la perturbación en el funcionamiento de algún equipo eléctrico o electrónico como consecuencia de un transmisor de RF perfectamente homologado.

En general, pueden darse estos dos casos de interacción perjudicial (o incompatibilidad electromagnética, como es su término técnico EMI) y su estudio es igualmente importante.

Es un hecho que ante la aparición masiva de aparatos electrónicos digitales se ha registrado un aumento sensible en el nivel de interferencias y de ruido eléctrico o de origen humano; por otro lado, no hay soluciones totales para la interferencia y el ruido eléctrico, pero aun así es posible luchar contra los peores efectos de los mismos por medio de algunos recursos. De lo anterior viene la importancia de desarrollar un modelo que permitiera de alguna manera predecir los efectos que tendrá este ruido en las comunicaciones inalámbrica, y de esta forma tomar medidas preventivas.

Se debe agregar, además, que las perturbaciones radioeléctricas de origen humano pueden ser agrupadas en otras dos subcategorías, de acuerdo a la distribución de su energía de manera continua sobre el espectro radioeléctrico:

- *Espectro coherente*- También conocidas como interferencias, se caracterizan porque la señal perturbadora es de naturaleza discreta y puede localizarse en una o mas frecuencias de un receptor selectivo; algunos ejemplos típicos de esto son las señales generadas por el barrido horizontal de televisores y pantallas de computadoras, los procedentes de la señal de video de la computadora, los que se originan en los circuitos de control de los motores, los convertidores CC/CC, etc.
- *Espectro difuso*- Denominado también "ruido eléctrico". Es de naturaleza aleatoria (no se le puede asignar una frecuencia característica), además de que la señal cubre en forma continua extensas gamas del espectro con niveles de intensidad que dependen poco (o nada) de la frecuencia; ejemplos de esto son el producido por una lámpara de descarga gaseosa, el de un arco de soldadura eléctrica, los zumbidos generados por las válvulas de autodescarga de líneas eléctricas de alta tensión, etc

Por otro lado, el ruido que alcanza la etapa de entrada de un receptor (y que determina el nivel mínimo de señal detectable), puede llegarle por dos vías: por *radiación* directa desde el dispositivo perturbador y captación desde la antena del receptor, o por *conducción* a través de la red eléctrica (que a su vez puede actuar como antena, tal y como se dijo anteriormente).

Se debe aclarar que la radiación directa de la señal es posible sólo si la longitud de las conexiones por las que circula la señal perturbadora es suficiente para crear un campo electromagnético de bastante magnitud y si, además, estas conexiones no están encerradas en un blindaje electroestático.

La perturbación conducida hacia el exterior de cualquier dispositivo capaz de generar señales de este tipo lo es, en gran medida, a través de los cables de alimentación.

Para evitar la propagación de señales perturbadoras conducidas por la red, las normas de compatibilidad electromagnética (CE) de los países desarrollados obligan a los fabricantes a instalar filtros eficaces contra la conducción parásita a través de los cables.

Sin embargo, al no existir un filtro de atenuación infinita, todas las normas de CE aceptan cierta cantidad de ruido eléctrico.

El ruido hecho por el hombre existe en prácticamente todos los ambientes de radio móvil. Para analizar el rendimiento de un sistema de radio-transmisión en presencia de este ruido, se pueden realizar pruebas en sitios altamente ruidosos o a través de un simulador.

Un simulador ofrece varias ventajas significativas:

- Puesto que el ruido hecho por el hombre es un evento no estacionario, se tienen limitaciones en el periodo durante el cual pueden efectuarse las pruebas; un simulador, en cambio, dan lugar a un proceso estacionario, eliminando la limitación anterior
- Las pruebas hechas con un simulador ahorran tiempo y dinero desde el momento que dejan de ser necesarias las pruebas físicas
- Finalmente, un simulador ofrece la posibilidad de repetir las pruebas tantas veces como sea necesario, con la finalidad de contemplar todos los escenarios de interés

En los simuladores más simples de ruido eléctrico, la contribución del ruido Gaussiano a la degradación de la señal transmitida se obtiene simplemente agregando ruido con distribución de Gauss, ancho de banda variable y potencia promedio predeterminada.

Sin embargo, para la mayoría de los ambientes el ruido impulsivo emitido por dispositivos eléctricos debe ser tomado en cuenta.

A diferencia del ruido Gaussiano, el ruido impulsivo hecho por el hombre es un proceso estadístico complejo, que tiene muchos parámetros, los cuales cambian de un lugar a otro, por lo que se requiere un método de predicción bastante flexible.

3.4.2 Naturaleza física del ruido impulsivo

Las características del ruido hecho por el hombre son diferentes a las del ruido de origen "natural", principalmente puesto que el primero es de naturaleza impulsiva, además de que el nivel medio de este ruido cambia en el tiempo debido a cambios en el número y tipo de fuentes de ruido artificial en el ambiente.

El ruido impulsivo se debe a pulsos de corriente ricos en armónicas que se originan en dispositivos eléctricos tales como los sistemas de ignición de los automóviles y las líneas de energía eléctrica de alta tensión.

Las características frecuenciales de la energía electromagnética radiada depende del ancho de los pulsos, la construcción y diseño del dispositivo que las genera y el trayecto de propagación que sigue la señal de interferencia. Así, a diferencia de los impulsos ideales, la amplitud del espectro del ruido impulsivo varía de manera aleatoria con la frecuencia.

En frecuencias mucho menores que el recíproco del ancho de pulso, la amplitud del espectro puede considerarse uniforme y puede aproximarse al espectro de un impulso ideal con área similar (V/Hz); así, para un ruido impulsivo uniforme, con una amplitud S obtenida en un analizador de espectros, se puede asumir que tuvo como origen un impulso ideal con área igual a S , en V/Hz.

De lo anterior, llegamos a que el ruido impulsivo en un receptor RF de banda angosta (un analizador de espectros, bajo ciertas condiciones de operación) puede ser modelado con un tren impulsivo ideal de amplitud espectral aleatoria S y una ocurrencia determinada:

$$f(t) = \sum S_n \delta(t - \rho_n) \quad (3.18)$$

Se ha encontrado que el ruido hecho por el hombre consta de dos partes: una componente Gaussiana de fondo de bajo nivel, de naturaleza térmica principalmente, sobre la cual se monta una componente impulsiva de alto nivel, correspondiente a los impulsos; si se intentara computar el APD del proceso total, se perdería la componente impulsiva (que es la que realmente interesa), puesto que está presente sólo una pequeña parte del tiempo total de medición.

En realidad, la componente de fondo puede considerarse despreciable con respecto a las amplitudes de los impulsos; observamos en las gráficas que la componente de fondo sólo se ubica aproximadamente 5 dB por encima de la referencia de $1 \mu\text{V/m}$, mientras que las amplitudes de los impulsos tienen un valor promedio de aprox. 25 dB por encima de la misma referencia (**figura 3.7**).

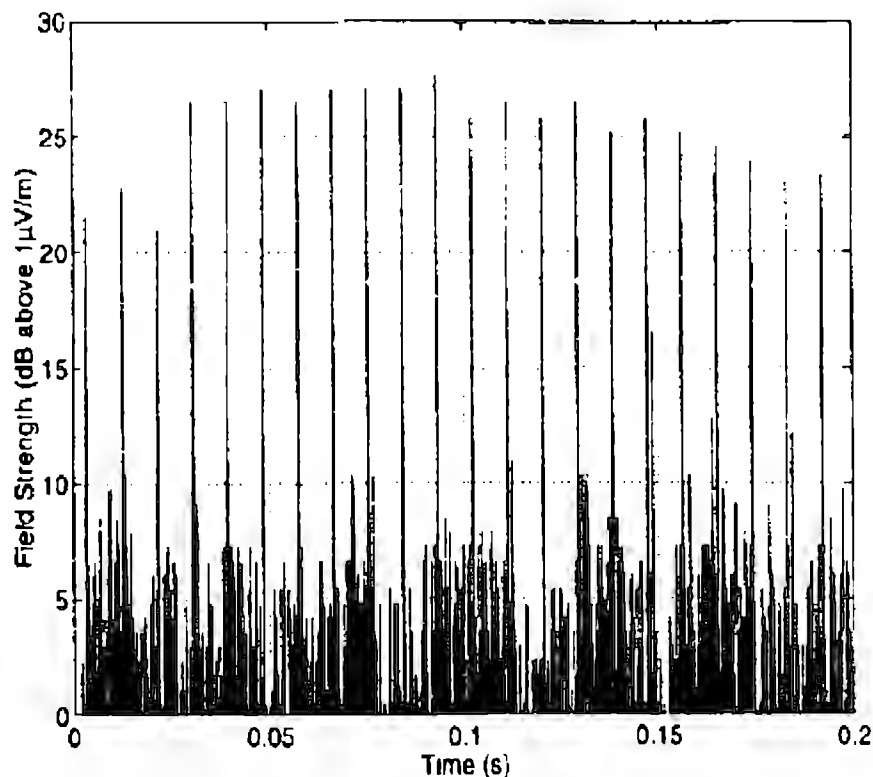


Figura 3.7 Ruido impulsivo en el dominio del tiempo (Tomado de Wilfred R. Lauber and Jean M. Bertrand, "Statistics of Motor Vehicle Ignition Noise at VHF/UHF", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 41, 1999).

3.4.3 Parámetros que es necesario conocer

- **APD (Distribución de Probabilidad de la Amplitud)** – Típicamente es presentada en términos de la potencia de ruido recibido en dB en relación con el térmico

($dB(k \cdot T_o \cdot B)$). Esta distribución se asemeja a una Rayleigh (de gran interés en sistemas de telefonía celular, por ejemplo) con bajos valores de probabilidad debido a la naturaleza impulsiva del ruido, que causa excursiones ocasionales de potencia pico.

- **ACR (Tasa de Cruce Promedio)** – Presenta información sobre el número promedio de veces que una amplitud de la envolvente alcanza un valor particular durante un intervalo de medición. Si se considera que cada nivel positivo que cruza ese valor representa un impulso, entonces se hace uso de la representación NAD (Noise-to-Amplitude Distribution), donde se presentan el número de impulsos por segundo que exceden cierto nivel de referencia.
- **PSD (Distribución Espacial de los Pulsos)**- Describe la probabilidad de que el espaciamiento temporal de un pulso dado sea excedido. Es posible predecir valores típicos para el espaciamiento de pulsos en el proceso de ignición de un motor, considerando que éste produce un pulso por cada dos revoluciones; así, se puede utilizar una sencilla fórmula para calcular la tasa de repetición de pulsos (PRR):

$$PRR = \left(\frac{NCYL \times RPM}{2} \right) / 60 \quad (3.13)$$

Donde NCYL es el número de cilindros del motor y RPM, las revoluciones por minuto del mismo. El espacio entre pulsos (PS) es el inverso del PRR. Puesto que el rango de posibles velocidades del motor puede ser estimado, se pueden hacer predicciones verosímiles del PS para organizarlo estadísticamente

- **PDD (Distribución de Duración de Pulso)**- Es similar al anterior, salvo que la probabilidad de que la duración de un pulso dado sea superada se modela

3.4.4 Una posible implementación

El simulador más sencillo de este tipo consiste en un generador de tren de pulsos con distribución de Poisson y una tasa de ocurrencia que se pueda ajustar (**figura 3.8**).

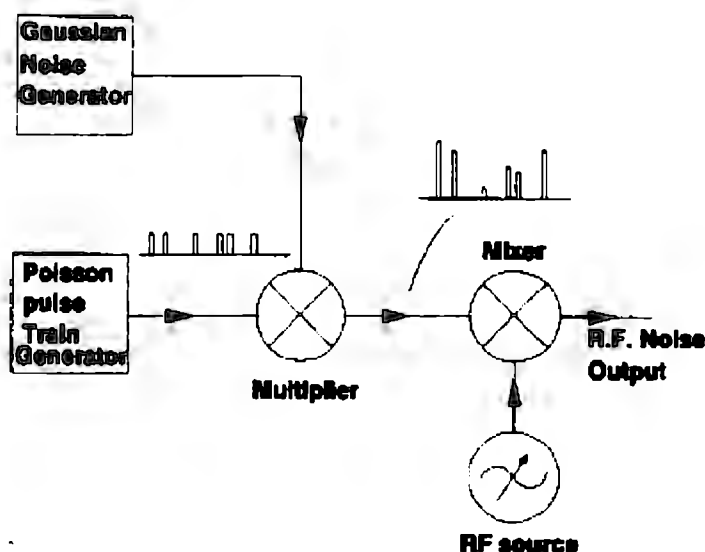


Figura 3.8 Implementación del ruido impulsivo (Tomado de Wilfred R. Lauber and Jean M. Bertrand, "Statistics of Motor Vehicle Ignition Noise at VHF/UHF", IEEE Transactions on Electromagnetic Compability, Vol. 41, 1999).

La amplitud de los impulsos es multiplicada por números aleatorios con otra distribución estadística determinada (en realidad, puede utilizarse cualquier distribución, y comúnmente se toma la distribución Normal por cuestiones de simplicidad).

Existen gran cantidad de publicaciones sobre el ruido hecho por el hombre en la IEEE; desafortunadamente, la mayoría de esta información no especifica los parámetros necesarios para una simulación precisa y una reproducción confiable del ruido impulsivo medido; sin embargo, es posible encontrar algunos registros de pruebas que se realizaron en determinados lugares y con circunstancias específicas. Basándose en los tratamientos estadísticos que se les da a los resultados experimentales obtenidos, podemos plantear parámetros aceptables para nuestro modelo.

Es de capital importancia mencionar que la capacidad de nuestro modelo para predecir con exactitud los niveles de ruido esperados guarda estrecha relación con la determinación de estos parámetros; es importante saber también que los parámetros que tomamos corresponden a registros de mediciones realizadas en ciudades como Ottawa, Tokio y Los Ángeles hace ya algo de tiempo (20 años en el caso de Los Ángeles), por lo que la validez de nuestros datos debe someterse a un estudio por separado.

De acuerdo a las publicaciones encontradas que hacen referencia de forma más o menos concreta a estimaciones de los parámetros estadísticos que hacen falta para poder realizar un modelo de ruido "hecho por el hombre" aceptable, se pueden asignar valores específicos a nuestras distribuciones de amplitud, espaciamiento de pulsos y duración de los mismos, los cuales por cierto no dejan de ser *propuestas* porque su validez está sujeta a varias condiciones.

Algunas de las condiciones a tomar en cuenta en el proceso de predicción son, por ejemplo:

- La hora del día a la cual desea hacerse la estimación, lo cual tiene una relación directa con el nivel de ruido (figura 3.9).
- La densidad poblacional del lugar, la cual lleva a muchos autores a clasificar las áreas como altamente urbanas (grandes ciudades), residenciales, suburbanas (zonas externas de la ciudad) o rurales, y que tiene repercusión en la varianza de la distribución de probabilidad de amplitud (y en el nivel de ruido total, por supuesto); desafortunadamente, no se logra observar un comportamiento consistente entre el nivel de ruido y la densidad poblacional, tal como se puede apreciar en la figura 3.10, por lo que decidimos descartar este parámetro de nuestro modelo

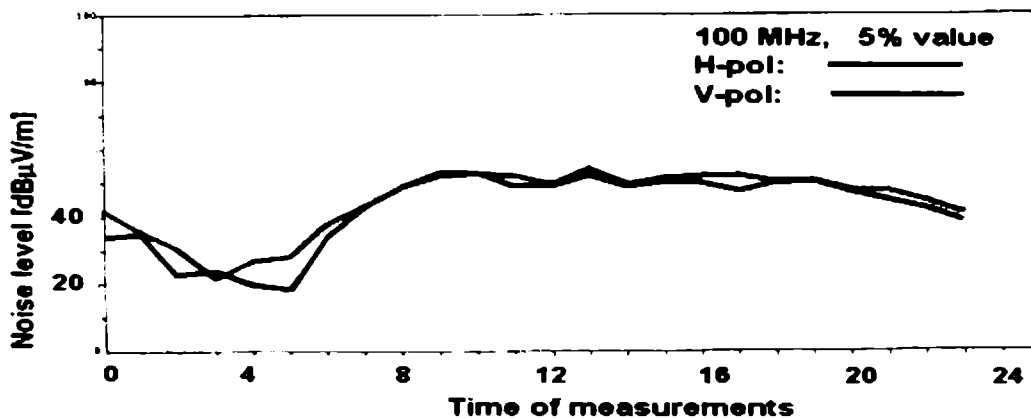


Figura 3.9 Nivel del ruido impulsivo a diferentes horas del día (Tomado de Wilfred R. Lauber and Jean M. Bertrand, "Statistics of Motor Vehicle Ignition Noise at VHF/UHF", IEEE Transactions on Electromagnetic Compability, Vol. 41, 1999).

Es relevante mencionar que la recabación de información sobre los parámetros del modelo ha llegado a ser bastante frustrante puesto que, si bien es cierto que existe bastante material concerniente al ruido de ignición, son realmente pocos los artículos que estudian a fondo las características estadísticas del mismo; esto pudiera considerarse lógico, dado el carácter aleatorio del proceso y su complejidad implícita.

