

# INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1976.

---

Departamento de Electrónica, Sistemas e Informática  
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS EMBEBIDOS



## ESTIMADOR DE RUIDO PARA SEÑALES CAN

Tesina para obtener el grado de:  
ESPECIALISTA EN SISTEMAS EMBEBIDOS

Presenta: Fernando Gamino Sánchez

Director: Luis Rizo Domínguez

San Pedro, Tlaquepaque, Jalisco. 13 de julio de 2017.



A mis padres.



# Abstract

*Noise is a common problem in communication systems. The CAN (Controller Area Network) protocol is not the exception, since noise affects the channel capacity of the bus and knowing the noise level in a CAN bus is useful for data transmission. Therefore, the aim of this work is to estimate the additive white Gaussian noise level in simulated data frames.*

*The problem of noise level estimation was approached by analyzing the noise extracted from contaminated simulated signals. This process was performed by filtering the contaminated signals and then, subtracting the filtered signals from the contaminated signals, and lastly, the standard deviation and the average value were calculated for each analyzed signal and associated to the level of noise in the signal.*

*After the analysis of the data, it was demonstrated that estimating the noise level in a simulated data frame is feasible. However, it was not possible to establish a relationship between noise level and SNR (Signal to Noise Ratio) to compute the channel capacity as a more detailed analysis is required. Also, it is important to mention that the proposed estimators had to be adapted depending on the transmission speed considered in the simulation and the obtained results had an error lower than 20%.*

# Resumen

*El ruido es un problema presente en todos los sistemas de comunicaciones. El protocolo CAN (Controller Area Network) no es la excepción, ya que este ruido afecta la capacidad del canal sobre el bus, por lo que se considera de utilidad el conocimiento del nivel de ruido presente en el bus de CAN. Debido a esto, en el presente trabajo se aborda el problema de la estimación del nivel de ruido blanco aditivo gaussiano contenido en tramas de datos simuladas.*

*Esta problemática fue abordada mediante el análisis del ruido extraído de las señales simuladas contaminadas con diferentes niveles de ruido. Dicho proceso se llevó a cabo filtrando la señal contaminada para posteriormente restar la señal filtrada de la señal contaminada finalmente se calculó la desviación estándar y el promedio del ruido extraído para relacionarlos con el nivel de ruido contenido en la señal.*

*Se comprobó que es posible estimar el nivel de ruido en una trama simulada, sin embargo, no fue posible relacionar el nivel de ruido con el SNR (Signal to Noise Ratio) para calcular la capacidad de canal –esto requiere de un análisis más detallado-. También fue necesario adaptar cada uno de los estimadores dependiendo de la velocidad de transmisión considerada en la simulación. En general, los resultados obtenidos tienen un error menor al 20%.*

# Contenido

<b>Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>vi</b>
<b>Contenido</b> .....	<b>vii</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>viii</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>ix</b>
<b>Acrónimos y abreviaturas</b> .....	<b>x</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Antecedentes</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Marco Teórico</b> .....	<b>6</b>
2.1. PROTOCOLO CAN.....	6
2.2. ANÁLISIS DE SEÑALES.....	8
2.2.1 Análisis espectral.....	8
2.2.2 Filtrado de señales.....	9
2.3. CAPACIDAD DE CANAL.....	10
<b>3. Metodología</b> .....	<b>11</b>
3.1. SEÑALES MUESTRA SIMULADAS.....	11
3.2. ESTIMADOR DE RUIDO.....	12
3.2.1 Estimación ideal.....	13
3.2.2 Estimadores propuestos.....	15
3.3. CAPACIDAD DE CANAL DE UN BUS DE CAN.....	22
<b>4. Resultados</b> .....	<b>26</b>
4.1. DESEMPEÑO DE LOS ESTIMADORES DISEÑADOS.....	26
4.2. RESULTADOS USANDO LAS SECUENCIAS DE VALIDACIÓN.....	31
<b>5. Discusión</b> .....	<b>35</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>36</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>37</b>

# Índice de figuras

Figura 2.1 Ejemplo de una trama de CAN. -Tomado de [19]- .....	7
Figura 3.1 Tren de pulsos uniforme.....	12
Figura 3.2(a) tren de pulsos contaminados por ruido, (b) tren de pulsos ideal.....	14
Figura 3.3 Promedio del ruido obtenido usando la señal filtrada. ....	16
Figura 3.4 Promediado de los valores graficados en la figura 3.3.....	17
Figura 3.5 Grafica de los datos obtenidos experimentalmente y los obtenidos de la ecuación 3.4 usando las constantes de la tabla 3.2.....	18
Figura 3.6 Desviación estándar obtenida usando la señal filtrada. ....	19
Figura 3.7 Promediación de la desviación estándar obtenida. ....	20
Figura 3.8 Comparación visual de los datos obtenidos experimentalmente -línea continua- y usando la ecuación 3.4 -línea punteada-, para cada una de las velocidades consideradas. ....	21
Figura 3.9 Capacidad de canal para SNR simulado de 0 a 100 en intervalos de 1.....	23
Figura 3.10 Promedio del SNR calculado experimentalmente.....	23
Figura 3.11 Promedio de la capacidad de canal calculada experimentalmente.....	24
Figura 3.12 SNR obtenido experimentalmente considerando un filtro ideal.....	25
Figura 3.13 Inversa de los datos graficados en la figura 3.12.....	25
Figura 4.1 Error relativo de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - <i>gpro</i> -, 3.7 - <i>gdes1</i> - y 3.8 - <i>gpro</i> -, para la velocidad de 125kbit/s. ....	28
Figura 4.2 Error relativo de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - <i>gpro</i> -, 3.7 - <i>gdes1</i> - y 3.8 - <i>gpro</i> -, para la velocidad de 250kbit/s. ....	28
Figura 4.3 Error relativo de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - <i>gpro</i> -, 3.7 - <i>gdes1</i> - y 3.8 - <i>gpro</i> -, para la velocidad de 500kbit/s. ....	29
Figura 4.4 Error relativo de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - <i>gpro</i> -, 3.7 - <i>gdes1</i> - y 3.8 - <i>gpro</i> -, para la velocidad de 1Mbit/s. ....	29
Figura 4.5 Incertidumbre de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - <i>gpro</i> -, 3.7 - <i>gdes1</i> - y 3.8 - <i>gpro</i> -, para la velocidad de 125kbit/s. ....	30
Figura 4.6 Incertidumbre de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - <i>gpro</i> -, 3.7 - <i>gdes1</i> - y 3.8 - <i>gpro</i> -, para la velocidad de 250kbit/s. ....	30
Figura 4.7 Incertidumbre de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - <i>gpro</i> -, 3.7 - <i>gdes1</i> - y 3.8 - <i>gpro</i> -, para la velocidad de 500kbit/s. ....	31
Figura 4.8 Incertidumbre de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - <i>gpro</i> -, 3.7 - <i>gdes1</i> - y 3.8 - <i>gpro</i> -, -, para la velocidad de 1Mbit/s. ....	31
Figura 4.9 Comparación de la estimación de ruido contra el nivel de ruido agregado -ideal- usando las ecuaciones 3.6 - <i>gpro</i> -, 3.7 - <i>gdes1</i> - y 3.8 - <i>gpro</i> -, para la velocidad de 125kbit/s....	32
Figura 4.10 Comparación de la estimación de ruido contra el nivel de ruido agregado -ideal- usando las ecuaciones 3.6 - <i>gpro</i> -, 3.7 - <i>gdes1</i> - y 3.8 - <i>gpro</i> -, para la velocidad de 125kbit/s....	33
Figura 4.11 Comparación de la estimación de ruido contra el nivel de ruido agregado -ideal- usando las ecuaciones 3.6 - <i>gpro</i> -, 3.7 - <i>gdes1</i> - y 3.8 - <i>gpro</i> -, para la velocidad de 500kbit/s....	33
Figura 4.12 Comparación de la estimación de ruido contra el nivel de ruido agregado -ideal- usando las ecuaciones 3.6 - <i>gpro</i> -, 3.7 - <i>gdes1</i> - y 3.8 - <i>gpro</i> -, para la velocidad de 1Mbit/s. ....	34



# Índice de tablas

Tabla 2.1 Parámetros mostrados en la figura 2.1.....	7
Tabla 2.2 Propiedades básicas de la transformada de Fourier.....	8
Tabla 3.1 Puntos seleccionados para la linealización de los datos graficados en la figura 3.4. ....	17
Tabla 3.2 Constantes obtenidas para ser usadas en la ecuación 3.4. ....	18
Tabla 3.3 Puntos seleccionados para cada línea -velocidad-.....	20
Tabla 3.4 Constantes obtenidas para la ecuación 3.4 para las diferentes velocidades consideradas. .....	21

# Acrónimos y abreviaturas

CAN	<i>Controller Area Network</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
RFI	<i>Radio Frequency interference</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
AWGN	<i>Additive Withe Gaussian Noise</i>
CRB	<i>Cramér-Rao Bound</i>
ICI	<i>InterCarrier Interference</i>
CPR	<i>Common Phase Rotation</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CAN_H	<i>Canal alto del bus de CAN</i>
CAN_L	<i>Canal bajo del bus de CAN</i>
SOF	<i>Start Of Frame</i>
CRC	<i>Código de redundancia cíclica</i>
ACK	<i>Acknowledge</i>
EOF	<i>End Of Frame</i>
TF	<i>Transformada de Fourier</i>
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i>
BIBO	<i>Bounded Input Bounded Output</i>

# Introducción

En la presente tesina se describe el diseño y el análisis de factibilidad de un cuantificador de ruido gaussiano, que se usará para determinar la velocidad máxima recomendable a utilizar en un bus CAN (*Controller Area Network*). Este diseño se basa principalmente en el uso de un filtro FIR (*Finite Impulse Response*) para obtener una señal con una intensidad de ruido reducida que se usará como referencia al estimar la cantidad de ruido gaussiano en el bus de CAN.

Se denomina ruido a toda aquella señal que interfiere en un sistema al cual no solo no aporta información, sino que dificulta la interpretación de la señal de interés [1]. Específicamente, ruido electromagnético se refiere al ruido que afecta a las señales eléctricas. En el presente trabajo se considerará que el ruido en un bus de CAN es ruido blanco gaussiano aditivo [2].

El ruido electromagnético está presente en el ambiente debido a diversas fuentes, como teléfonos celulares, motores eléctricos, aparatos electrónicos en general, etc. En el ámbito automotriz, no solo se debe tomar en cuenta el ruido electromagnético en el ambiente, sino también, el ruido inducido por pulsos de ignición, el pulso reflejado del inyector, corrientes erráticas, chispas en motores de cepillo -por ejemplo, motores de limpia parabrisas-, rizo de la salida del alternador de corriente directa (d.c), RFI, etc. La principal forma en que el bus de CAN es afectado por el ruido magnético es la inducción, aunque también pudiera suceder que uno de los dispositivos conectados al bus inyecte ruido a causa de un mal funcionamiento.

El protocolo CAN presentado por Robert Bosch en 1986 [3], fue diseñado para trabajar en ambientes con altos niveles de ruido magnético. Tomando esto en cuenta se podría suponer que el diseño e implementación de un analizador cuya función principal sea cuantificar el ruido en un bus de CAN no es de mucha utilidad, sin embargo, dicho analizador puede ser utilizado para el diagnóstico de una red CAN.

Como se ha mencionado, la implementación del filtro FIR [4] es de gran importancia para la realización de este trabajo ya que, a pesar de ser uno de los filtros más básicos para señales digitales, es de fácil implementación.

El objetivo principal de esta tesina es diseñar un estimador de ruido para ser usado en el bus de CAN. Para ello, se cumplirán los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar de factibilidad de un estimador de ruido enfocado al bus de CAN.
2. Analizar experimentalmente el efecto del ruido blanco gaussiano aditivo en una trama de CAN.
3. Realizar un análisis de errores de los estimadores propuestos.

El presente trabajo estará organizado de la siguiente manera: en el capítulo 1 se abordarán los antecedentes de los estimadores de ruido en diversas aplicaciones. En el capítulo 2 se describirán los conceptos teóricos a utilizar, así como la descripción de las técnicas requeridas. En el capítulo 3 se describe la metodología seguida para el diseño de los estimadores de ruido presentados. En el capítulo 4 se exponen los resultados obtenidos de los estimadores de ruido diseñados, así como la correspondiente discusión. Por último, se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro.

# 1. Antecedentes

La estimación del nivel de ruido es de especial interés en el ámbito de las comunicaciones alámbricas o inalámbricas debido a que el ruido en el canal de comunicación afecta la probabilidad de error. Actualmente, los sistemas de estimación de ruido son utilizados en áreas como el audio, las comunicaciones, procesamiento digital de imágenes, etc.

Este trabajo se enfoca a la estimación del nivel de ruido como un valor de SNR (*Signal to Noise Ratio*) en un canal de comunicación AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). Se define un canal de comunicación AWGN como aquel que es afectado por ruido aditivo blanco gaussiano. En [6], J. Piera y Parada hacen mención a un modelo matemático que describe un canal de comunicación AWGN. Este modelo matemático es relevante para conocer el comportamiento de un canal AWGN.

Los trabajos referenciados del [7] – [9] son patentes, las cuales presentan algoritmos para la estimación de ruido en diferentes tipos de sistemas de comunicación, aunque en ninguno de ellos se presentan resultados concretos. En [7], Katzir et. al. proponen un método de estimación de ruido para comunicaciones inalámbricas el cual se basa en obtener dos estimaciones separadas, para posteriormente, obtener una estimación de ruido refinada de la mezcla de las primeras dos. En [8], Hetherington presenta un sistema de estimación y control de ruido. En [9], Hetherington propone un método de estimación de ruido basado en análisis espectral de potencia, aunque no propone una aplicación específica.

Los trabajos referenciados del [10] – [15] se toman en cuenta ya que estudian la estimación de ruido en canales de comunicación AWGN tal como es el caso de la presente tesis, en cada uno se obtienen resultados por lo que pueden servir como referencia en el análisis del sistema propuesto, aun cuando no están relacionados al protocolo CAN en específico e incluso se enfocan en las comunicaciones inalámbricas.

