

DESARROLLO DE UN GIROSCOPIO DIGITAL INALÁMBRICO CON UN SENSOR TMR Y UN CIRCUITO DE INTERFAZ DIRECTA

*DEVELOPMENT OF A WIRELESS DIGITAL GYROSCOPE WITH A
TMR SENSOR AND DIRECT INTERFACE CIRCUIT*

Ernesto Sifuentes de la Hoya

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
esifuent@uacj.mx

Francisco Javier Enríquez Aguilera

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
fenrique@uacj.mx

Juan de Dios Cota Ruiz

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
jcota@uacj.mx

Abel Eduardo Quezada Carreón

Universidad autónoma de Ciudad Juárez, México
abquezad@uacj.mx

Jesús Martín Silva Aceves

Universidad autónoma de Ciudad Juárez, México
jesilva@uacj.mx

Recepción: 28/noviembre/2022

Aceptación: 13/marzo/2023

Resumen

La medición de la posición angular con precisión y exactitud es de gran importancia en sistemas portables, donde normalmente se utilizan sensores de aceleración y vibración. La conexión entre el sensor y el microcontrolador (μC) normalmente se realiza con circuitos de acondicionamiento o procesamiento analógico de señal, más un convertidor analógico-digital (ADC) embebido en el μC . Este artículo presenta el desarrollo de un giroscopio digital inalámbrico, compacto, de bajo costo y consumo de energía que las soluciones actuales. El giroscopio se implementó con un sensor magnetorresistivo TMR conectado directamente a un μC . Con esta interfaz, los cambios de resistencia en el sensor magnetorresistivo ocasionados por el desplazamiento angular pueden medirse y digitalizarse

directamente con el μC , sin utilizar etapas de procesamiento analógico ni ADC. Los resultados experimentales demuestran que es posible detectar cambios en el sensor TMR que producen variaciones de ángulo en el giroscopio menor a un grado.

Palabras Clave: Giroscopio, interfaz-directa, TMR, microcontrolador.

Abstract

Measuring angular position with precision and accuracy is of great importance in portable measurement systems where acceleration and vibration sensors are usually used. The connection between the sensor and the microcontroller (μC) is normally made with analog signal conditioning or processing circuits, plus an analog-to-digital converter (ADC) embedded in the μC . This paper presents the development of a wireless, compact, low-cost, low-power digital gyroscope than existing solutions. The gyroscope was implemented with a TMR magnetoresistive sensor connected directly to a μC . With this interface, resistance changes in the magnetoresistive sensor caused by angular displacement can be measured and digitized directly with the μC , without using analog processing stages or ADC. The experimental results show that it is possible to detect changes in the TMR sensor that produce angle variations in the gyroscope of less than one degree.

Keywords: Gyroscope, direct-interface, TMR, microcontroller.

1. Introducción

El giroscopio es un dispositivo que puede rotar en cualquier dirección sobre su propio eje. Su funcionamiento está basado en la conservación del momento angular [EcuRed, 2021]. Éste, comúnmente detecta la velocidad angular alrededor de un eje de sensibilidad con respecto a un sistema de referencia inercial, permitiendo así conocer cómo varía el ángulo en el tiempo [Secer, 2016]. Antiguamente los giroscopios tenían aplicaciones limitadas por su peso y carácter mecánico, siendo esencialmente utilizados para aplicaciones militares. Actualmente se utiliza la tecnología MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems por sus siglas en inglés) o micro-electromecánica con lo cual el tamaño y peso de los dispositivos dejaron de ser un problema convirtiéndose en sistemas versátiles.

Existen diferentes métodos en la construcción de giroscopios. Algunos de ellos tienen más de un sensor o utilizan en su sistema giroscopios o acelerómetros programables previamente diseñados. Los proyectos revisados y referenciados, en su mayoría utilizan técnicas de acondicionamiento de interfaz clásica (sensor, etapa de acondicionamiento mediante amplificadores en diferentes configuraciones, convertidor análogo-digital y microcontrolador), en donde la información de interés se encuentra en amplitud de voltaje o corriente. A continuación, se sintetizan los más relevantes a nuestro parecer. En [Da-wei, 2011] se presenta un inclinómetro de dos ejes con un acelerómetro tipo MEMS, el inclinómetro está compuesto por un acelerómetro y un microcontrolador, la señal es procesada y adquirida por el microcontrolador para la obtención del ángulo desconocido y finalmente se envía a una pantalla LCD. El acelerómetro es de bajo costo y doble eje, además cuenta con una resolución de $\pm 2^\circ$.