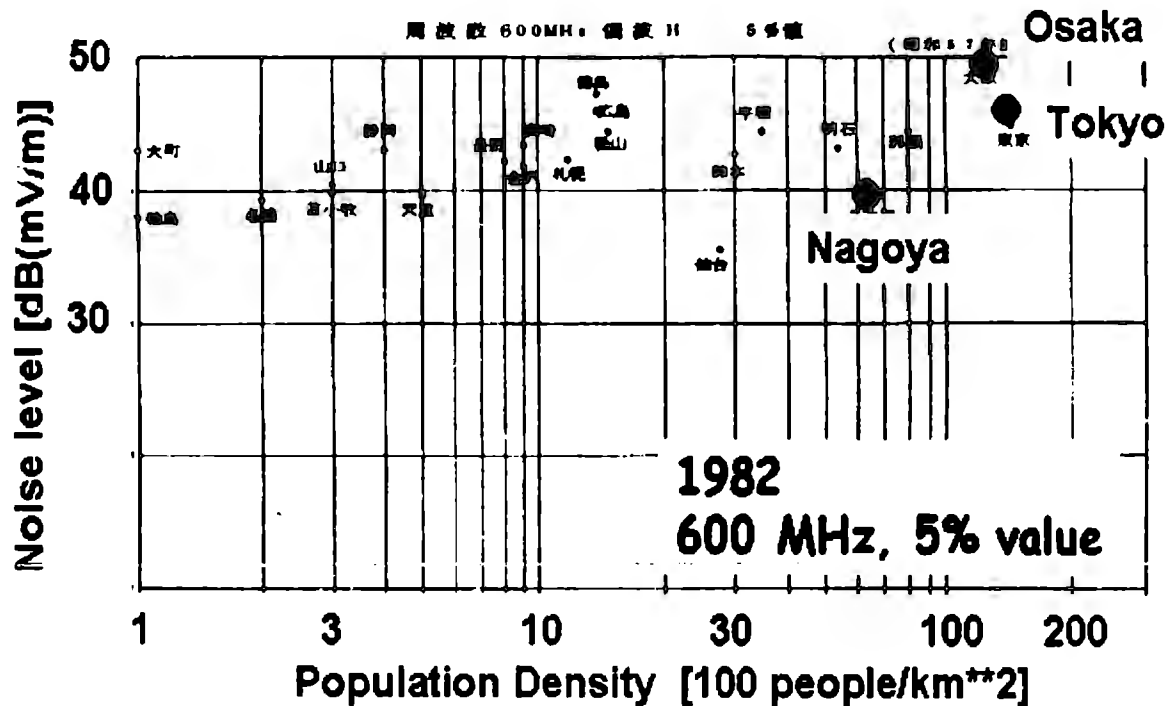


Figura 3.10 Nivel del ruido impulsivo para entornos con diferente densidad de población (Tomado de Wilfred R. Lauber and Jean M. Bertrand, "Statistics of Motor Vehicle Ignition Noise at VHF/UHF", IEEE Transactions on Electromagnetic Compability, Vol. 41, 1999).

Además, se observa que la gran totalidad de las mediciones documentadas del ruido hecho por el hombre se han hecho en frecuencias por debajo de 1 GHz, siempre en exteriores y hace ya bastante tiempo (dos décadas); de lo anterior, podemos inferir que sería una importante contribución el documentar mediciones arriba de 1 GHz, tanto en interiores como en exteriores.

APD

Si bien es cierto que la distribución probabilística que siguen las amplitudes del ruido hecho por el hombre obedece a una Normal, resulta difícil llegar a conocer con exactitud sus valores estadísticos correspondientes. Remitiéndonos a las gráficas mostradas por Lauber y Bertrand en su publicación, podemos inferir los valores pico y medio de la amplitud. En la **figura 3.11** se muestra lo anterior, donde se localizan los puntos correspondientes después de someter la curva a un tratamiento estadístico; es importante observar que todos los valores están referidos con respecto al valor RMS. Así, observamos una media de -15 dB con respecto al valor RMS y un valor pico de amplitud de 40 dB por encima del RMS.

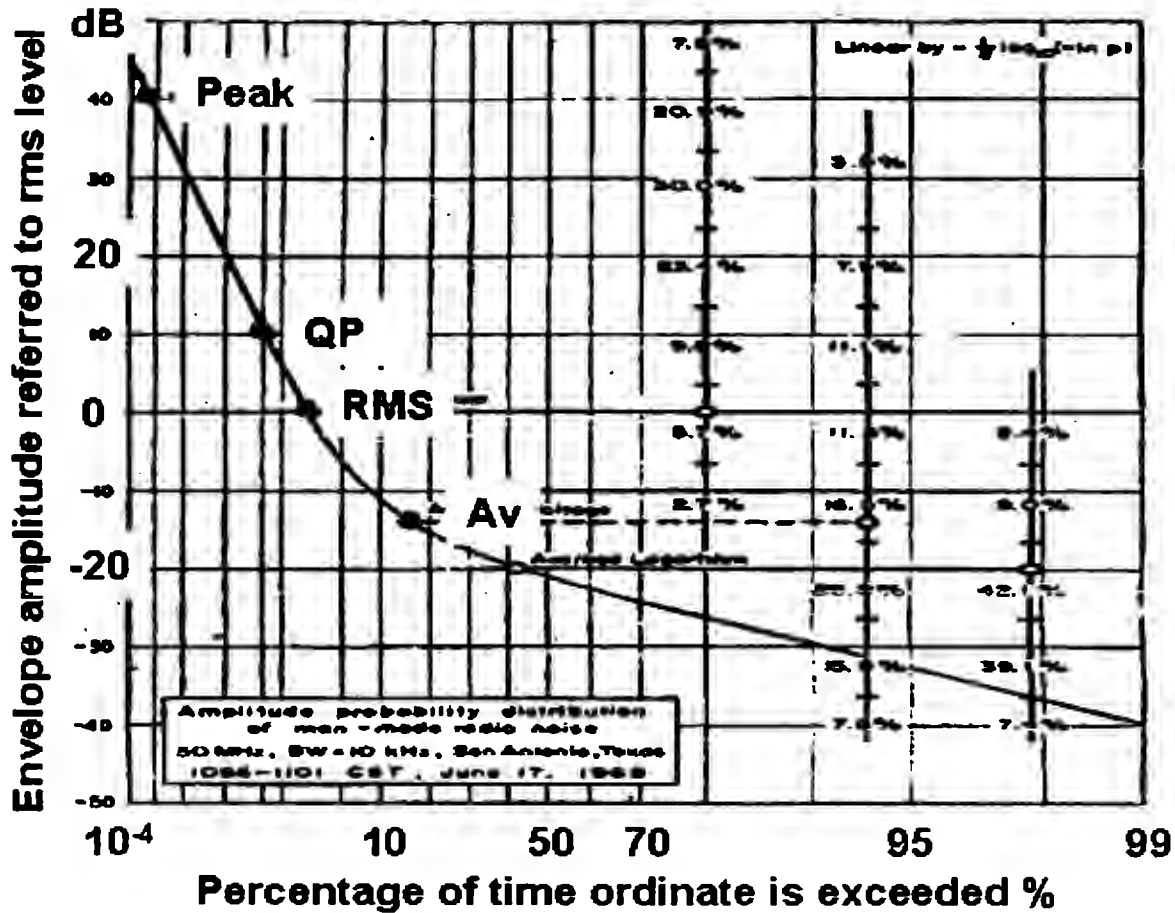


Figura 3.11 Amplitud de la envolvente del ruido impulsivo referida al nivel rms (Tomado de Wilfred R. Lauber and Jean M. Bertrand, "Statistics of Motor Vehicle Ignition Noise at VHF/UHF", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 41, 1999).

PSD

Como ya se dijo, es posible predecir valores típicos para el espaciamiento entre pulsos de acuerdo al número de cilindros y la velocidad del motor; conociendo un rango probable de velocidades de motor, se pueden generar estadísticas del proceso.

En la **figura 3.12** se muestra la densidad de probabilidad obtenida por Lauber y Bertrand; aquí, la distribución tiende a presentar su pico alrededor de 10 ms y cae significativamente arriba de este valor, llegando a ser despreciable arriba de 15 ms. Los autores mencionan que los valores de la media para esta distribución son bastante consistentes en un rango de frecuencias de aprox. 500 MHz, quedando entre 8 y 9 ms.

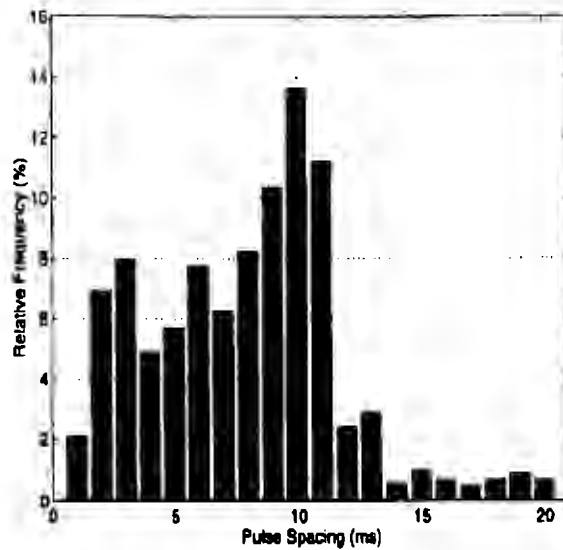


Figura 3.12 Distribución de probabilidad del espaciado entre pulsos (Tomado de Wilfred R. Lauber and Jean M. Bertrand, "Statistics of Motor Vehicle Ignition Noise at VHF/UHF", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 41, 1999).

PDD

En cuanto a la duración de pulsos, no se tienen parámetros bien definidos, puesto que el trazo de su distribución de probabilidad tiene una estrecha relación con el protocolo de medición que se este siguiendo; Lauber y Bertrand. obtuvieron valores de duración de pulsos en múltiplos de 50 μ s; por simplicidad, fijaremos ese valor en nuestra simulación.

Finalmente, si nos remitimos a las gráficas presentes en las fuentes con relación a los niveles de ruido hecho por el hombre (o factor de ruido, que es igualmente descriptivo) con relación a la frecuencia (**figura 3.13**), podemos descubrir detalles interesantes: primero, que el decaimiento es mayor que 20 dB/década, segundo que pareciera que para frecuencias mayores de 1 GHz este ruido no es tan significativo y tercero que las curvas correspondientes a los distintos entornos (urbano, residencial, rural) tienen una correlación bastante alta, llegando a parecer que se trata exactamente de una misma curva desplazada hacia arriba o hacia abajo dependiendo de cada caso.

Esta gráfica es particularmente importante, puesto que permite responder a la pregunta de ¿para qué banda de frecuencias es interesante este modelo?; pues pudiera decirse que va desde algunos cuantos kHz hasta 1 GHz, aunque en las referencias consultadas hablan de que este modelo se extiende hasta la frecuencia de los 3 GHz. Es relevante mencionar que la inmensa mayoría de las mediciones que se han registrado hasta ahora siempre han estado por debajo de 1 GHz, por lo que sigue relativamente incierto y poco documentado el comportamiento de este ruido para frecuencias mayores que ésta.

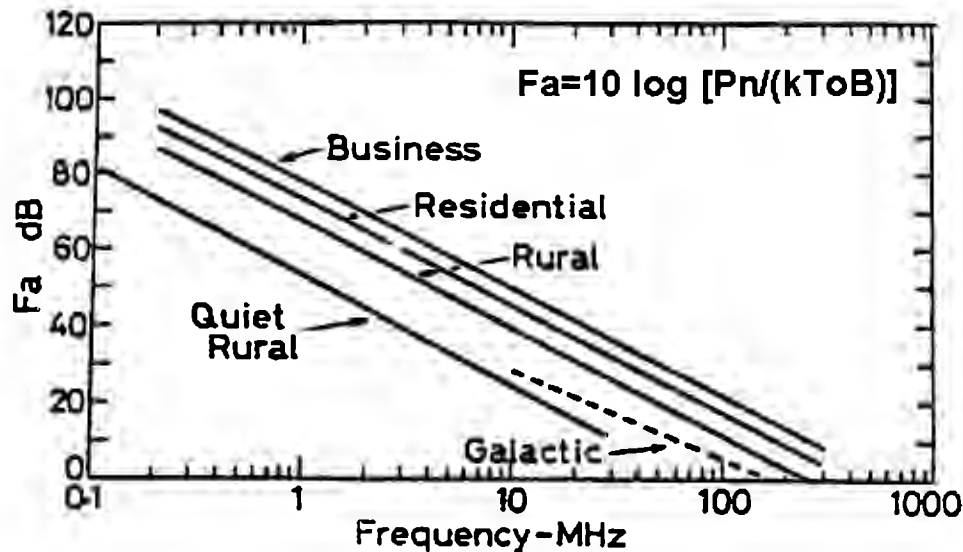


Figura 3.13 Nivel de ruido impulsivo con relación a la frecuencia (Tomado de Wilfred R. Lauber and Jean M. Bertrand, "Statistics of Motor Vehicle Ignition Noise at VHF/UHF", IEEE Transactions on Electromagnetic Compability, Vol. 41, 1999).

3.4.5 Ruido impulsivo en las líneas eléctricas de alta potencia

Sobre el ruido impulsivo originado en líneas eléctricas de alto voltaje, debemos mencionar que su estudio es particularmente relevante ante situaciones en las que se quiera transmitir señales a través del propio cableado, de acuerdo a algunas técnicas que han venido desarrollándose en los últimos años.

Si bien se puede ver estas líneas de voltaje como un canal de transmisiones hostil, es importante aclarar que, a diferencia de los modelos de canal tradicionales, no se puede hablar de una representación con ruido blanco gaussiano; de hecho es bastante más complejo que eso, teniéndose 5 diferentes tipos de ruido en este medio:

- *Ruido de fondo*- Con una Densidad Espectral de Potencia relativamente baja y que varía con la frecuencia; esta contribución es mayormente debida a la agregación de numerosas fuentes de ruido de baja potencia
- *Ruido de banda angosta*- Generalmente se trata de señales senoidales, con amplitudes moduladas causadas por las estaciones y sub-estaciones
- *Ruido impulsivo periódico asíncrono*- Tiene una tasa de repetición de entre 50 y 200 kHz, con un espectro discreto espaciado de acuerdo a la tasa anterior; ésta componente se debe a procesos de conmutación (switching) en las líneas de potencia
- *Ruido impulsivo periódico síncrono*- Con una tasa de repetición de 50 ó 100 Hz en Europa y 60 ó 120 Hz en Norteamérica; los impulsos son de corta duración (del orden de los microsegundos) y tienen una densidad espectral de potencia que decrece con la frecuencia. El origen de este ruido está en los diodos encargados del proceso de rectificación.
- *Ruido impulsivo síncrono*- Causado por los estados transitorios pertenecientes a los procesos de conmutación de la red eléctrica; los impulsos tienen una ocurrencia totalmente aleatoria y los niveles que puede alcanzar este ruido pueden sobrepasar hasta por 50 dB a los del ruido de fondo

Las primeras tres categorías de ruido suelen presentar características estacionarias en el tiempo y, generalmente, se les puede agrupar en una sola categoría de "ruido de fondo". Sin embargo, los otros dos son variantes en el tiempo y durante la ocurrencia de estos impulsos, la densidad espectral de potencia del ruido puede elevarse considerablemente causando errores de bits en la transmisión.

Al igual que para el ruido de ignición de los automóviles, la determinación de los parámetros para estos modelos proviene de un tratamiento estadístico de complejidad considerable, y los cuales no pueden ser considerados estrictamente válidos para muchas condiciones.

Puesto que no es interés original de este proyecto el determinar la distorsión que pueden introducir las líneas de la red eléctrica a una señal cuando éstas son usadas como canal de transmisión, no se profundizará en el tema; este campo, sin embargo, se nos aparece como un tema interesantísimo de investigación y con amplias posibilidades para el futuro.

4. Resultados

4.1 Simulaciones Gráficas

4.1.1 Resultados preliminares del ruido atmosférico

Tomando como referencia el modelo citado anteriormente para el ruido atmosférico (Mastrangelo: 1993), se hicieron algunas pruebas en Matlab para observar la forma de la señal en tal caso.

A continuación se muestran las gráficas que se han obtenido para el ruido atmosférico. El periodo de muestreo es de 1ns y se consideraron 100 valores. El rango que se ve en las gráficas para el eje horizontal abarca de 0 a 100ns debido a que se pretende trabajar sobre la banda VHF (30 a 300MHz).

En la primera gráfica podemos ver el ruido de fondo añadido a una señal senoidal. Este ruido de fondo, como nos dice el modelo, tiene una distribución de probabilidad gaussiana con media cero y varianza uno. Suponemos por el momento, y por cuestiones prácticas, que el valor de la amplitud de la señal senoidal es de $20\mu\text{V}$ y tiene una frecuencia de 31.83MHz y un periodo de 31.42 ns.

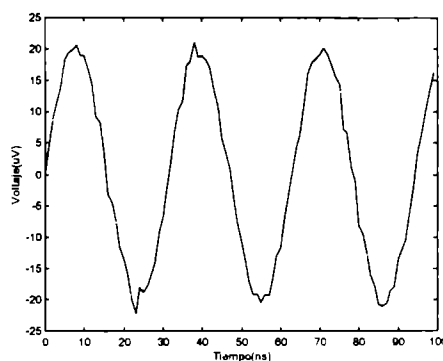


Figura 4.1 La gráfica muestra una señal senoidal de amplitud $20\mu\text{V}$ con un ruido de fondo gaussiano de media cero y varianza 1

Para simular la componente del ruido impulsivo se utilizaron señales sinc trasladadas en el tiempo de tal forma que generaban disparos de longitud aleatoria y con una amplitud de $1\mu\text{V}$.

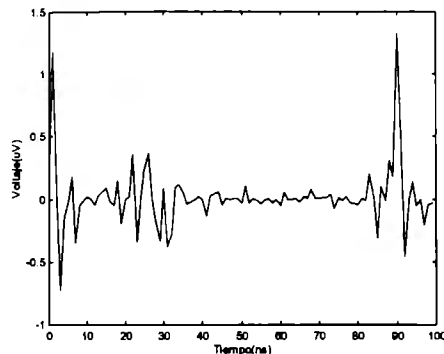


Figura 4.2 La gráfica muestra una señal senoidal de amplitud $20\mu\text{V}$ con un ruido de fondo gaussiano de media cero y varianza 1

Finalmente se añadieron ambas componentes de ruido sobre la señal original para obtener la siguiente gráfica.

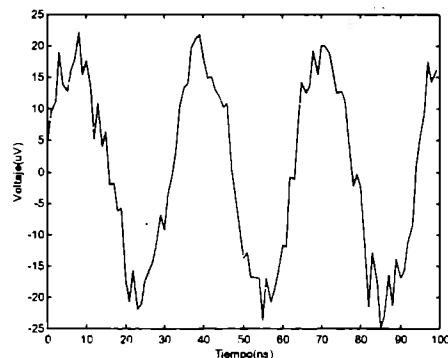


Figura 4.3 La gráfica muestra una señal senoidal de amplitud $20\mu\text{V}$ con una componente de ruido de fondo y una componente impulsiva

Como podemos apreciar en esta última gráfica, el ruido ha distorsionado apreciablemente la señal, aunque aún se puede distinguir la forma de la señal original.

En posteriores simulaciones, se ha mejorado la calidad del modelo ya que se han introducido nuevas y más precisas consideraciones que se detallarán a continuación.