También es importante resaltar que en [6] se estima el nivel de ruido en función de la varianza del ruido blanco aditivo gaussiano y no en función del SNR, como se hace en los trabajos del [7] – [15].

En [10], Paulizzi y Beaulieu presentan una comparación de técnicas de estimación del SNR, las cuales se hacen usando una métrica en común CRB (*Cramér-Rao Bound*). La conclusión más importante que presentan los autores es que el desempeño de cada estimador depende de la aplicación específica para la cual fueron diseñados, ya que el rendimiento de cada uno mejora cuando son usados bajo las condiciones específicas para las cuales fueron diseñados.

En [11], Bin Li et al. presentan un algoritmo iterativo de estimación del SNR de baja desviación, dicho estimador alcanza su mayor precisión en la estimación para niveles de SNR bajos, sin embargo, no se menciona ningún rango de estimación específico.

En [12], Baranski y Haimovich también presentan un estimador iterativo de la varianza del SNR. Es importante resaltar que este es el único trabajo de los estudiados en el que se analiza la varianza del SNR.

En [13], Munier et al. mencionan lo que ellos consideran como los dos efectos más significativos del ruido de fase en canales AWGN, los cuales son interferencia de portadora ICI (*InterCarrier Interference*) y la rotación de fase común para cada símbolo CPR (*Common Phase Rotation*). En este trabajo se presentan dos estimadores en los que se compensan el CPR y el ICI. El resultado más importante presentado en este trabajo es una mejora en la razón de error de bit BER (*Bit Error Rate*).

En [14], Sangho Nam et. al. presentan un método mediante el cual se puede estimar la máxima frecuencia Doppler, el resultado más importante al que llega es que esta estimación es realizada sin la necesidad de información a priori del SNR.

Otro de los fenómenos que contribuyen a la razón de error de bit se explica en [15] por Cheng Wang et. al., en el cual se presenta el *offset* de frecuencia portadora. La principal aportación de este trabajo es un estimador de la frecuencia de portadora en un canal AWGN bajo diversos niveles de SNR.

En [16] y [17] se presentan manuales que presentan protocolos destinados a conocer el estatus de un bus de CAN mediante el uso de multímetros -marca fluke- con la funcionalidad adicional de poder ser usados como osciloscopios.

Ya que este trabajo está enfocado en el procesamiento de señales en el protocolo CAN, se decidió estudiar el trabajo presentado por Shannon en [18], el cual es ampliamente utilizado en la estimación de la capacidad de canal. La capacidad de canal está limitada por la probabilidad de error, que, a su vez, depende del nivel de ruido en el canal.

En general, los trabajos revisados muestran la importancia de la estimación del ruido blanco gaussiano en un canal de comunicación y que la estimación del ruido en general se debe realizar con respecto al SNR, sin embargo, en este trabajo se hará la estimación de la desviación estándar del ruido gaussiano en un bus de CAN, por lo que se propone que en trabajos posteriores se obtenga una relación entre el SNR y la desviación estándar del ruido Gaussiano.

## 2. Marco Teórico

En este capítulo se presentan las bases teóricas utilizadas en el diseño del estimador de ruido, así como la descripción de las técnicas requeridas. En la sección 2.1, se presentan los conceptos necesarios a conocer para comprender el diseño propuesto. En la sección 2.2, se presentan conceptos y procedimientos relacionados al filtrado de señales. Esta sección está dividida en dos sub-secciones: en la sección 2.2.1, se describe a grandes rasgos el análisis espectral; en la sección 2.2.2 se presenta de forma general el filtrado de señales digitales, en específico se describirá el filtro FIR. Finalmente, en la sección 2.3 se presenta la teoría relacionada con la estimación de la capacidad de canal.

### 2.1. Protocolo CAN

CAN es un protocolo pensado para trabajar en ambientes con altos niveles de ruido, velocidades de comunicación de hasta 1Mbit por segundo [3]. Es ampliamente utilizado en sistemas de comunicación dentro de automóviles, aunque, también es utilizado en la automatización industrial.

El protocolo CAN, comúnmente maneja las siguientes velocidades 125kb/s, 250 kb/s, 500 kb/s y 1Mb/s, dependiendo de los requerimientos de la aplicación y el ambiente en el cual es utilizado.

El bus de CAN es básicamente un par trenzado compuesto por dos líneas, una llamada CAN\_H, y otra llamada CAN\_L. La característica más importante a considerar en este trabajo es la velocidad de transmisión, aunque el protocolo CAN posee métodos para evitar los errores de comunicación que están estrechamente relacionados con el ruido en el bus CAN, estas características son: consistencia de los datos transmitidos, integridad del mensaje y detección de errores.

Otra de las características importantes en la reducción de errores es la forma en la que se codifica la información, sin embargo, en este trabajo no se explicará este punto dado que para la estimación del ruido gaussiano presente en el bus de CAN es irrelevante.



El conocimiento de las velocidades de transmisión es relevante ya que, de acuerdo a la teoría, se puede reducir la cantidad de errores al disminuir la velocidad de transmisión o aumentar la velocidad de transmisión sin riesgo de incrementar el número de errores.

En la Figura 1.1. se presenta una señal CAN estándar, y se ilustra la forma en que se representan los unos y los ceros en los canales CAN\_H y CAN\_L.

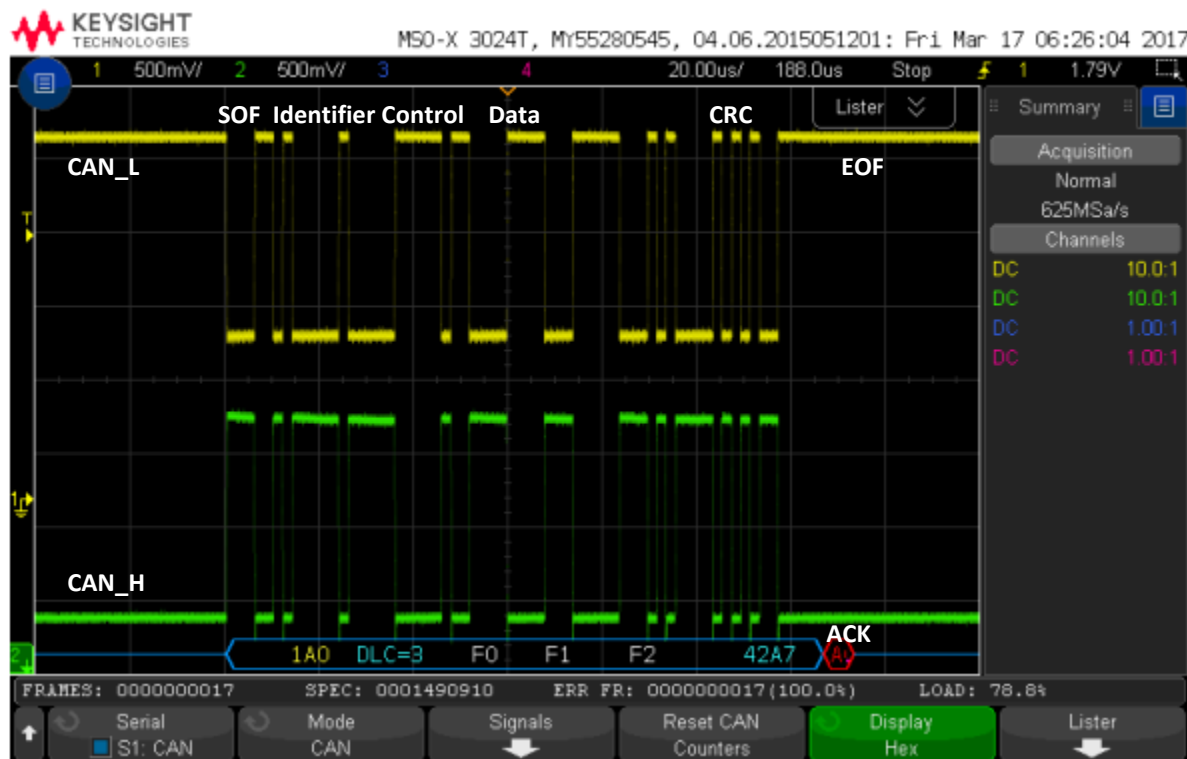


Figura 2.1 Ejemplo de una trama de CAN Capturada con un osciloscopio.

Los otros parámetros que se pueden observar en la figura 2.1 se definen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros mostrados en la figura 2.1.

Parámetro	Definición
CAN_H/CAN_L	Canales alto y bajo del bus CAN
Idle	Espacio en el que no se trasmite ninguna trama sobre el bus
SOF	Start Of Frame -inicio de trama-
Identifier Control	Identificador de trama
Data	Datos
CRC	Código de redundancia cíclica
ACK	Acknowledge
EOF	End Of Frame fin de trama

## 2.2. Análisis de señales

En este trabajo se utilizan dos técnicas de procesamiento de señales, las cuales corresponden a dos formas distintas en que se puede llevar a cabo dicho análisis. Estas son el análisis espectral y el filtrado de señales.

### 2.2.1 Análisis espectral

El análisis espectral de potencia se basa en la transformación de una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, la función más utilizada para este propósito es la transformada de Fourier (TF).

La TF (ecuación 1.1) es una función con la que se puede obtener una descripción en la frecuencia ( $G(f)$ ) de una señal en el tiempo ( $x(t)$ ). Esta transformación tiene propiedades básicas de las cuales algunas serán de utilidad en el desarrollo de este trabajo. Se presentan dichas propiedades en la Tabla 1.2.

$$G(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-ift} dt \quad \dots \dots \dots (1.1)$$

Tabla 2.2 Propiedades básicas de la transformada de Fourier.

Propiedades de la Transformada de Fourier importantes para este trabajo	
Linealidad	$F\{ax(t) + by(t)\} = aF\{x(t)\} + bF\{y(t)\}$
Corrimiento en el tiempo	$F\{x(t \pm t_0)\} = X(j\omega)e^{\pm j\omega t_0}$

Es de especial interés para este trabajo la transformación de una función escalón, ya que una trama de CAN se puede considerar como un conjunto de funciones escalón desplazadas en el tiempo. En la ecuación 1.2 se presenta la equivalencia de la función escalón en el tiempo con su transformación al dominio de las frecuencias.

$$\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \leftrightarrow \tau \text{Sa}\left(\frac{\tau\omega}{2}\right) \quad \dots \dots \dots (1.2)$$

Donde

$$\tau \text{Sa}\left(\frac{\tau\omega}{2}\right) = \tau \frac{\sin\left(\frac{\tau\omega}{2}\right)}{\left(\frac{\tau\omega}{2}\right)} \quad \dots \dots \dots (1.3)$$

y

$$\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) = \begin{cases} 1 & -\tau/2 \leq t \leq \tau/2 \\ 0 & t < -\tau/2, \quad t > \tau/2 \end{cases} \quad \dots \dots \dots (1.4)$$

En las ecuaciones 1.2 – 1.4 considérese que  $\omega = 2\pi f$ , ( $f$  es frecuencia) y  $\tau$  es una constante en el tiempo. En 1.2 se hace referencia a la función *sampling* como *Sa* y a la función escalón rectangular como *rect*.

### 2.2.2 Filtrado de señales

Se puede definir el filtrado como cualquier proceso que altere una señal. En general, en procesamiento de señales se entiende por filtrado la eliminación de señales no deseadas, es decir, la supresión de ruido. Un filtro ideal se define como aquel que cumple con linealidad en fase y amplitud constante.

El filtro FIR se conoce así ya que su duración es finita en el tiempo es decir sus valores son iguales a cero en un determinado punto, en contraste con un filtro IIR (*Infinite Impulse Response*) el cual, debido a que tiene retroalimentación, podría continuar respondiendo indefinidamente.

Un filtro FIR de orden  $N$  aplicado a una muestra ( $n$ ) -donde  $n < N$ - se define como una suma pesada de los valores de entrada más recientes. Esto se puede ver en la ecuación 1.5, donde  $x[n]$  es la señal de entrada,  $y[n]$  es la señal de salida, el orden del filtro - $N$ - se calcula como el número de muestras más uno,  $b_i$  es el  $i$ -ésimo valor de la respuesta al impulso o coeficiente del filtro, donde  $0 \leq i \leq N$ . La ecuación X se puede ver como una convolución discreta de los coeficientes contra la señal a filtrar.

$$y[n] = \sum_{i=0}^n b_i \cdot x[n-i] \quad \dots \dots \dots (1.5)$$

Entre las propiedades de un filtro FIR se encuentran las siguientes:

- 1) que no requiere retroalimentación;
- 2) presenta estabilidad en sentido BIBO (*Bounded Input Bounded Output*) de la función de filtrado debido a que se tiene un número finito de coeficientes;
- 3) es de fácil diseño ya que haciendo la secuencia de coeficientes simétrica se logra que la fase de la función de filtrado sea lineal.

La principal desventaja de los filtros FIR respecto a otras estructuras como IIR es que, en general, se requiere más poder de procesamiento, cuando se usan procesadores de propósito general.

### 2.3. Capacidad de canal

La capacidad de canal se define como la cantidad de información que se puede transmitir en un medio sin error en el receptor y se mide en bits por segundo. La capacidad de canal se puede determinar usando la ecuación 1.6 propuesta por Shannon en [18], en la que se toma en cuenta el SNR del medio de transmisión lo cual proporciona una estimación más realista que el método propuesto por Nyquist (ecuación 1.7), ya que este no toma en cuenta el SNR del medio de transmisión, es decir, la ecuación 1.7 nos proporciona la capacidad de canal en un medio de transmisión ideal.

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad \dots \dots \dots (1.6)$$

En cuanto a la ecuación 1.6 se tiene que C es la capacidad de canal medida en bits por segundo, B es el ancho de banda del canal S y N son las potencias medidas en watts de la señal y el ruido respectivamente.

$$C = 2B \log_2 M \quad \dots \dots \dots (1.7)$$

Para la ecuación 1.7, C es la capacidad de canal medida en bits por segundo, B es el ancho de banda del canal y M es el número de niveles utilizados para codificar cada dato.

### **3. Metodología**

Este trabajo está orientado a la estimación del SNR en un canal de comunicación del tipo AWGN con el objetivo principal de proponer una velocidad de transmisión con una probabilidad de error tan baja como sea posible de acuerdo a los requerimientos de la aplicación en la que se esté trabajando. En este capítulo se describe el desarrollo del estimador de ruido basado en el estimador propuesto en [19] el cual está diseñado para estimar ruido en imágenes.

