

CONTROL STABILITY OF ROBOT BY MEANS ULTRASONIC SIGNALS

CONTROL DE ESTABILIDAD DE UN ROBOT POR MEDIO DE SEÑALES ULTRASÓNICAS

Wilmar G. Monsalve

Universidad de San
Buenaventura Medellín
Wilmarg182@gmail.com

Harby A. Muñoz

Universidad de San
Buenaventura Medellín
ham613@gmail.com

David A. Álvarez

Universidad de San
Buenaventura Medellín
murdock246@hotmail.com

Sergio F. Ardila

Universidad de San Buenaventura Medellín
sergioardi@gmail.com

Andrés M. Cárdenas T.

Universidad de San Buenaventura Medellín
andresm.cardenas@usbmed.edu.co

(Tipo de Artículo: **INVESTIGACIÓN**. Recibido el 11/11/2010. Aprobado el 05/12/2010)

Abstract – *Currently there are various methods used for measuring an inclination of a body with respect to a reference or a fixed frame, but the problem is that these carry costs, this being a limiting factor for the development of science when you have low income economic. At this point it becomes relevant where the research and development in technology led to dig in this article, since the purpose of this project is to provide stability to an autonomous robot one axis, for which becomes necessary, the implementation of a tilt control system. The tilt detection system developed is based on ultrasound as the primary tool for measuring distance between two points equidistant from the central axis of the robotic platform, which is inherently unstable. With this new method has been established tilt magnitudes of the order of fractions of degrees, as the piezoelectric transducers in conjunction with electronics implemented, provides greater precision in the measurements.*

Keywords: *Inclination, piezoelectric, robotics, transducer.*

Resumen – Actualmente son diversos los métodos utilizados para la medición de una inclinación de un cuerpo respecto a una referencia o un marco fijo, pero el problema radica en los costos que estos acarrearán, siendo este un factor limitante para el desarrollo científico cuando se dispone de bajos recursos económicos. En Este punto es en donde se hace relevante la investigación y el desarrollo en materia de tecnología llevado a cabo, en este artículo, ya que la finalidad del presente proyecto, consiste en proporcionarle estabilidad a un robot autónomo de un solo eje, para lo cual se hace necesario, la implementación de un sistema de control de inclinación. El sistema de detección de inclinación desarrollado, está basado en el ultrasonido como herramienta principal de medición de distancia entre dos puntos equidistantes del eje central de la plataforma robótica, la cual es inestable por naturaleza. Mediante este nuevo método, se ha logrado establecer magnitudes de inclinación del orden de fracciones de grados, ya que los transductores piezoeléctricos en conjunto con la electrónica implementada, brinda gran precisión en las medidas realizadas.

Palabras clave: Inclinación, piezoeléctrico, robótica, transductor.

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se encuentra ubicado en un contexto investigativo y aplicativo de ciencias tales como control automático (robusto), robótica móvil, maquinas eléctricas y física de ondas.

La idea principal del proyecto, consiste en implementar un sistema de detección de inclinación por un método no convencional, que se acomode al prototipo de plataforma robótica implementada [1] [8], para la posterior aplicación de dos tipos diferentes de técnicas de control robusto tales como LQR y LQG/LTR, con el fin de identificar cual es la técnica de control más apropiada para el proyecto en desarrollo. En este punto de la investigación es en donde se toma como recurso principal las propiedades de la física de ondas, más específicamente ondas de sonido, ya que los sensores utilizados son transductores piezoeléctricos, con los cuales se realizarán las mediciones de distancia de los extremos de la plataforma con el fin de establecer el índice de inclinación de la plataforma en todo momento [9].

2. DESARROLLO

El desarrollo del proyecto está basado en la medición de la distancia de los extremos de la plataforma, la cual es inestable, ya que solo cuenta con un solo eje central de apoyo, todo esto con el fin de establecer el índice de inclinación de un extremo de la plataforma con respecto al otro. Lo cual se realiza con dos módulos de transductores piezoeléctricos Tx y Rx, ubicados en cada extremo, esto con el fin de tomar el tiempo de vuelo T_v [2], de un tren de pulsos emitidos sincrónicamente por los sensores ultrasónicos – Tx. El procesamiento del cálculo de la distancia de los extremos de la plataforma respecto a la superficie de apoyo y el control de los actuadores finales –dos motores DC–, está a cargo del microcontrolador PIC16F877A de Microchip [4]. La metodología general se observa en la Fig. 1.