En [Das, 2013] se realiza la medición de ángulos utilizando un giroscopio. El elemento clave es el ADXRS450 de tecnología MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems), basado en el principio de vibración, tiene interfaz SPI (*Serial Peripheral Interface*), de la cual se extrae la velocidad angular por medio de un microcontrolador PIC que se utiliza para leer los datos provenientes del sensor y enviarlos al software LabVIEW mediante RS-232. Por otra parte [Piyabongkarn, 2005] basa su funcionamiento en un sistema vibrador que reacciona a la aceleración de Coriolis cuando el giroscopio es sometido a una rotación angular. De esta manera, midiendo esta reacción se puede estimar la rotación del giroscopio. El diseño propuesto se basa en el principio de medición de ángulo mediante la vibración libre de una masa suspendida con respecto a la carcasa del giroscopio, si a la masa se le otorga una condición inicial de manera que vibre en una dirección conocida, el ángulo del giroscopio en el marco global se puede determinar mediante el seguimiento del ángulo de la dirección de la vibración en el marco local. El trabajo realizado en [Geen, 2003] presenta los giroscopios ADXRS150 y ADXR300 que son dispositivos analógicos con rangos de escala completa de 150 y 300° respectivamente. Estos dispositivos están disponibles comercialmente, miden la rotación angular mediante la aceleración de Coriolis. El prototipo de inclinómetro

digital es capaz de medir simultáneamente ángulos de unión en los tres planos anatómicos, es decir, sagital, coronal y transversal. El dispositivo es un sistema integrado que puede ser utilizado por terapeutas y médicos para medir ángulos articulares de una manera más fácil en comparación con el uso del goniómetro de plástico clásico o un simple transportador. Su operación se basa en sensores de tipo (MEMS) y consta de un sensor LSM303DLHC, que contiene un acelerómetro digital de tres ejes y un magnetómetro digital, el acelerómetro mide los ángulos en una vertical mientras que el magnetómetro realiza la medida en un plano horizontal, el tiempo de respuesta del sensor es alrededor de 1ms lo cual es más que suficiente para la aplicación deseada, y tiene, una resolución de 180°. [Zabat, 2015] implementa un giroscopio compuesto de una unidad principal conectada al sensor por un cable telefónico de cuatro hilos, una batería de litio a 3.3 V. El sistema se adjunta a la articulación y mide un rango de movimientos el cual debe ser evaluado por medio de sensores. Las medidas se utilizan directamente para calcular los ángulos deseados, los resultados se pueden mostrar en la pantalla del Inclinómetro o ser transmitido a la computadora personal (PC, *personal computer*), donde una interfaz de gestión de usuario (GUI, *Graphical User Interface*) puede proporcionar la gráfica de los ángulos medidos en tiempo real, así como una animación 3D correspondiente al movimiento realizado por el sujeto. Los autores argumentan que el prototipo es un Inclinómetro digital de bajo costo, desarrollado para medir el rango de movimiento simultáneamente en los planos vertical y horizontal. Por otra parte, en [Hua-wei, 2005] se diseñó e implementó un inclinómetro digital portátil (autónomo) alimentado con una batería de 9 V, basado en el principio de detección de fuerza, que además de medir nivel, también puede medir el ángulo de una superficie con grado de inclinación de 0 a 360°, esta aplicación tiene una resolución de 0.1°, basándose en el hecho de que cada objeto es atraído a la tierra por la gravedad y que la presión en una masa dada en una pendiente es proporcional al ángulo de la pendiente, el sensor de fuerza puede ser utilizado para calcular el ángulo de la pendiente. El sensor de inclinación está constituido por dos sensores situados perpendicularmente. En [Anoop, 2013] se presenta un esquema de acondicionamiento de señal eficiente que ayuda a obtener una salida lineal con un

sensor magnetorresistivos (MR) para medir ángulo de 0-360°, la mayoría de los sensores MR existentes tienen una relación seno/coseno entre la salida y el ángulo de detección, pero una característica lineal es muy útil. El acondicionamiento de señal de este sistema procesa las señales de salida de un sensor de tipo magnetorresistivo con salida sinusoidal, para entregar una señal directamente proporcional al ángulo.

