CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la electrónica se ha desarrollado de una manera impresionante y con esto el uso y procesamiento de señales se ha incrementado. Debido al tráfico de tanta información, y otros factores como el clima y medios geográficos, las señales presentan problema de ruido, lo que complica la transmisión y recepción de datos.

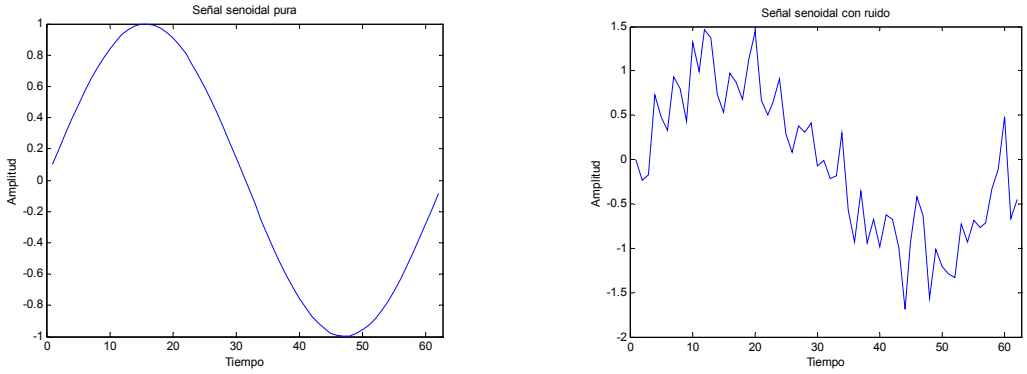
En esta tesis se estudiará y analizará la teoría de *wavelets*, que es una herramienta matemática a la cual se le puede dar varias aplicaciones, una de ellas es la reducción de ruido [KOB99]. Actualmente existen varios métodos que se utilizan para reducir el ruido de las señales, entre ellos están los que suprimen el ruido en la fuente, acoplamientos para eliminación de ruido y los que reducen el ruido en el receptor; dentro de esta clasificacion destacan los filtros en todas sus variedades que son sin duda los que más se utilizan. Para más detalle se puede consultar [OTT88]. En esta tesis hablaremos únicamente sobre aquellos métodos para reducir ruido utilizando la teoría de *wavelets*, dado que han demostrado ser mejor que los métodos tradicionales en un estudio comparativo que se puede consultar en [WRQ98]. Por ello se investigarán los 3 algoritmos más importantes que existen en la literatura para compararlos y determinar cual es el más adecuado para trabajar bajo ciertas condiciones de trabajo.

Una vez concluida esta tesis, el lector tendrá una idea clara de lo que es la teoría de *wavelets* y las posibles aplicaciones que se le pueden dar, las cuales abarcan la compresión de señales, reducción de ruido, identificación de frecuencias puras entre otras [KOB99]. En el análisis comparativo de los 3 algoritmos para reducir ruido se dejará en claro cual es el comportamiento con diferentes *wavelets* y el lector podrá decidir cual es la mejor opción a utilizar para cierta aplicación, por ejemplo, para telefonía celular en los casos de enlaces aéreos inalámbricos de acuerdo con la señal que se trabaje y tipo de modulación.

1.1 Planteamiento del problema: el ruido

Iniciaremos con la explicación del problema, de ésta forma tendremos en claro que es lo que este trabajo involucra y que es lo que se puede esperar de él. Como primer punto debemos aclarar lo que es el ruido. Se entiende por ruido la mezcla de señales aleatorias de diferente frecuencia a la de una señal principal de interés, pudiendo ser mayor o menor a la frecuencia que se desea [JAL00]. En la actualidad existen diferentes fuentes ruido y se clasifican en diversas formas. A continuación se describen brevemente las principales .