La organización de este capítulo es la siguiente: en la sección 3.1, se describen las señales muestra simuladas para calibrar el estimador propuesto; en la sección 3.2, se describe el estimador de ruido; y en la sección 3.3, las pruebas en señales de una trama de CAN.

#### **3.1. Señales muestra simuladas**

En esta sección se presentan las señales muestra utilizadas en el refinamiento del estimador de ruido, de las cuales se generaron una base de datos de 40 señales simuladas.

Debido a la naturaleza de la aplicación se utilizaron trenes de pulsos uniformes. En la figura 3.1 se puede apreciar una de las señales muestra utilizadas para obtener los coeficientes del estimador. Se eligió usar este tipo de señales para la determinación de los coeficientes del estimador, ya que este caso particular se puede considerar como el peor escenario, es decir, hay tantos cambios de nivel como la velocidad de transmisión lo permite; además, como se mencionó en la sección 2.1, la codificación de los mensajes en la trama es irrelevante para la estimación del ruido.

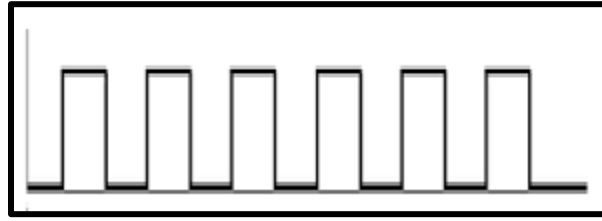


Figura 3.1 Tren de pulsos uniforme.

El protocolo CAN permite el uso de por lo menos 4 velocidades de transmisión, por lo que si solo se utilizaran tramas de pulsos uniformes como el que se muestra en la figura 3.1, solo se tendrían 4 señales muestra, lo que es considerado poco significativo, es decir, se requiere de un mayor número de señales muestra. Los tipos adicionales de señales muestra sugeridos, se definieron usando los siguientes patrones: 1001001001001, 1011011011011, 1001001101011, 101101001011, 1000001000001, 101001000001, 1001001001001, 1011101110111, 1010110111101, estas secuencias se denominarán secuencias de diseño.

Las señales basadas en estos patrones se generaron utilizando MATLAB, en las diferentes velocidades de transmisión, pero manteniendo constante la frecuencia de muestreo y repitiendo la secuencia, en caso de ser necesario para evitar tener valores indefinidos en la señal muestra simulada.

### 3.2. Estimador de ruido

En esta sección se describe el estimador de ruido propuesto, el cual está basado en el estimador de ruido presentado en [19] diseñado para ser utilizado en imágenes.

Para posibilitar la estimación de ruido es necesario conocer la forma en que dicho ruido interactúa con la señal de interés. Para esto, se usará la ecuación 3.1, donde  $y_r$  es la señal contaminada con ruido gaussiano,  $y$  es la señal original,  $n(\mu, \sigma^2)$  es el ruido gaussiano aditivo con promedio  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$ , para nuestro caso en particular consideraremos  $\mu = 0$ .

$$y_r = y + n(\mu, \sigma^2) \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

En la sección 3.2.1 se explica lo que sería una estimación de ruido ideal esto consiste en filtrar la señal contaminada  $y_r$  para obtener una señal filtrada  $y_f$  y restar estas dos señales -  $y_r, y_f$ -

La propuesta para el estimador consiste en seguir el método utilizado en [20] que en resumen consiste en hacer una estimación de ruido a partir del promedio del ruido en el canal, aunque también se exploró el uso de la desviación estándar, este método se denominó estimación compleja y se explica en la sección 3.2.2.

### 3.2.1 Estimación ideal

Como se explicó previamente, este método consiste en restar la señal filtrada  $y_f$  de la señal contaminada  $y_r$  obteniendo así el ruido con el que se contaminó la señal original.

Se transformó 3.1 en 3.2 donde el término  $y$  se sustituyó con  $y_f$  que, como ya se mencionó, representa a la señal filtrada, también se agregó el término  $c$  que representa la diferencia entre la señal original y la señal filtrada.

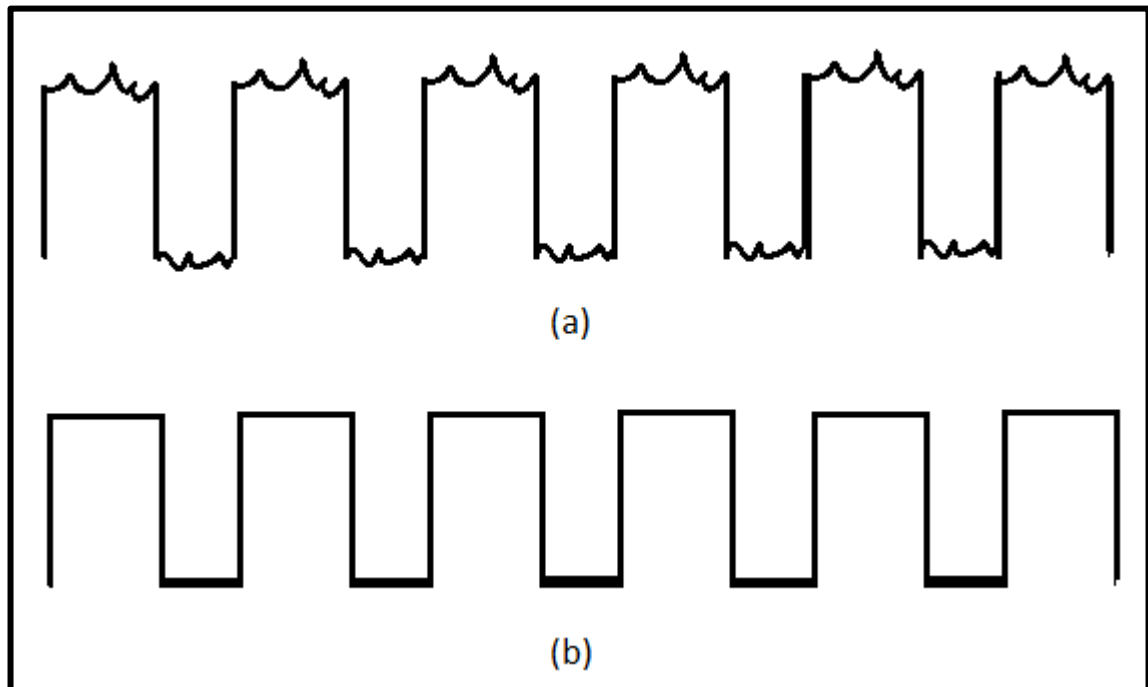
$$y_r = y_f + c + n(\mu, \sigma^2) \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

$$n(\mu, \sigma^2) + c = y_r - y_f \quad \dots \dots \dots (3.3)$$

Utilizando la ecuación 3.2 y suponiendo que el filtro utilizado es ideal, es decir, que cumple con las características linealidad en fase y amplitud constante, se obtendría  $c=0$ . Haciendo el despeje de  $n(\mu, \sigma^2)$  -ecuación 3.3- se observa que es igual a la diferencia de la señal ruidosa y la señal filtrada, por lo que, al cumplirse este caso hipotético, se tendría únicamente el ruido que contamina nuestra señal y la estimación del ruido sería exacta; sin embargo, en el caso práctico siempre se cumple que  $c \neq 0$  y por lo tanto la estimación no es exacta.

Otro punto en contra de este método es que los pulsos que conforman una trama de un mensaje CAN no son ideales, por lo que también introducen error en el filtrado y por lo tanto en la estimación del ruido, de ser ideales los pulsos, se podría evitar el filtrado y generar una señal

idéntica de la trama de CAN en el receptor y usarla como la señal original para así obtener una estimación exacta, esto se ilustra en la figura 3.1.



*Figura 3.2(a) tren de pulsos contaminados por ruido, (b) tren de pulsos ideal*

Como se puede observar en la figura 3.2 si los pulsos emitidos por el transmisor fueran ideales, es decir, similares a los observados en la figura 3.2(b), al ser contaminados por ruido tendrían una apariencia similar a la mostrada en la figura 3.2(a), por lo que al descifrar la trama captada en el receptor, y descifrar el contenido, suponiendo un ancho de pulso uniforme como es el caso del protocolo CAN, únicamente se tendría que generar nuevamente la señal original para ser usada como la señal filtrada y así obtener una estimación del ruido exacta.

Desafortunadamente, las señales de una trama de CAN en la práctica son como la que se ilustra en la figura 2.1, donde se puede observar una rampa de descarga de un capacitor en la señal azul, además de algunos picos en las transiciones de cambio de nivel.



### 3.2.2 Estimadores propuestos

En esta sección se explica la implementación del estimador de ruido basado en el estimador presentado en [20] diseñado para estimar ruido en imágenes a color, una de sus características principales es la adaptabilidad al nivel de ruido que se estima en una primera aproximación, el estimador en el que se basara el presentado en este trabajo es el denominado EstGl.

El método a seguir es el siguiente:

1. Teniendo la señal contaminada, se filtra.
2. Se resta la señal filtrada de la señal contaminada.
3. Se calcula el promedio y la desviación estándar del ruido obtenido.
4. Utilizar el promedio y la desviación estándar para estimar el ruido en la señal.

En el método utilizado en [20] se usa el promedio del ruido, sin embargo, hay que considerar que la naturaleza de una imagen y la naturaleza de una señal de pulsos rectangulares es claramente diferente, por lo que se analizará la posibilidad de utilizar el promedio o la desviación estándar para la estimación final del ruido. En este trabajo se usa el concepto nivel de ruido para hablar de la desviación estándar del ruido, esto con el propósito de tener un concepto específico de lo que se está estimando y así evitar confusiones con otras desviaciones estándar que se calcularon.

Como primer paso para definir el estimador de ruido, se tomaron las señales de la base de datos descrita en 3.1, se contaminaron con ruido de desviación estándar de 0 a 1 en intervalos de 0.05, posteriormente se filtraron estas señales usando un filtro FIR de orden 256 -los coeficientes del filtro se calcularon usando una función de MATLAB-, finalmente utilizando la ecuación 3.3 y suponiendo  $c=0$  se caracterizó el ruido obtenido usando el promedio  $\mu$  y la varianza  $\sigma$ . Las gráficas que ilustran los resultados de este proceso se muestran en las figuras 3.3 y 3.4.

En la figura 3.3 se pueden ver los resultados obtenidos al seguir los pasos 1 a 3 explicados al inicio de esta sección para la estimación del promedio del ruido obtenido; cada línea representa el proceso repetido para cada una de las señales muestra simuladas; se asignaron colores a las velocidades de trasmisión consideradas en este trabajo: 125kbit/s se graficó en rojo,

250kbit/s en azul, 500kbit/s en verde y 1Mbit/s en negro. Como se puede observar, el comportamiento para el promedio del ruido obtenido tiene una tendencia ascendente, sin embargo se pueden notar diferencias entre cada velocidad, el comportamiento del promedio del ruido extraído con respecto al nivel de ruido agregado asemeja una línea recta. Esto se puede observar en la figura 3.4.

Tanto en la figura 3.3 como en la 3.4 no se distinguen las líneas correspondientes a las velocidades de 125kbit/s y 250kbit/s esto se debe a que sus magnitudes son significativamente menores a las magnitudes obtenidas para los promedios de 1Mbit/s, debido a esto se propone tener un estimador para cada una de las velocidades consideradas.

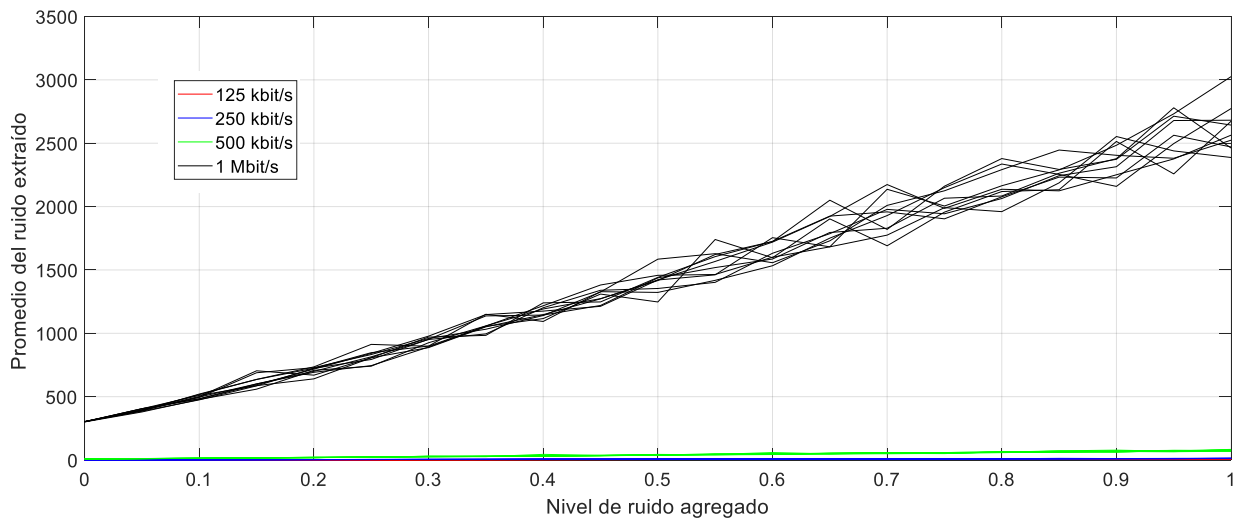


Figura 3.3 Promedio del ruido obtenido usando la señal filtrada.