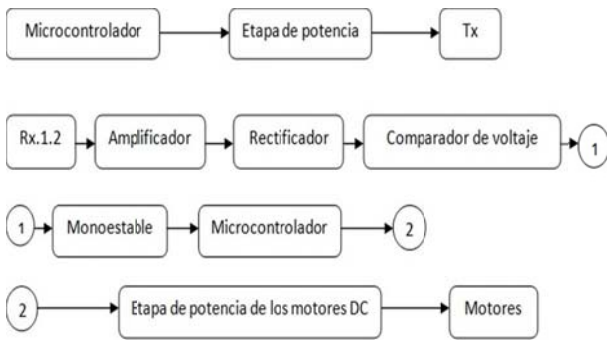


Fig. 1. Metodología general

2.1 Piezoelectricidad

Existen cristales que al ser sometidos a una tensión, experimentan distorsiones en su superficie debido a que las cargas positivas y negativas, por física natural tratan de disponerse a sí mismas. La reacción piezoeléctrica de un material depende directamente de su simetría, así como de la orientación del cristal respecto a sus ejes cristalográficos.

Cuando se aplica presión sobre las caras de un cristal con propiedades piezoeléctricas, es posible generar cargas eléctricas positivas en una superficie y negativas en la opuesta. El efecto inverso, cuando se aplica una tensión eléctrica, el cristal se distorsiona dependiendo directamente de la magnitud del campo eléctrico y de la frecuencia de este; si desaparece este campo eléctrico, también desaparece dicha distorsión.

Aprovechando la propiedad piezoeléctrica de algunos materiales, se diseñan transductores que permiten convertir pulsos eléctricos de alta frecuencia en una onda sonora de la misma frecuencia y viceversa. El transductor elegido para el desarrollo del proyecto es el 400SR160, cuyas características se observan a continuación.

TABLA 2
Características del 400SR160

Característica	Magnitud	Unidad de medida
Frecuencia de funcionamiento	40	Kilo Hertz
Voltaje Máximo (Vrms)	20	Volts
Temperatura de operación	-30→80	Grados Celsius
Ángulo de emisión	Cónico 25°	Grados angulares

Es de suma importancia mencionar que, cuando se utiliza un transductor piezoeléctrico, solo se debe emplear la frecuencia de trabajo recomendada por el fabricante de dicho transductor, ya que el transductor forma parte del mismo circuito oscilador, siendo el cristal el elemento quien determina la frecuencia de resonancia, que a su vez estabiliza la frecuencia de las oscilaciones eléctricas.

Como se puede observar en la Fig. 2, la frecuencia de máxima amplitud para el transductor

utilizado 400SR160, es de 40 KHz, por lo que el uso de una frecuencia diferente para este transductor, daría como resultado bajas amplitudes de voltaje en los receptores.

Otro aspecto importante que debe ser mencionado, es que los materiales piezoeléctricos tienen una etapa de resonancia, durante un corto periodo de tiempo, por lo cual se utilizan parejas de transductores independientes, con el fin que la etapa de resonancia en el Tx no afecte la señal de RX.

