

COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CRUCE POR CERO Y LA TRANSFORMADA Z-CHIRP PARA MEDIR FRECUENCIAS EN EL RANGO ULTRASÓNICO

Guadalupe Aguilar Cerda

Universidad Autónoma de Querétaro

lups_doll@hotmail.com

Luis Morales Velázquez

Universidad Autónoma de Querétaro

lmorales@hspdigital.org

Resumen

Este trabajo presenta una comparativa entre 2 métodos para detectar y medir la frecuencia con una alta precisión en el rango ultrasónico. La aplicación propuesta para esta investigación es la medición de velocidad con ultrasonido mediante efecto el Doppler en actuadores lineales, esta se desarrollará en un trabajo posterior. Se generaron señales sintéticas con distintos niveles de ruido, simulando la señal entregada por un sensor ultrasónico. Para la detección de frecuencia se diseñó una metodología para comparar las técnicas de detección de cruce por cero y la Transformada-Z Chirp. La Transformada-Z Chirp, tiene mejores resultados ya que se tiene una buena aproximación de la frecuencia real, y el error no incrementa en señales con ruido, en cambio en la detección de cruce por cero el error incrementa mostrando unos picos indeseables. Una vez que la metodología se perfeccione, se implementará en un sistema embebido para el procesamiento en tiempo real.

Palabras Claves: Alta resolución, detección de cruce por cero, efecto Doppler, estimación de frecuencia, transformada-Z Chirp, ultrasonido.

Abstract

This work presents a comparison between 2 methods to detect and measure the frequency with a high precision in the ultrasonic range. The proposed application for this research is the measurement of velocity with ultrasound by Doppler effect in linear actuators, this will be developed in a later work. Synthetic signals were generated with different levels of noise, simulating the signal delivered by an ultrasonic sensor. For frequency detection, a methodology was designed to compare zero crossing detection techniques and the Chirp Z-Transform. The Chirp Z-Transform, has better results since it has a good approximation of the real frequency, and the error does not increase in signals with noise, instead in the detection of crossing by zero the error increases showing some undesirable peaks. Once the methodology is perfected, it will be implemented in an embedded system for real-time processing.

Keywords: *Chirp z-transform, Doppler effect, frequency estimation, high resolution, ultrasound, zero crossing detection.*

1. Introducción

La frecuencia es un parámetro de gran importancia, por ello la precisión en la estimación de la misma es indispensable, la detección y medición de la frecuencia de una señal, ya sea pura o con ruido es un problema que ha sido estudiado en distintos trabajos para varias aplicaciones. Dentro de las metodologías propuestas están la Transformada Discreta de Fourier [Venkataramanan, 2006] que es una de las más utilizadas al igual que técnicas de estimación basadas en la interpolación de la Transformada Rápida de Fourier [Qi, 2004]. Se ha demostrado a pesar de tener un procesamiento rápido, la desventaja de utilizar la Transformada Rápida de Fourier, es que su rendimiento y resolución dependen de la relación señal ruido (SNR) y del número de muestras de la señal analizada. Para mejorar la precisión y resolución, [Yulan, 2007] combinaron una técnica de interpolación cuadrática y la Transformada Rápida de Fourier. Es importante destacar que las aplicaciones en las que utilizan la Transformada discreta de Fourier y la Transformada rápida de Fourier son mayormente para la estimación de parámetros como ángulo, fase, y

frecuencia entre otros en los sistemas eléctricos de potencia [Phadke et al, 1983]. La estimación de la frecuencia mediante detección de cruce por cero es ampliamente utilizada debido a su simplicidad [Friedman, 1994], el error presentado es discreto, el cual puede atenuarse aún más agregando un filtro. El algoritmo supervisado de Gauss-Newton (SGN) presenta la combinación de la Transformada Discreta de Fourier, el método de detección de cruce por cero y un filtro de respuesta infinita al impulso (IIR) mejorando así la estimación de errores [Xue, 2009]. La Transformada-Z Chirp presenta una resolución de frecuencia mucho más alta que la presentada por las técnicas anteriormente descritas (FFT y Detección de cruce por cero). La Transformada-Z Chirp permite la evaluación de la Transformada Z en M puntos equi-angularmente espaciados en los contornos que entran o salen en espiral desde un punto arbitrario en el plano Z. Dentro de las aplicaciones de este algoritmo se encuentra el análisis de frecuencia en alta resolución, la interpolación del tiempo de datos de una tasa de muestreo a cualquier otra tasa de muestreo y la mejora de los polos para su uso en el análisis espectral [Rabiner et al, 1969]. La importancia de encontrar la técnica adecuada para la medición de frecuencia en el rango ultrasónico con una alta resolución radica en la aplicación que se le desea dar al método propuesto. La aplicación consiste en resolver el problema que se tiene al medir velocidad. Uno de los métodos que usualmente se utilizan, es el de estimar la velocidad a partir de la posición del encoder esto debido a que el encoder es el sensor más común (típico) en el control de movimiento. La medición es simple, ya que se basa en la diferencia de recuentos sucesivos del encoder. A altas velocidades la estimación con este método proporciona resultados relativamente precisos, pero a bajas velocidades e inclusive velocidades extremadamente bajas, la estimación tiene una fiabilidad bastante baja. Un encoder de alta resolución podría proporcionar una estimación de velocidad mucho más precisa incluso para bajas velocidades, pero el coste de implementación, puede ser muy elevado tomando en cuenta que la aplicación no lo requiera [Jeon, 2007]. El uso de acelerómetros para la estimación de la velocidad ha ido en aumento gracias al desempeño que han mostrado y a la reducción de su coste. La velocidad se puede estimar integrando