El prototipo de esta propuesta fue construido y probado usando señales de salida del sensor simuladas en el software SPICE, fue basado en una unidad de control (MCU) y un Convertidor Análogo Digital (ADC del inglés *Analog to Digital Converter*), la salida del prototipo propuesto es lineal de 0-360°, el peor caso de error se presentó debajo del 0.08%.

Finalmente, en [Angular, 2013] se tiene una patente de una medición angular absoluta utilizando dos sensores magnetorresistivos. Se maneja el diseño de un giroscopio realizado a base de dos sensores magnetorresistivos anisótropos (AMR), dicho diseño cuenta con una señal angular de salida.

El circuito tiene dos sensores tipo AMR con una configuración de puente completo, cada sensor tiene dos señales de salida que son adquiridas y comparadas entre sí, ya que están relacionadas con la incidencia del campo magnético. Las magnetorresistencias tienen una gama angular de aproximadamente 180°, después se genera una señal indicativa de la posición angular basada en la comparación de los campos magnéticos, esta señal de salida tiene una resolución final del movimiento angular aproximada de 360°.

En los sistemas de medición de ángulo descritos, la conexión entre el sensor y el μ C normalmente se realiza con circuitos de acondicionamiento o procesamiento analógico de señal, más un ADC embebido en el μ C. Este artículo presenta el desarrollo de un giroscopio digital inalámbrico, compacto, de bajo costo y bajo consumo de energía que las soluciones actuales. Se implementó con un sensor magnetorresistivo TMR conectado directamente a un μ C de propósito general. Con esta interfaz, los cambios de resistencia en el sensor magnetorresistivo ocasionados por el desplazamiento angular pueden medirse y digitalizarse directamente con el μ C, sin utilizar etapas de procesamiento analógico ni ADC.

2. Métodos

La figura 1 muestra un diagrama de bloques del giroscopio digital inalámbrico prototipo implementado. El prototipo se implementó con un sensor magnetorresistivo TMR y técnicas de interfaz directa para el acondicionamiento de señal. La fase de comunicación inalámbrica se realizó con dos módulos XBee-S1 y la unidad de gestión se implementó en LabVIEW.



Figura 1 Diagrama de bloques del giroscopio digital inalámbrico.

Caracterización del sensor (MG) AAT003-10E

Para conocer la relación resistencia versus ángulo, se midió cada una de las resistencias del sensor, R_1 , R_2 , R_3 y R_4 , en intervalos de 1° desde 0 hasta 360° y los valores se graficaron utilizando Excel. En la figura 2 se muestra la configuración interna del sensor AAT003-10E.

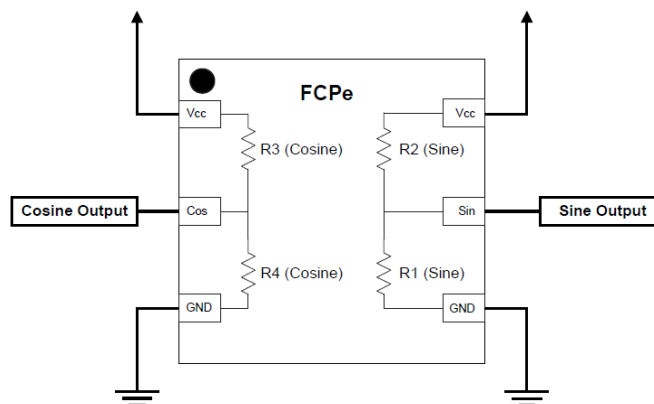


Figura 2 Configuración interna del sensor AAT003-10E [NVE, 2021].

Se utilizó un imán de excitación encima del sensor, separado a una distancia de 5 mm por una capa de acrílico y se realizaron mediciones correspondientes, cada medida se obtuvo a través de un promedio de 10 muestras. Las mediciones se

realizaron con un multímetro KEYSIGHT modelo 34461A de forma remota a través del puerto USB con un programa en LabVIEW. El código de LabVIEW se muestra en la figura 3 y el panel frontal en la figura 4.

