

Diseño de Sensor de Movimiento de 9 GDL para Robot Móvil con Ruedas

Cortés Ramírez U., Arroyo Díaz S, Antonio Benitez Ruiz

*Departamento de Posgrado Universidad Politécnica de Puebla, Tercer Carril del Ejido "Serrano" s/n
San Mateo Cuanalá. Juan C. Bonilla, Puebla C.P. 72640 México
México (e-mail: ulises@cortes.mitmx.net).*

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sensor de movimiento de 9 grados de libertad, el cual será empleado para la elaboración de una ley de control de movimiento de un robot móvil con ruedas de tracción diferencial. Con este sensor se tendrá conocimiento de su orientación en un determinado instante de tiempo, su desplazamiento y la ubicación del norte de la tierra. Este sensor de movimiento está basado en la integración de un giroscopio y un acelerómetro, ambos de tres ejes, además de la implementación de un compás magnético de 3 ejes. Lo que lo hace ideal para aplicaciones de Procesamiento Digital de Movimiento o Sistemas de Navegación Inercial en cualquier plataforma móvil.

ideal para conocer cuando el robot está subiendo una pendiente o está inclinado hacia alguno de sus costados.

La necesidad de implementar este sensor de movimiento de 9 grados de libertad es el de reducir el error odométrico acumulativo [2] en la ley de control de movimiento [3] en dicha plataforma móvil para asegurar que el movimiento sea estable y constante, por lo cual existe la necesidad de estimar la variable orientación no solo partiendo del conocimiento de la posición o velocidad de cada una de las ruedas [4]. Además de que con este sensor se podrá conocer la orientación del robot con respecto al eje magnético de la tierra.

El objetivo de este trabajo es diseñar e implementar un sensor de movimiento de 9 GDL para reducir el error odométrico en la variable orientación (φ) para un robot móvil con ruedas a partir del uso de sensores inerciales [5].

1 Nomenclaturas

φ = Orientación del Robot [grados].
 v = Velocidad del Robot [m/s].
 θ = Dirección del Robot [grados].
 w_d = Velocidad angular de la rueda derecha [rad/s].
 w_i = Velocidad angular de la rueda izquierda [rad/s].

Palabras clave: Navegación inercial, procesamiento digital de movimiento, sensor de movimiento.

2 Introducción

En robótica móvil al momento de hacer navegación surgen dos variables sumamente importantes, que son la orientación (φ) y posición (p) del robot [1], es decir, hacia donde está orientado el frente del robot y en qué punto está ubicado en un plano cartesiano. En cualquier plataforma móvil es necesario tener en cuenta la variable orientación (φ), ya sea en humanoides, aéreos, o en particular, un robot móvil con ruedas.

En el caso de un humanoide es necesario conocer su orientación en tres ejes, por ejemplo, para evitar que caiga, en el caso de los robots móviles con ruedas es

3 Implementación del Sistema

El sensor de movimiento de 9 GDL para robot móvil con ruedas que se diseñó e implemento consta de un giroscopio, acelerómetro y magnetobrójula que serán explicadas en detalle más adelante; además se cuenta con una plataforma móvil en la que estará implementado dicho sensor. Con el giroscopio se podrá sensar movimiento rotacional, lo que nos permitirá saber cuándo el robot este subiendo una pendiente, tenga una inclinación en alguno de sus costados, y la variable a priori, la orientación del robot, esta variables estará representada por una rotación en el eje Z.

3.1 Plataforma Móvil

La plataforma móvil para la que se diseñó el sensor de movimiento de 9 grados de libertad (GDL), corresponde a un robot móvil de ruedas del tipo diferencial [6], el cual es esquematizado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** La velocidad (v) y dirección (θ) del robot, dependerán directamente de la velocidad instantánea de cada una

de las ruedas, es decir, para que el robot pueda moverse en línea recta, la velocidad en ambas ruedas debe ser la misma.