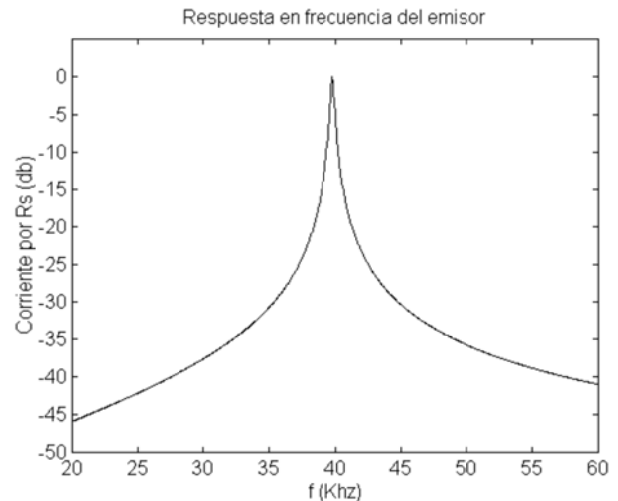


Fig. 2. Respuesta en frecuencia del emisor

2.2 Topología de trabajo

La base teórica y de funcionamiento de la topología de trabajo se fundamenta en el tiempo de vuelo de un tren de pulsos. Para esta topología se utilizara un par de cristales Rx y Tx en cada extremo de la plataforma (derecha e izquierda), de esta forma un tren de pulsos será emitido de forma sincrónica por los dos Tx, y dependiendo del nivel de inclinación, hacia la derecha o hacia la izquierda, el tren de pulsos regresara primero a uno de los dos Rx, ya que recorrerá una menor distancia [3]. Ver Fig. 3.

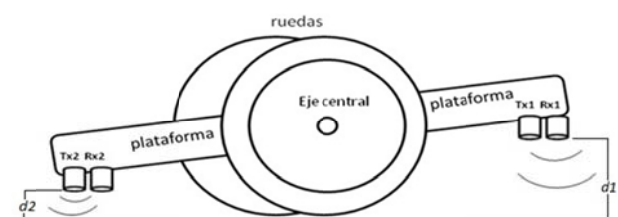


Fig. 3. Topología de trabajo

La distancia de cada de cada Rx respecto a la superficie de apoyo de la plataforma cuando esta se encuentra en perfecto equilibrio es de aproximadamente 8cm, por lo que el tren de pulsos de 40KHz hará un recorrido de 16cm, teniendo presente que la velocidad del sonido es de aproximadamente 343m/s a 20°C, el tiempo de vuelo del tren de pulsos es de 466.47µSeg aproximadamente [6].

Por conveniencia y funcionalidad del sistema de detección de inclinación, solo se enviara un tren de 4 pulsos a 40 KHz, como se ve en la Fig.4, ya que se debe dar un tiempo muerto a los Tx para que el microcontrolador haga el correspondiente procesamiento de las señales que ingresan a el y determine así el nivel de inclinación en ese momento.



Fig. 4. Tren de pulsos a 40 KHz

El suministro de voltaje para todo el diseño electrónico, estará a cargo de dos baterías 9 V á 170 mA.

2.3 Instrumentación electrónica para los dos Rx

Dado el echo de trabajar con una onda sonora a alta frecuencia, es importante diseñar una buena etapa de instrumentación electrónica para cada Rx [5], dado los altos niveles de ruido presente en el ambiente, los fasos pulsos en los Rx producto de los ecos de la onda sonora reflejada en la superficie de apoyo, todo esto sumado al echo que es absolutamente necesario digitalizar la señal de los RX para que con esto el microcontrolador disponga de señales claras, con las cuales pueda determinar con mayor precisión los tiempos de vuelo de ambos extremos de la plataforma.

Amplificador de instrumentación

La primera etapa de la electrónica de acondicionamiento implementada para ambos Rx, consta de un amplificador de instrumentación [11] –Fig.5.

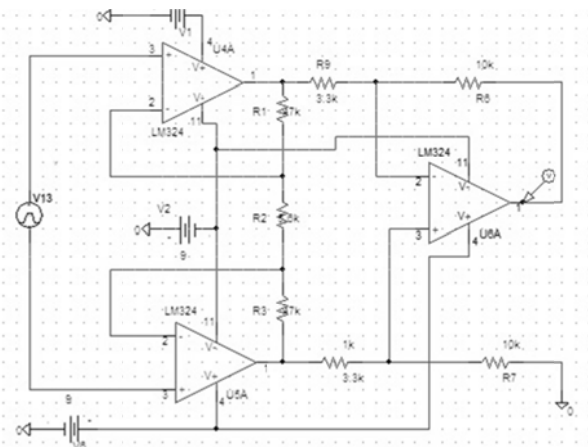


Fig. 5. Amplificador de instrumentación

Esta etapa es absolutamente necesaria, ya que la señal de ultrasonido recibida por ambos Rx es de uno cuantos milivoltios, como puede verse en la Fig.6, y es necesario amplificarla.