la aceleración, pero debido a que no es una medición directa y se recurre a la integración, se presenta un error, el cual crece sin límites debido a la polarización y la deriva de la salida del acelerómetro. Para solucionar este problema también se utiliza la medición de la posición y así realizar una compensación para tener una estimación de la velocidad más precisa [Shim et al, 1998]. La propuesta de acelerómetros MEMS con sensores de baja resolución, utilizando el filtro cinemático de Kalman combina las mediciones de posición y aceleración para realizar la estimación de la velocidad. Este método puede presentar perturbaciones a la salida del acelerómetro [Tomizuka, 2001]. La implementación del efecto Doppler para distintas aplicaciones ha ido en aumento. La velocimetría láser de efecto Doppler (laser Doppler Velocimetry, LVD) puede ser usada para medir velocidades de flujo con exactitud y sin invasión. El método consiste en la observación de una luz reflejada, esta luz es generada originalmente por un láser y el estudio de las reflexiones permite derivar la velocidad local e instantánea. El espectro Doppler obtenido a partir del desplazamiento Doppler en frecuencia del rayo láser incidente al mover objetos sólidos o dispersores en flujos, se ha utilizado desde un inicio para propósitos de detección, incluyendo la flujometría y aplicaciones biomédicas [Mowla et al, 2014]. El uso del ultrasonido ha evolucionado de manera importante hasta volverse una de las herramientas de diagnósticas más importantes en el campo de la medicina para la detección de enfermedades gracias a que es una técnica no invasiva y por ello es la más utilizada en todo el mundo [Dávila et al, 2016]. Pero las aplicaciones del ultrasonido no se limitan únicamente al área médica. Se opta por utilizar el método Doppler por ultrasonido debido a la propagación de la onda, en el ultrasonido se propaga con un haz pequeño, de mayor concentración, el cual tiene poca dispersión, a su vez es direccional, en cambio el sonido, tiene una dispersión muy rápida, lo cual provoca la generación de ecos, que al momento de realizar la medición, pueden existir que provengan de distintos lados, que se vuelva señales indeseables, las cuales posteriormente sean discriminadas y llevar a cabo el filtrado [Pye et al, 1998]. En investigaciones actuales, el uso del efecto Doppler por ultrasonido, está enfocado exclusivamente para aplicaciones en áreas médicas,

como estimación no invasiva de la presión sistólica mediante la ecografía Doppler [Yock, 1984]. En los trabajos existentes, la medición de la frecuencia está enfocada para el monitoreo de la calidad en sistemas de potencia, lo cual implica la medición de la línea eléctrica, la cual se encuentra a frecuencias muy bajas, es decir, oscila en el rango de los 60 Hz.

La aportación de este trabajo es la medición de frecuencias en el rango ultrasónico (>20kHz) con una alta precisión y resolución. Una vez que la técnica de medición se encuentre sustentada como la más adecuada, el procesamiento del algoritmo se implementará en un arreglo de compuertas programables en campo (FPGA) debido a que como las frecuencias que se manejan son muy altas, será un cálculo pesado y es necesario hacerlo en un dispositivo de alto desempeño que trabaje a una alta velocidad.

2. Métodos

En este apartado se presenta la metodología para la detección y medición de la frecuencia que consiste en la comparación de 2 técnicas, la detección de cruce por cero y la Transformada-Z Chirp. La cual consiste en la generación de 3 señales sintéticas, de las cuales 2 contienen ruido, una en mayor proporción. Una vez que se tengan las señales generadas, se les aplican ambos métodos implementados en Matlab®. Teniendo los resultados de los 2 métodos, se procede a realizar la comparación entre ambos mediante el análisis estadístico del error. La figura 1 muestra el diagrama a bloques de la metodología propuesta para la detección y medición de la frecuencia en el rango ultrasónico de alta resolución.