Por ejemplo, para simular la componente impulsiva se utilizaron pulsos de duración aleatoria (distribución uniforme) con una amplitud de 1V. De ahí se creó un generador de números con una distribución gaussiana de media cero y varianza uno, pero sólo se seleccionó aquellos que fueran positivos para que concordaran con la naturaleza de los impulsos generados por descargas eléctricas. Posteriormente, se multiplicaron ambas señales y se obtuvo una mejor simulación de la componente impulsiva del ruido atmosférico.

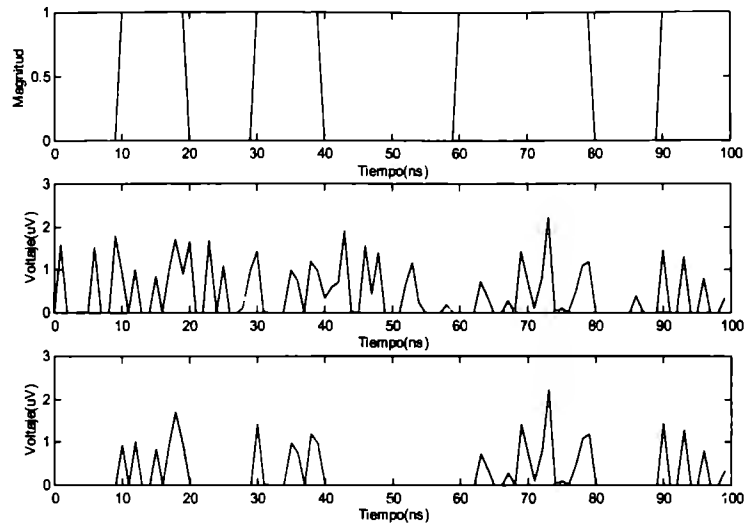


Figura 4.4 (a) Pulsos de duración aleatoria (b) Generador de números positivos con una distribución gaussiana. (c) Componente impulsiva del ruido atmosférico producto de la multiplicación de las dos anteriores.

La componente de ruido de fondo se mantiene como una señal de ruido gaussiano con media cero y varianza uno como se muestra a continuación.

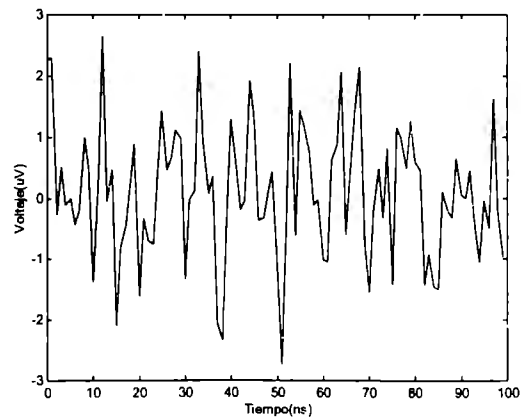


Figura 4.5 La gráfica muestra la componente de ruido de fondo

Una vez hecho esto se procede a sumar ambas componentes de ruido y obtener su transformada rápida de Fourier (FFT) con el fin de analizar la señal en el dominio de la frecuencia y para poder realizar las respectivas comparaciones con lo que se obtenga en el analizador de espectros.

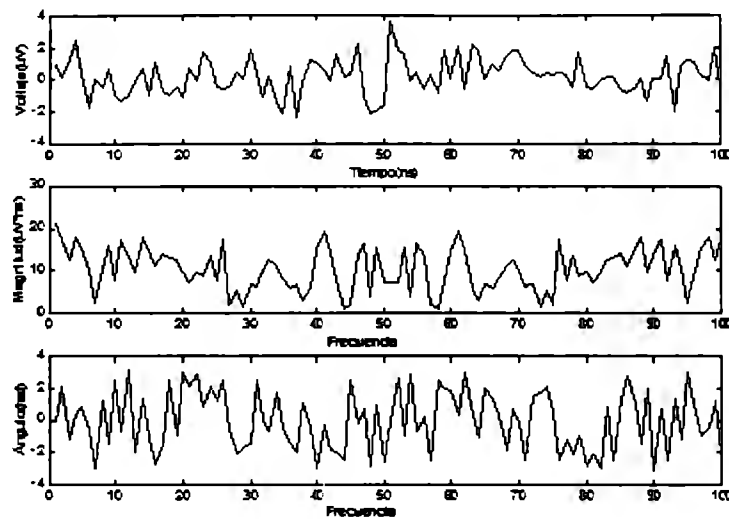


Figura 4.6 (a) Suma de ambas componentes de ruido (b) Magnitud de la transformada rápida de Fourier del ruido. (c) Fase de la transformada rápida de Fourier del ruido.

A continuación se hizo el mismo análisis pero tomando en cuenta el ruido de fondo agregado a la señal original y se obtuvieron las siguientes gráficas.

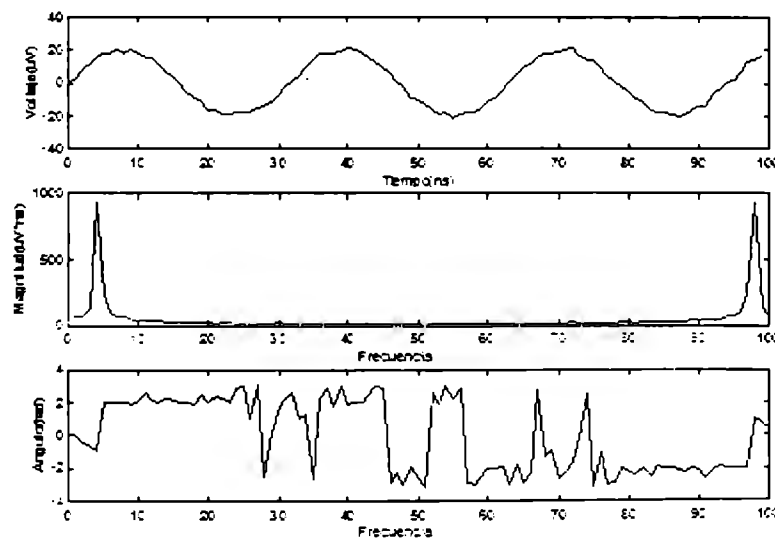


Figura 4.7 (a) Suma de ambas componentes de ruido junto con la señal original (b) Magnitud de la transformada rápida de Fourier de la señal ruidosa. (c) Fase de la transformada rápida de Fourier de la señal ruidosa.

Como podemos ver en las gráficas anteriores, el ruido atmosférico genera ciertas componentes armónicas en el dominio de la frecuencia que están distantes de la frecuencia de la señal original. Por otro lado notamos que la fase de la FFT también se ve distorsionada por el ruido.

4.1.2 Resultados preliminares del ruido térmico

Voltaje de ruido térmico RMS

Tomando en cuenta el modelo del resistor metálico propuesto para el ruido térmico, se tiene que:

$$\overline{v^2} = 4kTRB \quad (4.1)$$

En donde:

- $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
- La temperatura debe expresarse en grados Kelvin, pero por comodidad para la visualización, se presenta la gráfica en grados Celsius.
- Como un ejemplo, podemos tomar un ancho de banda de 5kHz y una resistencia equivalente de antena $10\text{k}\Omega$, constantes. Lo anterior, simplemente por proponer algún valor, ya que este modelo funciona para cualquier ancho de banda y/o resistencia.
- La temperatura se hace variar entre -10 y 50 °C, simplemente para demostrar la relación lineal que existe entre la temperatura y el voltaje de ruido térmico RMS, así como con la densidad espectral de potencia.

T [°C]	V rms [uV]
-10	8,52E-07
-5	8,60E-07
0	8,68E-07
5	8,76E-07
10	8,84E-07
15	8,92E-07
20	8,99E-07
25	9,07E-07
30	9,14E-07
35	9,22E-07
40	9,29E-07
45	9,37E-07
50	9,44E-07

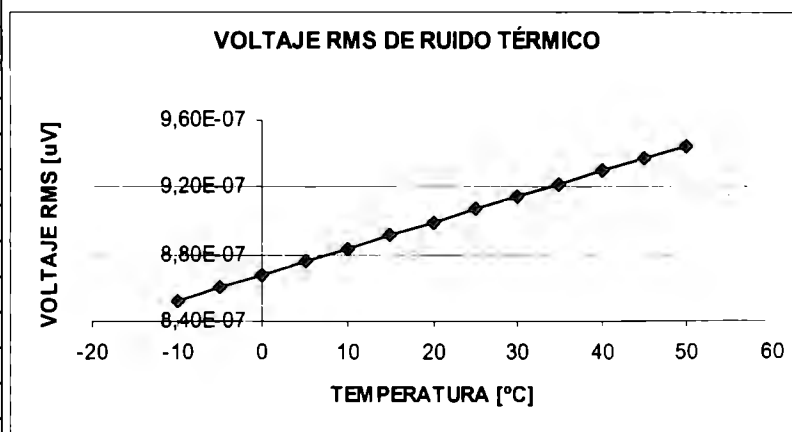


Figura 4.8 Variación del voltaje rms del ruido térmico de acuerdo a la temperatura.

Densidad espectral de potencia de ruido térmico

Para el caso de la densidad espectral de potencia obtenida de:

$$G_n(f) = \frac{k(T_s + T_e)}{2} \quad (4.2)$$

La T_s representa la temperatura de espacio o de brillo y varía en función de la temperatura ambiental. Ésta se considera característica de una temperatura reflejada a la entrada de las antenas principalmente como resultado de la radiación de cuerpo negro. La T_e representa la temperatura equivalente de ruido introducida por el mismo sistema de medición, que para aquellos sistemas correctamente calibrados es menor a 2K.

A partir de estos datos se generaron las siguientes gráficas:

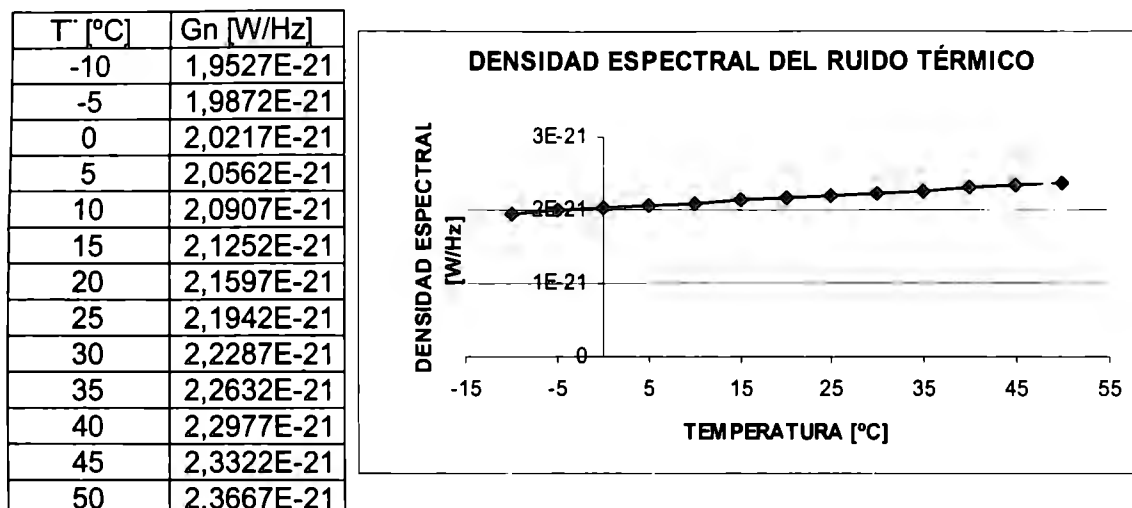


Figura 4.9 Variación de la densidad espectral de potencia del ruido térmico de acuerdo a la temperatura.

A partir del modelo propuesto para el ruido térmico, se tiene:

El ruido térmico (blanco) tiene una función de densidad de probabilidad Gaussiana (debido al movimiento aleatorio de partículas que producen la radiación electromagnética atribuida principalmente a la radiación de cuerpo negro).

Por lo anterior, y dado que la media es cero, se puede aproximar la desviación estándar al valor RMS, mismo que se obtiene así:

$$\overline{v^2} = 4kTBR \quad \sigma = V_{rms} = \sqrt{4kTBR} = 0.897V_{rms} \quad (4.3)$$

Con la desviación estándar anterior podemos generar en Matlab (respetando el teorema de Nyquist para el periodo de muestreo que maneja el programa en la generación de señales) una señal aleatoria de ruido que se aproxime a lo que deseamos. Posteriormente, se agrega este ruido a una señal (senoidal) modulada en frecuencia.

Una vez, hecho lo anterior, se procede a obtener la transformada rápida de Fourier, que por cierto, será sencilla a comparar tanto cualitativa como cuantitativamente con las mediciones que se realicen con el analizador de espectros.

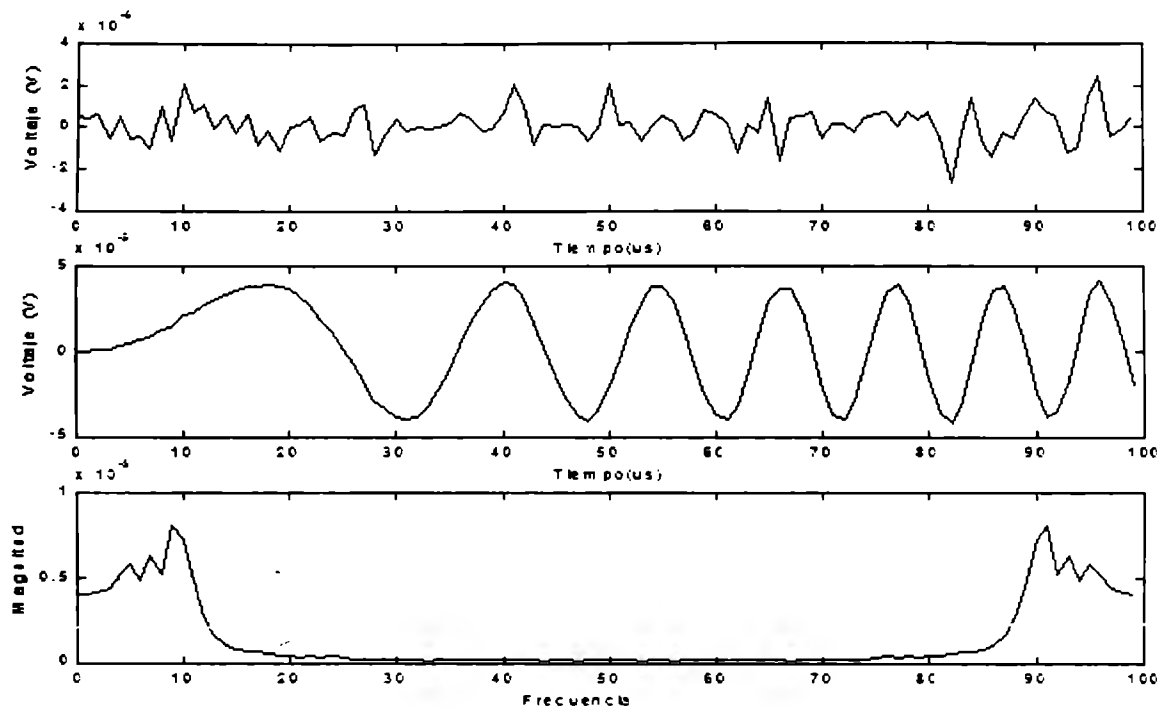


Figura 4.10(a) Ruido térmico (b) Señal sin ruido modulada en frecuencia. (c) Magnitud de la transformada rápida de Fourier de la señal ruidosa.

Finalmente, gracias a este modelo somos capaces de caracterizar al ruido térmico, a partir de parámetros como resistencia equivalente, ancho de banda, y desde luego, la temperatura T_s , y la temperatura de equivalente de ruido del sistema T_e .

4.1.3 Resultados preliminares del ruido cósmico

Modelo propuesto

$$\Delta SNR = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{S_b G c^2}{4\pi f^2 k T_s} \right) \quad (4.4)$$

En donde:

- ❖ S_b : componente de tormenta solar ($W/m^2/Hz$)
- ❖ G : ganancia de la antena
- ❖ c : velocidad de la luz
- ❖ f : frecuencia de transmisión (Hz)
- ❖ k : constante de Boltzmann
- ❖ T_s : temperatura de ruido del sistema (K)

Se propone el siguiente sistema:

- ❖ $T_s = 300K$
- ❖ $G = 1.65$
- ❖ Las componentes de tormenta solar determinadas por:

- - 25000 SFU
- - 100000 SFU
- - 500000 SFU

Graficando, se obtiene que:

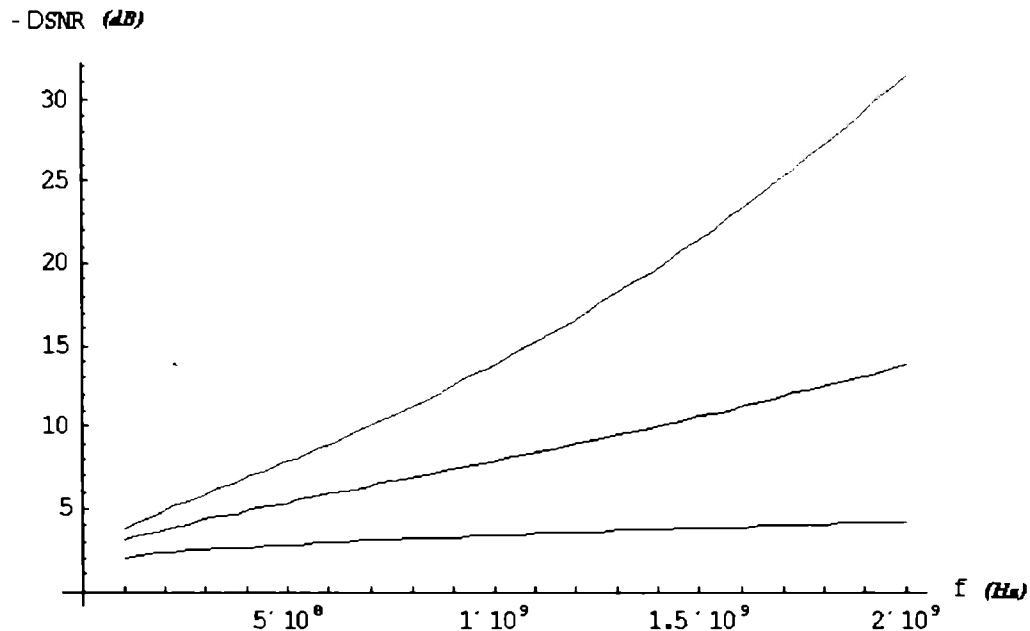


Figura 4.11 Modelo de ruido solar que muestra la variación de la razón señal a ruido para diferentes intensidades de la tormenta solar.