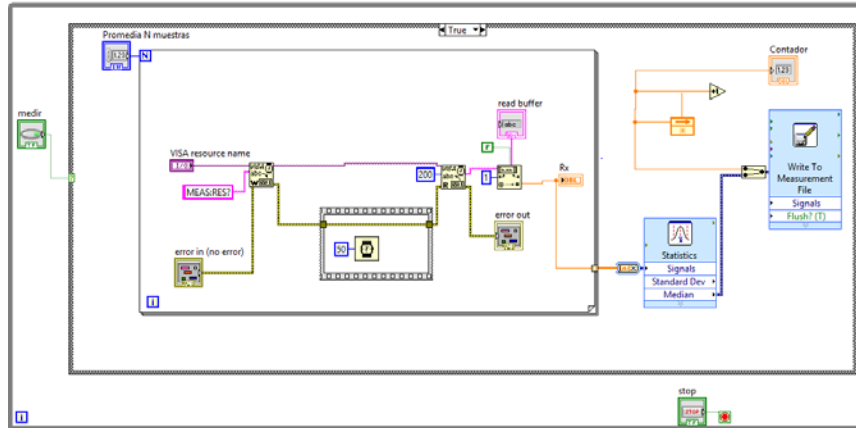


Figura 3 Diagrama de bloques del VI para leer resistencia.

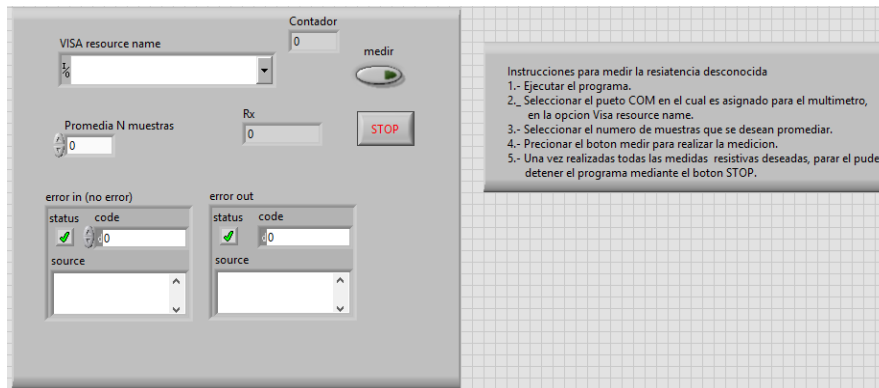


Figura 4 Panel frontal para lectura de resistencia.

El panel frontal muestra los resultados en R_x , tiene con un contador de muestras llamado promedio N-muestras, en el cual se indica el número de muestras resistivas a promediar, también tiene un controlador para seleccionar el puerto COM del multímetro.

Interfaz directa con calibración a dos puntos

En este proyecto se implementó el circuito de interfaz directa, sensor resistivo- μC que realiza la técnica de auto-calibración de tres señales [Reverter, 2008]. La

figura 5a muestra el modelo simple y en la figura 5b el utilizado para la implementación con cuatro resistencias variables, R_{C2} es la resistencia de calibración cuyo valor debe ser del punto de calibración máximo, y un cortocircuito que es el punto de calibración mínimo. R_0 limita la corriente que pueden drenar los pines del μC .

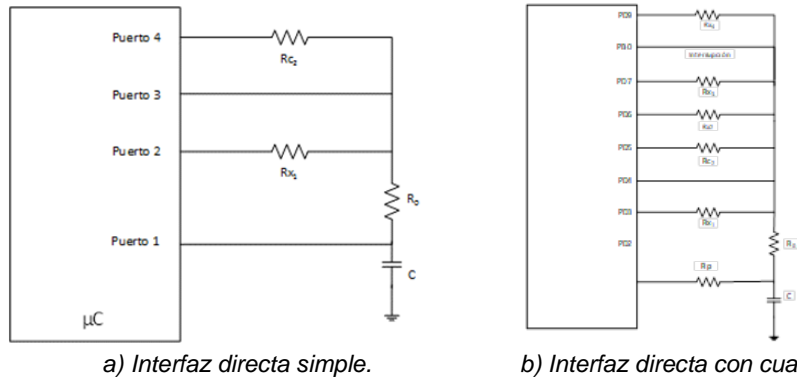


Figura 5 Modelos de interfaz directa.