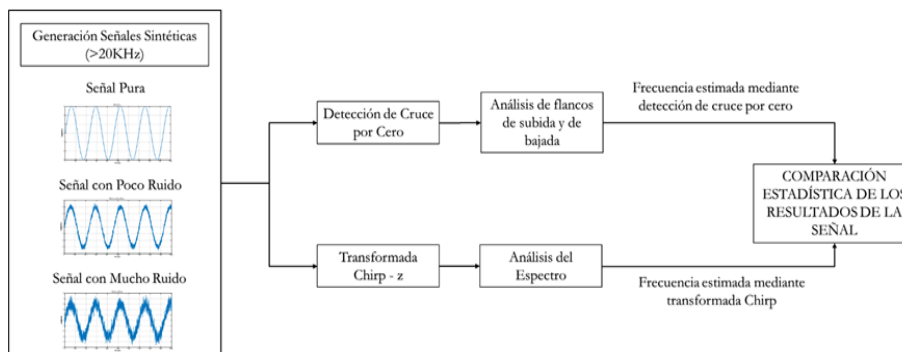


Figura 1 Diagrama a bloques de la metodología propuesta.

Primero se generaron las señales sintéticas, simulando la señal entregada por el sensor ultrasónico. La frecuencia de las señales oscila entre los 30 kHz hasta los 50 kHz, es decir, dentro del rango ultrasónico (>20 kHz). Además dos de las señales generadas contendrán ruido, el cual está presente en las señales reales. Con las señales generadas, se procedió a aplicar 2 de los métodos que más comúnmente se utilizan para medición de frecuencia, con la finalidad de comparar ambas técnicas. Las técnicas utilizadas fueron la de detección de cruce por cero y la Transformada-Z Chirp. En ambos métodos las señales mantuvieron restricciones y limitaciones basadas en la aplicación contemplada a futuro. Una de las restricciones es la resolución. Se restringió la resolución de las señales, y los cálculos con la finalidad de implementar en tiempo real el método en el procesador (FPGA) para tener un sensor en tiempo real y llegar a la medición de la velocidad mediante el efecto Doppler en el rango ultrasónico, lo cual es difícil ya que las frecuencias son muy altas y un dispositivo de baja gama como un microcontrolador, arduino, entre otros, no tiene la velocidad suficiente para realizar la adquisición y el procesamiento al mismo tiempo. La detección de cruce por cero consiste en el cálculo de un punto donde el signo de la función cambia ya sea de positivo a negativo o viceversa, representado por un cruce del eje, el cruce por cero es el punto donde no hay amplitud. El conteo de cruces por cero es un método utilizado en el procesamiento para estimación de la frecuencia. Para ello se diseñó un algoritmo que hace lo siguiente, a partir de la señal generada de manera sintética, se guarda la señal en un arreglo de 4096 valores. Ese arreglo se comparó con cero, si es mayor o menor a cero, en el caso de que sea mayor a cero se le asigna el valor de 1, si es menor a cero, se le asigna el valor de -1, así es la manera en que detecta los cruces por cero, en el cambio de signo de la señal. Así se tendrá un arreglo con unos y menos unos, el paso siguiente es hacer la diferencia de números consecutivos dando como resultado un arreglo de 0, +2, y -2. Los valores que interesan son únicamente los diferentes de 0, ya que ahí se indica el cambio de signo o cruce por cero, al utilizar el absoluto a los valores del arreglo únicamente quedan valores positivos. Posteriormente se obtiene la longitud de la señal dividida entre 2, cada uno de los valores que se tienen en el

arreglo se van a dividir entre ese valor, para este caso 2048. Al final se hace una sumatoria de todos los elementos del arreglo, dando como resultado un valor numérico. Para obtener la frecuencia, se multiplicó ese valor numérico obtenido con anterioridad por la frecuencia de muestreo en este caso 200 000 muestras por segundo (samples per second, Sps) y se dividió entre 2. La Transformada-Z Chirp permite el cálculo rápido de la Transformada Z en ciertos puntos dentro de una región de la circunferencia de radio. Es útil cuando no se desea evaluar la Transformada Discreta de Fourier en todo el intervalo, sino sólo en un rango de frecuencias [Albertí, 2006]. La Transformada-Z Chirp $X(k)$ de una secuencia de N puntos $x(n)$ para $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ está dado por la ecuación 1.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) Z_L^{kn} \quad (1)$$

En dicha ecuación $X(k)$ permite calcular los contenidos de frecuencia de $x(n)$ muestreados a una frecuencia f_s , en un conjunto de L frecuencias en el rango cubierto por el arco del círculo unitario que comienza en $\omega_0 = 2\pi f_0$ y termina en $\omega_1 = 2\pi f_1$ [Proakis, 1996].