Se puede apreciar que conforme se incrementa la componente de tormenta solar en un mismo sistema, hay mayor cantidad de ruido en la transmisión, y este ruido se incrementa conforme aumenta la frecuencia de transmisión del sistema. Esto es, un sistema de transmisión que cuente con una frecuencia más baja será menos afectado por una misma tormenta solar que una transmisión de mayor frecuencia.

4.1.4 Presentación del Simulador

Interfaz Gráfica del Simulador

Contiene 10 parámetros de entrada.

Parámetros Generales

- Atenuación del cable y conectores (dB)
- Resistencia equivalente de la antena (ohms)
- Ganancia de la antena (dBi)
- Área efectiva de la antena (m²)

Parámetros del Ruido Atmosférico

- Frecuencia (kHz)
- Tormenta eléctrica intensa (1), ligera (2) o nula (3)

Parámetros del Ruido Térmico

- Temperatura (K)

- Ancho de Banda del filtro de resolución (kHz)

Parámetros del Ruido Solar

- Intensidad de la Tempestad Solar (SFU)

Parámetros del Ruido Creado por el Hombre de Naturaleza Impulsiva

- Afluencia de vehículos grande (1), mediana (2) o baja (3)

Para definir el parámetro de tormenta eléctrica, nos basamos en los resultados obtenidos por Fishman (1991) y de ahí concluimos que una tormenta intensa es aquella que cuenta con una cantidad aleatoria (distribución uniforme) entre 4 y 8 impulsos eléctricos cada 25 μ s, una tormenta ligera es aquella que tiene entre 1 y 2 impulsos en el mismo tiempo y una tormenta nula no cuenta con ellos. Sin embargo, las tres presentan la componente de ruido de fondo atmosférico.

En cuanto a la afluencia de vehículos, se manejan tres rangos de acuerdo a criterios establecidos por Spaulding & Disney:

- Baja- De 0 a 10 vehículos/min con una media de 89.125 μ V/m y una varianza de 5 μ V/m.
- Mediana- De 10 a 25 vehículos/min con una media de 125.892 μ V/m y una 10 varianza de μ V/m.
- Alta- De 25 en adelante; con una media de 223.87 μ V/m y una varianza de 15 μ V/m.

En la ventana principal, la gráfica de la parte de arriba ruido total en el dominio del tiempo y la de abajo, el ruido total en el dominio de la frecuencia. También aparecen 5 ventanas, cada una mostrando el ruido atmosférico, térmico, solar, creado por el hombre y su correspondiente gráfica en el dominio del tiempo y la frecuencia. La última muestra una comparación entre los tres primeros modelos.

Estas ventanas se muestran a continuación:

1. Ventana del simulador. Muestra el ruido total.

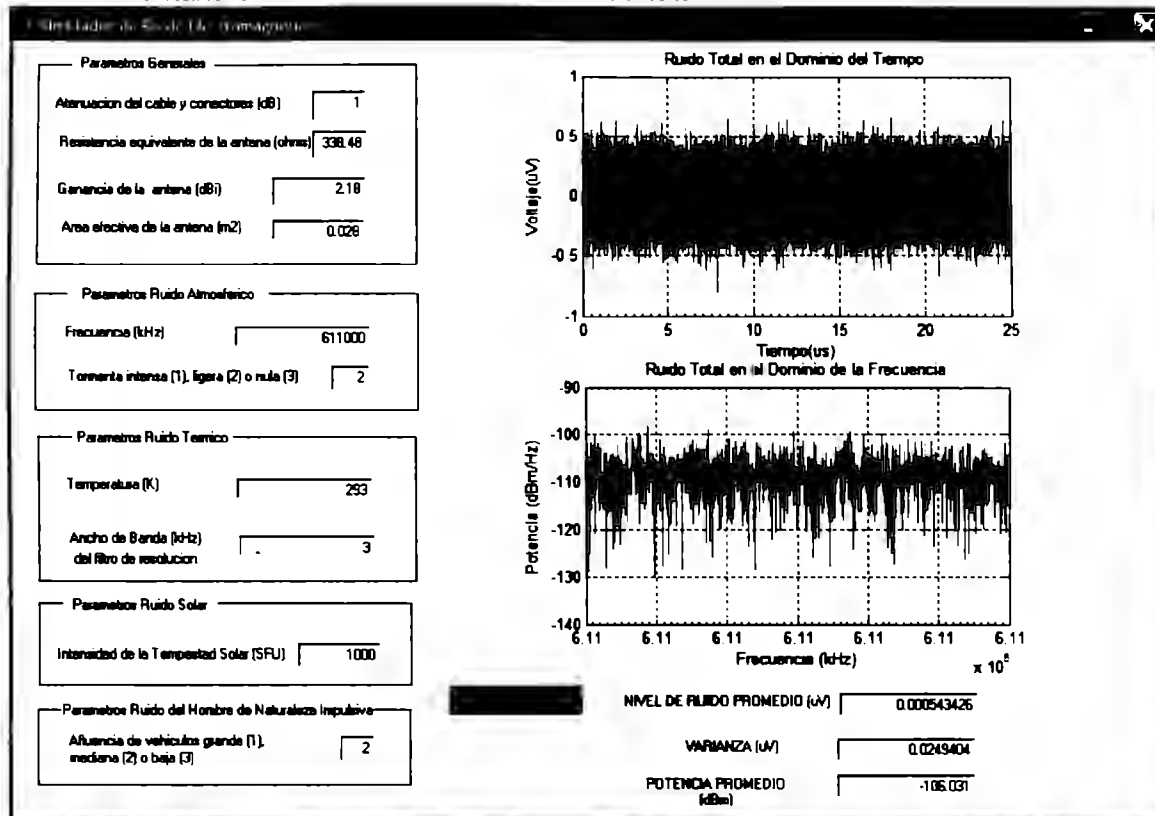


Figura 4.12 La gráfica muestra la ventana principal del simulador. De acuerdo a nuestra antena, se eligieron valores de 1dB para la atenuación del cable y conectores, 338.48 Ω para la resistencia de la antena, 2.18dBi de ganancia de la antena, 0.028 m² de área efectiva, una frecuencia de 611 MHz, una tormenta eléctrica ligera, una temperatura de 293 K, un ancho de banda de 3 kHz, una intensidad de la tormenta solar de 1000 SFU y una afluencia vehicular mediana. Se obtuvo un nivel de ruido promedio de 0.000543426µV, una varianza de 0.0249404 µV y una potencia promedio de -106.031 dBm

2. Ventana del Ruido Atmosférico

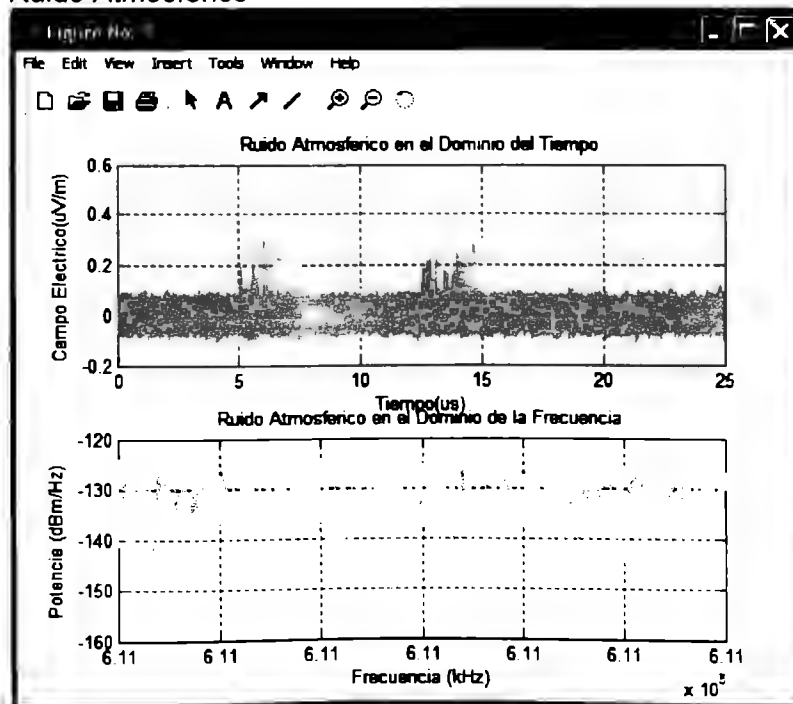


Figura 4.13 La gráfica muestra la ventana del ruido atmosférico.

3. Ventana del Ruido Térmico

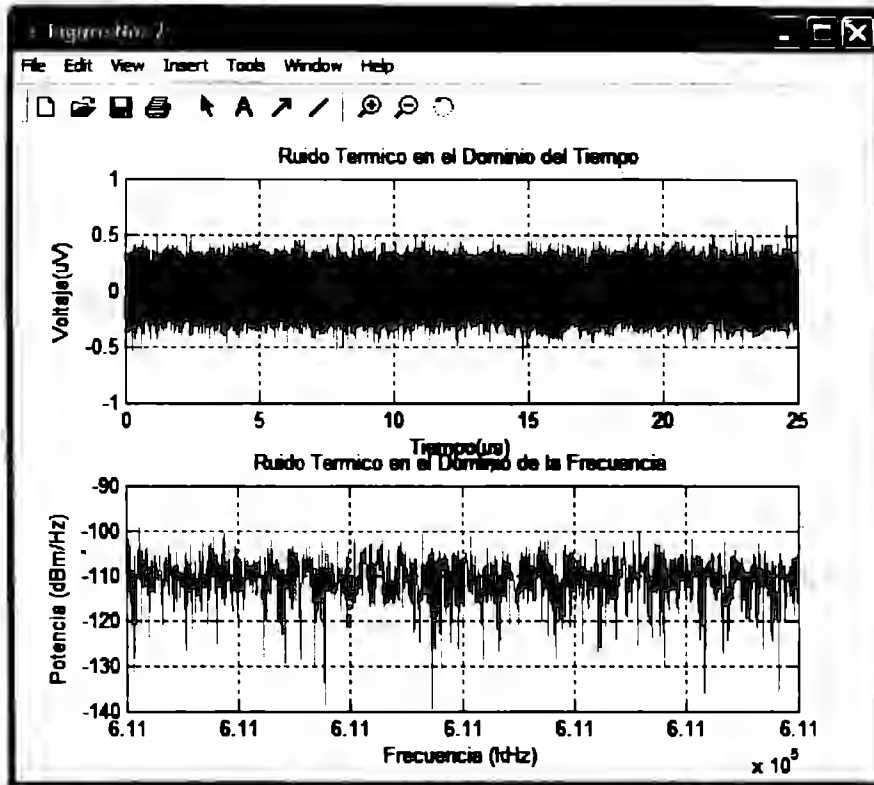


Figura 4.14 La gráfica muestra la ventana del ruido térmico.

4. Ventana del Ruido Solar

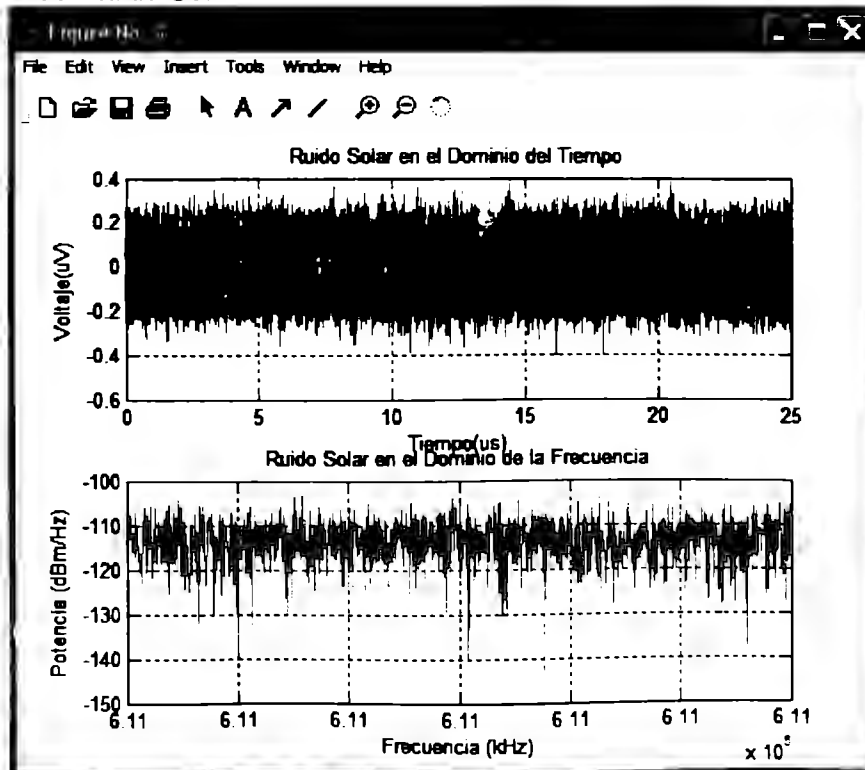


Figura 4.15 La gráfica muestra la ventana del ruido solar.

5. Ventana del Ruido Creado por el Hombre de Naturaleza Impulsiva

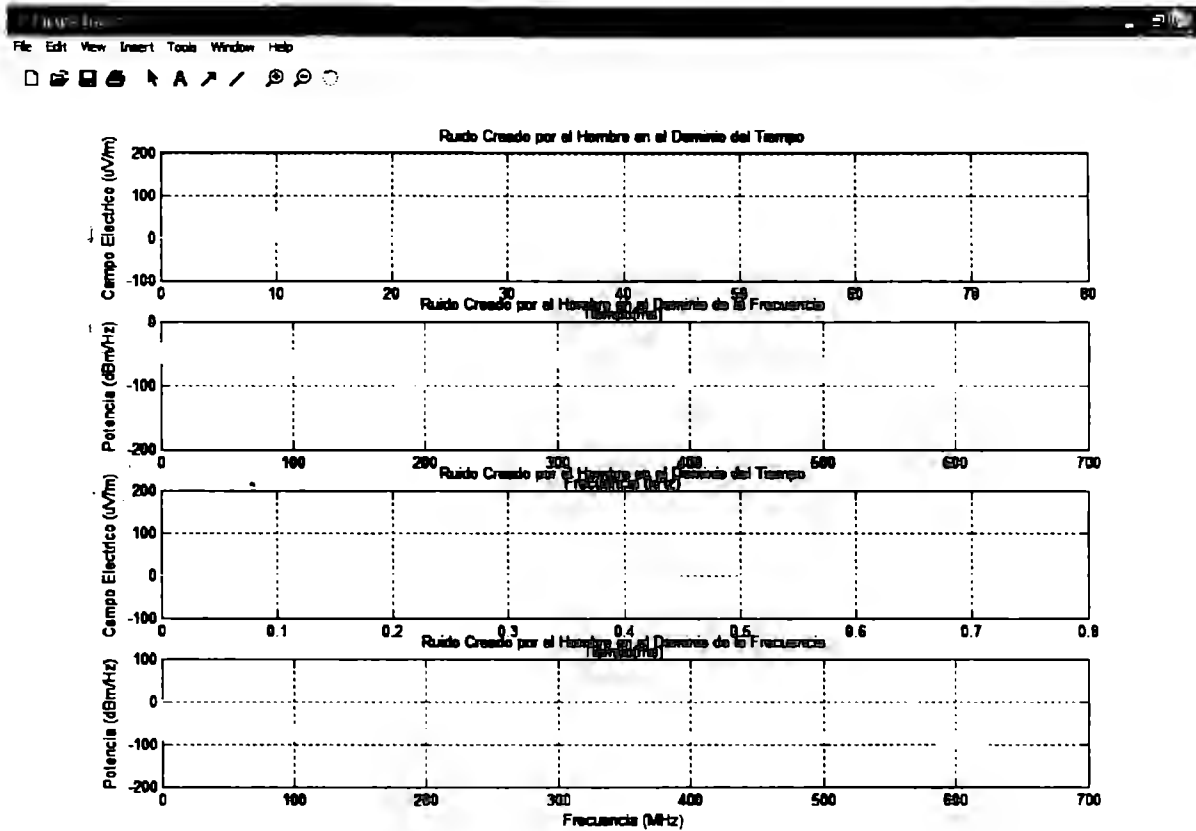


Figura 4.16 La gráfica muestra la ventana del ruido creado por el hombre de naturaleza impulsiva.

Cabe señalar que para el ruido creado por el hombre fue necesario realizar cuatro gráficas. En la primera se pueden ver varios pulsos con una distribución de Poisson en una ventana de 80ms y en la segunda su densidad espectral de potencia hasta una frecuencia de 625 kHz. En la tercera se puede ver un solo pulso en una ventana de 0.8 ms, pero de este modo se puede observar en la cuarta gráfica una densidad espectral de potencia hasta una frecuencia de 625 MHz.

6. Ventana Comparativa de los modelos de atmosférico (azul), térmico (magenta) y cósmico (rojo).

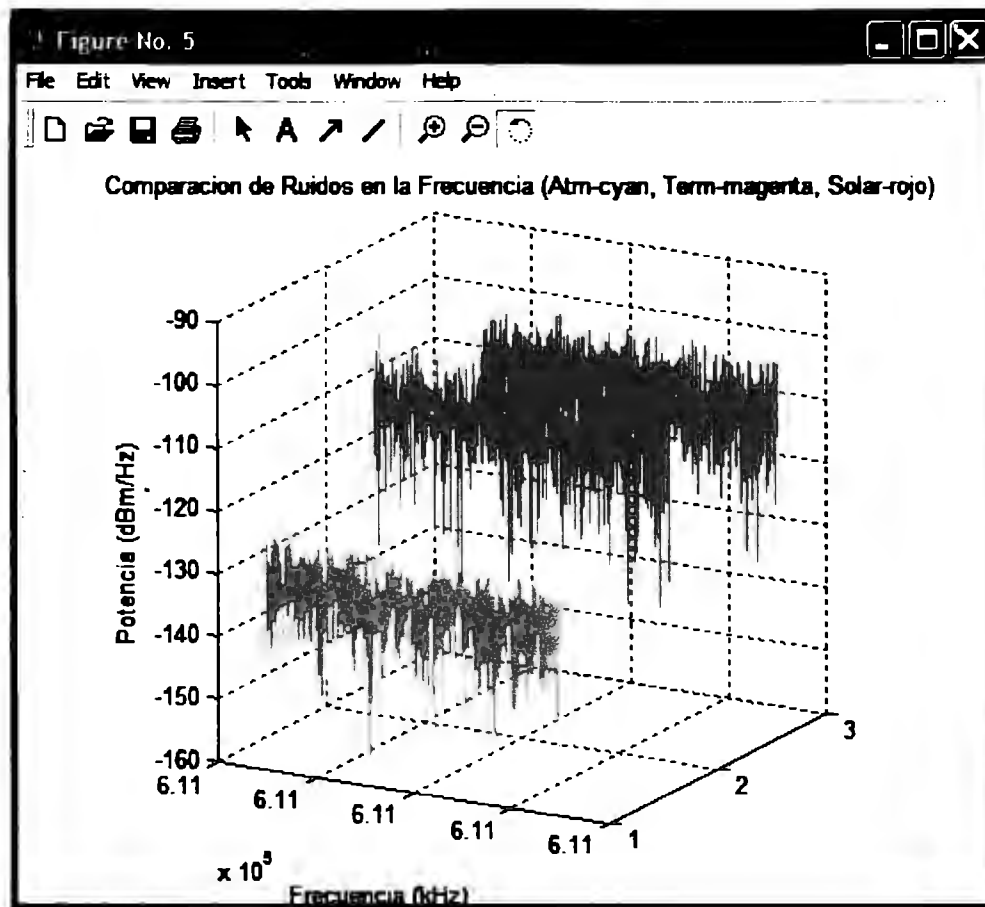


Figura 4.17 La gráfica muestra la ventana comparativa de los ruidos atmosférico, térmico y cósmico.