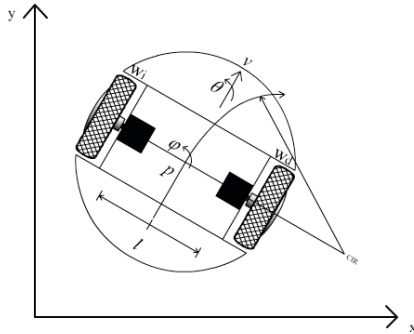


Figura 1. Esquema de la plataforma móvil.

El modelo cinemático correspondiente a la plataforma móvil del tipo diferencial esta expresado en las ecuaciones (1) y (2) [7] [8].

$$(1) \quad \begin{bmatrix} v \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{r}l & -\frac{r}{2}l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_d \\ w_i \end{bmatrix}$$

$$(2) \quad \begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \theta \\ \dot{y} &= v \sin \theta \\ \dot{\phi} &= \theta \end{aligned}$$

Si solo se toma en cuenta la velocidad de cada una de las ruedas, la velocidad (v) y dirección (θ) no serán exactas y el modelo no será correcto. Es por eso que se deben hacer consideraciones para que el modelo sea correcto y descriptivo del sistema, los factores a destacar son: i) los coeficientes de deslizamiento en los materiales de cada rueda; ii) diámetros de rueda diferentes; iii) imperfecciones en la superficie donde se estará moviendo la plataforma móvil; iv) tomar en cuenta los ejes de referencia de cada uno de los sensores con respecto al plano cartesiano de la plataforma móvil, para conocer con certeza en que eje se estará moviendo la plataforma, este factor de relevancia [9] [10].

3.2 Acelerómetro ADXL345 de 3 ejes

El acelerómetro que se usó fue el ADXL345, es de 3 ejes fabricado por Analog Devices, presenta alta resolución (13 bits), con medidas de hasta ± 16 g. Su salida tiene un formato de 16 bits en complemento a dos y es accedido a través de protocolo IIC o SPI, con una resolución de 3.9 mg/LSB. También tiene medidas de inclinación menores a 1° y es resistente a impactos de 10000 g [11].

El rango de voltaje admitido por este sensor es de 2.0 a 3.6 V, tiene un consumo de 23 uA en operación y 0.1 uA en modo de espera, con un voltaje de alimentación de 2.5 V.

En la Figura 2 se muestra el esquemático on-chip del sensor ADXL345, como puede observarse esta implementado con sensores inerciales, un convertidor analógico a digital, un filtro digital, un módulo controlador de interrupciones, una memoria del tipo FIFO de 32 niveles y su interfaz serial (IIC y SPI).

Es esencial tomar en cuenta la orientación que tendrá el sensor con respecto al plano cartesiano de la plataforma móvil, Figura 3.

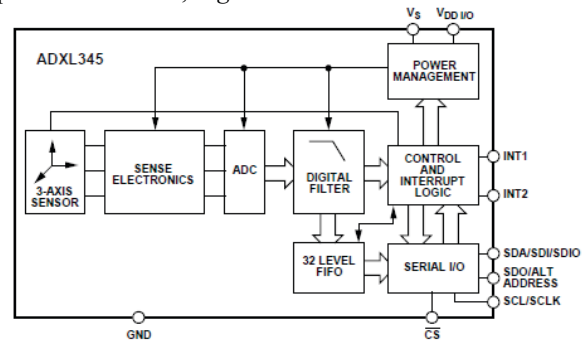


Figura 2. Esquemático del sensor ADXL345 [11].

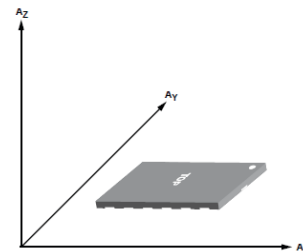


Figura 3. Orientación en el plano del sensor ADXL345.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa la orientación del sensor con respecto al eje gravitacional de la tierra.