Como hemos dicho anteriormente el ruido es una frecuencia indeseable, dicho de otro modo, es un elemento extra que aparece en la señal de interés y que produce ciertos problemas. De acuerdo con Tomasi en [TOM01], y de una manera más formal, el ruido electrico se define como una energía electrica indeseable que aparece en la frecuencia de la señal. En la figura 1 vemos una señal senoidal pura y otra con un ruido agregado.



a) b)

Figura 1. *a) Señal senoidal pura y b) senoidal con ruido.*

Existen varias formas en que se presenta el ruido y esto se debe a la naturaleza del mismo, por ello es que se ha clasificado en base a su comportamiento, de esta forma tenemos que el ruido se puede clasificar en dos categorias que son: Correlacionado y No correlacionado. El ruido correlacionado es aquel que involucra a una señal, es decir, existe sólo cuando una señal está presente. Por otro lado tenemos que el ruido no correlacionado es el que está presente independientemente de que exista señal o no. En la figura 2 se presenta un resumen de las principales fuentes de ruido eléctrico.

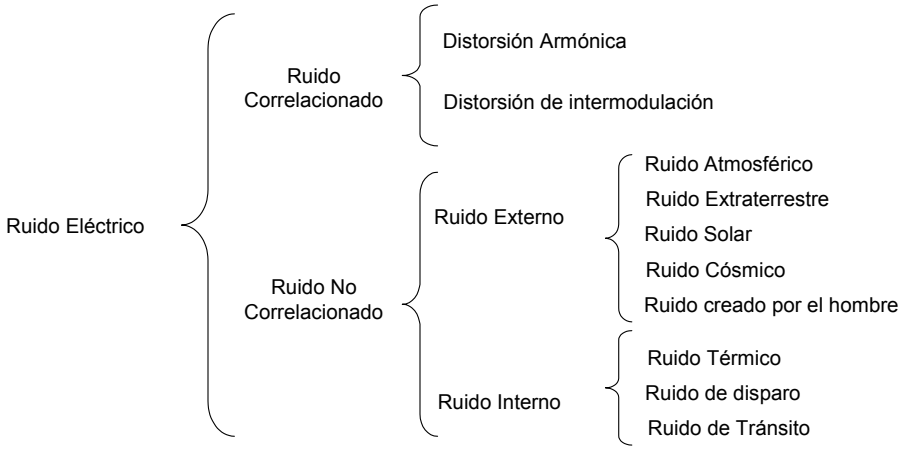


Figura 2. *Principales formas de ruido eléctrico.*

El ruido Correlacionado es producido principalmente por amplificaciones no lineales e incluye armónicos y distorsión de intermodulación, que son dos formas de distorsión no lineal.

1. Distorsión armónica: Se define como la producción de armónicos de una señal originados por una mezcla no lineal. Los armónicos son múltiplos enteros de la señal orignal de entrada. La señal original es la primer armónica y se conoce como la frecuencia fundamental.

2. Distorsión de intermodulación: Se refiere a la generación indeseable de productos cruzados, que son la suma o resta de frecuencias. Estos productos cruzados se generan por la mezcla no lineal de dos o más señales.

Dentro del ruido No Correlacionado tenemos el ruido externo, el cual se produce fuera del sistema que trata la señal, es decir, medios de comunicación, circuitos, amplificadores, etc. Las tres principales fuentes de ruido externo son:

1. Ruido atmosférico: Conocido como estática eléctrica, se escucha en los receptores de comunicación aún cuando no hay señal presente. La principal fuente son las tormentas eléctricas cuando se presentan impulsos que riegan energía sobre un ancho rango de frecuencias. La magnitud de su energía es inversamente proporcional a su frecuencia. Por lo que a frecuencias mayores de 30Mhz, el ruido atmosférico es relativamente insignificante [TOM01].

2. Ruido extraterrestre: Consiste de señales eléctricas que se originan fuera de la atmósfera terrestre, algunas veces es conocido como ruido del espacio profundo. Las principales formas de este ruido proviene de la Vía Láctea, otras galaxias y el Sol, por ello se subdivide en dos categorías que son ruido solar y cósmico. El primero comprende dos partes, la condición normal, cuando el Sol se encuentra en calma con una intensidad de radiación constante y la de alta intensidad provocada por disturbios esporádicos por la actividad del Sol, que sigue un patrón que se repite cada 11 años aproximadamente [TOM01]. El ruido cósmico es llamado también ruido de los cuerpos negros, ya que las fuentes se encuentran dispersas a lo largo de las galaxias, por ello la intesidad de este ruido es relativamente pequeña.