Ganancia del amplificador de instrumentación:

$$V_{out} = (V_1 - V_2) \left(1 + \frac{2R_1}{R_g} \right) \frac{R_3}{R_2} \quad (1)$$

Donde V_{out} es el voltaje de salida, y R_1 , R_2 , R_3 y R_g se da en Ohm.

La ganancia deseada para el amplificador de instrumentación es de 50, ya que la señal original -346 mV , multiplicada por un factor de ganancia de 50 da como resultado un valor máximo de voltaje de $\pm 17,3 \text{ V-pp}$.

$$\Delta V = \left(1 + \frac{2R_1}{R_g} \right) \frac{R_3}{R_2} = 50 \quad (2)$$

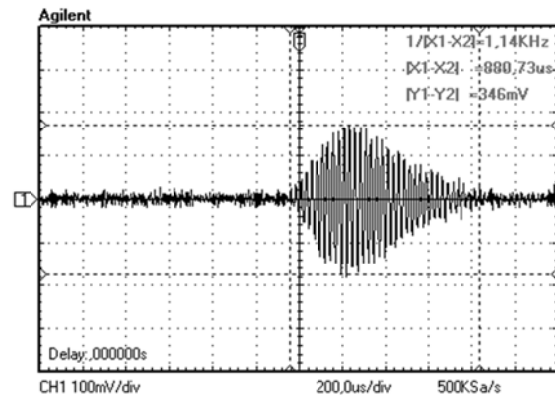


Fig.6. Rx sin amplificar

Conociendo el valor de la ganancia deseada, se despeja una de las variables $-R_g-$, y suponemos su valor $R_g = 5,6 \text{ K}\Omega$, y las demás variables de la ganancia las hallamos de tal forma que se aproximen a valores comerciales de resistencia para así obtener un valor de ganancia cercano al deseado.

TABLA 2

Parámetros del Amplificador de instrumentación

Resistencia	Valor en Ohm
R_g	$5,6 \text{ K}\Omega$
R_1	$47 \text{ K}\Omega$
R_2	$3,3 \text{ K}\Omega$
R_3	$10 \text{ K}\Omega$

Reemplazando estos valores de resistencias en (2) se obtiene un valor final de ganancia de:

$$\Delta V = \left(1 + \frac{2 * 47 \text{ K}\Omega}{5,6 \text{ K}\Omega} \right) \frac{10 \text{ K}\Omega}{3,3 \text{ K}\Omega} \cong 53,89 \quad (3)$$

Amplificador rectificador

Después de amplificar la señal R_x , se pasa por un rectificador –Fig.7–, con el propósito de eliminar la fase negativa, ya que se pretende establecer un comparador de voltaje en la fase positiva, por lo cual la fase negativa es innecesaria –Fig.8.

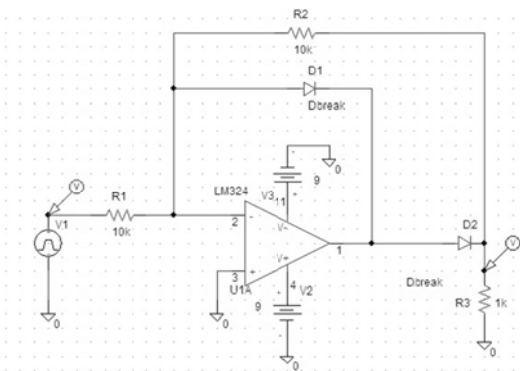


Fig. 7. Amplificador rectificador

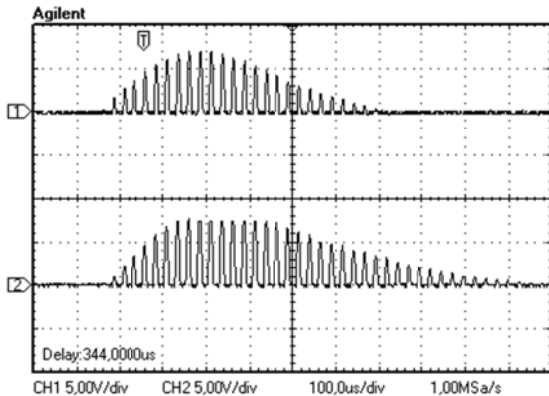


Fig. 8. Rectificador con ganancia unitaria

La ganancia del amplificador rectificador está determinada por la siguiente formula [11].

$$\Delta V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_f}{R_i}$$

Para este caso solo se desea una ganancia unitaria, pues con la ganancia entregada por el amplificador de instrumentación es suficiente, por esto se hará $R_f = R_i = 10K\Omega$.