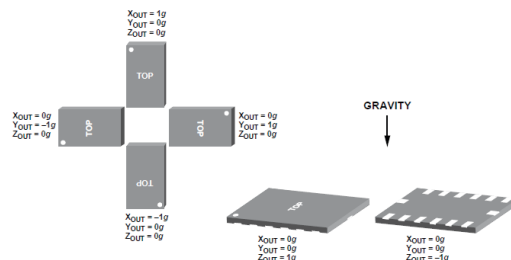


Figura 4. Orientación del sensor con respecto al eje gravitacional.

3.3 Giroscopio IMU-3000 de 3 ejes

Se utilizó un giroscopio IMU-3000, es un sensor inercial fabricado por Inven Sense que tiene embebido un giroscopio de 3 ejes y un procesador digital de movimiento (DMP de sus siglas en ingles), cuenta con un puerto de comunicación IIC, con la capacidad de detectar movimiento lineal y rotacional. Este dispositivo soporta impactos de hasta 10000 g [12]. Una característica a destacar del IMU-3000 es que, es un sensor de giro digital programable con rangos de ± 250 , ± 500 , ± 1000 , y ± 2000 grados por segundo (dps).

Las características on-chip como puede verse en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, son una memoria FIFO, que permite la posibilidad de conectar varios dispositivos: un sensor acelerómetro dedicado en un bus IIC-maestro (implementado externamente), convertidores analógico a digital de 16 bits de hasta 8000 muestras por segundo, filtros digitales programables, un reloj con una precisión del 1%, un voltaje de alimentación de 2.1 a 3.6 volts (Vdd) y un voltaje de interface de 1.71 a 3.6 Volts (Vlogic). Este sensor soporta impactos de hasta 10000g.

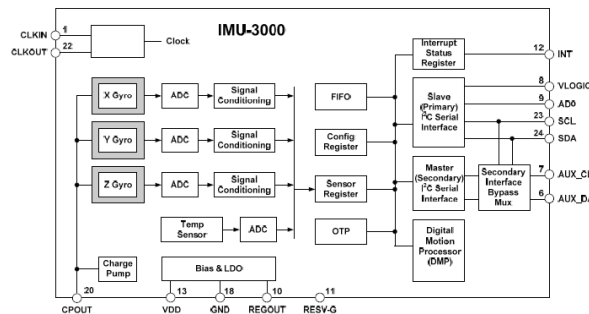


Figura 5. Esquemático del sensor de giro IMU-3000 [12].

Los pines 6 y 7 corresponden a las líneas AUX_DA y AUX_CL respectivamente, que forman parte del bus para conexión del acelerómetro, y el pin 22 corresponde a una salida de reloj de 1MHz para que ambos estén sincronizados, este bus es compatible con el sensor ADXL345.

Al igual que en el acelerómetro, en el giroscopio es necesario considerar el eje de referencia, en este caso del sensor de giro con respecto al plano cartesiano del robot, como se ilustra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Además de ello es de hacer notar que la orientación del robot está dada con respecto al punto central del eje de las ruedas, identificado como p en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

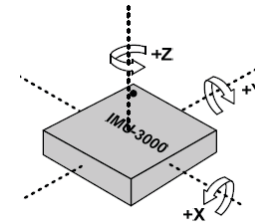


Figura 6. Orientación en el plano del IMU-3000.

En los ejes de referencia del sensor IMU-3000, la orientación del robot corresponde a una rotación en el eje Z, cuando el robot este subiendo o descendiendo de una pendiente tendremos una rotación en el eje X, y si llegara a tener una inclinación en alguno de sus costados, se interpretará como una rotación en el eje Y.

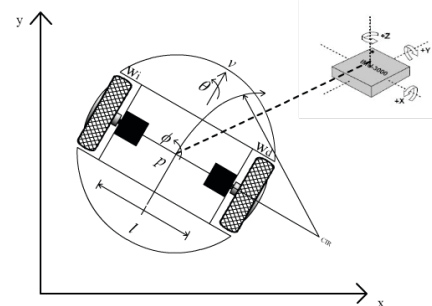


Figura 7. Orientación del sensor de giro IMU300.