En la ecuación 1 la transformación kernel Z_L^{kn} está dada por la ecuación 2.

$$Z_L^{kn} = \exp\left\{ -j \frac{2\pi n}{f_s} \left[f_0 + \frac{(f_1 - f_0)k}{L} \right] \right\} = \cos(\omega n) - j \sin(\omega n) \quad (2)$$

Donde:

$$\omega = \frac{2\pi n}{f_s} \left[f_0 + \frac{(f_1 - f_0)k}{L} \right] \text{ y } k = 0, 1, \dots, L - 1$$

La transformación kernel Z_L^{kn} se puede implementar como 2 funciones discretas recursivas descritas por la ecuación 3 y la ecuación 4 para la componente real Z_R y la componente imaginaria Z_I .

$$Z_R(n) = Z_R(n - 1) \cos(\omega n) - Z_I(n - 1) \sin(\omega n) \quad (3)$$

$$Z_I(n) = Z_I(n-1) \cos(\omega n) + Z_R(n-1) \sin(\omega n) \quad (4)$$

De igual manera que en la detección de cruce por cero, se diseñó un algoritmo que permitiera aplicar la Transformada-Z Chirp a la señal deseada. Se obtuvo la frecuencia a partir del análisis de su espectro.

3. Resultados

En este apartado se muestran las simulaciones correspondientes a la comparación de las 2 técnicas para la detección y medición de frecuencia. Al realizar las simulaciones de los algoritmos diseñados mediante la herramienta matemática Matlab ®.

En la gráfica de la figura 2 se puede observar que las señales sintéticas generadas a través del algoritmo cuentan con las restricciones específicas del sistema, como lo son el rango de frecuencias ultrasónicas (30-50 kHz) al que pertenecen, y una frecuencia de muestreo de 200 kSps.

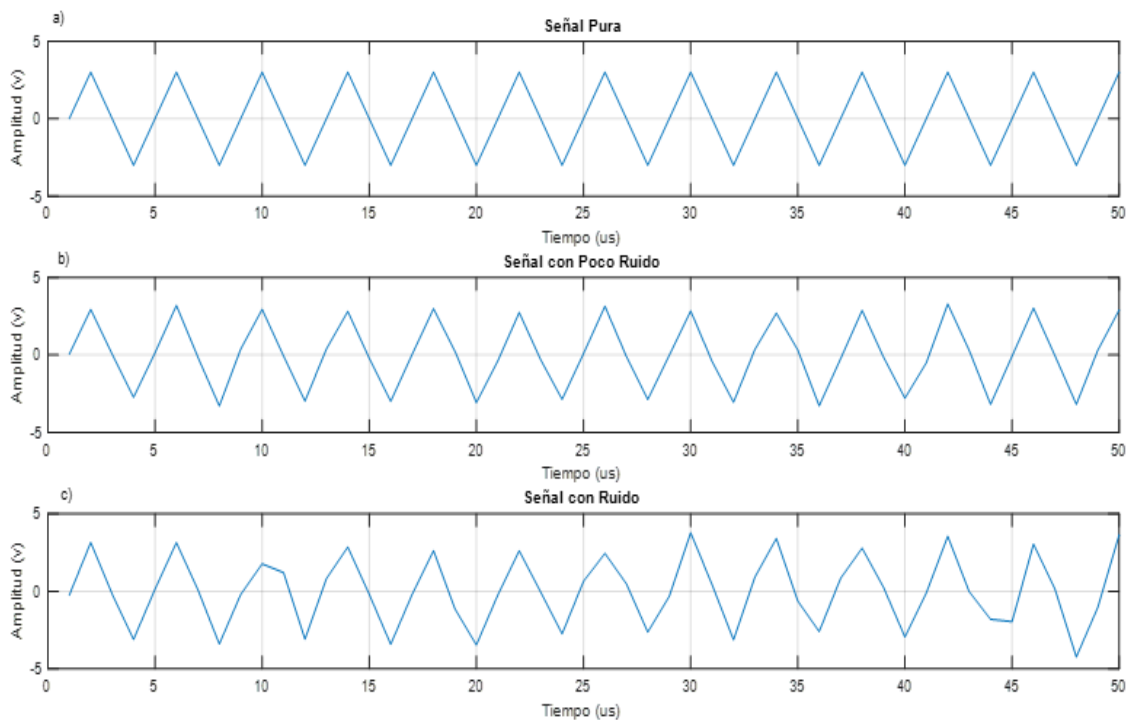


Figura 2 Generación de señales sintéticas (pura, poco ruido, con ruido) con una frecuencia en el rango ultrasónico.