Aprovechando la semejanza del comportamiento del promedio a una línea recta, se utilizó una linealización de los datos graficados en la figura 3.4 para posteriormente basar la estimación de ruido en esta función. Para realizar dicha linealización se usó la ecuación 3.4, donde  $y_n$  representa el promedio del ruido agregado,  $m_n$  es la pendiente de la recta graficada en la figura 3.4,  $b_n$  es el punto donde la recta cruza el eje y finalmente  $n$  es el numero asignado al estimador con base en la velocidad de transmisión considerada.

$$y_n = m_n x + b_n \quad \dots \dots (3.4)$$

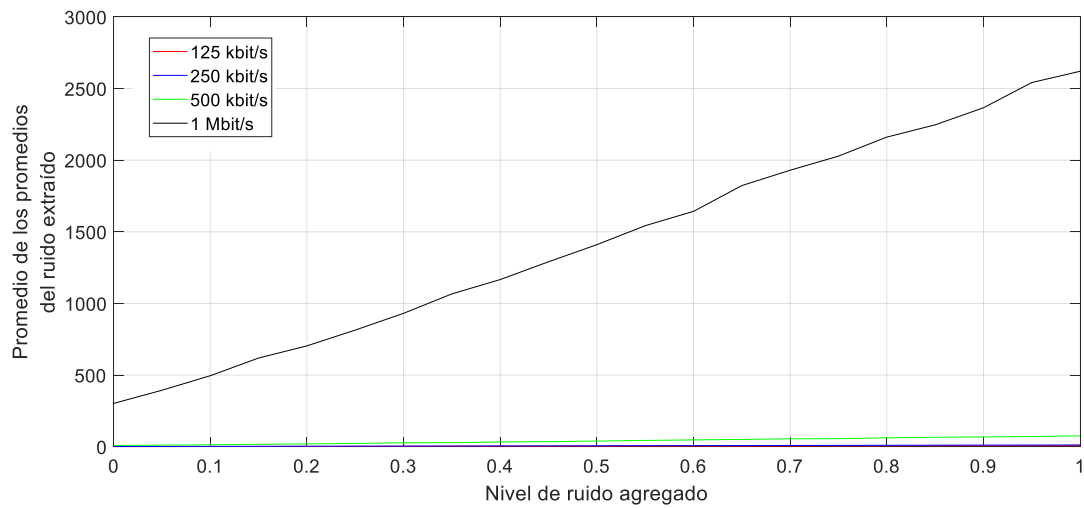


Figura 3.4 Promediado de los valores graficados en la figura 3.3.

El proceso de linealización realizado fue el siguiente: se seleccionaron dos puntos sobre la línea obtenida, se generó un sistema de ecuaciones y se despejaron las constantes  $m_n$  y  $b_n$  para cada velocidad considerada. Usando los datos mostrados en la tabla 3.3 y sustituyéndolos en la ecuación 3.5, se generaron 4 sistemas de ecuaciones que nos permitieron conocer los valores de las constantes  $m_n$  y  $b_n$  donde n vale 1 para 125kbit/s, 2 para 250kbit/s y así sucesivamente.

Los valores de los puntos seleccionados se muestran en la tabla 3.1 usando estos puntos se generaron cuatro sistemas de ecuaciones que fueron utilizados para obtener los valores mostrados en la tabla 3.2.

Tabla 3.1 Puntos seleccionados para la linealización de los datos graficados en la figura 3.4.

Velocidad	Punto 1		Punto 2	
	x	y	x	y
125kbit/s	0	1.251	0.5	4.338
250kbit/s	0	1.816	0.5	6.956
500 kbit/s	0	8.985	0.5	398.9
1Mbit/s	0	302.5	0.5	1410

Los valores obtenidos para  $m_n$  y  $b_n$  se muestran en la tabla 3.2., estos valores serán utilizados en los estimadores de ruido generados.

Tabla 3.2 Constantes obtenidas para ser usadas en la ecuación 3.4.

Velocidad	$m_n$	$b_n$
125 kbit/s	6.174	1.251
250 kbit/s	10.28	1.816
500 kbit/s	61.81	8.985
1 Mbit/s	2215	302.5

En la figura 3.5 se pueden observar cada una de las líneas calculadas usando la ecuación 3.4 graficadas en paralelo al promedio de los datos obtenidos experimentalmente que se muestran en la figura 3.4.

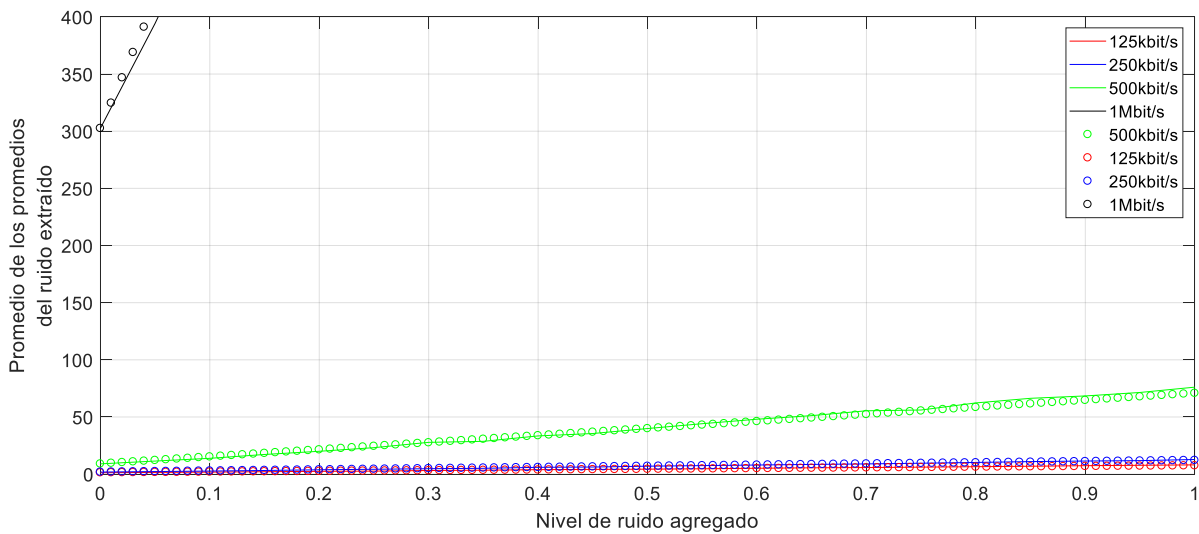


Figura 3.5 Grafica de los datos obtenidos experimentalmente y los obtenidos de la ecuación 3.4 usando las constantes de la tabla 3.2.

Por otro lado, en la figura 3.6 se puede observar la desviación estándar calculada para cada señal en cada punto del nivel de ruido agregado para las pruebas realizadas, en este caso se respetó la convención en cuanto a los colores usada en las figuras 3.3 y 3.4 para cada velocidad de transmisión utilizada en este trabajo.

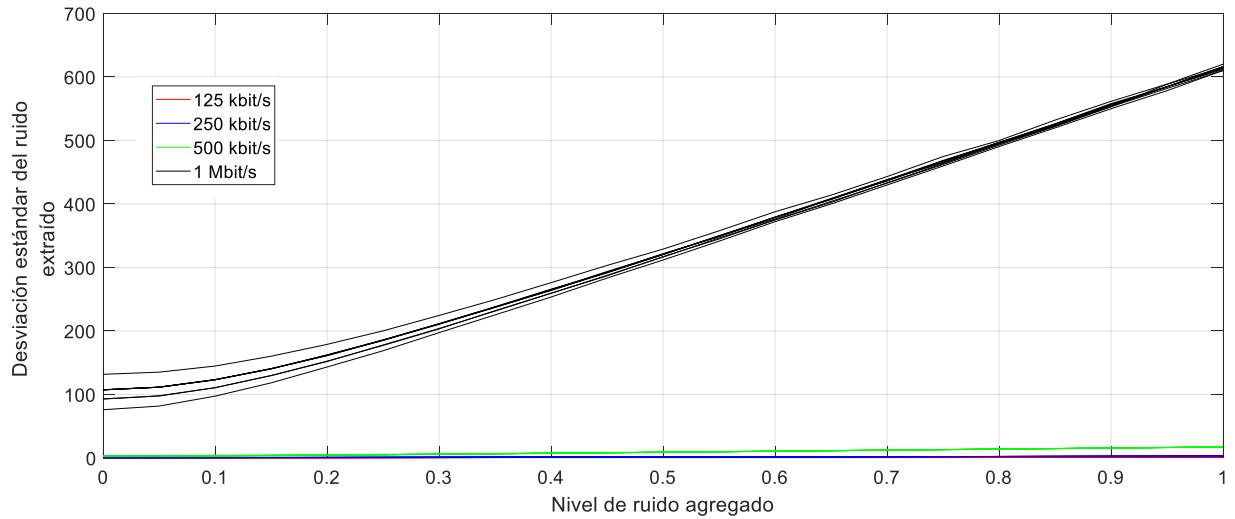


Figura 3.6 Desviación estándar obtenida usando la señal filtrada.

En el caso de la desviación estándar se puede observar una tendencia similar a una función cuadrática, sin embargo, la diferencia en la desviación estándar calculada es significativa entre las diferentes velocidades de transmisión utilizadas, por lo que se considera que se obtendrían errores menores en la estimación si se utiliza un estimador para cada velocidad, al igual que en el análisis del promedio del ruido.

El siguiente paso fue calcular el promedio de cada punto para las 4 velocidades usadas. El resultado de este proceso se puede ver en la figura 3.7.

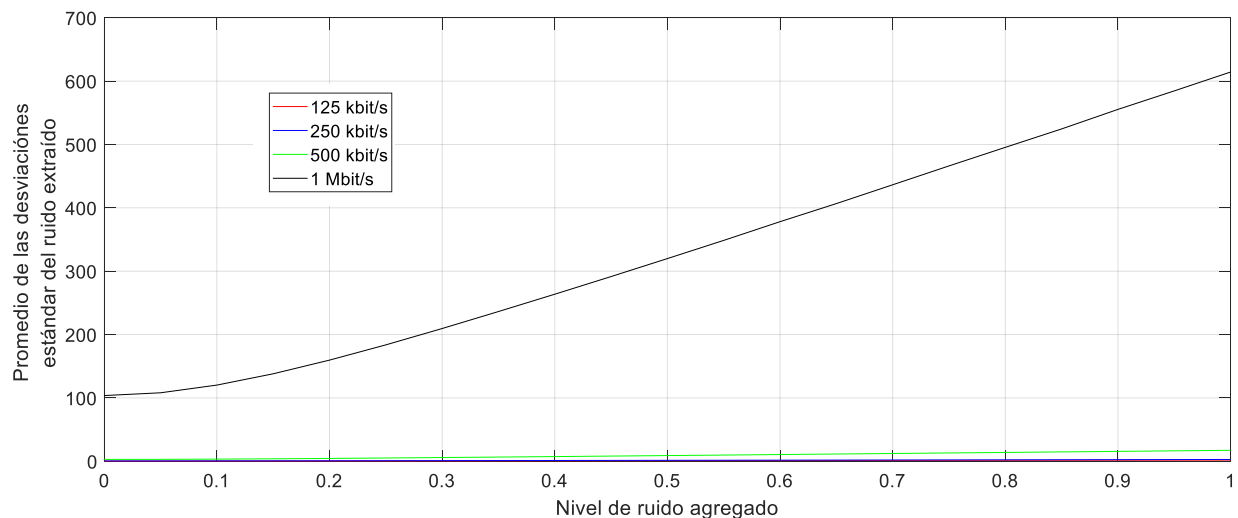


Figura 3.7 Promediación de la desviación estándar obtenida.

Posteriormente, se propuso utilizar una interpolación cuadrática para cada una de las velocidades usadas. Para esto se utilizó la ecuación 3.5, donde  $a_n$ ,  $b_n$  y  $c_n$  son parámetros que se calcularon para el estimador enfocado a cada una de las velocidades. Para obtener estos parámetros se seleccionaron tres puntos en cada una de las líneas a caracterizar. En la tabla 3.3 se muestran los puntos seleccionados para cada línea.

$$y = ax^2 + bx + c \quad \dots \dots \dots (3.5)$$

Tabla 3.3 Puntos seleccionados para cada línea -velocidad-.

Velocidad	Punto 1		Punto 2		Punto 3	
	x	y	x	y	x	y
125kbit/s	0	0.3445	0.25	0.5683	0.5	0.9676
250kbit/s	0	0.5883	0.25	0.9208	0.5	1.529
500 kbit/s	0	2.968	0.25	5.204	0.5	9.029
1Mbit/s	0	103.7	0.25	183.7	0.5	319.9

Usando los datos mostrados en la tabla 3.3 y sustituyéndolos en la ecuación 3.5, se generaron 4 sistemas de ecuaciones que nos permitieron conocer los valores de las constantes  $a$ ,  $b$  y  $c$  que se denominaron  $a_n$ ,  $b_n$  y  $c_n$  donde  $n$  vale 1 para 125kbit/s, 2 para 250kbit/s y así

sucesivamente. En la tabla 3.2 se muestran los valores de las constantes obtenidos a partir de los sistemas de ecuaciones.

Tabla 3.4 Constantes obtenidas para la ecuación 3.4 para las diferentes velocidades consideradas.

Velocidad	$a_n$	$b_n$	$c_n$
125 kbit/s	1.404	0.5442	0.3445
250 kbit/s	2.2056	0.7786	0.5883
500 kbit/s	12.7120	5.7660	2.968
1 Mbit/s	449.6	207.6	103.7

En la figura 3.8 se muestra en líneas punteadas la evaluación de la ecuación 3.5 usando los distintos valores mostrados en la tabla 3.2, estas evaluaciones se muestran a la par de las líneas con base en las cuales fueron obtenidas las constantes para la ecuación 3.4.