3.4 Magneto brújula (Compas Digital) HMC5883L

La Magneto brújula o también llamado compas digital HMC5883L es un sensor inercial de 3 ejes fabricado por Honeywell, diseñado para sensar el campo magnético de la tierra y es accedido mediante un bus I²C, Figura 8.

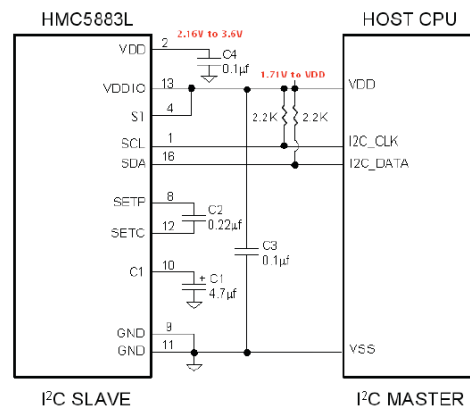


Figura 8. Esquemático del sensor HMC5883L [13].

El HMC5883L está construido en un encapsulado LCC de 16 pines de 3 mm de ancho por 3 mm de largo

y un grosor de 0.9mm de montaje superficial. Consta de un convertidor de 12 bits para una alta resolución del sensado del campo magnético de la tierra. Está diseñado para un voltaje de alimentación de 2.16 a 3.6 volts, con un consumo de 100uA y 2uA en modo inactivo, un rango de medida de ± 8 gauss con una resolución de 2 miligauss [13].

Para el compás magnético o magnetobrójula, es necesario al igual que los dos sensores previos, considerar su eje de referencia con respecto al de la plataforma móvil como se observó en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

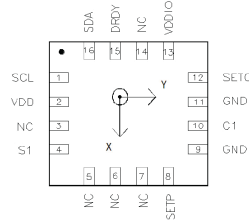


Figura 9. Ejes de referencia del sensor HMC5883L

4 Interface de Comunicación

Los tres sensores tienen implementado un bus de comunicación serial, el cual corresponde al protocolo I²C (de sus siglas en inglés de Inter-Integrated Circuit), o también denominado como bus TWI (de sus siglas en inglés de Two Wire Interface) interface de comunicación a dos hilos.

En la figura 10 puede verse el esquema general de conexión de los sensores al núcleo central de procesamiento, implementados en el bus I²C.

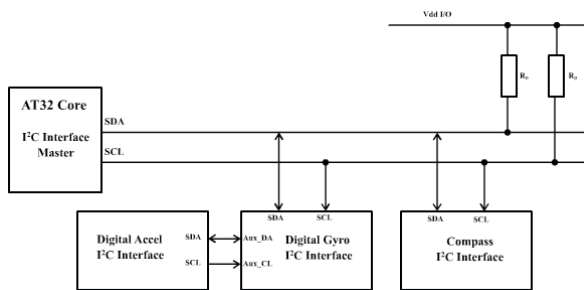


Figura 10. Conexión del protocolo I²C.

4.1 Comunicación I²C del Acelerómetro ADXL345

Cuando \overline{CS} (ver Figura 2), es conectado a VDDIO, el sensor está en modo I²C, el cual requiere de dos líneas de conexión, tal como se muestra en el esquema de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** La línea Alt Address corresponde al séptimo bit de la dirección, cuando es puesto a alto corresponde a 0x1D, y para una instrucción de escritura es 0x3A y

0x3B para lectura, de modo alterno cuando el pin Alt Address es conectado a tierra su dirección es 0x53 y para una instrucción de escritura 0xA6 y 0xA7 para lectura. Este bus puede funcionar con el estándar de 10KHz y el modo rápido de 400KHz [11].