De igual manera se observan 3 gráficas de las cuales la primera, es una señal pura, por el contrario, a las otras 2 señales, se les agregó ruido blanco Gaussiano con una relación señal-ruido por muestra de 10 y 20 dB, esto con la finalidad de simular las condiciones reales que estaría entregando un sensor ultrasónico. Una vez que se obtuvieron las señales sintéticas con las especificaciones requeridas, se procedió a aplicar los dos métodos descritos con anterioridad para una comparación entre ambos métodos.

El algoritmo para la detección de cruce por cero, es muy sencillo y entrega una buena estimación de la frecuencia. En el caso del algoritmo para detectar la frecuencia mediante Transformada-Z Chirp, se analiza el espectro para así poder obtener la frecuencia. En el caso de la Transformada-Z Chirp, el análisis se realizó a partir de su espectro, a continuación se muestran las gráficas.

La figura 3 presenta el espectro de la señal a la cual se le agregó ruido, es evidente como se empieza a notar la presencia de ese ruido en su espectro.

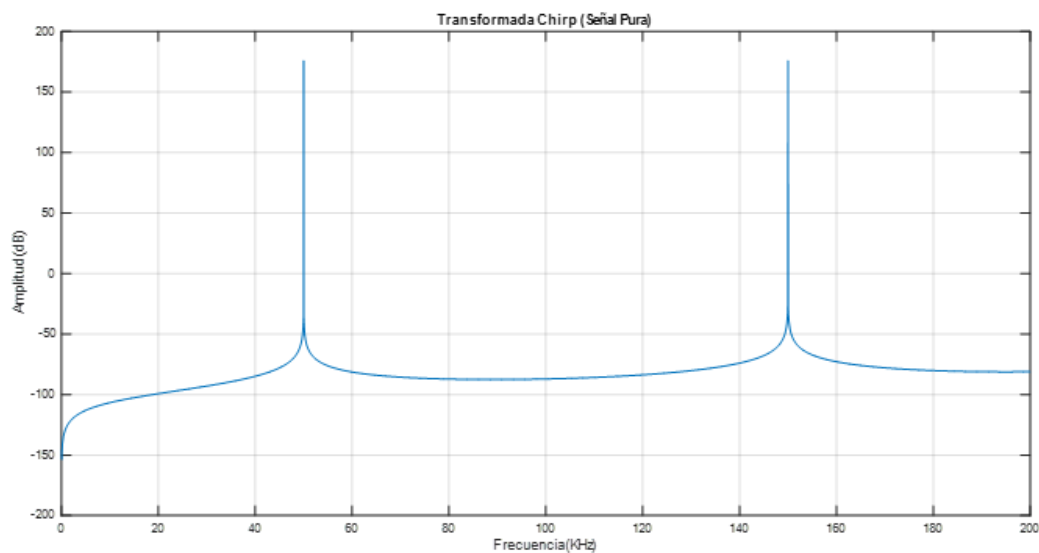


Figura 3 Espectro de la Transformada Z Chirp (Señal Pura).

En la figura 4 y en la figura 5, que son las señales a las que se les agregó ruido, se observa claramente que el ruido está presente en ambas señales, para la señal de la figura 4 se le inyectaron 20dB, en el caso de la figura 5, el ruido inyectado fue de 10dB.

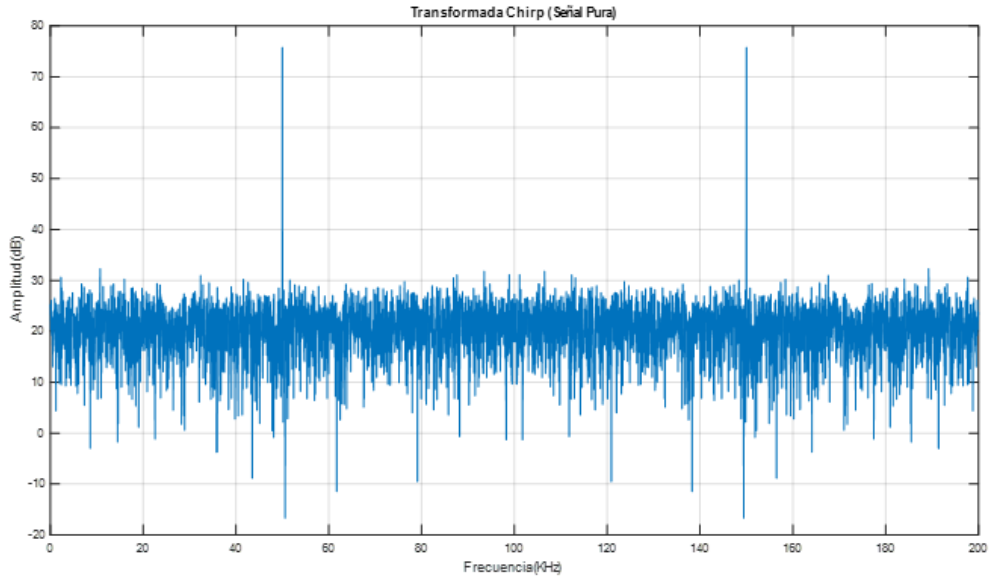


Figura 4 Espectro de la Transformada-Z Chirp (Señal con Poco Ruido).