Comparador de voltaje

Como se puede ver en la Fig.9, el primer pulso de llegada de la señal rectificada es de una amplitud muy pequeña, que solo alcanza a superar 1 V – Máx. 1.2 V.

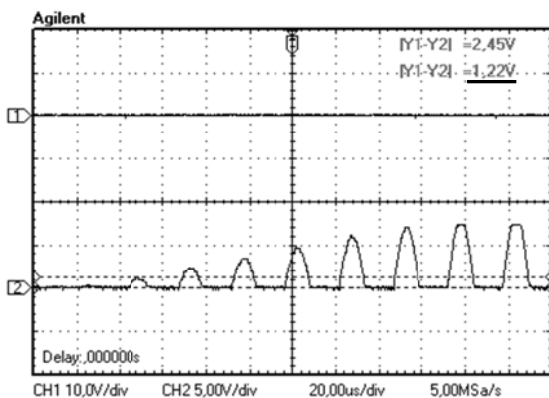


Fig. 9. Primer pulso del rectificador

Para lo cual fijamos un comparador de voltaje en un umbral de 500 mV, ya que es de vital

importancia detectar el primer pulso de llegada en ambos Rx, pues con este pulso es con el cual se determina el tiempo de vuelo contado desde el instante de la emisión de los cuatro pulsos a 40 KHz, ver Fig.10.

El echo de no detectar la señal de Rx en el primer pulso, acarrearía imprecisiones en la medición del tiempo de vuelo real de cada modulo Tx-Rx, lo cual se vería manifestado finalmente en un calculo erróneo de la inclinación en dicho momento, y por consiguiente se ejercería un control inadecuado sobre los actuadores finales, ocasionando una mayor inestabilidad.

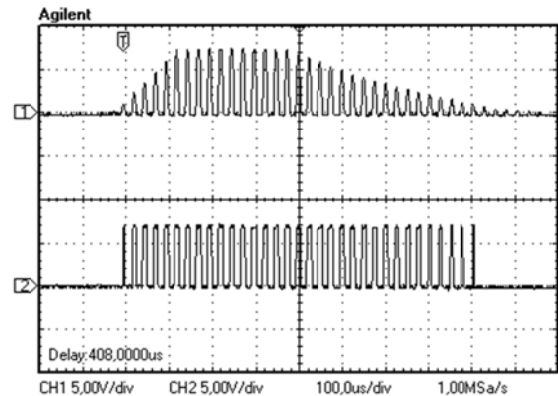


Fig. 10. Comparador de voltaje

Como se puede ver en la Fig. 11, la señal que sale del rectificador, ingresa al comparador de voltaje por la terminal positiva, y a la terminal negativa se establece el nivel de comparación de 500 mV, mediante un divisor resistivo de voltaje, esto dará como resultado, que cada que el voltaje de la terminal positiva supere al voltaje de la terminal negativa, el amplificador entre en saturación, dando como resultado a la salida el máximo voltaje positivo de alimentación [12].

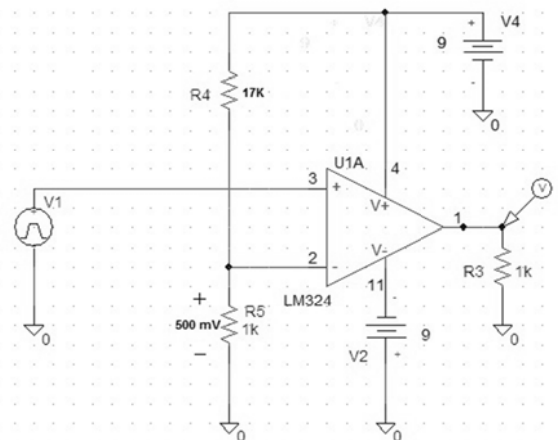


Fig. 11. Comparador de voltaje en Spice

Monoastable

El uso de un monoastable en la etapa de instrumentación y digitalización de los Rx, se hace necesario, ya que la señal final que le será

entregada al microcontrolador debe ser lo mas clara y estable posible durante un tiempo mínimo para que sea detectada, condiciones que no ofrece la señal entregada por el comparador de voltaje, la cual es fluctuante, con un periodo aproximado de 25µseg.