3. Ruido creado por el hombre: Es aquel que ha sido producido por la mano del hombre en su afán por los procesos productivos, por ello se le conoce como ruido industrial. Este tipo de ruido aparece principalmente por motores eléctricos, sistemas de ignición de automóviles, generadores de corriente alterna, equipos de conmutación y lámparas fluorecentes. Esta clase de ruido se propaga por el espacio de igual forma que las ondas de radio, sólo que contiene un gran rango de frecuencias.

Otra variante del ruido no correlacionado es el ruido interno, que es la interferencia eléctrica generada dentro de un diseño o circuito. Existen tres formas principales de generar el ruido interno:

1. Ruido de disparo: Es provocado por la llegada aleatoria de los electrones, o huecos, a la salida del elemento de un diseño electrónico, tal como diodos, transitores de efecto de campo y de union, por esto es que se le conoce también como ruido de transistor. Se descubrió en 1918 por *W. Schottky* [TOM01].

2. Ruido de tránsito: Es aquel en el que existen modificaciones en los electrones o huecos que viajan de la entrada a la salida del circuito. Esto produce variaciones irregulares y aleatorias. Cuando el tiempo que tarda un electrón en propagarse a través del circuito es una parte apreciable del del tiempo de un ciclo de la señal, el ruido llega a ser notable.

3. Ruido térmico: Se asocia con el movimiento rápido y aleatorio de los electrones en un conductor producido por la agitación térmica. Este fenómeno fue visto por vez primera en los *Bell Telephone Laboratories* por *J. B. Johnson* en 1927. Esto se explica de

la siguiente manera, un electrón en un conductor porta una unidad negativa de carga, y la velocidad media cuadrática del electrón es proporcional a la temperatura absoluta, por lo que el recorrido de cada electrón entre las colisiones con las moléculas representa un pequeño pulso de corriente que desarrolla un pequeño voltaje a través de los componentes resistivos del conductor. Como los movimientos del electrón son totalmente aleatorios y en todas direcciones, el voltage promedio es 0 volts de corriente directa. Sin embargo, como es un movimiento aleatorio produce componentes de corriente alterna. Este fenómeno recibe varios nombres como Ruido Browniano, Ruido Johnson y Ruido blanco porque el movimiento aleatorio es en todas las frecuencias. La potencia del ruido puede ser calculada bajo la siguiente expresión:

$$NP = KTB_n \tag{1}$$

donde K es la constante de proporcionalidad de *Boltzman* (1.38 x 10^{-23} joules por kelvin), T es la temperatura absoluta (kelvin) y B_n es el ancho de banda del ruido (hertz). Otra propiedad importante de esta clase de ruido es que tiene una densidad de potencia constante en todas las frecuencias, por ello es que se le reconoce a una fuente de ruido térmico como una fuente de ruido blanco, en analogía con la luz blanca que contiene todas frecuencias del espectro visible [TOM01]. Podemos ver que el ruido térmico es aleatorio, continuo y ocurre en todas las frecuencias, también es predecible, aditivo y está presente en todos los diseños de circuitos, por ello es que el ruido térmico es el más significativo de todas las fuentes de ruido.

La interferencia es una forma de ruido externo el cual provoca disturbios a otras señales. Si una señal procedente de una fuente produce frecuencias que caen fuera del ancho de banda que le corresponde, entonces está provocando interferencia a otra señal que comparte el ancho de banda vecino, a este fenómeno también se le conoce como ruido de canal adyacente [GAB03].

Ahora conocemos las principales clases de ruido que existen y podemos catalogarlas de acuerdo a la clasificación que ya explicamos. Es importante señalar que para este trabajo en particular trabajaremos con el Ruido Térmico mejor conocido como Ruido Blanco, ya que posee una densidad de potencia constante para todas las frecuencias. Las características que posee nuestra muestra de ruido es $N(0,1)$, la cual denota una distribución normal o Gaussiana con media igual a cero y varianza igual a uno, lo que involucra una desviación estándar igual a 1 [OTT88].