La ventana anterior tiene la capacidad de ser rotada con el fin de que el usuario pueda comparar los 3 tipos de ruido para los parámetros de entrada dados.

El usuario debe de escribir en las casillas correspondientes los datos necesarios para calcular el nivel de cada tipo de ruido y la densidad espectral de frecuencia del ruido total. Una vez hecho esto, se presiona el botón de aceptar y el programa despliega los resultados en forma gráfica y analítica.

Modo de operación:

Este simulador toma en cuenta cuatro tipos de ruido:

- Ruido atmosférico
- Ruido térmico
- Ruido cósmico
- Ruido creado por el hombre de naturaleza impulsiva

Con base en los parámetros introducidos por el usuario, el programa calcula el nivel de ruido promedio, la varianza y la potencia promedio y muestra los resultados en las casillas correspondientes grafica la señal tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

Este simulador es un archivo m de Matlab versión 6.5 Release 13. Fue realizado gracias a la interfaz de usuario gráfica (GUI), una herramienta de Matlab para realizar aplicaciones gráficas.

Lo primero que realiza el programa es recoger los datos que el usuario introduce desde el teclado y les asigna ciertas variables.

El simulador genera 100,000 muestras con una frecuencia de muestreo de 4GHz (T_s de 0.25ns) por lo que la frecuencia máxima que puede detectar en una señal cualquiera es de 2GHz (máximo valor que muestra en la gráfica).

Estas muestras las genera con base en los modelos sobre ruido atmosférico, térmico y cósmico explicados en el capítulo 3. Para el caso del ruido creado por el hombre, debido a las limitaciones de Matlab y a la naturaleza del ruido, sólo podemos apreciar una frecuencia máxima de 625MHz.

Detalles de los resultados gráficos

Este simulador muestra cada tipo de ruido en el dominio del tiempo en una gráfica separada. El ruido atmosférico está en color cian, el térmico en fucsia, el solar en rojo y el total en azul. Estas gráficas muestran la señal de ruido medida en μV presente durante $25\mu\text{s}$.

La forma de obtener la gráfica dominio de la frecuencia es relativamente más compleja.

Primero, con los datos del ruido total se realiza una transformada de Fourier en tiempo discreto. Como sabemos, su expresión matemática es:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\omega n} \quad (4.5)$$

Esta instrucción obtiene la transformada discreta de Fourier a partir del algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier. Este algoritmo se adapta a la ejecución digital eficiente, reduciendo el tiempo requerido para calcular las transformadas discretas de Fourier por órdenes de magnitud.

Posteriormente se obtiene la densidad espectral de potencia. La densidad espectral de potencia $S_f(\omega)$ describe la distribución de la potencia en función de la frecuencia. Se sabe que la densidad espectral de potencia está definida por:

$$S_f(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|F(\omega)|^2}{T} \text{ [Watts segundo]} \quad (4.6)$$

Pero en nuestro caso el periodo de muestreo T no tiende a infinito, sino que depende del número de puntos que se tomen para realizar la transformada. La transformada rápida de Fourier que realiza Matlab corresponde a las muestras de $F(\omega)$ tomadas cada $k = 2\pi/N$. Donde $F[k]$ es la transformada rápida de Fourier.

Con el objetivo de realizar las comparaciones con los resultados obtenidos mediante el analizador de espectros Tektronix 2712, se tiene que pasar ese resultado a unidades de dBm (deciBeles con relación a 1mW). Para eso se obtiene el \log_{10} del resultado anterior y se multiplica por 10.

$$P = 10 \log_{10} \left(\frac{S_f}{1mW} \right) \text{ [dBm/Hz]} \quad (4.7)$$

Finalmente los resultados obtenidos se muestran en la gráfica correspondiente, pero con la particularidad de que esta gráfica es dinámica, ya que va cambiando según el ancho de banda y la frecuencia que se elijan, dejando ver así sólo una cierta parte del espectro.

Detalles de los resultados analíticos

El simulador muestra tres resultados en forma analítica muy importantes para poder conocer las características del ruido que se espera.

Estos resultados son: el nivel de ruido promedio, la varianza y la potencia promedio. Cada uno de estos resultados se obtiene analíticamente mediante el siguiente algoritmo:

1. Sabemos que la media aritmética, en pocas palabras, es la suma de todos los datos o puntuaciones dividida por el número de casos (Downie, 1970):

$$\bar{x} = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^{NM} f[i] \quad (4.8)$$

Este valor nos indica la tendencia central que siguen los puntos de dicha distribución.

2. La varianza es el cuadrado de la desviación típica. Esta nos sirve para saber cuánto se desvían los elementos de la población de la media. Se cumplen tres propiedades.

a) Aproximadamente el 68% de la probabilidad está comprendida en una región entre las abscisas que distan menos de una desviación estándar de la media, es decir, dentro del intervalo cuyos extremos son $x = \mu \pm \sigma$.

b) Casi 95% de los valores de probabilidad están comprendidos en la región entre las abscisas $x = \mu \pm 2\sigma$.

c) Alrededor de 99.7% de la probabilidad está comprendida dentro del intervalo cuyos extremos son $x = \mu \pm 3\sigma$.

Finalmente tenemos que la varianza se representa con la siguiente expresión.

$$\sigma^2 = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^{NM} (f[i] - \bar{x})^2 \quad (4.9)$$

3. Para los sistemas eléctricos, una señal es una tensión o una corriente. La potencia instantánea disipada por una tensión $e(t)$ en una resistencia R es

$$p = |e(t)|^2 / R \text{ [Watts]} \quad (4.10)$$

y para una corriente $i(t)$

$$p = |i(t)|^2 / R \text{ [Watts]} \quad (4.11)$$

En cada caso, la potencia instantánea es proporcional al cuadrado de la magnitud de la señal. Para una resistencia de 1Ω , estas ecuaciones toman la misma forma por lo que es usual, en el análisis de señales, referirse a la potencia instantánea asociada con una señal dada $f(t)$ como

$$p = |f(t)|^2 / R \text{ [Watts]} \quad (4.12)$$

De acuerdo con esta convención, la energía disipada por la señal durante un intervalo de tiempo (t_1, t_2) es

$$E = \int_{t_1}^{t_2} |f(t)|^2 dt \text{ [Joules]} \quad (4.13)$$

Y la potencia media disipada por la señal $f(t)$ durante el intervalo de tiempo (t_1, t_2) es:

$$P = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |f(t)|^2 dt \text{ [Watts]} \quad (4.14)$$

Pero en Matlab se trabaja en forma discreta así que en tiempo discreto la potencia promedio de un número de muestras NM se define como:

$$P = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^{NM} |f[i]|^2 \text{ [Watts]} \quad (4.15)$$

Donde NM en este caso es 100000.

5. Validación y Mediciones

Para tomar las mediciones de ruido electromagnético a una frecuencia central dada, se tiene que tomar en cuenta que la antena a utilizar tiene que ser de cierta longitud con respecto a la longitud de onda de la señal a analizar, de manera que no haya atenuaciones dentro de la misma antena por presencia de interferencia destructiva dentro de ésta. A continuación, se tiene que llevar a cabo un acoplamiento de impedancias para que se minimicen las pérdidas existentes entre la antena y el analizador de espectros. Se tiene que tomar en cuenta la impedancia del sistema de conexión de la antena con el analizador de espectros, así como la impedancia del analizador de espectros. Para poder llevar a cabo el acoplamiento, se usó el método de acoplamiento de trozo simple (*single stub matching*), el cual considera la frecuencia de operación y las impedancias a acoplar.

En el analizador de espectros Tektronix 2712, una vez conectado el sistema, se selecciona la frecuencia central a analizar. En este caso, se han hecho mediciones para frecuencias centrales de 156.8 MHz (correspondiente a señales de radio marítimas), y a 611 MHz (correspondiente a señales de radioastronomía). A continuación, se seleccionó un span/div de 500 kHz (esto es, a cada cuadro del analizador le corresponden 500 kHz de frecuencia), un nivel de referencia de -70 dBm y un ancho de banda de resolución (RBW) de 3 kHz. El RBW lo que nos determina es qué tan fino es el análisis de una señal obtenida: a un RBW más fino, mejor discernimiento de la composición espectral se tendrá. Este RBW escogido es el más fino que tiene el analizador de espectros, por lo que nos dará una lectura más precisa en lo que corresponde al ruido promedio.

Una vez seleccionados los parámetros, se utiliza la librería de utilidades, la cual contiene un algoritmo de ruido electromagnético promedio. Para tomar la medida de ruido promedio, se le tiene que especificar un ancho de banda sobre el cual va a tomar la medición de ruido promedio. Este ancho de banda no es el mismo que el RBW, ya que el RBW sólo nos determina la finura de la medición, mientras que el ancho de banda de ruido nos determina sobre qué rango de frecuencias sobre la frecuencia central hará el promedio de ruido. Sin embargo, el RBW está relacionado con el ancho de banda de la medición de ruido ya que entre más fina es la obtención de datos, se obtendrá un promedio de ruido más acorde con lo medido en realidad. Si el RBW fuera mayor que el ancho de banda obtendríamos una medición errónea ya que la potencia promedio no consideraría la contribución de aquellas frecuencias limitadas por el RBW, pero fuera del ancho de banda. No obstante, el algoritmo de ruido electromagnético del analizador realiza esta corrección.

Una vez seleccionado el ancho de banda sobre el cual se mide el ruido, el algoritmo de medición de ruido lleva a cabo un proceso de operaciones internas en el cual descuenta el ruido generado por el mismo analizador de espectros, y se despliega el valor de ruido promedio en pantalla de la siguiente manera:

N -106.2 dBm @ 10 kHz

Lo cual indica que hay un ruido promedio de -106.2 dBm en un ancho de banda de 10 kHz.

En la obtención de datos experimentales, para cada frecuencia central se toman mediciones a anchos de banda de 1, 10, 100, 1000, 10000, 100000 y 1000000 Hz, tomándose un conjunto de 10 mediciones para cada uno de ellos, con separación de 10 segundos entre medida y medida, para poder entonces tomar un promedio de las diez mediciones y su desviación estándar asociada, para tener entonces un valor de ruido

promedio y una incertidumbre, lo cual es necesario para poder tener una validación apropiada de los valores simulados.

Una vez tomadas en cuenta todas las consideraciones anteriores, retomemos el esquema de medición propuesto para la adquisición experimental. Se tiene el siguiente esquema para realizar la medición

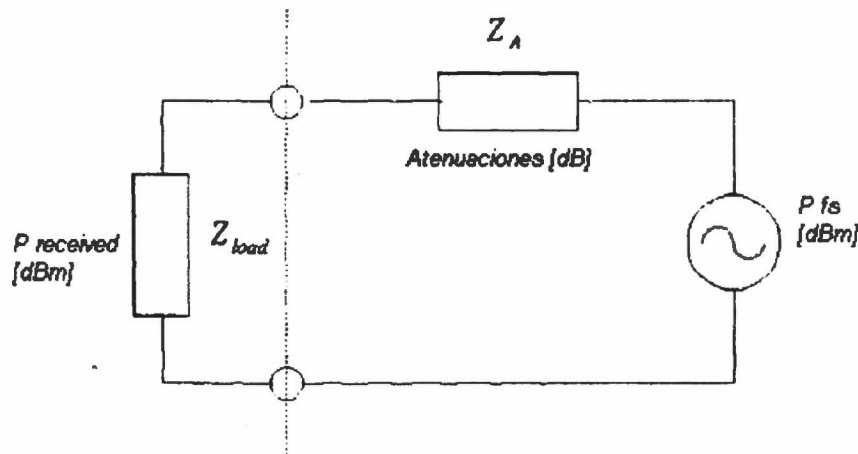


Figura 5.1 Esquema de medición (Tomado de Mc Lean, James et al, *Interpreting Antenna Performance Parameters for EMC Applications. Part 3: Antenna Factor*, TDK RF Solutions)

P_{fs} representa la potencia de la señal de ruido que se encuentra en el espacio libre, la impedancia Z_A representa la antena y el cable coaxial entre el analizador de espectro y la antena, dichos elementos proporcionan atenuaciones [dB] debidas en menor grado a la antena, pero sobre todo, al cable coaxial, que en nuestras mediciones resultaron ser de aproximadamente 1 dB. Sobre la impedancia Z_{load} , (impedancia del analizador de espectro 50Ω) podemos ver la potencia de la señal recibida, $P_{received}$ [dBm], a la cual se da lectura en el analizador de espectro.

De manera que, para obtener la potencia en el espacio libre P_{fs} [dBm], es necesario realizar la suma de $P_{received}$ [dBm] y de las atenuaciones que se dan en el canal [dB].

Se han realizado algunas mediciones con el analizador Tektronix 2712 en los alrededores del Tecnológico de Monterrey Campus Ciudad de México. Si bien todavía hace falta una más estricta comparación, los resultados preliminares y aquellos obtenidos con el analizador resultan ser similares.

En la figura 5.1 se muestran las ubicaciones donde se han realizado las mediciones dentro del campus. En algunas localidades hay máquinas y equipo de laboratorio cerca y otras están un poco más apartadas para poder comprobar cómo afectan los diferentes tipos de ruido.

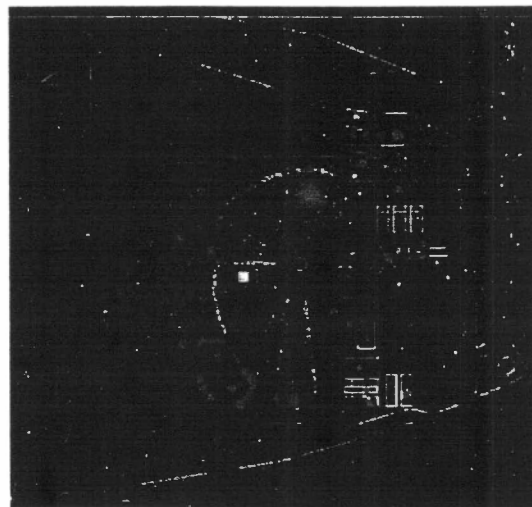


Figura 5.2 Ubicaciones donde se realizaron mediciones dentro del Tecnológico de Monterrey Campus Ciudad de México

Y la siguiente tabla es un ejemplo del protocolo de medición:

CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS				PARÁMETROS FRECUENCIALES		CARACTERÍSTICAS DE LA MEDICIÓN			
FECHA	HORA	LUGAR	TEMP. (°C)	FRECUENCIA (MHz)	ANCHO DE BANDA	SPAN/DIV (KHz)	RBW (KHz)	NIVEL DE REF. (dBm)	RUIDO PR. (dBm)
20-09-04	12:15	LE02	20.3	156.8	100 KHz	500	3	-70.0	-109.1
20-09-04	13:00	LE02	21.2	611	100 KHz	500	3	-70.0	-108.1
20-09-04	13:35	LE02	21.5	612	100 KHz	500	3	-70.0	-107.7
20-09-04	13:40	LE01	21.5	613	100 KHz	500	3	-70.0	-107.7
20-09-04	13:45	LE02	21.5	614	100 KHz	500	3	-70.0	-107.1
02-10-04	15:15	CEDETEC	23.8	611	100 KHz	500	3	-70.0	-84.1
02-10-04	15:20	CEDETEC	24.1	611	100 KHz	500	3	-70.0	-102.7
02-10-04	15:25	CEDETEC	24	612	100 KHz	500	3	-70.0	-102.1
02-10-04	15:30	CEDETEC	23.7	613	100 KHz	500	3	-70.0	-107.7
02-10-04	15:45	AJEDREZ	24.2	156.8	100 KHz	500	3	-70.0	-89.4
02-10-04	15:50	AJEDREZ	23.9	611	100 KHz	500	3	-70.0	-106.4
02-10-04	15:55	CEDETEC	24.2	612	100 KHz	500	3	-70.0	-107.7
02-10-04	16:00	CEDETEC	24	613	100 KHz	500	3	-70.0	-108.1
03-10-04	10:57	ENOTE	20.1	156.8	5MHz	50	3	-70.0	-107.3
03-10-04	12:30	TERRAZA B	21.9	156.8	100Hz	100	3	-70.0	-78.6
03-10-04	12:39	TERRAZA B	22	156.8	100Hz	50KHz	3	-70.0	-78.9

Tabla 5.1 Protocolo de medición.

Hay algunos valores en los que aumenta estrepitosamente en varios dBm la potencia del ruido medido. Esto se debió a que las mediciones anteriores se realizaron en el momento del funcionamiento de algunos motores de la construcción contigua, lo cual alteró perceptiblemente nuestras mediciones. Un estudio más profundo sobre ello se realiza en las siguientes secciones.

CONSIDERACIONES DE LA ANTENA.

Para conocer la atenuación que agrega la antena, es necesario considerar algunos conceptos que nos ayudarán a entender y calcular la misma y cómo afecta al nivel de ruido promedio que se obtiene en el analizador de espectro.