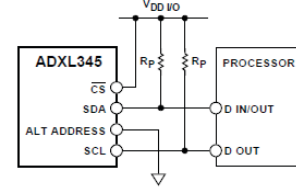


Figura 11. Conexión I²C del sensor ADXL345.

Como ya se mencionó con anterioridad, con el bit \overline{CS} del ADXL345 se puede seleccionar el modo de comunicación (Tabla 1), y con el pin Alt Address el direccionamiento para las instrucciones de lectura/escritura (Tabla 2).

\overline{CS}	Protocolo
0	SPI
1	I ² C

Tabla 1: Pin \overline{CS} .

Alt Address	Dirección	Escritura	Lectura
0	0x53	0xA6	0xA7
1	0x1D	0x3A	0x3B

Tabla 2: Pin Alt Address.

4.2 Comunicación I²C del Giroscopio IMU-3000

El pin ADO corresponde al primer bit de dirección del giroscopio IMU-3000, como se ve en la Tabla 3. Este pin es el bit menos significativo del byte de dirección del sensor, el cual corresponde al valor b110100X en binario, donde X es el valor del pin ADO [12].

ADO	Dirección
0	0x68
1	0x69

Tabla 3: Pin ADO.

El sensor IMU-3000 puede trabajar con el protocolo I²C a una velocidad de hasta 400KHz, en los pines SDA y SCL.

4.3 Comunicación del Compás Digital HMC5883L

El compás magnético HMC5883L tiene un ancho de 7 bits de dirección y 8 bits para sus instrucciones de lectura escritura, Tabla 4 [13].

Dirección	0x1E
Lectura	0x3D
Escritura	0x3C

Tabla 4: Dirección e instrucciones de lectura escritura.

Este sensor esta implementado con el protocolo de comunicación I²C y puede trabajar a una frecuencia de hasta 400KHz.

5 Resultados y Discusión

5.1 Integración de los sensores

El esquema completo del sensor de movimiento de 9 GDL se observa en la *Figura 12*. En el se puede ver la conexión de los sensores con la interfaz I²C; cabe denotar que el maestro es un microcontrolador, el cual dispone de un nucleo de 32 bits, encargado de capturar y procesar los datos recibidos de los sensores.

El sensor de giro tiene implementado un bus I²C auxiliar en el que es posible conectar el sensor acelerometro. La fusión de estos dos sensores permite sensar movimiento lineal y rotacional, de donde se tiene el sensado de seis grados de libertad de nuestro sensor de movimiento, los otros tres grados de libertad son obtenidos del compas magnetico, en donde se estará sensando el eje magnetico de la tierra en los tres ejes del plano cartesiano.

En la figura 13 se muestra una vista en 3D de la tarjeta electronica, en el centro de la tarjeta electronica esta situado el sensor de giro, el cual debe coincidir con el punto *p* de la plataforma móvil en la que se estará empleando el sensor de movimiento de 9 grados de libertad. En la implementación de la tarjeta se ha dispuesto un led indicador de encendido y un led para cada uno de los sensores, para indicar cual de ellos esta siendo accedido a través del Bus I²C.

6 Conclusiones

En este trabajo se diseñó e implementó un sensor de movimiento de 9 GDL, a utilizar en un robot móvil con ruedas, que presenta la ventaja de reducir el error