El ancho de banda del ruido B_n es definido para un sistema con ganancia uniforme a lo largo de la banda de paso y ganancia cero fuera de la banda de paso. En el caso del ruido blanco el objetivo es conocer si el área bajo la curva del ancho de banda de ruido equivalente es igual al área bajo la curva actual. Esto se representa en la figura 3 para un circuito pasa bajas.

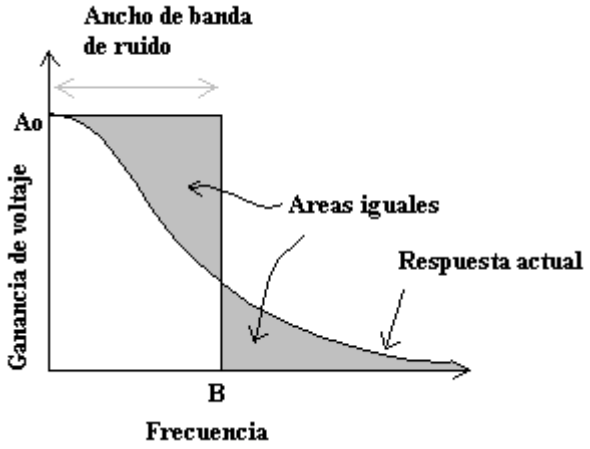


Figura 3. *Respuesta actual y ancho de banda equivalente para un circuito pasa bajas.*

Para cualquier sistema con función de transferencia $A(f)$ existe un ancho de banda de ruido equivalente con una magnitud constante A_0 y un ancho de banda de:

$$B_n = \frac{1}{|A_0|^2}\int_0^\infty |A(f)|^2 df \tag{2}$$

Para el desarrollo de este trabajo las funciones de transferencia de los sistemas serán desconocidas, ya que únicamente se tendrán las señales de prueba que son de frecuencias bajas tal y como se puede ver en el Capítulo 4. Sin embargo, era necesario mencionar este concepto para que sea tomado en cuenta a la hora de llevar este trabajo a la práctica.

La mezcla de la señal de interés y el ruido puede producirse por varias razones, entre ellas están los múltiples procesamientos de señales que existen hoy en día tales como envío de datos por líneas de transmisión, radiofrecuencias y procesamiento en tranceptores. Otros factores que intervienen y coadyuvan en el incremento de ruido son el clima y los factores geográficos, ya que, hablando de transmisiones aéreas, introducen ruido térmico y producen reflexión, difracción, dispersión y refracción [GAB03],

fenómenos que permiten que las señales se mezclen aunque tengan diferentes componentes de frecuencia.

Es muy importante señalar que el ruido se mide con la SNR (Signal to Noise Ratio) o Relación Señal a Ruido que es la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido. Esta relación generalmente se expresa en decibeles (dB) para facilitar el manejo de la información. La expresión matemática que define la SNR es:

$$\text{SNR(dB)} = 10\log\frac{P_s}{P_n} \tag{3}$$

donde P_s es la potencia de la señal y P_n es la potencia del ruido. Si las resistencias de entrada y salida del amplificador, receptor o red son iguales la ecuación (3) se reduce a:

$$\text{SNR(dB)} = 20\log\frac{V_s}{V_n} \tag{4}$$

Esta unidad puede utilizarse para expresar ganancias cuando $V_s > V_n$, o pérdidas cuando $V_s < V_n$. Hay que aclarar que no es la única unidad de medición que existe, ya que se han originado una serie unidades a partir del decibel para mayor detalle consutar [OTT88]. La tabla 1 muestra las principales unidades que existen.

Niveles de referencia *Varias unidades de dB*			
Unidad	**Unidades**	**Referencia**	**Uso**
dBa (dBrn adjusted)	Potencia	$10^{-11.5}$ W	Ruido
dBm	Potencia	1 mW	Comunicaciones
dBrn (dB reference noise)	Potencia	10^{-12} W	Ruido
dBV	Voltaje	1 V	Amplificadores
dBmV	Voltaje	1 mV	Comunicaciones
dBμV	Voltaje	1μV	Circuitos Integrados
dBw	Potencia	1 W	Comunicaciones
dBx	Potencia	-90 dB	Referencias

Tabla 1. *Unidades derivadas del decibel y sus usos.*

Para este trabajo en particular hemos tomado una relación señal a ruido igual a 3dB, lo que significa que se tiene una recepción de señal con ganacias. Un factor importante para esta decisión fue que es un valor intermedio entre las magnitudes que se utilizan para las comunicaciones inalámbricas, cercanas a los -90dB, y los que se utilizan dentro de los circuitos integrados que son del orden de 90dB.