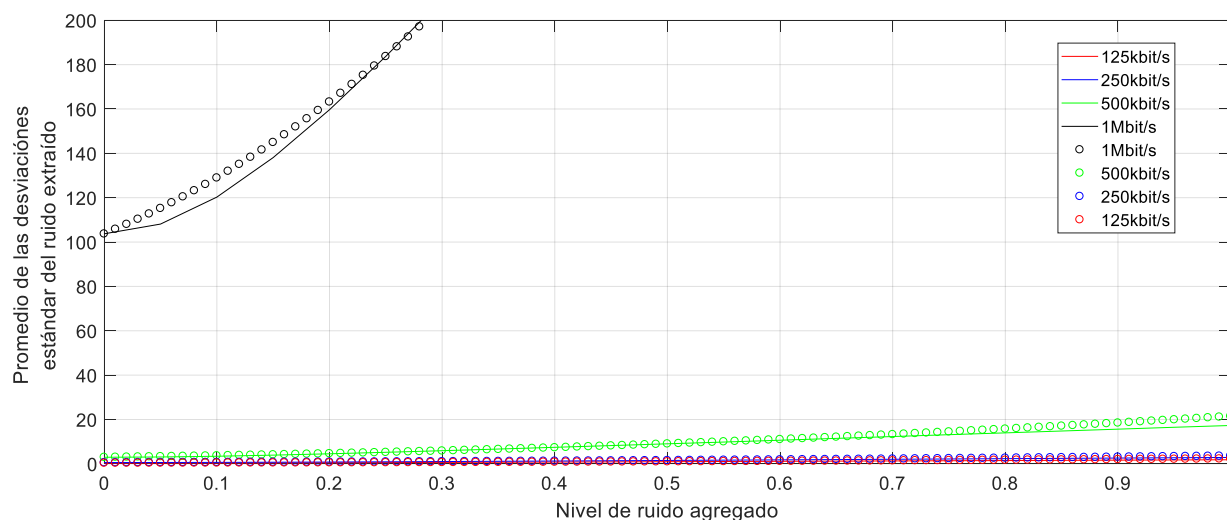


Figura 3.8 Comparación visual de los datos obtenidos experimentalmente -línea continua- y usando la ecuación 3.4 -línea punteada-, para cada una de las velocidades consideradas.

Finalmente, los estimadores de ruido se obtuvieron de despejar  $x$  de las ecuaciones 3.4 y 3.5, a lo que además se agregó la incertidumbre -representada por  $\sigma_n$ - del estimador diseñado, la cual se calculó con base en los resultados experimentales obtenidos -estos resultados se muestran en el capítulo 4-. Las ecuaciones de los estimadores quedan entonces de la siguiente forma:

$$\delta_{Pr} = x = \frac{y - b_n}{m_n} + \sigma_n \quad \dots \dots \dots (3.6)$$

En la ecuación 3.6 el término  $\delta_{Pr}$  se usó para denotar el nivel de ruido calculado usando el promedio del ruido extraído; en las ecuaciones 3.7 y 3.8 se usó el término  $\delta_{De}$  para denotar el nivel de ruido calculado usando la desviación estándar del ruido extraído.

$$\delta_{De} = x = \frac{-b_n + \sqrt{b_n^2 - 4a_n(c_n - y)}}{2a_n} + \sigma_n \quad \dots \dots \dots (3.7)$$

$$\delta_{De} = x = \frac{-b_n - \sqrt{b_n^2 - 4a_n(c_n - y)}}{2a_n} + \sigma_n \quad \dots \dots \dots (3.8)$$

La incertidumbre  $\sigma_n$  representa que tan dispersos se encuentran los valores estimados entre sí. Es necesario mencionar que una incertidumbre baja solo representa poca dispersión en los datos calculados y no representa una disminución en el error de los datos obtenidos.

### 3.3. Capacidad de canal de un BUS de CAN

En esta sección se muestra cómo la capacidad de canal es afectada en relación al SNR. En este trabajo no se usa el SNR en decibeles, simplemente se calcula dividiendo la potencia de la señal entre la potencia del ruido (S/R). En cuanto al ancho de banda, se considerará de 2Mbit/s. Se tomó la ecuación 1.6 para realizar la prueba de agregar un SNR de 0 a 100 en intervalos de 1 con el objetivo de calcular la capacidad de canal conforme se aumentó el SNR. Los resultados de esta prueba se ilustran en la figura 3.9.



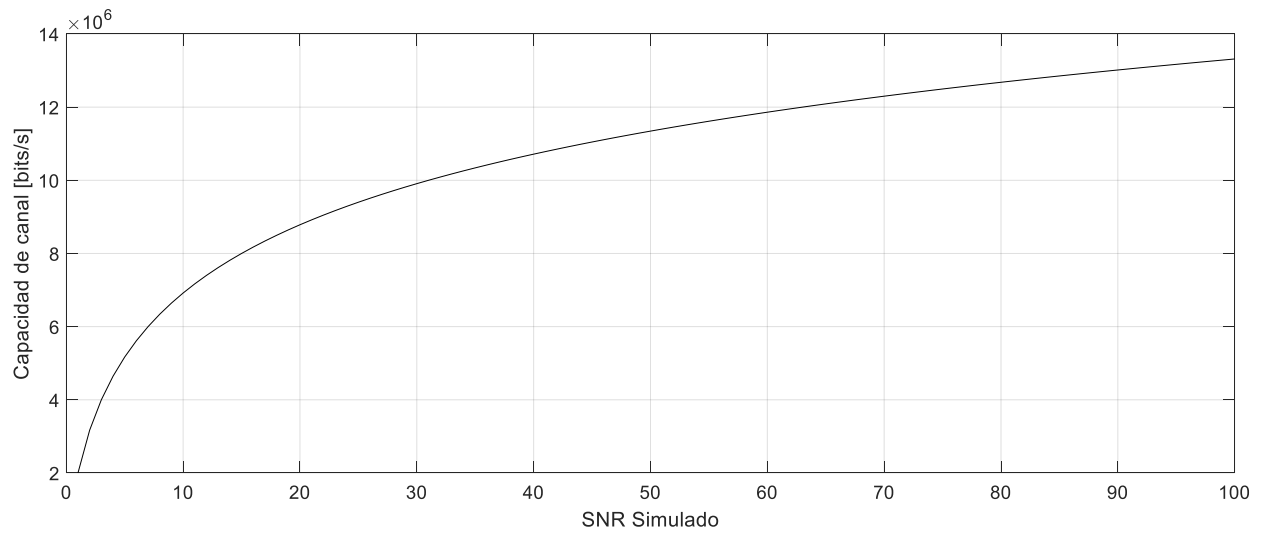


Figura 3.9 Capacidad de canal para SNR simulado de 0 a 100 en intervalos de 1.

En la figura 3.8 se puede ver el deterioro de la capacidad de canal conforme aumenta el ruido en el mismo, para analizar experimentalmente este efecto. Al procedimiento usado para obtener el promedio y la desviación estándar del ruido extraído se agregó el cálculo del SNR y el cálculo de la capacidad de canal. Los promedios de los resultados de estos cálculos se muestran en las figuras 3.10 y 3.11.

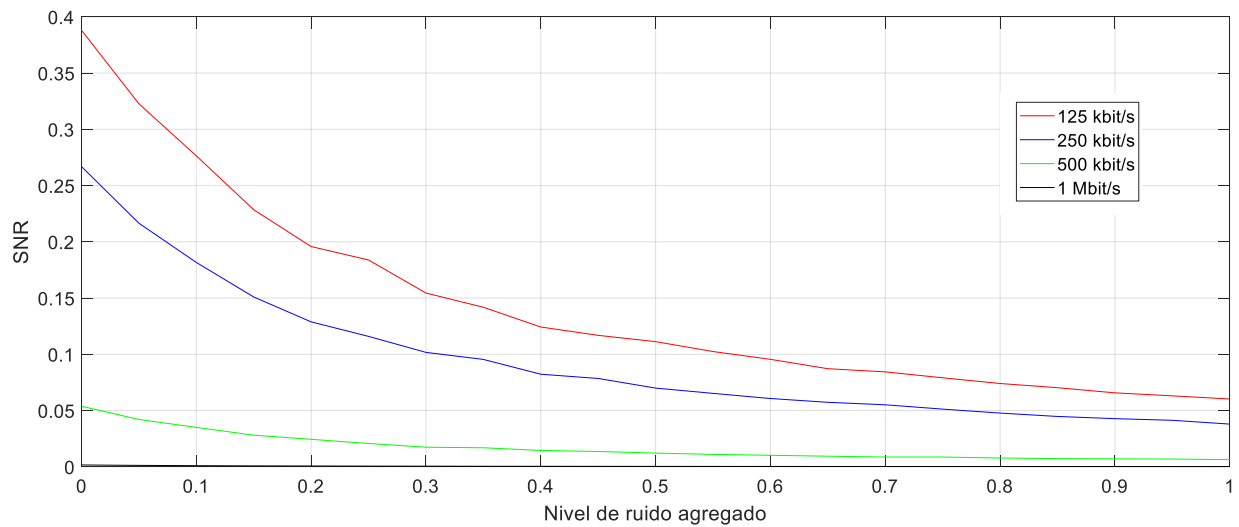


Figura 3.10 Promedio del SNR calculado experimentalmente.

Analizando los resultados graficados en la figura 3.10 se puede observar que los resultados obtenidos coinciden con el comportamiento esperado, ya que el SNR debe disminuir con el aumento del nivel de ruido; lo mismo se puede deducir al analizar la figura 3.11, ya que conforme aumenta el nivel de ruido disminuye la capacidad de canal.

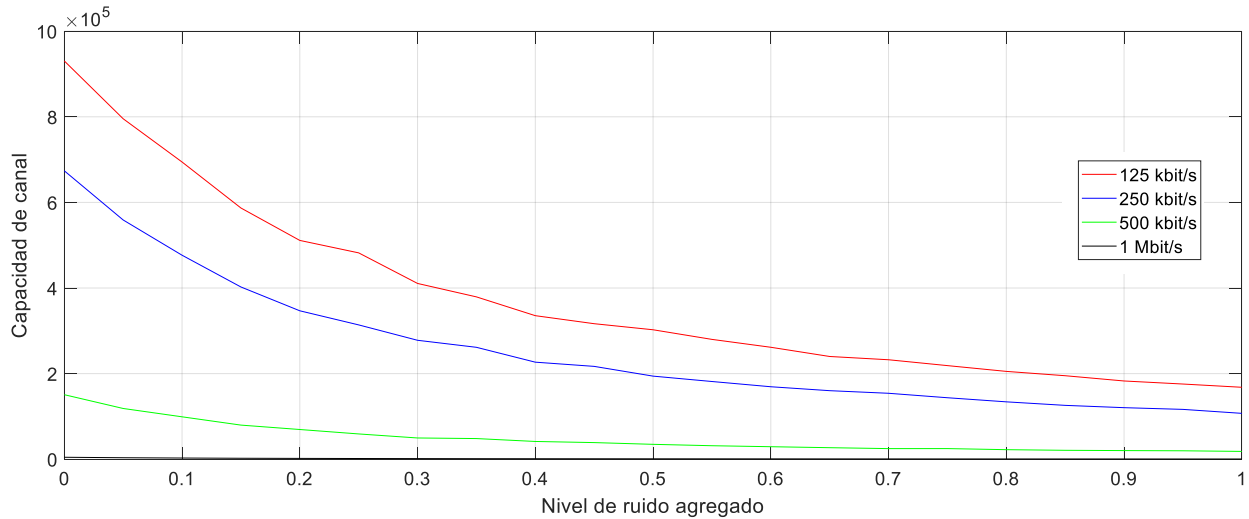


Figura 3.11 Promedio de la capacidad de canal calculada experimentalmente.

Con el objetivo de relacionar el nivel de ruido con el SNR se experimentó con la generación de ruido de niveles que van de 0 a 1 en intervalos de 0.01, y usando las señales de la base de datos sin ser contaminadas -esto para simular un filtro ideal- se calculó el SNR. Los resultados de este experimento se muestran en la figura 3.12. Con el objetivo de facilitar el manejo de los datos obtenidos se calculó la inversa, lo que se muestran en la figura 3.13.

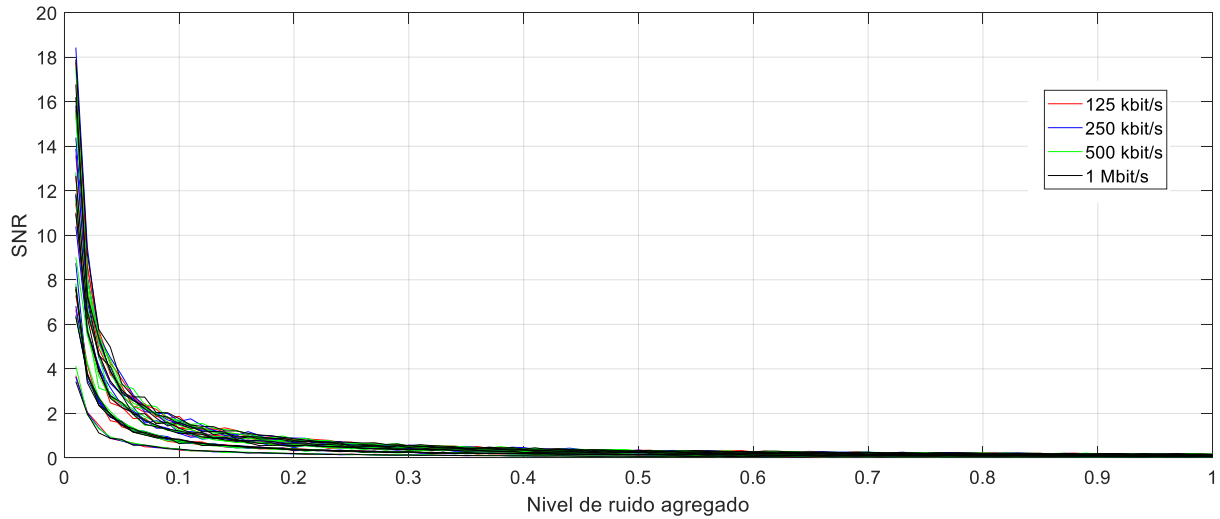


Figura 3.12 SNR obtenido experimentalmente considerando un filtro ideal.

Como se puede observar en las figuras 3.12 y 3.13 el comportamiento del SNR pareciera no seguir ningún patrón predecible con respecto al nivel de ruido agregado o la velocidad de transmisión considerada. Esto se debe a que la potencia de una señal binaria depende del número de niveles altos que existan en la trama analizada, por ejemplo, suponiendo un bus en el que hay un nivel de ruido constante con dos tramas, una en la que solo un bit es alto, se tendrá un SNR más bajo que una trama donde la mitad de los bits o más sean altos. Debido a esto se requerirá un análisis más profundo de esta relación. Dicho análisis podría ser parte de un trabajo a futuro.