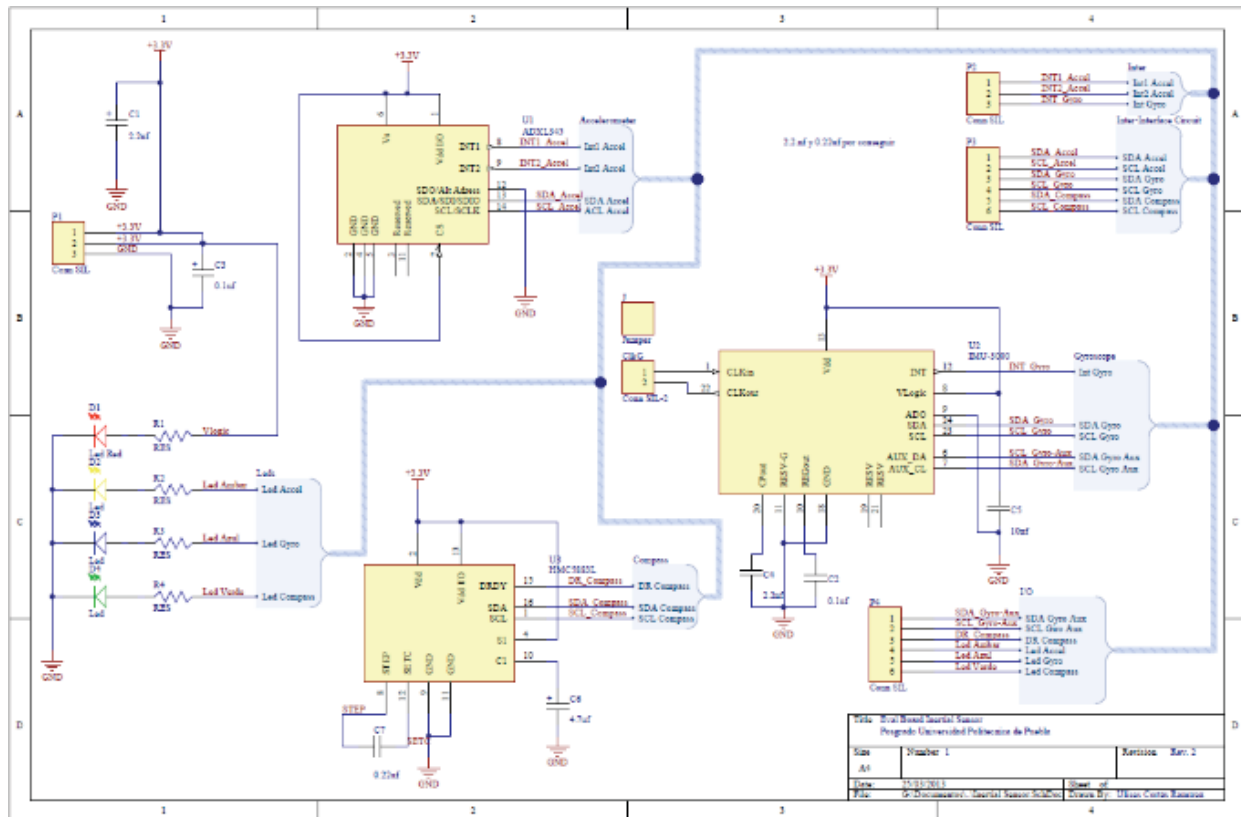


Figura 12. Esquemático del sensor de movimiento de 9 grados de libertad.

odométrico al considerar los factores principales que influyen en el movimiento. De esta manera la disminución del error se ve reflejada en: i) la articulación de orientación error ocasionado por el deslizamiento de las ruedas del robot, debido al material de construcción de las ruedas o por imperfecciones en la superficie en la que se mueve el robot, ii) la orientación de la plataforma móvil que en todo momento estaría correctamente orientada con el uso de la magnetobrójula, así se aseguraría que los ejes de referencia del plano cartesiano de la superficie donde está navegando, coincidan con los ejes de referencia de la plataforma móvil.

7 Agradecimientos

Al CONACyT, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México por la beca de Maestría en Ingeniería del Ing. Ulises Cortés Ramírez.

8 Referencias

[1] Gracia, L. I. (2006). Modelo Cinemático y Control de Robots Móviles con Ruedas (Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia). Recuperado de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=17944>.

[2] Borenstein, J., Feng, L. 1996. Measurement and Correction of systematic Odometry Errors in Mobile Robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. The University of Michigan. Vol 12, pp. 886-880.