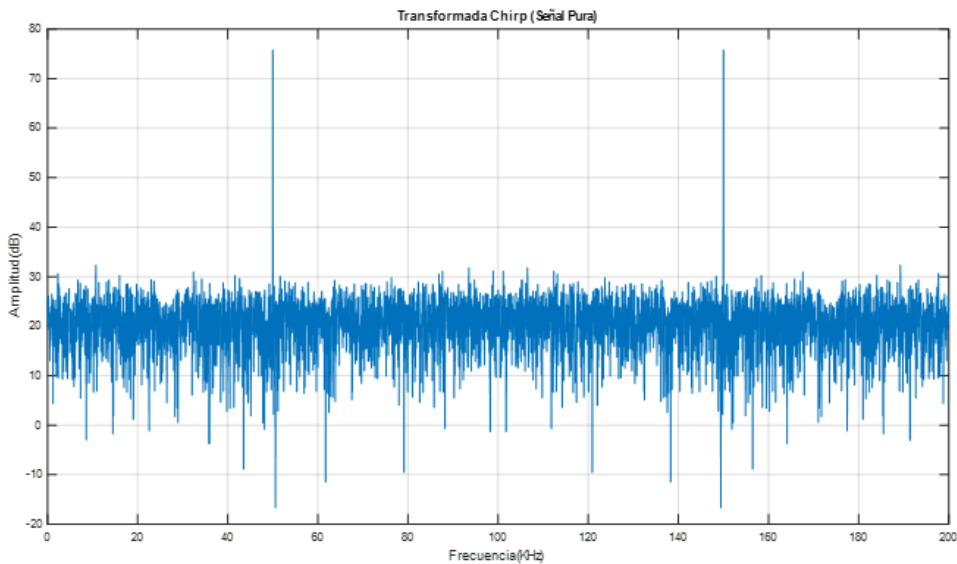


Figura 5 Espectro de la Transformada-Z Chirp (Señal con Ruido).

La figura 5 presenta el espectro de la señal que contiene la mayor cantidad de ruido. Se puede observar que la señal de ruido no afecta la medición del punto máximo.

Para realizar la comparación entre ambos métodos, se obtuvo el error entre la frecuencia de la señal de referencia y la frecuencia que entrega el algoritmo de detección mostrado al aplicar las dos técnicas: la Transformada-Z Chirp y la

detección de cruce por cero para los 3 tipos de señales generadas de manera sintética realizando un barrido de frecuencia desde los 30 hasta los 50 kHz.

En la figura 6 se muestra la comparativa de los errores presentados por ambas técnicas para cada una de las señales sintéticas generadas. En tablas 1 y 2 se muestran algunos parámetros obtenidos de las gráficas de error.