La resistencia del sensor R_x se calcula mediante el procedimiento descrito en [Reverter, 2012] y [Reverter, 2008]. La interfaz desarrollada mide las cuatro resistencias del sensor AAT003-10E. La tabla 1 presenta los valores de componentes utilizados.

Tabla 1 Valores de componentes utilizados.

Valor Ideal	Valor medido
$R_p = 100 \Omega$	$R_p = 100.56 \Omega$
$R_0 = 220 \Omega$	$R_0 = 219 \Omega$
$C = 64 \text{ nf}$	$C = 64.62 \text{ nf}$

El diagrama de flujo de la figura 6 representa la metodología para obtener el ángulo. Describe paso a paso la estructura del programa implementado en el μC y las operaciones para calcular el ángulo.

Interfaz de comunicación Inalámbrica

La interfaz de comunicación inalámbrica se implementó con dos módulos XBee S1, configurados para una comunicación punto a punto. Ambos como

transmisor/receptor. Cada módulo se configuró con comandos AT y el software X-CTU, los comandos se muestran en la tabla 2.

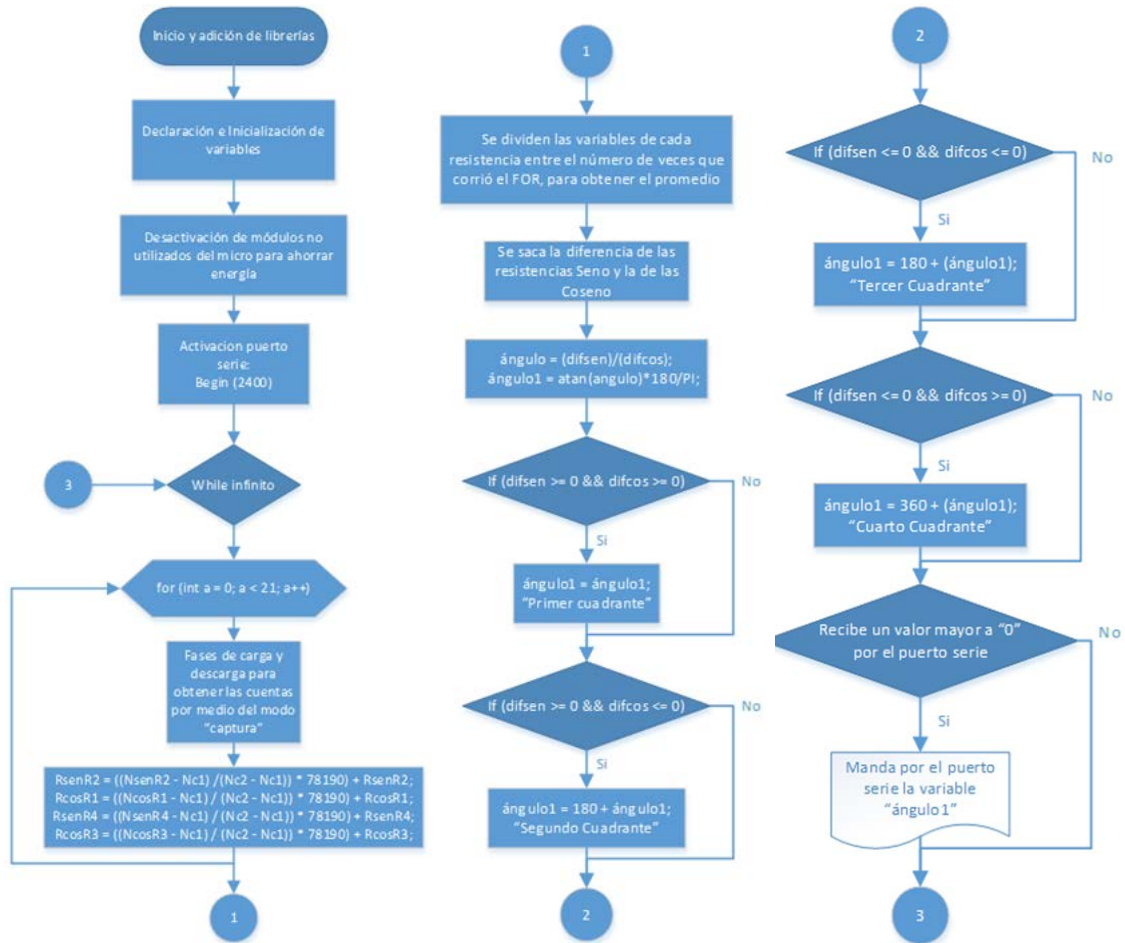


Figura 6 Diagrama de flujo implementado para obtener el ángulo.