Impedancia característica

Es un parámetro que depende de la relación longitud/diámetro del conductor y de la frecuencia de trabajo.

La Z_0 de cada punto del conductor es también función de su distancia al punto de alimentación de la antena, por lo que la misma varía a lo largo del conductor.

Al referirse a la Z_0 , se puede hablar de la correspondiente a un punto determinado o al valor medio de la misma. Este último concepto es el utilizado comúnmente en el cálculo de antenas.

La impedancia característica de un punto cualquiera de un dipolo delgado es:

$$Z_{up} = 120 \ln \left(\frac{2r}{a} \right) \quad (5.1)$$

siendo, r = distancia del punto considerado al punto de alimentación del dipolo.

a = radio del conductor

(r y a , en las mismas unidades)

La Z_o media de un dipolo, viene dada aproximadamente por

$$Z_{um} = 120 \left[\ln \left(\frac{2H}{a} \right) - 1 \right] \quad (5.2)$$

siendo, H = semilongitud del dipolo

a = radio del conductor

(H y a , en las mismas unidades).

El valor más próximo al real viene dado por las siguientes expresiones

generales:

Monopolo

$$Z_o = 60 \left(\ln \frac{H_o}{a} - 1 - \frac{1}{2} \ln \frac{2H_o}{\lambda} \right) \quad (5.3)$$

Dipolo

$$Z_o = 120 \left(\ln \frac{H_o}{a} - 1 - \frac{1}{2} \ln \frac{2H_o}{\lambda} \right) \quad (5.4)$$

siendo

H_o = semilongitud o altura física del dipolo o monopolo,

a = radio del conductor

λ = longitud de onda de la frecuencia de trabajo

(todos en las mismas unidades).

Longitud Eléctrica

En los estudios de la distribución de la corriente en un dipolo de media onda, o monopolo de cuarto de onda, teóricamente la corriente en los extremos alejados del punto de alimentación es cero.

Experimentalmente se sabe que esto no es así y que en realidad los nulos o nodos de corriente están en longitudes físicas algo más «largas». Este efecto se conoce como efecto terminal. Esto se debe a un aumento de λ y una disminución de a en las proximidades de los extremos, dando lugar a una disminución de la Z_o puntual y a un aumento de corriente en esa zona terminal lo que produce un «alargamiento» aparente del conductor por lo que para que, al final de una longitud eléctrica de cuarto de onda para monopolos y media onda para dipolos, aparezca el cero de corriente, la longitud física debe ser algo menor.

La razón del acortamiento (H/H_o) es función de la longitud de onda y de Z_o y viene a resultar de una media del 5 %.

H = longitud eléctrica

Ho = longitud física

La longitud eléctrica de una antena viene a ser con buena aproximación, 5 % más larga que la longitud física, por lo que:

$$H = H_o \times 1.05$$

Tanto una como otra longitud se pueden expresar en radianes:

Monopolo

Longitud física = βH_o radianes

Longitud eléctrica = βH radianes

Dipolo

Longitud física = $2\beta H_o$ radianes

Longitud eléctrica = $2\beta H$ radianes

siendo

H y Ho semilongitudes o alturas del dipolo o monopolo, expresadas en metros.

Factor de atenuación

Este coeficiente determina la pérdida de energía que se produce en cada punto de la antena.

Es función de su longitud, resistencia de radiación y Zo. Su unidad es el neper. (1 neper = 8.7dB)

Viene determinado por:

$$\alpha = \frac{R_{rv}}{H \times Z_0} \text{ nepers} \quad (5.5)$$

siendo

Rvr = resistencia de radiación en el vientre de corriente

H = altura o semilongitud eléctrica en metros.

La atenuación total de una antena dipolo o monopolo, será

$$\alpha H = \frac{R_{rv}}{Z_0} \text{ nepers} \quad (5.6)$$

Resistencia de radiación

Este es un parámetro que viene determinado por la capacidad que tiene la antena de disipar la energía que recibe del generador, radiándola al espacio.

Su valor en ohmios es el equivalente a una resistencia «física» que disipara la misma energía que radia la antena, cuando por las dos circula una corriente de igual intensidad.

Este valor está referido normalmente al punto en el que existe en la antena el máximo valor de corriente (vientre) y es función directa de la potencia radiada, o al punto de

alimentación, donde este valor es la componente activa del valor complejo de la impedancia de entrada.

La resistencia de radiación es función de la longitud del conductor y de la frecuencia de trabajo.

La expresión general de la resistencia de radiación de un dipolo de semilongitud eléctrica H, referida a un vientre de corriente, es:

$$R_{rv} = 30[(2 + 2 \cos b)S_1(b) - (\cos b)S_1(2b) - (2 \sin b)S_1(b) + (\sin b)S_1(2b)] \quad (5.7)$$

siendo

$$b=2\beta H$$

$$S_1(x) = \frac{x^2}{2 \cdot 2!} - \frac{x^4}{4 \cdot 4!} + \frac{x^6}{6 \cdot 6!} - \frac{x^8}{8 \cdot 8!} + \dots \quad (5.8)$$

$$S_i(x) = x - \frac{x^3}{3 \cdot 3!} + \frac{x^5}{5 \cdot 5!} - \frac{x^7}{7 \cdot 7!} + \dots \quad (5.9)$$

Estas dos últimas expresiones son generales siendo x cualquier número (en este caso vale b o 2b) y cuatro términos son suficientes para una aproximación aceptable.

La resistencia así calculada (R_{rv}) corresponde a un vientre de corriente,

Para hallar la resistencia en el punto de alimentación (R_{ra})

$$R_{ra} = \frac{R_{rv}}{\sin^2(\beta H)} \quad (5.10)$$

(βH es la longitud en radianes de la antena $\frac{2\pi H}{\lambda}$)

Para un monopolo, esta resistencia es la mitad.

Dado que la aplicación de esta fórmula general es muy laboriosa, si se dispone de un elemento auxiliar de cálculo adecuado, para fines prácticos podemos operar con las siguientes simplificaciones.

Dipolo de semilongitud $H > 0,2\lambda$)

$$R_{rv} = 30 \left[\left(\ln \frac{2H}{\lambda} + 1,722 \right) \cos \frac{4\pi H}{\lambda} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{4\pi H}{\lambda} + 4,83 + 2 \ln \frac{2H}{\lambda} \right] \quad (5.11)$$

Para un monopolo, este valor es la mitad. En el punto de alimentación,

$$R_{ra} = \frac{R_{rv}}{\sin^2(\beta H)} \quad (5.12)$$

Dipolo de semilongitud $H < 0,2\lambda$) y longitud eficaz L la resiste de radiación en el punto de alimentación es,

$$R_{ra} = 800 \frac{L_e^2}{\lambda^2} \quad (5.13)$$

Para un monopolo de altura $H < 0,2\lambda$ y altura eficaz H_e ,

$$R_{ra} = 1600 \frac{H_e^2}{\lambda^2} \quad (5.14)$$

Estas dos últimas fórmulas se deben emplear con precaución ya que se basan en una distribución constante de la corriente en la antena y eso sólo ocurre en radiadores elementales, antenas muy cortas respecto a la longitud de onda de trabajo, antenas cortadas a su longitud eficaz y rematadas en sus extremos con una capacidad adecuada o antenas de Hertz. Por esto los resultados obtenidos con estas fórmulas dan un error tanto mayor (hasta un 10 % aproximadamente), cuanto más cercana sea su longitud a $0,2\lambda$.

Aplicando la fórmula general y para distintos valores de la relación H/λ se han hallado los valores reseñados en la tabla, referidos al vientre de corriente.

H/λ	$R_v(\Omega)$	H/λ	$R_v(\Omega)$	H/λ	$R_v(\Omega)$
0.125	6.4	0.325	144	0.525	185
0.15	13	0.35	168	0.55	166
0.175	23	0.375	187	0.575	145
0.2	36.5	0.4	200	0.6	121
0.225	54	0.425	209	0.625	105
0.25	73	0.45	212	0.65	93
0.275	96	0.475	210	0.675	87
0.3	120	0.5	199	0.7	85

Tabla 5.2 Valores de resistencias de vientre de corriente para diferentes H/λ .

Los valores para un monopolo de altura H ($H \times 1,05$), son la mitad de los expuestos en la tabla.

Con esta tabla se puede construir una gráfica y así poder determinar las R_v de los valores intermedios de H/λ .

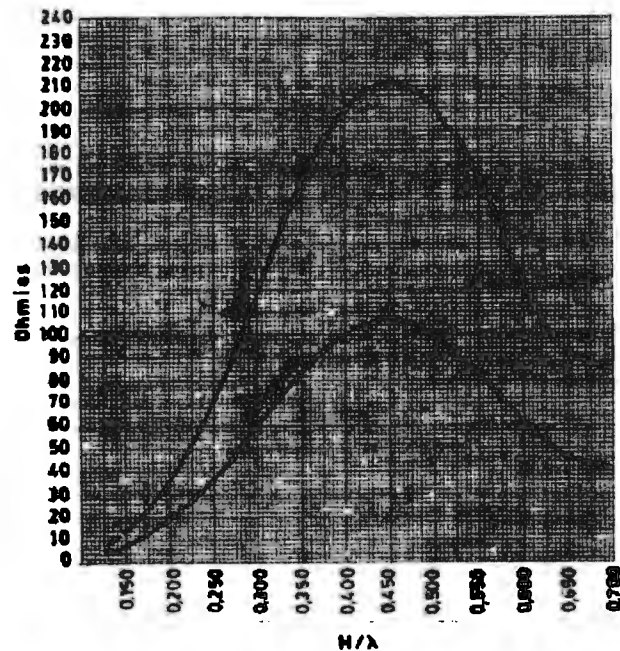


Figura 5.3 Gráfica de la resistencia de vientre de corriente para diferentes valores de H/λ

Coeficiente de onda

Este coeficiente es un ángulo unidad de valor $2\pi/\lambda$ radianes. También recibe el nombre de constante de fase. Son los radianes que corresponden a cada metro de longitud de onda.

Ganancia

La ganancia directiva máxima de un dipolo en función de su resistencia de radiación y su longitud eléctrica (semilongitud H) es, en el supuesto de que la potencia radiada sea 1 vatio y medida la intensidad de campo a una distancia unidad,

$$G_{d \max} = \frac{120}{R_r} [1 - \cos(\beta H)]^2 \quad (5.15)$$

Usualmente, la ganancia de una antena se compara con la ganancia de un dipolo de media onda ($2H$) o de un monopolo de cuarto de onda, según sea la antena considerada, y se da en dB.

a $G_{d \max}$ de un radiador isotrópico es: 1 (valor absoluto)

La $G_{d \max}$ de un radiador elemental es: 1,5 (valor absoluto)

La $G_{d \max}$ de un dipolo de media onda es: 1,64 (valor absoluto)

La ganancia en dB de una antena será:

$$G = 10 \log \frac{G_{d \max} \text{ antena } _ \text{ prueba}}{G_{d \max} \text{ antena } _ \text{ patrón}} \quad (5.16)$$

Cuando la antena patrón es la isotrópica, la ganancia se expresa en dBi.

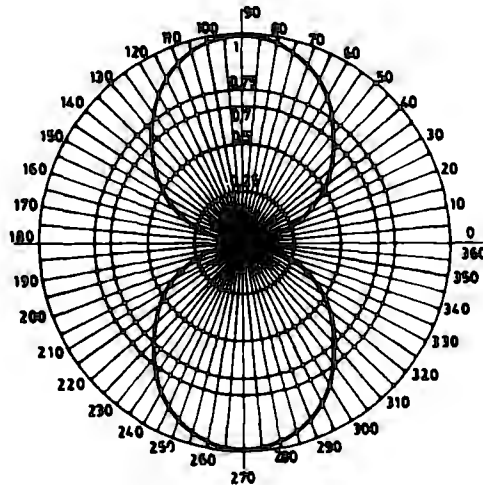


Figura 5.4 Patrón directivo de un dipolo

Resistencia de Entrada

La parte real de la impedancia de entrada compleja es la resistencia de entrada. La resistencia de entrada de la antena también se puede determinar a partir de la impedancia característica de la antena a través de la expresión:

$$R_c = \frac{Z_0}{2} \left(\frac{\sinh(2\alpha H)}{\cosh^2(\alpha H) - \cos^2(\beta H)} \right) \quad (5.17)$$

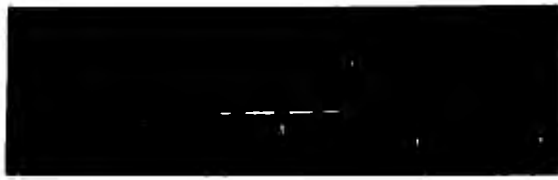
$$R_c = Z_0 \left(\frac{\sinh(2\alpha H)}{\cosh(2\alpha H) - \cos(2\beta H)} \right) \quad (5.18)$$

Esta R corresponde a la resistencia de radiación referida al punto de alimentación de la antena, cuando ésta se comporta como un circuito resonante serie.

Construcción de las antenas

En el principio del proyecto, se usaron las antenas disponibles en el laboratorio como inducción al uso de éstas con el analizador de espectros, sin embargo, dichas antenas no cubren las necesidades de longitud eléctrica para las frecuencias que se iban a manejar. Por lo tanto, se procedió a construir un juego de antenas con el cual se iban a hacer las mediciones.

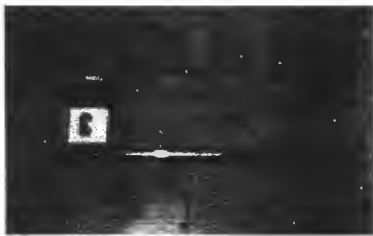
Las antenas construidas tienen una longitud física de $\lambda/4$, siendo ésta la longitud recomendada en la mayoría de los sistemas de comunicaciones. Se usó un tubo de cobre de 0.5". Se montaron las antenas en un mástil de madera para poder tenerlas en una posición fija. A continuación, se les soldó un conductor de longitud $\lambda/4$ y con impedancia característica $\sqrt{R_o R_A}$, en donde R_o es la impedancia del analizador de espectros y R_A la impedancia característica de la antena, se le conecta entonces el extremo de la antena al analizador de espectros, para poder llevar a cabo las mediciones.



Dipolo 156.8MHz



Dipolo 611 MHz



Monopolo 156.8MHz



Monopolo 611 MHz

Figura 5.5 Antenas construidas

Características de las antenas construidas

Para 156.8 MHz, se tiene:

Dipolo

Longitud física	$H_0 = 0.9566\text{m}$
Longitud Eléctrica	$H = 1\text{ m}$
Radio del conductor	$a = 0.0127\text{m}$
Distancia del punto considerado al punto de alimentación del dipolo	$r = 0.4783\text{ m}$
Impedancia característica	$Z_0 = 398.61\ \Omega$
Longitud de onda: (156.8 MHz)	$\lambda = 1.91\text{ m}$
Parámetro H/λ	$H/\lambda = 0.5236$
Resistencia en el vientre de corriente	$R_{rv} = 185\ \Omega$
Resistencia de Entrada	$R_e = 338.48\ \Omega$
Atenuación de Antena	$\alpha_H = 0.2132\text{ [nepers]}$
Atenuación de Antena	$\alpha_H = 1.8548\text{ [dB]}$
Atenuación del Cable	$\alpha = 0.0254\text{[dB]}$
Constante de fase	$\beta = 3.29\text{ radianes}$
Ganancia	$G_{dmax} = 1.65$
Ganancia respecto del patrón isotrópico	$G = 2.18\text{ [dBi]}$
Ganancia neta ($G - \alpha_H$)	$G_n = 0.322\text{ [dB]}$

Tabla 5.3 Parámetros de la antena dipolo construida para 156.8MHz.

Monopolo

Longitud física	$H_o = 0.4783\text{m}$
Longitud Eléctrica	$H = 0.5022\text{m}$
Radio del conductor	$a = 0.0127\text{m}$
Distancia del punto considerado al punto de alimentación del dipolo	$r = 0.4783\text{ m}$
Impedancia característica	$Z_o = 398.61\ \Omega$
Longitud de onda: (156.8 MHz)	$\lambda = 1.91\text{ m}$
Parámetro H/λ	$H/\lambda = 0.2624$
Resistencia en el vientre de corriente	$R_{rv} = 44\ \Omega$
Resistencia de Entrada	$R_e = 338.48\ \Omega$
Atenuación de Antena	$\alpha_H = 0.1103\text{ [nepers]}$
Atenuación de Antena	$\alpha_H = 0.9603\text{ [dB]}$
Atenuación del Cable	$\alpha = 0.0254\text{[dB]}$
Constante de fase	$\beta = 3.29\text{ radianes}$
Ganancia	$G_{dmax} = 1$
Ganancia respecto del patrón isotrópico	$G = 0\text{ [dBi]}$
Ganancia neta ($G - \alpha_H$)	$G_n = -0.9603\text{ [dB]}$

Tabla 5.4 Parámetros de la antena monopolo construida para 156.8MHz.

Para 611 MHz, se tiene:

Dipolo

Longitud física	$H_o = 0.08\text{m}$
Longitud Eléctrica	$H = 0.084\text{m}$
Radio del conductor	$a = 0.004\text{m}$
Distancia del punto considerado al punto de alimentación del dipolo	$r = 0.04\text{m}$
Impedancia característica	$Z_o = 306.641\ \Omega$
Longitud de onda: (611MHz)	$\lambda = 0.49\text{m}$
Parámetro H/λ	$H/\lambda = 0.17142$
Resistencia en el vientre de corriente	$R_{rv} = 22\ \Omega$
Resistencia de Entrada	$R_e = 28.2853\ \Omega$
Atenuación de Antena	$\alpha_H = 0.07174\text{ [nepers]}$
Atenuación de Antena	$\alpha_H = 0.62418\text{ [dB]}$
Atenuación del Cable	$\alpha = 0.0254\text{[dB]}$
Constante de fase	$\beta = 12.82\text{ radianes}$
Ganancia	$G_{dmax} = 1.5086$
Ganancia respecto del patrón isotrópico	$G = 1.78\text{ [dBi]}$
Ganancia neta ($G - \alpha_H$)	$G_n = 1.15582\text{ [dB]}$

Tabla 5.5 Parámetros de la antena dipolo construida para 611MHz.