[3] Howe, T., Mailah, M. (2006). Motion Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robot in a structured Layout. *Journal Mekanikal*. Department of Applied Mechanics. Universiti Teknologi Malaysia.

[4] Valencia, J. (2009). Modelo Cinemático de un Robot tipo diferencial y navegación a partir de la estimación odométrica. *Scientia et Technica*. Pp. 191-196.

[5] Muñoz, J., Guerrero, J., Durand, S., Marchand N., Mino, G. 2012. Control and Model-Aided Inertial Navigation of Nonholonomic Vehicle. *Memoria XV congreso Latinoamericano de Control Automatic*.

[6] Lopez, R., Paternina, D. (2001). Análisis Cinemático de un Robot Autónomo con Ruedas. *Ingeniería y desarrollo*. 113-127. pp. 113-127.

[7] Muir, P. and Neuman C. (1986). *Kinematics Modeling of Wheeled Mobile Robots*. Carnegie-Mellon University.

[8] Siciliano, B., Khatib, O. 2008. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Departamento de Informática y Sistemas, Universidad de Napoli Federico II, Italia.

[9] Ollero, A. 2001. *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*. Marcombo, Barcelona, España.

[10] Salidos, J. 2009. *Cibernética aplicada: Robots educativos*. Alfa-Omega, México.

[11] Analog Devices. (2011). Digital Accelerometer. Rev. C. US.

[12] InvenSense. (2010). IMU-3000 Motion Processing Unit Product Specification. Rev. 1.1. US.

[13] Honeywell. (2012). Three-Axis Digital Compass IC HMC5883L. Rev. C. US.

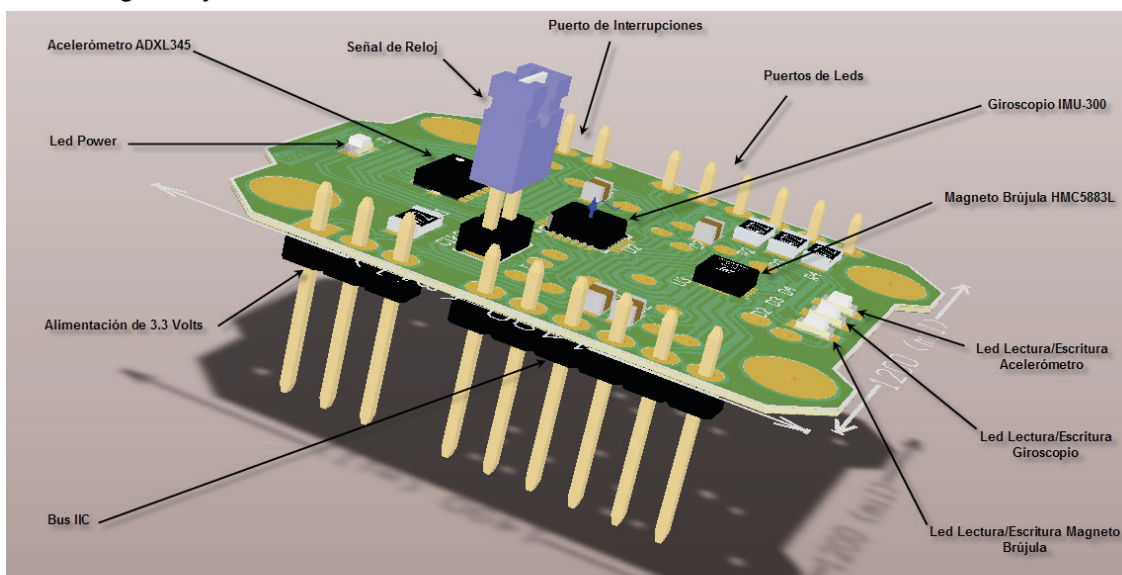


Figura 13. PCB sensor de movimiento de 9 grados de libertad. Vista 3D.