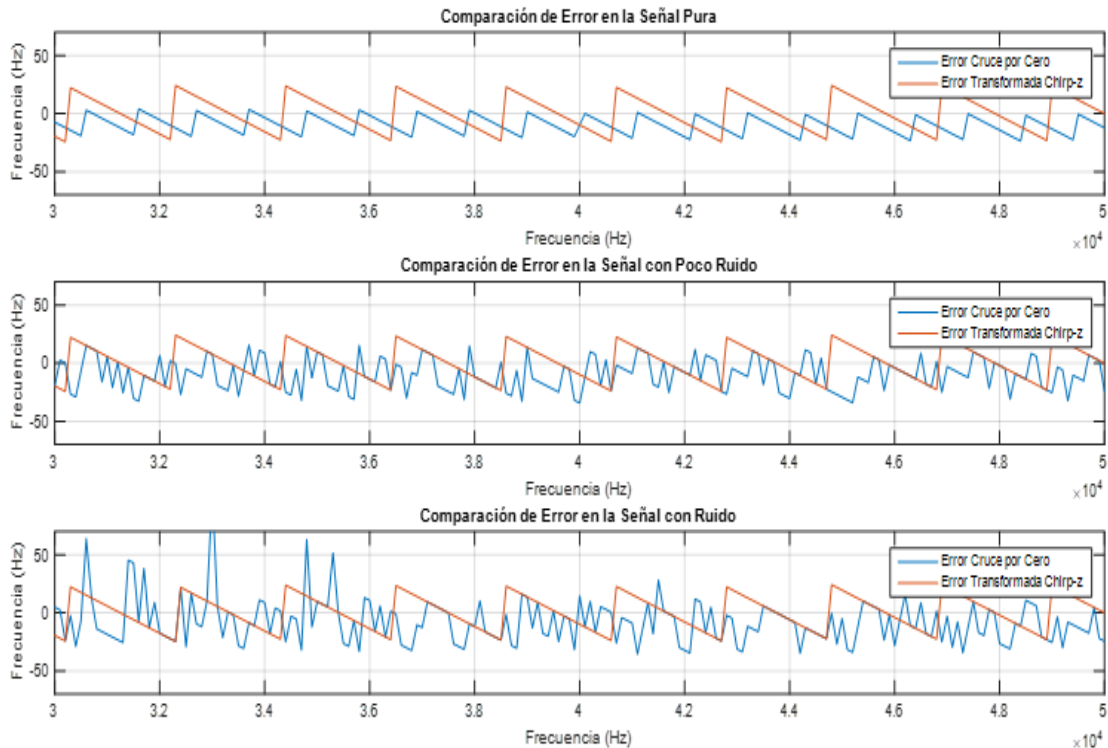


Figura 6 Comparativa de error de las técnicas de cruce por cero y Transformada-Z Chirp para las 3 señales sintéticas generadas.

Tabla 1 Parámetros obtenidos de las gráficas de error para el cruce por cero.

Error Señal Sintética				
Señal Sintética	Cruce por cero			
	Error cuadrático medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Pura	146.5892792	7.123553213	-4.00390625	23.53515625
Poco Ruido	484.8575592	20.28231855	-97.4609375	36.71875
Ruido	334.6538544	16.85483291	-83.7890625	37.6953125

Tabla 2 Parámetros obtenidos de las gráficas de error para la Transformada-Z Chirp.

Error Señal Sintética				
Señal Sintética	Transformada-Z Chirp			
	Error cuadrático medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Pura	202.6176453	14.22763111	-24.21875	24.21875
Poco Ruido	202.6176453	14.22763111	-24.21875	24.21875
Ruido	202.7130127	14.23639897	-24.21875	24.609375

4. Discusión

Al analizar las gráficas de las señales sintéticas mostradas en las figura 3, 4 y 5, es interesante observar que para identificar la frecuencia de la señal se parte del pico ignorando las demás señales mostradas, en otras palabras, al analizar mediante su espectro, el ruido es despreciado. Posteriormente, se obtuvieron los errores de cada una de las señales y se compararon ambos métodos. Para una mejor visualización, esos datos se muestran en las gráficas. Al comparar las gráficas de las figuras 6 se observa que en el caso de la figura 6a, que es la señal pura, el error mostrado por la técnica Transformada-Z Chirp, es mayor que el de detección de cruce por cero. De primera instancia se pudiera pensar que el método de detección de cruce por cero presenta un menor error. Por ello se decidió generar las señales con ruido y comprobar si el comportamiento seguía siendo el mismo. Pero al analizar las figuras 6b y 6c ambas con ruido (en diferentes porcentajes), se muestra que el error mostrado por la Transformada-Z Chirp se mantiene constante sin mostrar grandes cambios. En cambio el error mostrado por el cruce por cero es mucho mayor, inclusive muestra varios picos. Esto debido a lo que se mencionó anteriormente, al analizar el espectro, únicamente se toma el pico máximo e ignora las demás componentes. Por ello, pensando en la aplicación práctica, las señales reales entregadas por el sensor difícilmente serían señales puras. Con los datos obtenidos a partir de las gráficas, se analizaron algunos parámetros de error, los cuales son mostrados en la tabla 1 y tabla 2, se puede observar que el error cuadrático medio se mantiene en la Transformada-Z Chirp para los 3 tipos de señal por el contrario, los valores de

cruce por cero, se nota como se va deteriorando la señal al agregarle ruido. La desviación estándar, indica la variación que hay en la estimación de la frecuencia con la señal con o sin ruido, al tener ruido se va a ir alejando de la frecuencia estimada. Es importante la diferencia entre el valor mínimo y el máximo, ya que indica si existen picos en la señal, en el caso de la detección mediante cruce por cero, la diferencia es muy amplia y varía bastante, en el caso de la Transformada-Z Chirp la diferencia es prácticamente la misma en los 3 tipos de señales lo que indica que no existen tantos picos en la señal, lo cual es deseable debido a se puede tomar valores erróneos en la medición. Al comparar de cruce por cero y Transformada-Z Chirp para medición de frecuencia se puede concluir que cuando las señales son puras, la técnica de Transformada-Z Chirp no funciona de la manera esperada ya que existe una mayor cantidad de variación que con el cruce por cero. Ahora en señales que contienen ruido, el cruce por cero presenta la desventaja de que al incrementar el ruido, el error se va haciendo más, lo que significa que se tienen picos en la señal que pueden afectar su posterior procesamiento. Precisamente la ventaja de la Transformada-Z Chirp es que no importa el nivel de ruido que tenga la señal, el error se mantiene igual, no va creciendo, lo que se traduce en que no presenta picos ni variaciones indeseables. Para la aplicación propuesta de medición de velocidad por ultrasonido mediante efecto Doppler es necesario tener esa característica, ya que no se sabe que cantidad de ruido tenga la señal entregada por el sensor ultrasónico. Por ello lo ideal es utilizar una técnica que no tenga variaciones drásticas a pesar de tener ruido.