Condiciones

Fecha: 28 de septiembre de 2004
 Hora: entre 15:28 y 16:19
 Lugar: Afueras de salón de congresos
 Temperatura: 18° C
 Frecuencia central: 611 MHz
 Span: 500 kHz/div
 RBW: 3 kHz
 Nivel de referencia: -50 dBm
 Tipo de antena: dipolo

Actividad solar: Baja (4300 SFU)
 Tormenta eléctrica: Nula
 Tráfico automotor: Medio

Ancho de banda (Hz)	Ruido promedio (dBm)	Ruido simulado (dBm)	Error
1	-157.52	-149.30	5.22%
10	-147.63	-139.28	5.66%
100	-137.50	-129.29	5.97%
1000	-127.45	-119.29	6.40%
10000	-117.66	-109.25	7.15%
100000	-107.40	-99.25	7.59%
1000000	-96.50	-89.22	7.54%

Tabla 5.6 Comparación entre los valores medidos y los simulados para una frecuencia de 611MHz utilizando un dipolo.

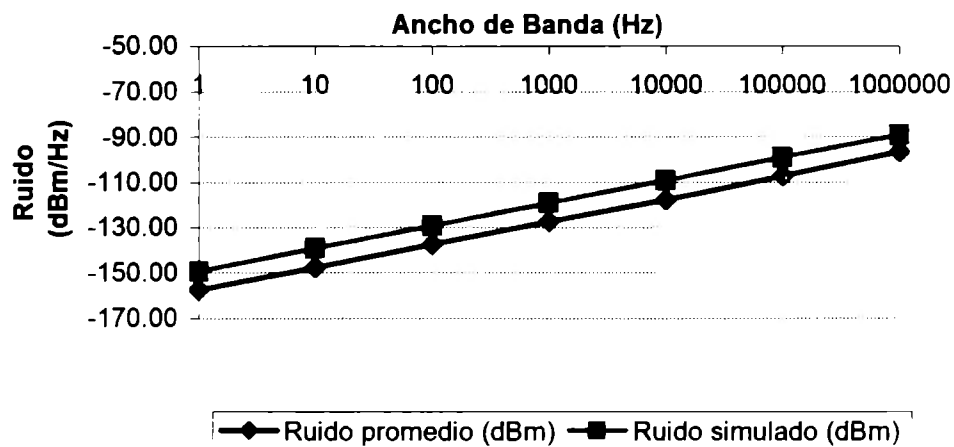
Comparación para 611 MHz, dipolo simple

Figura 5.6 Gráfica comparativa entre los valores medidos y los simulados para una frecuencia de 611MHz utilizando un dipolo simple.

En la gráfica anterior (figura 5.6) se puede apreciar un margen de error menor al 8% para una frecuencia de 611MHz.

Condiciones

Fecha: 8 de noviembre de 2004
 Hora: entre 18:20 y 18:34
 Lugar: Estacionamiento, primer nivel
 Temperatura: 14° C
 Frecuencia central: 156.8 MHz
 Span: 500 kHz/div
 RBW: 3 kHz
 Nivel de referencia: -70 dBm
 Tipo de antena: monopolo

Actividad solar: Baja (1025 SFU)
 Tormenta eléctrica: Nula
 Tráfico automotor: Alta

Ancho de banda (Hz)	Ruido promedio (dBm)	Ruido simulado (dBm)	Error
3000	-123.35	-130.7	5.93%
10000	-118.07	-125.429	6.23%
30000	-113.21	-120.647	6.57%
100000	-108.00	-115.42	6.87%
300000	-103.48	-110.631	6.91%
1000000	-98.25	-105.416	7.29%
3000000	-93.57	-100.646	7.56%
10000000	-88.29	-95.4135	8.07%

Tabla 5.7 Comparación entre los valores medidos y los simulados para una frecuencia de 156.8MHz utilizando un monopolo.

Comparación para 156.8 MHz, monopolo

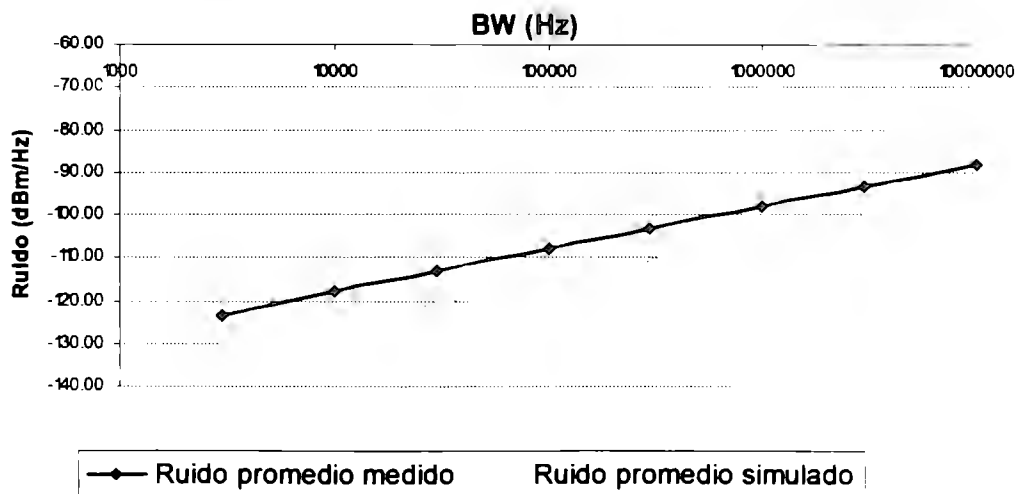


Figura 5.7 Gráfica comparativa entre los valores medidos y los simulados para una frecuencia de 156.8MHz utilizando un monopolo.

En esta gráfica (figura 5.7) se puede ver cómo se comporta el simulador al introducir parámetros para una alta densidad vehicular en el anochecer, con un monopolo, condiciones en las que se operó el analizador de espectros. Se puede apreciar que los errores siguen del orden del 5% con respecto a los valores medidos con el analizador, y que tienden a subir en una pequeña proporción conforme se incrementa el ancho de banda.

Condiciones

Fecha: 21 de septiembre de 2004
 Hora: entre 13:30 y 14:50
 Lugar: LE 03
 Temperatura: 20° C
 Frecuencia central: 156.8 MHz
 Span: 500 kHz/div
 RBW: 3 kHz
 Nivel de referencia: -70 dBm
 Tipo de antena: dipolo
 Actividad solar: Baja (1300 SFU)
 Tormenta eléctrica: Nula
 Tráfico automotor: Baja

Ancho de banda (Hz)	Ruido medido (dBm)	Ruido simulado (dBm)	Error
1	-153.57	-141.881	7.61%
10	-142.27	-131.906	7.28%
100	-129.89	-121.893	6.16%
1000	-118.58	-111.897	5.64%
10000	-109.71	-101.918	7.10%
100000	-103.03	-91.8892	10.81%
1000000	-91.00	-81.8652	10.04%

Tabla 5.8 Comparación entre los valores medidos y los simulados para una frecuencia de 156.8MHz utilizando un dipolo.

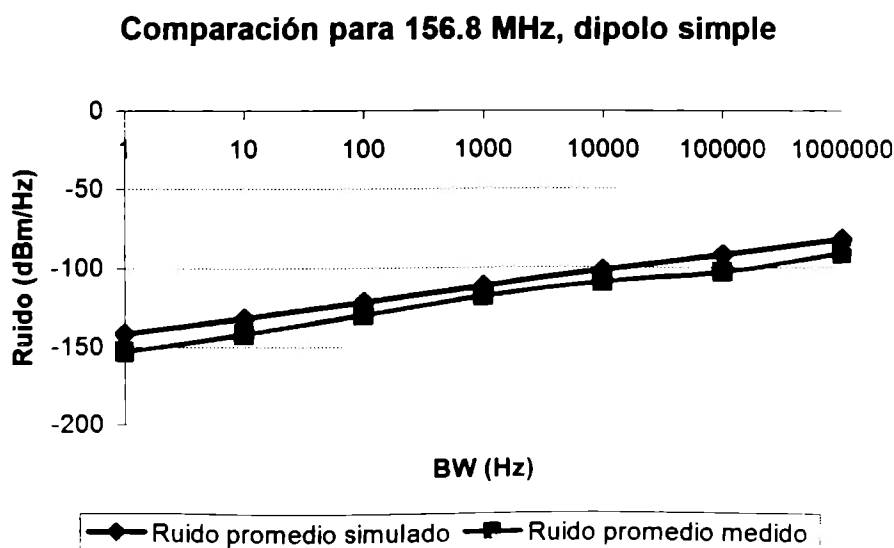


Figura 5.8 Gráfica comparativa entre los valores medidos y los simulados para una frecuencia de 156.8MHz utilizando un dipolo.

En esta gráfica (figura 5.8) se puede apreciar el comportamiento del ruido electromagnético a una frecuencia central de 156.8 MHz en horas de la tarde, con un tiempo templado. El simulador arroja resultados que oscilan entre el 7 y el 11% de los valores medidos con el analizador de espectros.

Condiciones

Fecha: 1 de noviembre de 2004

Hora: entre 19:15 y 19:30

Lugar: Exterior Aulas I

Temperatura: 17° C

Frecuencia central: 611 MHz

Span: 500 kHz/div

RBW: 3 kHz

Nivel de referencia: -70 dBm

Tipo de antena: dipolo

Actividad solar: Baja (500 SFU)

Tormenta eléctrica: Nula

Tráfico automotor: Baja

Ancho de banda (Hz)	Ruido promedio (dBm)	Ruido simulado (dBm)	Error
1	-156.24	-145.098	7.13%
10	-146.24	-135.114	7.61%
100	-136.07	-125.12	8.05%
1000	-126.3	-115.14	8.84%
10000	-116.27	-105.088	9.62%
100000	-106.16	-95.0846	10.43%
1000000	-96.47	-85.1168	11.77%

Tabla 5.9 Comparación entre los valores medidos y los simulados para una frecuencia de 611MHz utilizando un dipolo al anochecer.

Comparación para 611 MHz en la noche, dipolo simple

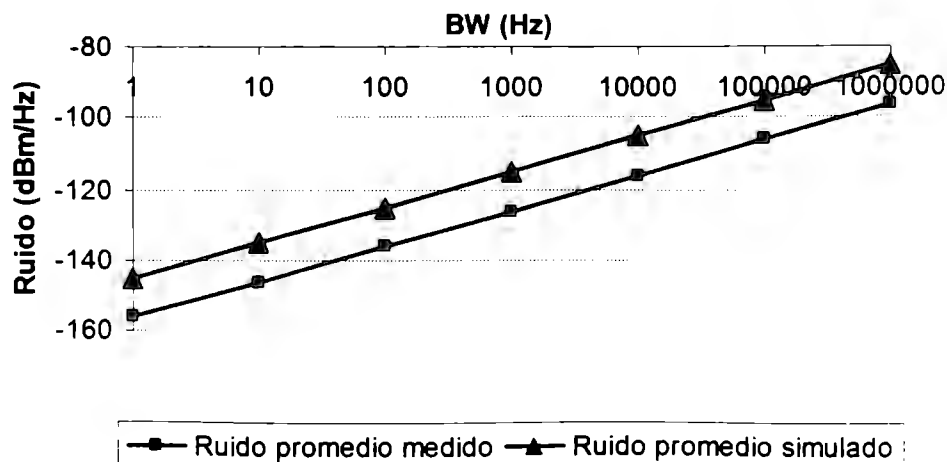


Figura 5.9 Gráfica comparativa entre los valores medidos y los simulados para una frecuencia de 611MHz utilizando un dipolo al anochecer.

Para esta gráfica (figura 5.9) se puede observar que en la noche decrece la actividad solar, para las condiciones mencionadas previamente, se tienen las siguientes gráficas tanto como para el ruido medido como para el ruido simulado; el error oscila entre un 7% y un 12% en dBm.

En la parte de predicción, que abarca desde los 625MHz hasta los 2GHz, tenemos la siguiente gráfica (figura 5.10) que explica la variación del ruido electromagnético con respecto al ancho de banda para frecuencias de 900 MHz, 1.5 y 2GHz.

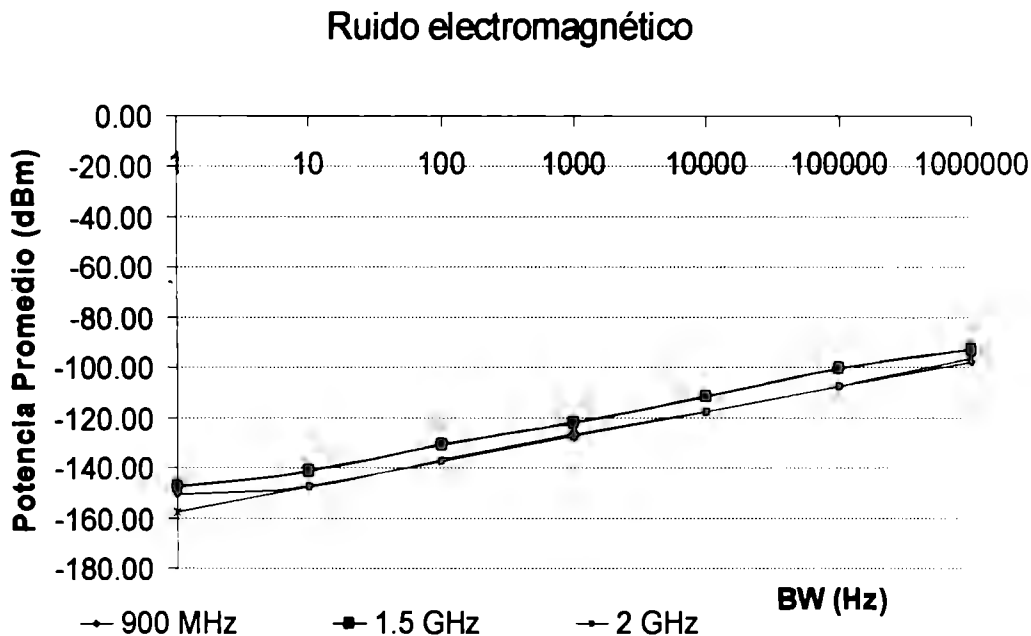


Figura 5.10 Gráfica comparativa entre los valores predictivos de la potencia promedio para frecuencias de 900MHz, 1.5 y 2GHz.

Como se puede apreciar, a mayor ancho de banda, mayor es la potencia promedio predicha para las tres frecuencias tomadas, siguiendo un comportamiento lineal dentro de una escala logarítmica.

Comparando la gráfica anterior con unas mediciones realizadas por Scintelsa dentro de las mismas frecuencias (900MHz, 1.5 y 2GHz) pudimos corroborar que nuestro simulador funciona con un margen de error menor al 4.7%.

6. Conclusiones, perspectivas y recomendaciones, trabajo a futuro

El **ruido térmico** es uno de los más significativos, en nuestro estudio y el modelo del resistor metálico funciona para nuestros fines en el proyecto.

El **ruido atmosférico** afecta poco a las comunicaciones. Sin embargo, a ciertas latitudes y bajo ciertas condiciones (como tormentas eléctricas), el ruido puede ser apreciable (como se muestra en la simulación), sobre todo en las bandas de frecuencia menores a HF.

El **ruido cósmico** en transmisiones inalámbricas es despreciable en la mayoría de los casos; sin embargo, cuando se presenta un evento solar tal como una tormenta, los efectos en las transmisiones aéreas se pueden ver muy afectadas por tal evento.

En el **ruido provocado por el hombre** existe una relación muy compleja entre las variables de entrada de una maquina eléctrica y el ruido que ésta produce. El modelado actual de ruido creado por el hombre queda limitado en este proyecto al ruido de naturaleza impulsiva.

La parte más compleja del proceso de modelado radica en la determinación de parámetros. Además de que las fuentes que hacen referencia a esto son pocas, no podemos asegurar que los datos sean válidos para cualquier entorno. Es por eso que sería recomendable realizar un riguroso y ordenado estudio sobre los niveles de ruido de origen humano en nuestro propio territorio; confiamos que esta investigación pudiera ser tomada como referencia para dicho estudio en un futuro.

El simulador se encuentra validado para frecuencias menores a 625MHz y considera los cuatro modelos de ruido tratados en este documento. Para frecuencias mayores y hasta de 2 GHz, el simulador es predictivo en cuanto al comportamiento de los modelos de ruido atmosférico, térmico y solar.

Este simulador funciona a frecuencias entre 0 y 2GHz y da resultados confiables (con un error menor al 12% en dBm). El error que encontramos entre los valores medidos y los obtenidos con el simulador se debe principalmente a la estimación de los parámetros de entrada del simulador y a que las antenas que construimos para el estudio no son de alta precisión. Por otra parte, si tomáramos en cuenta la polarización horizontal de las antenas construidas, además de la vertical, obtendríamos más de 3dB en cada medición, lo cual se aproxima mejor a los resultados del simulador.

Este proyecto, pretende ser de vital importancia para la fabricación, reparación y análisis de sistemas de comunicaciones inalámbricos, que trabajen en los rangos de frecuencia ya descritos (0 a 2GHz). Es por lo tanto, una herramienta predictiva para los diseñadores y fabricantes de estos tipos de sistemas.

Estando conscientes de la complejidad del tema y sin menoscabo de este estudio, sería propicio realizar a futuro una investigación en la parte experimental mucho más profunda e incluso proponer un modelo matemático general, más robusto y con mayor precisión. A partir de él se busca retroalimentar este simulador y se obtener resultados más fidedignos.