Tabla 2 Comandos de configuración XBee.

Función	Comando
Dirección de origen	ATDL
Dirección de destino	ATMY
Identificador de red	ATID
Canal	ATCH
Velocidad de transmisión	ATBD
Escribir comandos en el módulo	ATWR
Salir de modo Comandos	ATCN

En la figura 7 se puede apreciar la configuración de cada módulo. Para que se efectúe la comunicación entre los módulos es necesario que las direcciones DL y MY sean recíprocas, con esto se refiere a que la dirección DY de un módulo debe

corresponder a la dirección MY del otro módulo y viceversa, también deben tener el mismo identificador de red y el mismo canal.

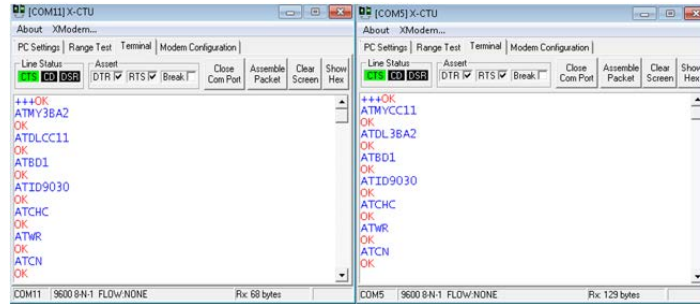


Figura 7 Configuración para una red punto a punto.

Interfaz de usuario

La figura 8 ilustra el esquema del giroscopio desarrollado. La interfaz de usuario se realizó en LabVIEW, el programa se implementó en dos partes: el diagrama a bloques y el panel frontal. Diagrama a bloques: recibe un dato tipo “String” por medio del puerto serie, el cual se convierte en numérico, se implementa también un ciclo “For Loop” para promediar muestras y con esos datos por medio de la función “Statistics” se obtiene: la media, la desviación estándar, la resolución y la incertidumbre. Como se aprecia en la figura 9, el sistema de interfaz despliega el ángulo y también solicita el número de muestras que se desea promediar.

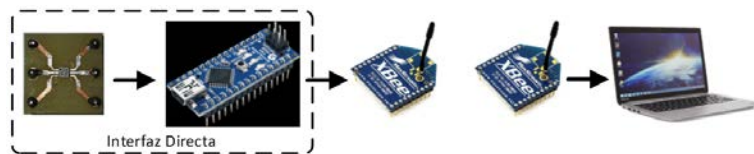


Figura 8 Estructura general del giroscopio digital inalámbrico.



Figura 9 Indicador del ángulo en el panel frontal de LabVIEW.

3. Resultados

La figura 10 ilustra la medición de una resistencia del sensor a cierta posición angular, el resultado puede observar en el multímetro y en el indicador del panel frontal de LabVIEW. En figura 11 se muestran las gráficas de los resultados obtenidos de R_1 , R_2 , R_3 y R_4 respectivamente, el eje Y corresponde al valor resistivo y el eje X corresponde a la posición angular en grados.

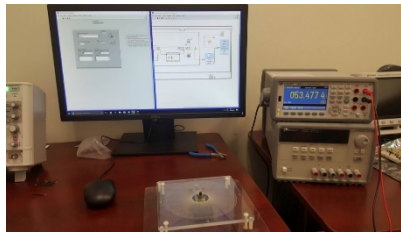


Figura 10 Conexión para medir una de las resistencias del sensor.