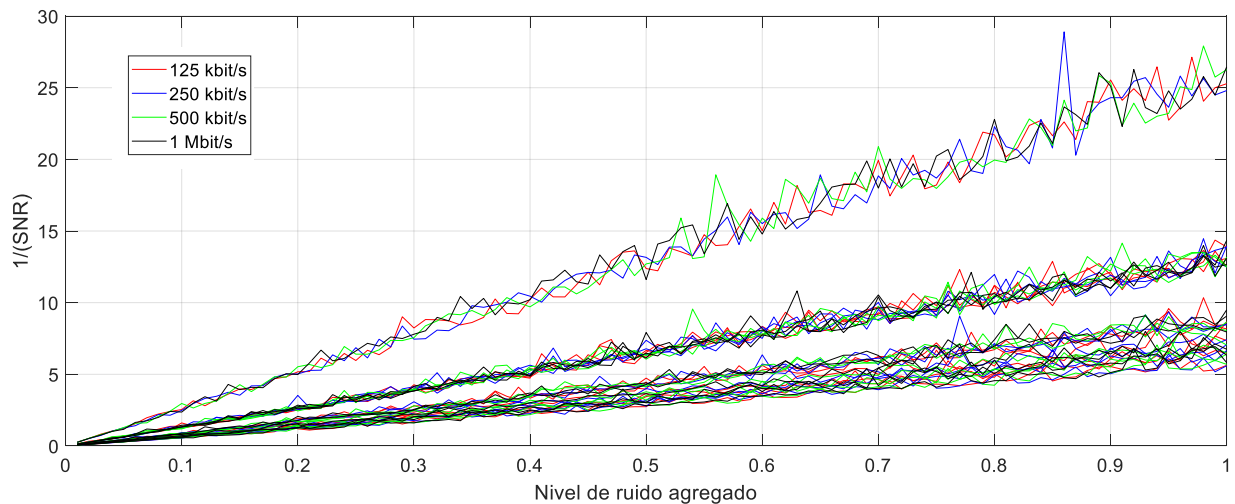


Figura 3.13 Inversa de los datos graficados en la figura 3.12

## 4. Resultados

En esta sección se muestra el análisis de errores para los estimadores diseñados, posteriormente se presentan los resultados obtenidos utilizando los estimadores propuestos -ecuaciones 3.6 y 3.7-. Para obtener estos resultados se propuso una nueva base de datos con secuencias diferentes a la utilizada en la sección 3, estas secuencias son las siguientes 100100000001, 111110110001, 100111100111, 110101011111 y 101000001011, y se denominarán “secuencias de validación”.

Las señales basadas en estos patrones se generaron utilizando MATLAB, con las mismas consideraciones que las secuencias de diseño, es decir, se mantuvo constante la frecuencia de muestreo y se repitió la secuencia, en caso de que se requiera evitar tener valores indefinidos en la señal simulada.

### 4.1. Desempeño de los estimadores diseñados

En esta sección se muestra el error promedio y la incertidumbre -mencionada en la sección 3.2.2 para las ecuaciones 3.6 , 3.7 y 3.8-. Para este proceso se usaron las ecuaciones 4.1 y 4.2 de la siguiente manera:

1. Se contaminó cada una de las señales muestra definidas por las secuencias de diseño.
2. Se extrajo el ruido usando un filtro FIR.
3. Se estimó el nivel de ruido usando las ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8.
4. Se calculó el error relativo y la incertidumbre.

En la ecuación 4.1 el término *Err* es el error relativo, el término  $v_{calculado}$  es el valor obtenido experimentalmente y el término  $v_{esperado}$  es el valor esperado.

$$Err = \frac{|v_{calculado} - v_{esperado}|}{v_{esperado}} \dots \dots \dots (4.1)$$

En la ecuación 4.2 el término  $v_{calculado_i}$  es el  $i$ -ésimo valor obtenido experimentalmente,  $v_{promedio}$  es el promedio de los valores obtenidos experimentalmente,  $N$  es el número de valores obtenidos y  $g$  es la incertidumbre calculada.

$$g = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (v_{calculado_i} - v_{promedio})^2}{N - 1}} \quad \dots \dots \dots (4.2)$$

Este procedimiento se siguió para cada una de las velocidades consideradas, los resultados de este procedimiento se muestran en las figuras 4.1 a 4.8, respetando la convención en cuanto a los colores correspondientes para cada velocidad considerada. En cuanto a las ecuaciones 3.7 y 3.8, se realizó este procedimiento para las dos estimaciones obtenidas. La razón de que se obtengan dos estimaciones es debido al termino cuadrático en la ecuación 3.5.

En las figuras 4.1 a 4.8 los términos  $g_{pro}$ ,  $g_{des1}$  y  $g_{des2}$  representan la estimación por medio de la linealización -ecuación 3.6-, formula general con signo positivo -ecuación 3.7-, y la formula general con signo negativo -ecuación 3.8-, respectivamente.

En las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se muestra el cálculo del error relativo para niveles de ruido de 0 a 1 en intervalos de 0.01 para las velocidades de 125kbit/s, 250kbit/s, 500kbit/s y 1Mbit/s respectivamente. En algunos casos no se observan los errores para  $g_{des2}$ , esto es porque se adaptó la gráfica de tal forma que se pudieran apreciar las diferencias entre  $g_{pro}$  y  $g_{des1}$ , sin embargo es difícil discernir cuáles resultados tienen el menor error. Por ejemplo, en la figura 4.2 los resultados de  $g_{pro}$  tienen el error relativo más bajo, sin embargo, en las figuras 4.1, 4.3 y 4.4 no hay una diferencia clara entre los errores relativos.

Otro comportamiento interesante es que el error es indefinido en cero, lo que se puede observar en las figuras 4.1 a 4.4.

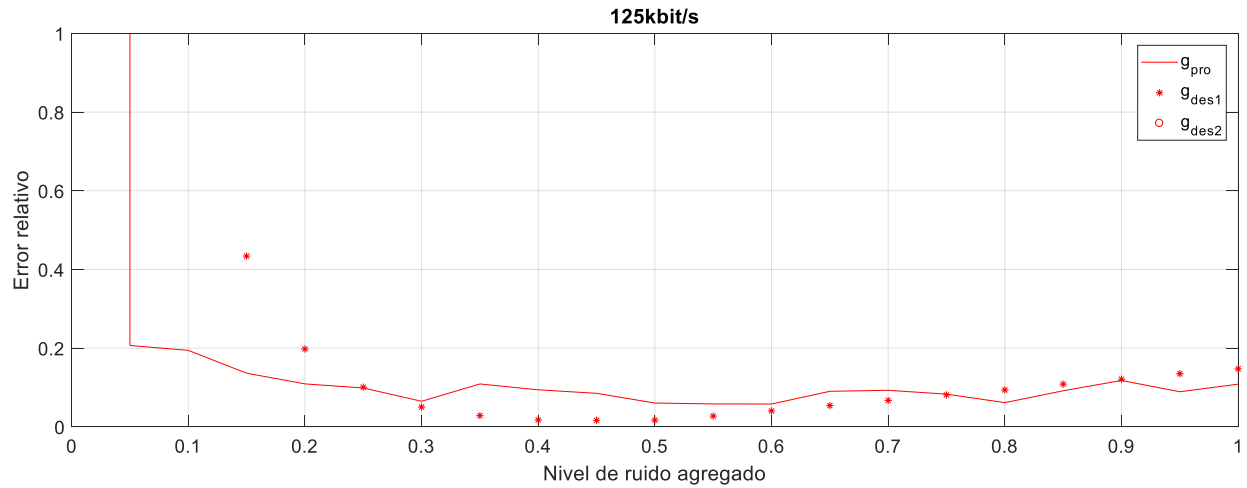


Figura 4.1 Error relativo de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - $g_{pro}$ -, 3.7 - $g_{des1}$ - y 3.8 - $g_{pro}$ -, para la velocidad de 125kbit/s.

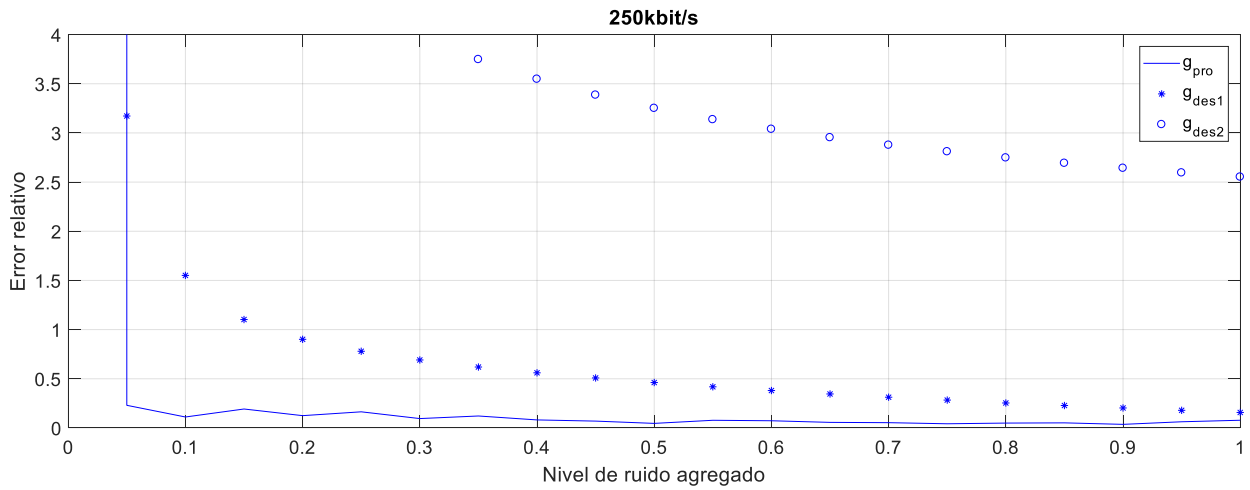


Figura 4.2 Error relativo de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - $g_{pro}$ -, 3.7 - $g_{des1}$ - y 3.8 - $g_{pro}$ -, para la velocidad de 250kbit/s.

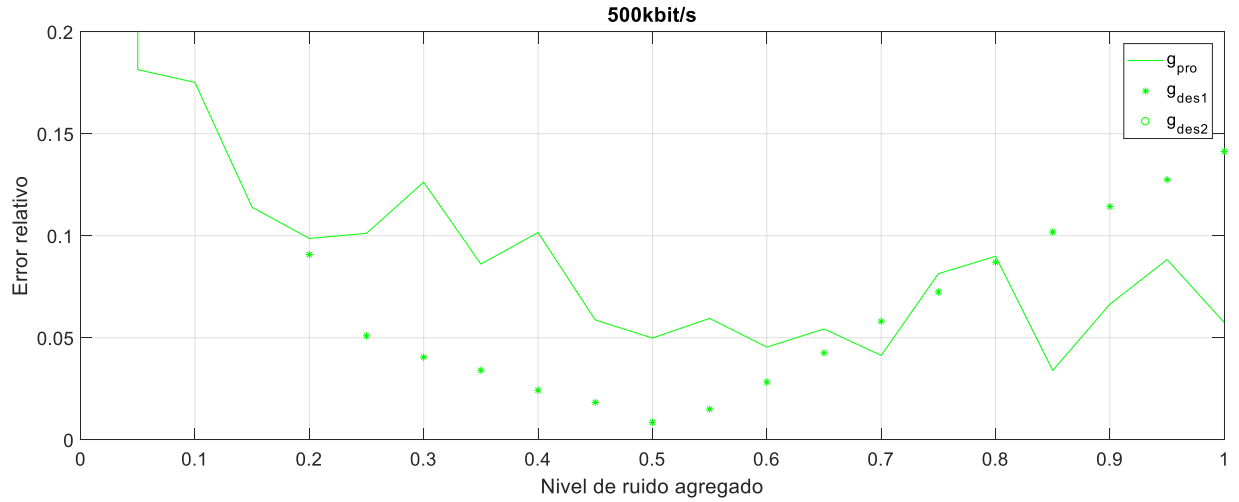


Figura 4.3 Error relativo de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - $g_{pro}$ -, 3.7 - $g_{des1}$ - y 3.8 - $g_{des2}$ -, para la velocidad de 500kbit/s.

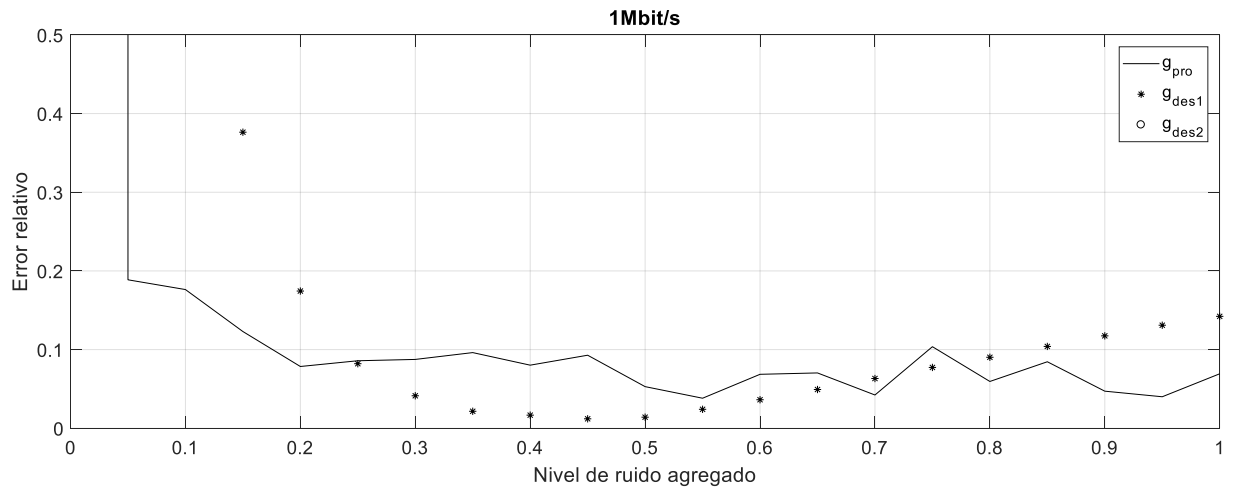


Figura 4.4 Error relativo de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - $g_{pro}$ -, 3.7 - $g_{des1}$ - y 3.8 - $g_{des2}$ -, para la velocidad de 1Mbit/s.