Bibliografía

- [1] *Radio Noise Recommendation ITU-R P.372-8*, 2003.
- [2] TOMASI, WAYNE. *Electronic Communications Systems: Fundamentals Through Advanced*. 4a ed. Prentice Hall, New Jersey: 2001.
- [3] MASTRANGELO, JOHN F. 'A New Noise Model and its Implementation in a Real-Time Signal Processing System.' *IEEE* 1993
- [4] OLSON, KATHARYN E. Y PER K. ENGE. 'Forward Error Correction for an Atmospheric Noise Channel.' *IEEE* 1992.
- [5] S. J. YANG, *Low-noise Electrical Motors*. Oxford, U.K.: Clarendon, 1981
- [6] TIMAR, P.L., *Noise and Vibrations of Electrical Machines*: Amsterdam. Elsevier 1989
- [7] IEEE Journal: Praveen Vijayraghavan y R. Krishnan
- [8] SCHWARTZ, MISHA; *Transmisión de Información, Modulación y Ruido*; 3ª ed; Mc Graw Hill; 1983.
- [9] LANZEROTTI, L., *Solar and Solar radio effects on technologies*; Bell Laboratories, Lucent Technologies; 2002
- [10] VELASCO SOTOMAYOR, GABRIEL Y PIOTR MARIAN WISNIEWSKI. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Edit. Thomson Learning. México: 2001.
- [11] DOWNIE, N.M. Y R.W. HEATH. *Métodos Estadísticos Aplicados*. Edit. Harla. México: 1970.
- [12] STREMLER, FERREL G. *Introducción a los Sistemas de Comunicaciones*. Edit. Addison-Wesley. E.U.A.: 1993.
- [13] OPPENHEIM, ALAN V. *Señales y Sistemas*. Edit. Pearson Education. México: 1997.
- [14] FISHMAN, PHILIP M. ET AL. *A Statistical Model for Burst Duration and Time Between Bursts for WBHF Atmospheric Noise*. IEEE, 1991.
- [15] LAUBER, WILFRED R. Y JEAN M. BERTRAND, "Statistics of Motor Vehicle Ignition Noise at VHF/UHF", IEEE Transactions on Electromagnetic Compability, Vol. 41, 1999.
- [16] SPAULDING, A.D. Y R.T. DISNEY, "Man-Made Noise Part I", OTR 75-38.
- [17] MASOUM, H. Y J.G. GARDINER, "Simulation of Man-Made Noise in 100 MHz to 3 GHz Band", University of Bradford.
- [18] SUGIURA AKIRA, "Radio Noise Measurements and Related Standards", Tohoku University (Japan), FCC Tutorial 1.
- [19] GARCÍA DOMÍNGUEZ, A, *Cálculo de antenas*, 2ª Ed. Alfaomega marcombo, Barcelona España 1995. pp. 18 - 31

Anexos

Código Fuente de la simulación en Matlab

```
function varargout = GUI(varargin)
% GUI M-file for GUI.fig
% GUI, by itself, creates a new GUI or raises the existing
% singleton*.
%
% H = GUI returns the handle to a new GUI or the handle to
% the existing singleton*.
%
% GUI('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
% function named CALLBACK in GUI.M with the given input arguments.
%
% GUI('Property','Value',...) creates a new GUI or raises the
% existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
% applied to the GUI before GUI_OpeningFunction gets called. An
% unrecognized property name or invalid value makes property application
% stop. All inputs are passed to GUI_OpeningFcn via varargin.
%
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
%

% Edit the above text to modify the response to help GUI

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @GUI_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @GUI_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin & isstr(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

function GUI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;

function varargout = GUI_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function ancho_de_banda_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
```

```

function ancho_de_banda_Callback(hObject, eventdata, handles)
function frecuencia_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function frecuencia_Callback(hObject, eventdata, handles)
function atenuacion_cable_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function atenuacion_cable_Callback(hObject, eventdata, handles)

function temperatura_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function temperatura_Callback(hObject, eventdata, handles)
function descargas_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function descargas_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
function ruido_promedio_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function ruido_promedio_Callback(hObject, eventdata, handles)
function pop_up_TSolar_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function pop_up_TSolar_Callback(hObject, eventdata, handles)
val = get(hObject,'Value');

```

```

str = get(hObject, 'String');
switch str{val};
case 'si' % User selects SI
    handles.current_data = handles.si;
case 'no' % User selects NO
    handles.current_data = handles.no;
end
guidata(hObject,handles)

function boton_aceptar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to boton_aceptar (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Display plot of the currently selected data
BW = str2double(get(handles.ancha_de_banda,'String'));
Freq = str2double(get(handles.frecuencia,'String'));
Atenuacion_Cable = str2double(get(handles.atenuacion_cable,'String'));
Temp = str2double(get(handles.temperatura,'String'));
Descargas = str2double(get(handles.descargas,'String'));
%Freq_prueba = str2double(get(handles.frec_prueba,'String'));
Resistencia_antena = str2double(get(handles.resistencia,'String'));
Ganancia_antena= str2double(get(handles.ganancia_antena,'String'));
Intensidad_solar = str2double(get(handles.intensidad,'String'));
Flujo = str2double(get(handles.flujo_autos,'String'));
Area_Antena = str2double(get(handles.area_antena,'String'));

guidata(hObject,handles);

% Calculos
n = 0:0.00000000025:0.000025;

a=0;

%INICIA RUIDO ATMOSFERICO
t= randn(size(n));

%Generador de los impulsos(hace falta acopiar el modelo de la distribucion
%de probabilidad de la duracion de los 2 estados)

%La variable z es la componente impulsiva del ruido atmosferico, t es el
%ruido de fondo, a es la señal de prueba

%z=y.*w;

%Si no hay tormentas (descargas) la componente impulsiva no existe
if Descargas==3
    final=zeros(1,100001);
else
    if Descargas==1
        num_Descargas=round(unifrnd(4,8,1,1));
    end
    if Descargas==2
        num_Descargas=round(unifrnd(1,2,1,1));
    end
    v=zeros(1,10);
    p=zeros(1,1000);
    w=zeros(1,1000);
    cont=0;
    for i=0:num_Descargas-1,
        variable=round(unifrnd(1,10,1,1));
        if(v(variable)>0)
            v(variable)=cont+1;
        end
    end
end

```

```

        cont=cont+1;
    else
        v(variable)=1;
    end
end;
for i=0:9,
    for j=100*i+1:100*i+100,
        p(1,j)=v(1,i+1);
    end
end

for (k=1:1000)
    v=unifrnd(0,1,1,1000);
    if(v(1,k)<0)
        w(1,k)=0;
    else
        w(1,k)=v(1,k);
    end
end

z=p.*w;
final=zeros(1,100001);
for k=1:100000,
    if mod(k,100)==0;
        final(1,k)=z(1,round((k+2)/100));
    else
        final(1,k)=0;
    end
end
end

%Consecuencia de que a frecuencias mayores a HF no hay ruido atmosferico
if Freq > 30000
    ruido_atm=((10*final+t+a)/30)/1000000;
else
    ruido_atm=(10*final+t+a)/1000000;
end
%TERMINA RUIDO ATMOSFERICO

%INICIA RUIDO TERMICO
sigma=(4*1.38*power(10,-23)*Temp*BW*1000*Resistencia_antena)^0.5;
ruido_term=power(10,6)*normrnd(0,sigma,1,100001)+a/10000000;
%TERMINA RUIDO TERMICO

%INICIA RUIDO SOLAR
c=3*power(10,8);
Pi=3.14159265;
Tempequ=Ganancia_antena*c*c*Intensidad_solar*1*power(10,-22)/(8*Pi*1.38*power(10,-23)*Freq*Freq*1000*1000);
sigma1=(4*1.38*power(10,-23)*Tempequ*BW*1000*Resistencia_antena)^0.5;
ruido_solar=power(10,6)*normrnd(0,sigma1,1,100001)+a/10000000;
%TERMINA RUIDO SOLAR

%INICIA RUIDO CREADO POR EL HOMBRE
r = 0:0.00000008:0.080;
r2=0:0.0000000008:0.0008;
lambda=8;
ancho_pulso=62;
ancho_pulso2=62500;
contador=0;
matriz=zeros(1,100001);
num_pulsos=15;

```

```

if Flujo==1,
    media=223.87;
    variacion=15;
end
if Flujo==2,
    media=125.892;
    variacion=10;
end
if Flujo==89.125,
    media=32;
    variacion=5;
end
for i=1:num_pulsos,
    dado=poisspdf(round(unifrnd(1,10,1,1)),lambda)*100000;
    g=normrnd(media,variacion,1,1);
    for j=0:ancho_pulso,
        if (round(dado)+j+contador)<100001,
            matriz(round(dado)+j+contador)=g*10^-6;
        end
    end
    contador=round(dado)+ancho_pulso+contador;
end
size(matriz);
fondo=10^-10*normrnd(0,1,1,100001);
dado2=poisspdf(round(unifrnd(1,10,1,1)),lambda)*1000000;
matriz2=zeros(1,1000001);
for k=0:ancho_pulso2,
    matriz2(round(dado2)+468750+k)=g*10^-6;
end
fondo2=10^-10*normrnd(0,1,1,1000001);
ruido_hombre2=(matriz2+fondo2);
ruido_hombre=(matriz+fondo);
%TERMINA RUIDO CREADO POR EL HOMBRE

% Esta es la grafica en dominio del tiempo del ruido atmosferico
%axes(handles.Graf_atm_t);
figure(1);
subplot(2,1,1);
%Suponemos ganancia mayor de 1
plot(1000000*n(1:100000),1000000*ruido_atm(1:100000),'c')
%set(handles.Graf_t,'XMinorTick','on')
title('Ruido Atmosferico en el Dominio del Tiempo');
xlabel('Tiempo(us)');
ylabel('Campo Electrico(uV/m)');
grid on
subplot(2,1,2);
inicio=Freq-(BW/2);
fin=Freq+(BW/2);
f1=2048;
f2=f1/2;
Y1 = fft(ruido_atm/1,f1);
%densidad_potencia_atm=ruido_atm.*ruido_atm/377;
densidad_potencia_atm=Y1.*conj(Y1)/(377);
potencia_atm=Area_Antena*densidad_potencia_atm;
%potencia_dBm_atm=10*log10(potencia_atm/0.001)-Atenuacion_Cable;
potencia_dBm_atm=10*log10(potencia_atm/0.001)-Atenuacion_Cable;
%Esta es la densidad espectral de potencia en unidades de Watts por Hertz
%Pyy1 = Y1.* conj(Y1) / f1;
%Densidad en dBm
%Tyy1=10*log10(Pyy1/0.001)-Atenuacion_Cable;
f = 4*(0:f2)/f1;
paso=BW/(f2/(512));

```

```

escala=(paso*f)+inicio;
plot(escala,potencia_dBm_atm(1:f2+1),'c')
title('Ruido Atmosferico en el Dominio de la Frecuencia');
xlabel('Frecuencia (kHz)');
ylabel('Potencia (dBm/Hz)');
grid on

% Esta es la grafica en el dominio del tiempo del ruido termico
%axes(handles.Graf_term_t);
figure(2);
subplot(2,1,1);
plot(1000000*n(1:100000),ruido_term(1:100000),'m')
%set(handles.Graf_t,'XMinorTick','on')
title('Ruido Termico en el Dominio del Tiempo');
xlabel('Tiempo(us)');
ylabel('Voltaje(uV)');
grid on
subplot(2,1,2);
inicio=Freq-(BW/2);
fin=Freq+(BW/2);
f1=2048;
f2=f1/2;
Y2 = fft(ruido_term/1000000,f1);
%Esta es la densidad espectral de potencia en unidades de Watts por Hertz
Pyy2 = Y2.* conj(Y2) / f1;
%Densidad en dBm
Tyy2=10*log10(Pyy2/0.001)-Atenuacion_Cable;
f = 4*(0:f2)/f1;
paso=BW/(f2/(512));
escala=(paso*f)+inicio;
plot(escala,Tyy2(1:f2+1),'m')
title('Ruido Termico en el Dominio de la Frecuencia');
xlabel('Frecuencia (kHz)');
ylabel('Potencia (dBm/Hz)');
grid on

% Esta es la grafica en el dominio del tiempo del ruido solar
%axes(handles.Graf_solar_t);
figure(3);
subplot(2,1,1);
plot(1000000*n(1:100000),ruido_solar(1:100000),'r')
%set(handles.Graf_t,'XMinorTick','on')
title('Ruido Solar en el Dominio del Tiempo');
xlabel('Tiempo(us)');
ylabel('Voltaje(uV)');
grid on
subplot(2,1,2);
inicio=Freq-(BW/2);
fin=Freq+(BW/2);
f1=2048;
f2=f1/2;
Y3 = fft(ruido_solar/1000000,f1);
%Esta es la densidad espectral de potencia en unidades de Watts por Hertz
Pyy3 = Y3.* conj(Y3) / f1;
%Densidad en dBm
Tyy3=10*log10(Pyy3/0.001)-Atenuacion_Cable;
f = 4*(0:f2)/f1;
paso=BW/(f2/(512));
escala=(paso*f)+inicio;
plot(escala,Tyy3(1:f2+1),'r')
title('Ruido Solar en el Dominio de la Frecuencia');
xlabel('Frecuencia (kHz)');

```

```

ylabel('Potencia (dBm/Hz)');
grid on

% Esta es la grafica en dominio del tiempo del ruido creado por el hombre
%axes(handles.Graf_atm_t);
figure(4);
%subplot(2,1,1);
subplot(4,1,1);
plot(1000*r(1:100000),1000000*ruido_hombre(1:100000),'y')
%set(handles.Graf_t,'XMinorTick','on')
title('Ruido Creado por el Hombre en el Dominio del Tiempo');
xlabel('Tiempo(ms)');
ylabel('Campo Electrico (uV/m)');
grid on
inicio=Freq-(BW/2);
fin=Freq+(BW/2);
f1=100000;
f2=f1/2;
Y4 = fft(ruido_hombre/1,f1);
densidad_potencia_hombre=Y4.*conj(Y4)/377;
%densidad_potencia_hombre=ruido_hombre.*ruido_hombre/377;
potencia_hombre=Area_Antena*densidad_potencia_hombre;
potencia_dBm=10*log10(potencia_hombre/0.001)-Atenuacion_Cable;
Y4_2 = fft(ruido_hombre2/1,f1);
densidad_potencia_hombre2=Y4_2.*conj(Y4_2)/377;
%densidad_potencia_hombre=ruido_hombre.*ruido_hombre/377;
potencia_hombre2=Area_Antena*densidad_potencia_hombre2;
potencia_dBm2=10*log10(potencia_hombre2/0.001)-Atenuacion_Cable;
f1=100000;
f2=f1/2;
%Fmax 625MHz
f = 1250*(0:f2)/f1;
%subplot(2,1,2);
subplot(4,1,2);
size(f);
size(potencia_dBm);
plot(f,potencia_dBm(1:f2+1),'y');
title('Ruido Creado por el Hombre en el Dominio de la Frecuencia');
xlabel('Frecuencia (kHz)');
ylabel('Potencia (dBm/Hz)');
grid on
subplot(4,1,3);
plot(1000*r2(1:1000000),1000000*ruido_hombre2(1:1000000),'y');
title('Ruido Creado por el Hombre en el Dominio del Tiempo');
xlabel('Tiempo(ms)');
ylabel('Campo Electrico (uV/m)');
grid on
subplot(4,1,4);
plot(f,potencia_dBm2(1:f2+1),'y');
title('Ruido Creado por el Hombre en el Dominio de la Frecuencia');
xlabel('Frecuencia (MHz)');
ylabel('Potencia (dBm/Hz)');
grid on
%figure(5);
%plot(10*log10(Y4.*conj(Y4)));
%Esta es la densidad espectral de potencia en unidades de Watts por Hertz
%Pyy4 = Y4.* conj(Y4) / f1;
%Densidad en dBm
%Tyy4=10*log10(Pyy4/0.001)-Atenuacion_Cable;
%f = 4*(0:f2)/f1;
%paso=BW/(f2/(512));
%escala=(paso*f)+inicio;

```

```

%plot(escala,Tyy1(1:f2+1),'y')

figure (5)
size(escala)
%size(potencia_dBm_atm(1:f2+1))
z=ones(1,1025);
size(z)
hold on
plot3(escala,z,potencia_dBm_atm(1:1025),'c');
plot3(escala,z*2,Tyy2(1:1025),'m');
plot3(escala,z*3,Tyy3(1:1025),'r');
title('Comparacion de Ruidos en el Dominio de la Frecuencia');
xlabel('Frecuencia (kHz)');
zlabel('Potencia (dBm/Hz)');
grid on;
axis square;
hold off

% Esta es la grafica en el dominio del tiempo del ruido total
ruido_total=ruido_term+ruido_atm+ruido_solar;
axes(handles.Graf_t);
plot(1000000*n(1:100000),ruido_total(1:100000))
set(handles.Graf_t,'XMinorTick','on');
title('Ruido Total en el Dominio del Tiempo');
xlabel('Tiempo(us)');
ylabel('Voltaje(uV)');
grid on

%INICIA ESCALACION DE LA GRAFICA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA
inicio=Freq-(BW/2);
fin=Freq+(BW/2);
f1=2048;
f2=f1/2;
xcentro=round(f2*Freq/(BW));
xizq=round(f2*inicio/(BW));
xder=round(f2*fin/(BW));
%TERMINA ESCALACION DE LA GRAFICA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

% Esta es la grafica en el dominio de la frecuencia
axes(handles.Graf_f)
Y = fft(ruido_total/1000000,f1);
%Esta es la densidad espectral de potencia en unidades de Watts por Hertz
Pyy = Y.* conj(Y) / f1;
%Densidad en dBm
Tyy=10*log10(Pyy/0.001)-Atenuacion_Cable;
f = 4*(0:f2)/f1;
paso=BW/(f2/(512));
escala=(paso*f)+inicio;
plot(escala,Tyy(1:f2+1))
set(handles.Graf_f,'XMinorTick','on')
title('Ruido Total en el Dominio de la Frecuencia');
xlabel('Frecuencia (kHz)');
ylabel('Potencia (dBm/Hz)');
grid on

%Ahora los resultados analiticos
media=(sum(ruido_total))/100000;
var=((sum(power((ruido_total-media),2)))/100000);
integral=10*log10(((sum(power(abs(ruido_total/1000000),2)))/100000)/0.001);
set(handles.ruido_promedio,'String',media);
set(handles.varianza,'String',var);
set(handles.potencia_promedio,'String',integral);

```

```

guidata(hObject,handles);

function varianza_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function varianza_Callback(hObject, eventdata, handles)
function potencia_promedio_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function potencia_promedio_Callback(hObject, eventdata, handles)
function intensidad_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function intensidad_Callback(hObject, eventdata, handles)
function agregar_senal_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function agregar_senal_Callback(hObject, eventdata, handles)
valor = get(hObject,'Value');
str = get(hObject, 'String');
switch str{valor};
case 'si'
    opcion=1;
    handles.agregar_senal = handles.si;
case 'no'
    opcion=2;
    handles.agregar_senal= handles.no;
end
guidata(hObject,handles)

function frec_senal_prueba_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
%RTD290804
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function frec_senal_prueba_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

function resistencia_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function resistencia_Callback(hObject, eventdata, handles)
function edit16_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit16_Callback(hObject, eventdata, handles)
function ganancia_antena_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function ganancia_antena_Callback(hObject, eventdata, handles)
function fluio_autos_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function flujo_autos_Callback(hObject, eventdata, handles)
function area_antena_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function area_antena_Callback(hObject, eventdata, handles)

```