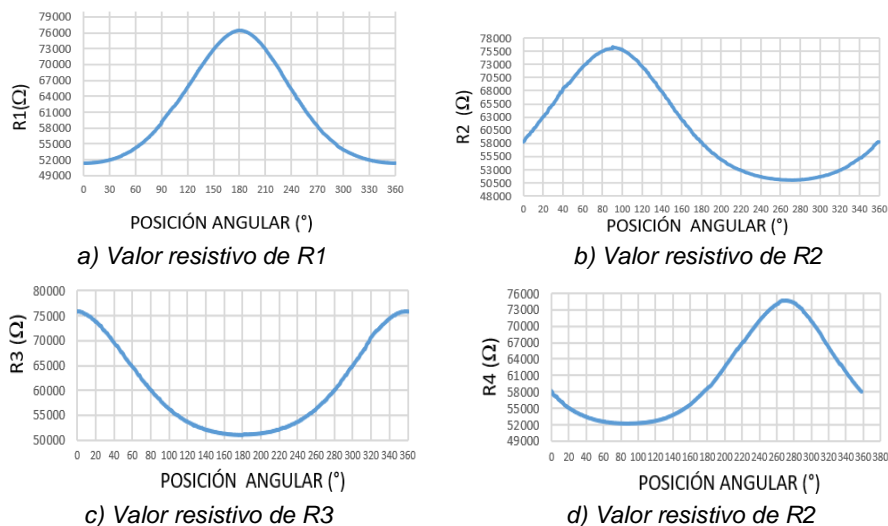


Figura 11 Valores resistivos conforme a la posición angular.

4. Discusión

Con los resultados se obtuvo la diferencia seno y coseno: ($R_1 - R_3 = \text{Diferencia coseno}$) y ($R_2 - R_4 = \text{Diferencia seno}$), con esto se corrige el offset y mediante funciones trigonométricas es posible calcular el ángulo de posición. La figura 12 muestra la gráfica de la diferencia coseno (naranja) y la diferencia seno (azul). En

la ecuación 1 se sustituyen los valores para calcular el ángulo de posición mediante la tangente inversa o cotangente.

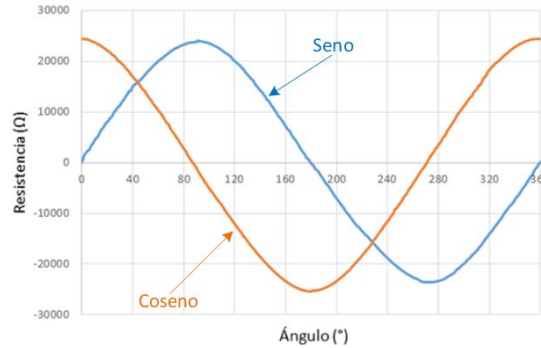


Figura 12 Gráfica de la respuesta seno y coseno.

La figura 13 muestra un ejemplo de cálculo realizado en Excel con los valores obtenidos, empleando la ecuación 1. Los datos fueron obtenidos con el programa desarrollado en LabVIEW y posteriormente analizados en Excel.

$$\cot \alpha = \left(\frac{R_2 - R_4}{R_1 - R_3} \right) \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

Posición	Resistencia R1	resistencia R2	ResistenciaR3	RESISTENCIA R4	R1-R3	R2-R4	Ángulo en grados
0	51370,8741	58194,83535	75918,78165	58140,05275	24547,9076	54,7826	0,127864526
1	51372,0167	58459,9685	75883,07405	57926,50445	24511,0574	533,46405	1,246801126
2	51375,9659	58877,9612	75878,2082	57508,85945	24502,2423	1369,10175	3,198167122
3	51379,6475	59092,5374	75849,9948	57348,9983	24470,3473	1743,5391	4,075499759
4	51385,8707	59298,30635	75801,48735	57200,23805	24415,6167	2098,0683	4,911441648
5	51393,558	59543,13745	75748,75865	57199,74625	24355,2007	2343,3912	5,495925824
6	51403,3369	59585,14455	75694,50425	57128,5546	24291,1674	2456,58995	5,774745632
7	51411,3396	59954,7977	75563,36215	56875,5165	24152,0226	3079,2812	7,265771102
8	51423,0751	60162,40085	75466,41345	56621,3053	24043,3384	3541,09555	8,378272871
9	51435,3861	60274,0278	75360,41505	56550,83025	23925,029	3723,19755	8,845383547
10	51452,0028	60635,5385	75286,6701	56369,66325	23834,6673	4265,87525	10,14723144
11	51465,2337	60897,40245	75184,22285	56232,14765	23718,9892	4665,2548	11,12738495
12	51481,512	60984,5277	75022,9169	56098,4365	23541,4049	4886,0912	11,72543691
13	51499,7268	61288,67225	74919,1067	56071,4036	23419,3799	5217,26865	12,55902354
14	51518,9836	61553,17035	74841,0923	55782,3403	23322,1087	5770,83005	13,89812871
15	51534,4576	61874,73475	74734,91005	55623,2309	23200,4525	6251,50385	15,08052636
16	51557,9249	62083,8459	74510,0464	55493,57615	22952,1215	6590,26975	16,02042294
17	51579,7311	62302,9562	74355,799	55398,8057	22776,0679	6904,1505	16,86372496
18	51607,2303	62559,121	74208,94085	55251,11235	22601,7106	7308,00865	17,91802976