El siguiente paso es conocer las razones que tenemos para eliminar esas componentes frecuencia de las señales de interés. La respuesta es sencilla y muy bien conocida, el ruido es un fenómeno parásito, y generalmente aleatorio, que produce confusión en los sistemas de detección de las señales, lo que puede llegar a ocasionar que la información transmitida se deteriore o se pierda. Lo anterior se puede traducir, por ejemplo, en la disminución de la calidad de imágenes o video hasta llegar incluso a caída de llamadas en telefonía celular.

1.2 Objetivos de la tesis

Conocido el problema podemos plantear los objetivos que tiene este trabajo. Dado que existen diversos métodos de reducción de ruido se han elegido aquellos que utilizan la teoría de *wavelets* con el objetivo general de analizar y comparar los 3 algoritmos más importantes existentes para reducir ruido en señales que utilizan dicha teoría, para ello será necesario apoyarse en la literatura existente y en la simulación de los algoritmos elegidos.

De este objetivo general podemos extraer los objetivos particulares que son:

1. Investigación de la Teoría de Wavelets. Es necesaria para entender posteriormente
   como es que trabajan los algoritmos de reducción de ruido en señales.

2. Investigación de los tres algoritmos más importantes para la reducción de ruido en señales usando *wavelets*.

3. Simulación de los algoritmos elegidos. En base a ella se hará la comparación de los tres algoritmos elegidos.

Estos objetivos se encuentran relacionados, por lo que para lograr el objetivo principal, se requiere del cumplimiento de los tres objetivos particulares. Para ello se ha diseñado un plan de trabajo que permita conseguir uno a uno los objetivos planteados. En la siguente sección se plantea la forma en que se expone el material que cubre los objetivos particulares de esta tesis.

1.3 Organización de la tesis

La Teoría de *Wavelets* se explica en el Capítulo 2 para permitir que el lector se involucre con ésta herramienta matemática que es la columna vertebral del trabajo. En ella se parte desde la suposición de que el lector conoce la Transformada de Fourier (FT), así como la Transformada de Fourier de Periodo Corto (STFT). De no ser así se sugiere hacer una revisión de estos conceptos en [POL96] y [PRO88]. Esto es importante, ya que de aquí se podrá comprender perfectamente el concepto de Transformada de *Wavelets* (WT).

Posteriormente, en el Capítulo 3 se conocerán los algoritmos de reducción de ruido en señales y se hará una simulación preliminar para determinar cuales serán los tres que se compararán. Una vez elegidos, cada uno se expondrá de forma breve en cuanto a su forma de procesar la señal hasta llegar a reducir el ruido que cada señal presente. Teniendo lo anterior, en el Capítulo 4 se simulará cada uno de los algoritmos elegidos con ayuda de Matlab® bajo diferentes condiciones para, posteriormente, analizar y comparar los resultados de cada algoritmo y su tratamiento de las señales. Se harán pruebas con diferentes *wavelets* para ver como se comporta cada uno de los algoritmos trabajando con cada una de ellas.

Los resultados se presentarán en dos formatos. La forma completa comprende los datos de la simulación, sus gráficas correspondientes y los resultados de umbral y Error Cuadrático Medio, mientras que la forma sintética es una serie de tablas que agrupa los valores del Error Cuadrático Medio permitiendo una comparación inmediata.

Finalmente, en el Capítulo 5 se concluirá sobre los resultados obtenidos y se hablará de las posibles aplicaciones que se le pueden dar a los resultados que se obtuvieron. Se harán las recomendaciones y aclaraciones adecuadas para interpretar los resultados que se han obtenido en este trabajo. De este modo se tendrá una idea clara de lo que es la teoría de *wavelets* y las posibles aplicaciones que se le pueden dar en cuanto a la reducción de ruido en señales se refiere.