5. Conclusiones

Este trabajo presenta el desarrollo de un método de detección de frecuencias en el rango ultrasónico de alta resolución que servirá como base, para la futura aplicación de medición de velocidad por ultrasonido mediante el efecto Doppler en tiempo real para actuadores lineales. Por lo tanto la técnica más conveniente para la aplicación propuesta en el trabajo posterior, debido a la inmunidad que tiene al ruido es la Transformada-Z Chirp. Una vez que el método de detección se tenga

perfeccionado, se tiene pensado implementarlo en un dispositivo FPGA debido a que los cálculos y la velocidad necesaria para realizar la adquisición y el procesamiento solo lo puede hacer un dispositivo de alta gama.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la beca CONACyT 742849 y el proyecto FIN201613 de la Universidad Autónoma de Querétaro.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Albertí, E. B., *Procesado digital de señales-II: Fundamentos para comunicaciones y control* Vol. 170, Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, 2006.
- [2] Dávila, F., Barros, L. A., Reynolds, J., Lewis, A. J., & Mogollón, I. R., El ultrasonido: desde el murciélago hasta la cardiología no invasiva. *Revista Colombiana de Cardiología*, 2016.
- [3] Friedman, V., A zero crossing algorithm for the estimation of the frequency of a single sinusoid in white noise. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42(6), pp. 1565-1569, 1994.
- [4] Jeon, S., & Tomizuka, M., Benefits of acceleration measurement in velocity estimation and motion control. *Control Engineering Practice*, 15(3), pp. 325-332, 2007.
- [5] Mowla, A., Nikolić, M., Lim, Y. L., Bertling, K., Rakić, A. D., & Taimre, T., Effect of the optical numerical aperture on the Doppler spectrum in laser Doppler velocimetry. In *Optoelectronic and Microelectronic Materials & Devices (COMMAD)*, pp. 72-74, December, 2014
- [6] Phadke, A. G., Thorp, J. S., & Adamiak, M. G., A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, pp. 1025-1038, 1983.
- [7] Proakis, J. G., & Manolakis, D. G., *Digital signal processing: principles, algorithms, and applications*, 1996.

- [8] Pye, J. D., & Langbauer Jr, W. R., Ultrasound and infrasound. In *Animal acoustic communication* Springer Berlin Heidelberg, pp. 221-250, 1998.
- [9] Qi, G. Q., & Jia, X. L., Accuracy analysis of frequency estimation of sinusoid based on interpolated FFT. *Acta Electronica Sinica*, 32(4), pp. 625-629, 2004.
- [10] Rabiner, L. R., Schafer, R. W., & Rader, C. M., The Chirp z-Transform Algorithm and Its Application. *Bell Labs Technical Journal*, 48(5), pp. 1249-1292, 1969.
- [11] Shim, H., Kochem, M., & Tomizuka, M., Use of accelerometer for precision motion control of linear motor driven positioning system. In *Industrial Electronics Society, 1998. IECON'98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, Vol. 4*, pp. 2409-2414, 1998.
- [12] Tomizuka, M., State/Parameter/Disturbance Estimation with Accelerometer in Precision Motion Control of Linear Motor. In *Proceedings 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress, IMECE2001/DSC-24578*, 2001.
- [13] Venkataramanan, R., & Prabhu, K. M. M. Estimation of frequency offset using warped discrete-Fourier transform. *Signal Processing*, 86(2), pp. 250-256, 2006.
- [14] Xue, S. Y., & Yang, S. X., Power system frequency estimation using supervised Gauss–Newton algorithm. *Measurement*, 42(1), pp. 28-37, 2009.
- [15] Yock, P. G., & Popp, R. L., Noninvasive estimation of right ventricular systolic pressure by Doppler ultrasound in patients with tricuspid regurgitation. *Circulation*, 70(4), pp. 657-662, 1984.
- [16] Yulan, C., & Cunyang, F., A new method of frequency measurement of power system. In *Industrial Electronics and Applications, 2007. ICIEA 2007. 2nd IEEE Conference on*, pp. 2522-2525, May 2007.