Figura 13 Obtención del ángulo en Excel.

5. Conclusiones

El giroscopio digital inalámbrico propuesto en esta investigación omite las etapas de acondicionamiento analógico de señal y el ADC, lo que da como resultado un

sistema de medición compacto y eficiente en el consumo de energía. Se comprobó que con sensores magnetorresistivos TMR y la técnica de interfaz directa, sensor-microcontrolador, es posible medir cambios resistivos relacionados con la posición angular. El giroscopio presenta una resolución menor a 1° y puede ser utilizado en diferentes áreas de aplicación: en monitoreo de movilidad de alguna parte del cuerpo en rehabilitación para comprobar avances o retrocesos, en telescopios para establecer posiciones precisas, complementado con un motor a pasos y mover brazos robóticos, en los sistemas de navegación y en general en cualquier sistema donde se desee conocer la medición del movimiento angular en un eje.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Angular A., Sensor P., and U. T. W. O. Magnetoresistive, (19) United States (12), vol. 1, no. 19, 2013.
- [2] Anoop C. S. and George B., "New signal conditioning circuit for MR angle transducers with full-circle range," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 5, pp. 1308–1317, 2013.
- [3] Da-wei, Design of Dual-axis Inclinator Based on MEMS Accelerometer, pp. 959–961, 2011.
- [4] Das R., Mandsorwale A., Antony P. P., Harikumar Warriar R. G., and Manoj Kumar B., "Angular measurement using MEMS digital gyroscope with PIC and LabVIEW interface for space applications," *Proc. 2013 Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Informatics, ICACCI 2013*, pp. 1744–1747, 2013.
- [5] Geen J. and Krakauer D., New iMEMS® AngularRate-Sensing Gyroscope, *Analog Dialogue*, vol. 37, pp. 1–4, 2003.
- [6] Giroscopio - EcuRed. [Online]. Available: <https://www.ecured.cu/Giroscopio>.
- [7] Hua-wei L. H. L., Tao M. T. M., and Meng Q. H., Design and implementation of a digital inclinometer, *IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom.* 2005, vol. 1, no. July, pp. 489–492, 2005.
- [8] Piyabongkarn D., Rajamani R., and M. Greminger, The development of a MEMS gyroscope for absolute angle measurement, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 185–195, 2005.

- [9] NVE Corporation, AAT003 Low-Resistance TMR Angle Sensors, no. 952, pp. 1–14, accessed jun 2021.
- [10] Reverter F., The Art of Directly Interfacing Sensors to Microcontrollers, *J. Low Power Electron. Appl.*, vol. 2, no. 4, pp. 265–281, 2012.
- [11] Reverter F. y Pallàs Ramon, Circuitos de interfaz directa sensor-microcontrolador© versión en español de la obra, no. 2005, 2008.
- [12] Secer G. and Barshan B., Improvements in deterministic error modeling and calibration of inertial sensors and magnetometers, *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 247, pp. 522–538, 2016.
- [13] Zabat M., Ouadahi N., Youyou A., Ababou A., and Ababou N., Digital inclinometer for joint angles measurements with a real-time 3D-animation, *12th Int. Multi-Conference Syst. Signals Devices, SSD 2015*, pp. 1–6, 2015.