En cuanto a la incertidumbre, los resultados se muestran en las figuras 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 para las velocidades de transmisión consideradas 125kbit/s, 250kbit/s, 500kbit/s y 1Mbit/s respectivamente. En este caso, la incertidumbre obtenida para  $g_{des1}$  y  $g_{des2}$  es igual en todos los casos. Es importante señalar que se ajustó la escala para hacer apreciables los datos más bajos.

En el caso de la incertidumbre se puede observar que para las velocidades consideradas la incertidumbre más baja se obtiene en los resultados  $g_{des1}$  y  $g_{des2}$ .

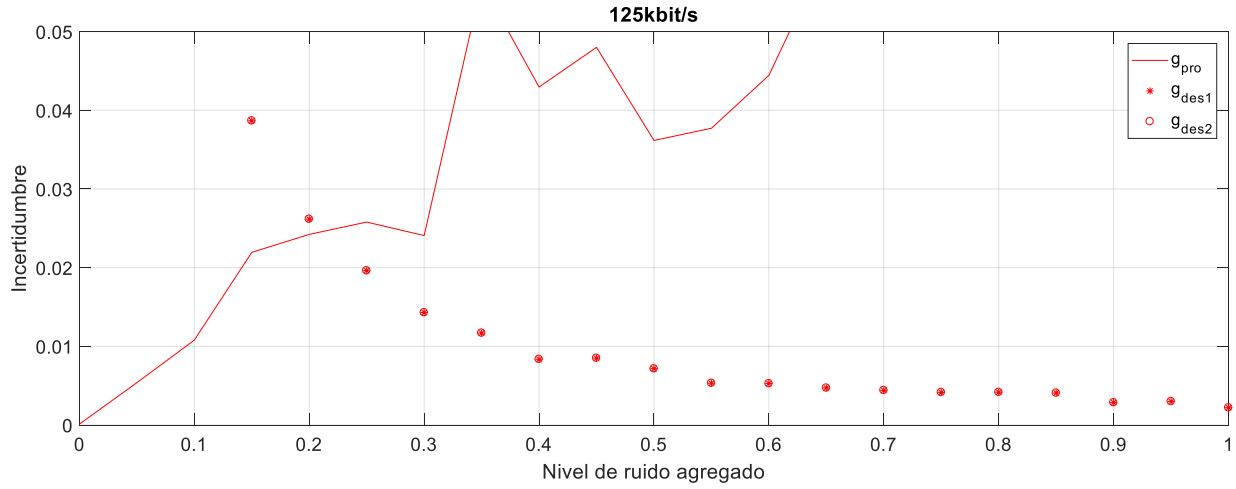


Figura 4.5 Incertidumbre de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - $g_{pro}$ -, 3.7 - $g_{des1}$ - y 3.8 - $g_{des2}$ -, para la velocidad de 125kbit/s.

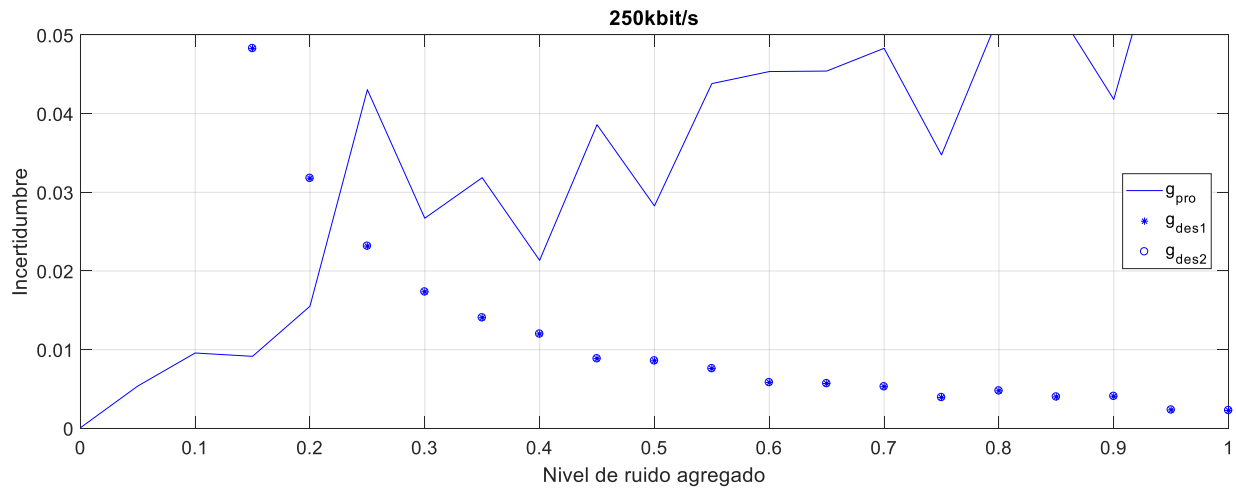


Figura 4.6 Incertidumbre de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - $g_{pro}$ -, 3.7 - $g_{des1}$ - y 3.8 - $g_{des2}$ -, para la velocidad de 250kbit/s.



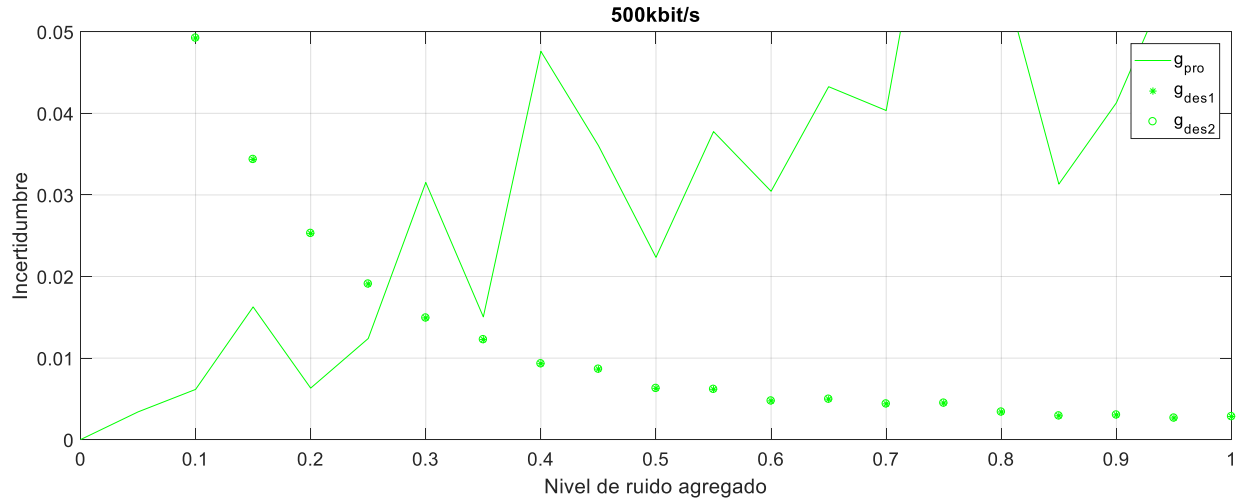


Figura 4.7 Incertidumbre de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - $g_{pro}$ -, 3.7 - $g_{des1}$ - y 3.8 - $g_{des2}$ -, para la velocidad de 500kbit/s.

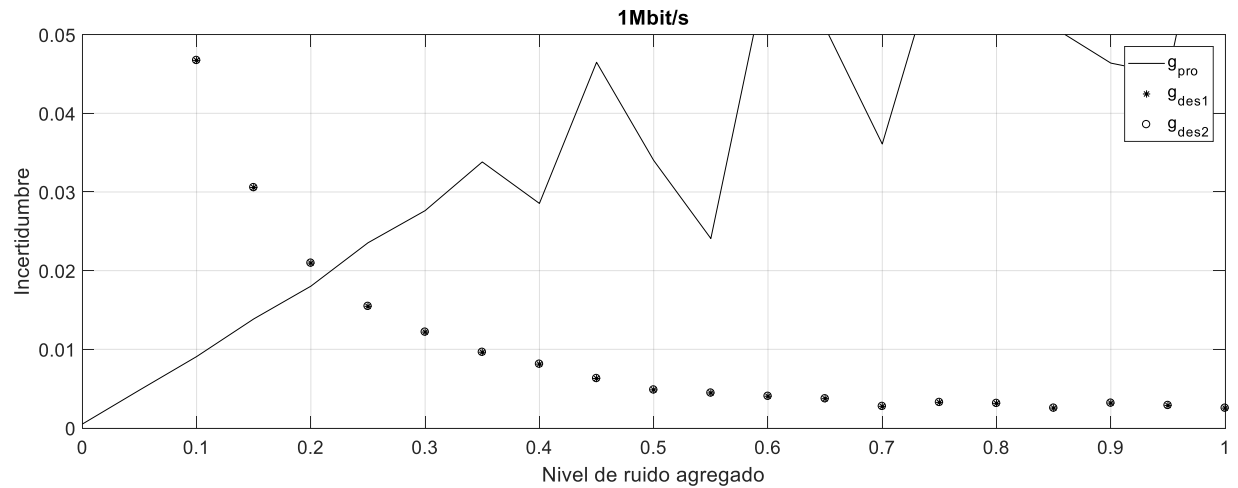


Figura 4.8 Incertidumbre de las estimaciones usando las ecuaciones 3.6 - $g_{pro}$ -, 3.7 - $g_{des1}$ - y 3.8 - $g_{des2}$ -, para la velocidad de 1Mbit/s.

## 4.2. Resultados usando las secuencias de validación

Las secuencias de la base de validación fueron simuladas para las cuatro velocidades consideradas, posteriormente se agregó ruido a cada una de estas secuencias desde 0 hasta 1 en intervalos de 0.05. En seguida, se estimó el ruido agregado usando las ecuaciones 3.6 y 3.7. En esta ocasión se graficaron los resultados con base en la velocidad de transmisión considerada,

resultados que se muestran en las figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 para las velocidades consideradas. En estas figuras se agregó una línea en color magenta representando el comportamiento ideal que deberían tener los estimadores.

Se puede observar que aun cuando la incertidumbre es igual para los datos  $g_{des1}$  y  $g_{des2}$  la diferencia entre las estimaciones es significativa, por lo tanto, la primera ecuación en ser descartada para la estimación es la 3.8. También se puede apreciar en la figura 4.10 que el error es mayor para  $g_{des1}$  en comparación con  $g_{pro}$ , lo que concuerda con los resultados mostrados en la figura 4.2. Otro punto interesante a observar es que visualmente los datos de  $g_{pro}$  para 0 parecieran coincidir con el comportamiento esperado.

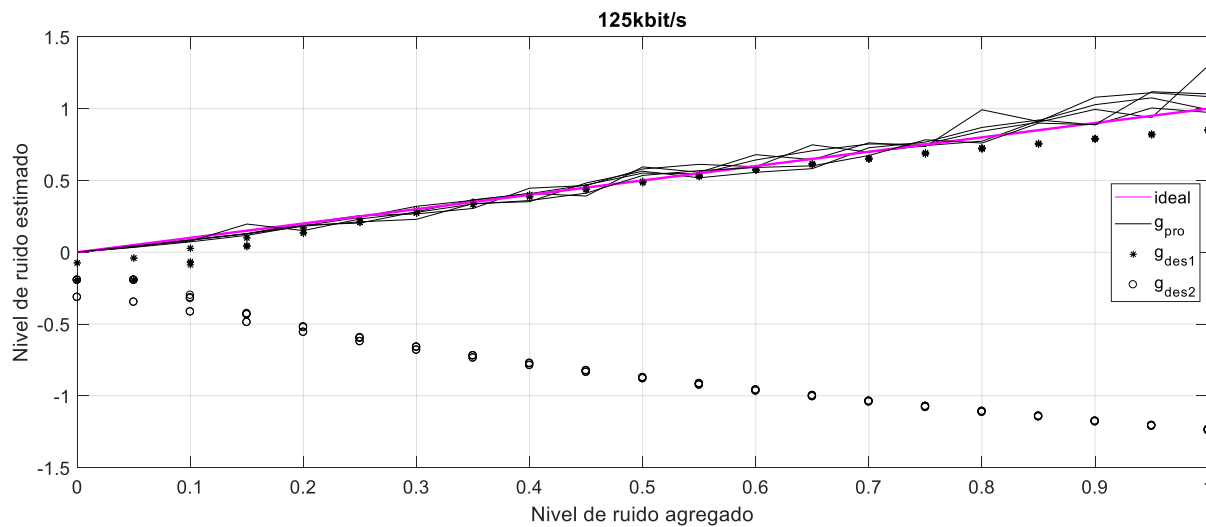


Figura 4.9 Comparación de la estimación de ruido contra el nivel de ruido agregado -ideal- usando las ecuaciones 3.6 - $g_{pro}$ -, 3.7 - $g_{des1}$ - y 3.8 - $g_{pro}$ -, para la velocidad de 125kbit/s.

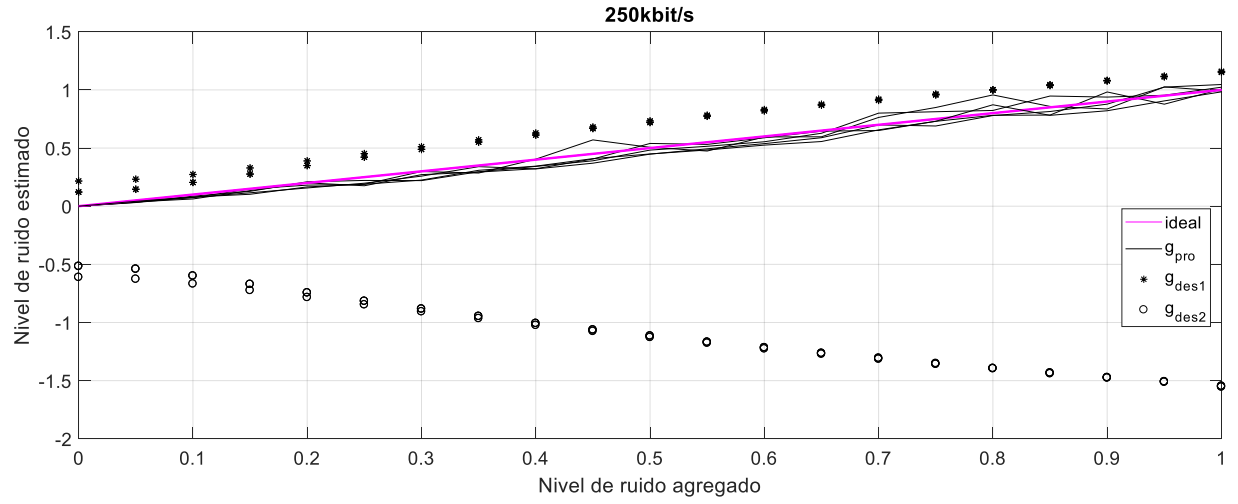


Figura 4.10 Comparación de la estimación de ruido contra el nivel de ruido agregado -ideal- usando las ecuaciones 3.6 - $g_{pro}$ -, 3.7 - $g_{des1}$ - y 3.8 - $g_{pro}$ -, para la velocidad de 125kbit/s.

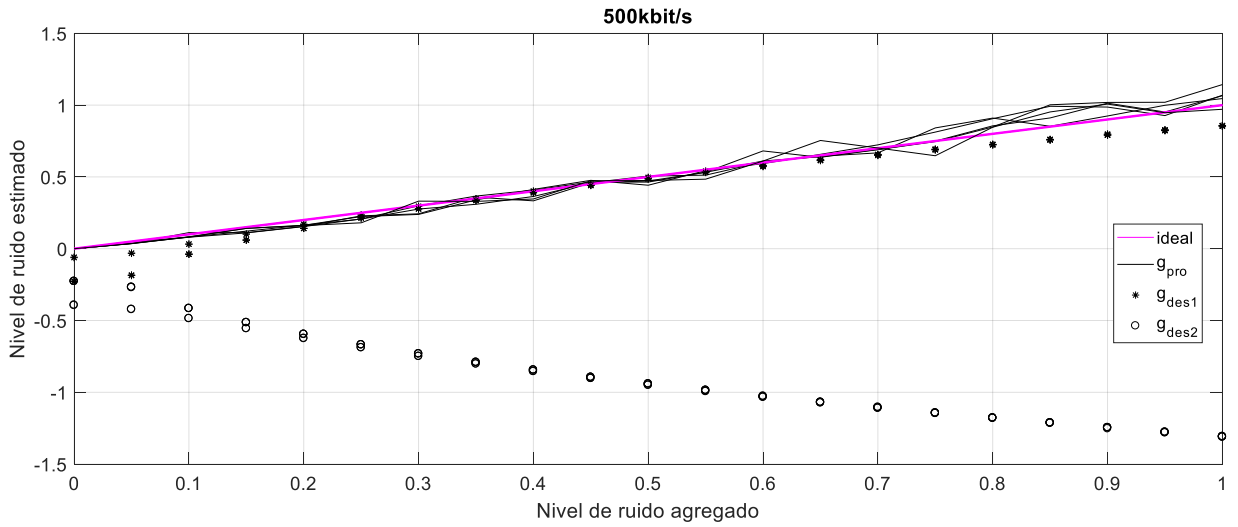


Figura 4.11 Comparación de la estimación de ruido contra el nivel de ruido agregado -ideal- usando las ecuaciones 3.6 - $g_{pro}$ -, 3.7 - $g_{des1}$ - y 3.8 - $g_{pro}$ -, para la velocidad de 500kbit/s.

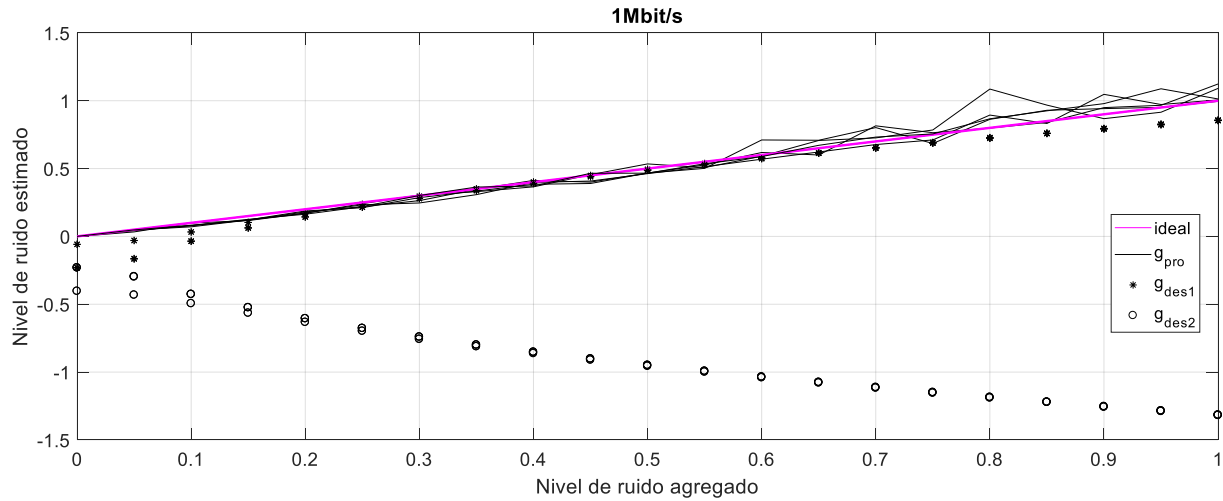


Figura 4.12 Comparación de la estimación de ruido contra el nivel de ruido agregado -ideal- usando las ecuaciones 3.6 - $g_{pro}$ -, 3.7 - $g_{des1}$ - y 3.8 - $g_{des2}$ -, para la velocidad de 1Mbit/s.

De los resultados mostrados en las figuras 4.1 a 4.8 y las validaciones de los estimadores mostradas en las figuras 4.9 a 4.12 se puede concluir que los mejores resultados se obtuvieron de las ecuaciones 3.6 y 3.7.

## 5. Discusión

En esta sección se presenta un análisis de los resultados obtenidos y de la metodología seguida para obtener los estimadores de ruido propuestos. Es importante mencionar que no se encontraron trabajos relacionados a la estimación -cuantificable- de ruido en el bus de CAN y el único trabajo en el que se hace la estimación con base en el nivel de ruido, es decir, a la desviación estándar del ruido extraído es [20], lo que se puede deber a que esta forma de analizar el ruido del tipo blanco gaussiano aditivo es usada en el procesamiento de imágenes. Los únicos documentos consultados enfocados al bus de CAN -[16] y [17]- solo hablan del análisis del estatus del bus mediante el uso de osciloscopios.

Otro punto es que en los trabajos consultados [7] – [15] se estima el SNR, ya que este parámetro es de mayor utilidad en la caracterización de un canal de comunicación, por lo que se podría explorar en un futuro análisis la posibilidad de relacionar el SNR con la desviación estándar del ruido en el canal de comunicación.

En comparación con lo reportado en [20], en este trabajo fue posible el uso tanto del promedio como de la desviación estándar para la estimación del nivel de ruido, además de que en este trabajo no fue necesaria hacer iteraciones para la obtención de los resultados.

El error de los estimadores en general es menor a 20%. Un punto interesante es que la incertidumbre de la estimación disminuye conforme aumenta el nivel de ruido para la estimación en la que se usa la desviación estándar del ruido. El rango de niveles de ruido utilizado en este trabajo fue de 0 a 1.

En relación al análisis de errores presentado en la sección de resultados se puede ver que tanto el error como la incertidumbre no cambian significativamente dependiendo de la velocidad de transmisión considerada, a excepción del error para la velocidad de 250kbit/s, el cual se incrementa.

La principal desventaja de los estimadores propuestos es que los valores de las constantes en las ecuaciones 3.6 y 3.7 debe variar en relación con la velocidad de transmisión considerada a analizar.

# Conclusiones

En este trabajo se demostró que es posible la estimación del nivel de ruido en una trama simulada de datos, por lo que teóricamente es posible calcular los niveles de ruido en un bus de CAN usando los estimadores propuestos. Igualmente, se diseñaron dos estimadores de ruido, los cuales fueron las ecuaciones 3.6 y 3.7, además de que se validó su funcionamiento con una base de datos diferente a la usada en el diseño.

En relación al objetivo específico 1, se analizó la viabilidad de la estimación del nivel de ruido en un bus de CAN, así como el error y la incertidumbre -sección 4.1-. Para cumplir con el objetivo específico 2, se analizó experimentalmente el efecto del incremento del nivel de ruido, esto se puede ver en la sección 3.3, aunque no fue posible establecer una relación entre el nivel de ruido y el SNR. El objetivo específico 3 se cumplió en la sección 4.1, en la que se analizó el error relativo y la incertidumbre de los estimadores propuestos, además de sus sub-variantes para cada una de las velocidades consideradas.

El trabajo estaba pensado para realizar un cálculo de la velocidad recomendable a utilizar en un bus de CAN, sin embargo, no se pudo llegar a este resultado debido a que no fue posible relacionar el nivel de ruido estimado con el SNR, tal como se puede ver en la sección 3.3 -en específico en las figuras 3.12 y 3.13-. Sin embargo, se encontró la ecuación  $a$  con la que es posible calcular el SNR en relación a la desviación estándar de la señal y la desviación estándar del ruido -manejada en este trabajo como nivel de ruido-. Esta ecuación podría coadyuvar en la realización de un trabajo posterior.

En específico, algunas sugerencias que podrían trabajarse en un análisis futuro son:

- Validación de los estimadores propuestos en este trabajo usando señales capturadas de un bus CAN.
- Relacionar el nivel de ruido con el SNR. Hasta ahora se sugiere usar la ecuación  $a$ , donde  $\sigma_{señal}$  es la desviación estándar de la señal y  $\sigma_{ruido}$  es la desviación estándar del ruido, llamada en este trabajo nivel de ruido.

$$SNR = \frac{\sigma_{señal}^2}{\sigma_{ruido}^2} \quad \dots \dots (a)$$

- Encontrar experimentalmente el rango útil de los estimadores propuestos con base en el SNR.

# Bibliografía

- [1] Real Academia de Ingeniería. “Ruido”. Internet: <http://diccionario.raing.es/es/lema/ruido-1>, [jun. 22, 2017]
- [2] Real Academia de Ingeniería. “Ruido blanco Gaussiano aditivo”. Internet: "http://diccionario.raing.es/es/lema/ruido-blanco-gaussiano-aditivo", [Jun. 22, 2017]
- [3] Robert Bosch GmbH. “CAN Specification – version 2.0” 1991.
- [4] John G. Proakis, Dimitris G. Manolakis, Tratamiento digital de señales, Pearson Educación, 2007. ISBN: 8483223473, 9788483223475, pp.
- [5] Russo, F, A method for estimation and filtering of Gaussian noise in images, Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002. IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE, vol.2, no., pp.1689,1694 vol.2, 2002.
- [6] F. J. Piera and P. Parada, "On the connections between information and estimation theory: from AWGN Channels to dynamical systems with feedback," 2008 Information Theory and Applications Workshop, San Diego, CA, 2008, pp. 239-248. doi: 10.1109/ITA.2008.4601056
- [7] Gil Katzir, Shimon Moshavi, Nimrod Mesika. “Data channel noise estimation using control channel”, U.S. Patent 8982866 B1, Mar. 17, 2015.
- [8] Phillip Alan Hetherington. “Noise estimation control system”, U.S. Patent 9318092 B2, Apr. 19, 2016.
- [9] Phillip Alan Hetherington. “Robust noise estimation”, U.S. Patent US7844453 B2, Nov. 30 2010.
- [10] D. R. Pauluzzi and N. C. Beaulieu, "A comparison of SNR estimation techniques for the AWGN channel," in IEEE Transactions on Communications, vol. 48, no. 10, pp. 1681-1691, Oct 2000. doi: 10.1109/26.871393
- [11] Bin Li, R. DiFazio and A. Zeira, "A low bias algorithm to estimate negative SNRs in an AWGN channel," in IEEE Communications Letters, vol. 6, no. 11, pp. 469-471, Nov. 2002. doi: 10.1109/LCOMM.2002.805546
- [12] Z. Baranski, A. M. Haimovich and J. Garcia-Frias, "EM-based iterative receiver for space-time coded modulation with noise variance estimation," Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBECOM '02. IEEE, 2002, pp. 355-359 vol.1. doi: 10.1109/GLOCOM.2002.1188100

- [13] F. Munier, T. Eriksson and A. Svensson, "Receiver algorithms for OFDM systems in phase noise and AWGN," 2004 IEEE 15th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE Cat. No.04TH8754), 2004, pp. 1998-2002 Vol.3. doi: 10.1109/PIMRC.2004.1368348
- [14] Sangho Nam, Goohyun Park, Sungmok Oh, Changeon Kang and Daesik Hong, "Robust velocity estimation for non-isotropic and AWGN channel," VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, 2005., 2005, pp. 2003-2006. doi: 10.1109/VETEFCF.2005.1558459
- [15] C. Wang, Y. He, W. Xu, G. Cui and W. Wang, "Carrier frequency offset estimation scheme for quasi-constant envelope OFDM satellite system under AWGN channel," 2016 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), Yangzhou, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/WCSP.2016.7752538
- [16] Application note, "Verifying CAN bus signals with a Fluke ScopeMeter® 120 Series", Fluke. Available: [http://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/2392165\\_6003\\_ENG\\_A\\_W.PDF](http://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/2392165_6003_ENG_A_W.PDF), [Jun 22, 2017].
- [17] Application note, "Industrial Bus Health testing with Fluke 125 Industrial ScopeMeter®", Fluke. Available: <http://fluke.informationstore.net/e-fullfill-bot.asp?link=11553&Email=&referer=>, [Jun 22, 2017].
- [18] C.E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication" The Bell System Technical Journal, July, October, 1948, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656.
- [19] Application note, "Industrial Bus Health testing with Fluke 125 Industrial ScopeMeter®", Fluke. Available: <http://www.aftermarketonline.net/Technical/2012/27824-/CAN-Bus-feature-Part-One>, [Jun 22, 2017].
- [20] F. Gamino, A.J. Rosales, F.J. Gallegos, "Gaussian Noise Estimation Applied to Color Images" Research in Computing Science, 2014, pp. 35-46., Vol 81, ISSN: 1870-4069.