El monoastable utilizado para generar un pulso estable es el DM74121 –Fig. 12–, el cual se activara ante el primer flanco de subida generado por el comparador de voltaje [13].

El tiempo de activación esta determinado por una constante de tiempo mayor al tiempo de funcionamiento del comparador de voltaje –Fig. 8 800µseg–, ya que de establecerse un tiempo menor de activación para el monoastable, tendríamos dos o más disparos de este dispositivo en un ciclo completo de trabajo del comparador de voltaje, por lo cual se establece un tiempo aproximado de activación del monoastable de 1.5 mSeg –Fig. 13–, tiempo más que suficiente para que el microcontrolador identifique esta señal como un nivel lógico alto y no se tengan varios disparos en un mismo ciclo de trabajo.

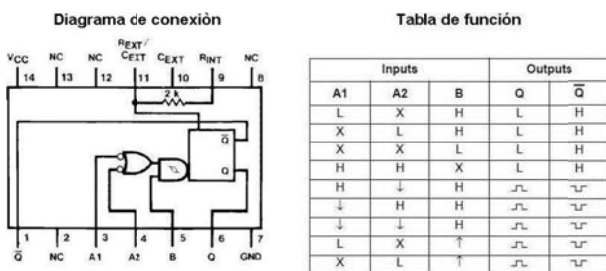


Fig. 12. Monoastable DM74121

El tiempo de activación del monoastable esta determinado por la siguiente ecuación:

$$t_w = K * R * C$$

Donde t_w se da en nano segundos, R en Kilo Ohm, C en pico Farad, y una constante $K = 0,7$

$$t_w = 0.7 * 22K\Omega * 100.000nF = 1'540.000nSeg$$

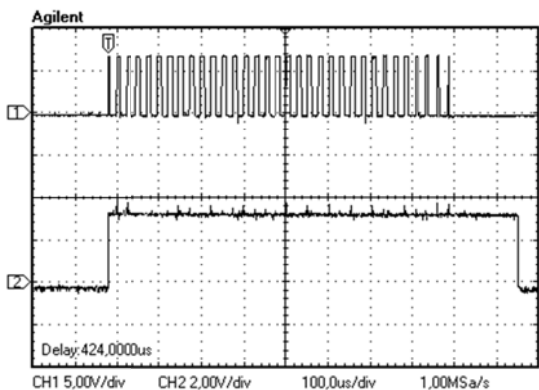


Fig. 13. Activación del monoastable por flanco de subida del comparador de voltaje

2.4 Establecimiento del nivel de inclinación

Luego de transformar la señal primaria de cada RX la cual asemejaba más a un ruido, en un pulso de una duración finita y magnitud estable, se procede a establecer un índice de inclinación, a partir de los tiempos de vuelo medidos en cada extremo de la plataforma, mediante el microcontrolador PIC16F877A [11].

Existen dos aspectos muy relevantes en el establecimiento del índice de inclinación; el primero consiste en saber cuál de los dos monoastables se activa primero, ya que se tendrá conocimiento de hacia que lado esta inclinada la plataforma, el segundo aspecto importante para determinar la inclinación, consiste en conocer muy bien cada tiempo de vuelo y saber la diferencia entre ellos.

En el instante en el cual se emiten los cuatro pulsos a 40 KHz, se inician dos contadores, los cuales estarán encargados cada uno, de realizar la medición del tiempo de vuelo de cada extremo de la plataforma robótica, cada contador se detendrá en el instante en el cual se active el monoastable asignado a este contador, y posteriormente se guardara este registro de conteo. Con este registro de conteo y mediante geometría básica se hallara el ángulo de inclinación.

El disparo de los dos monoastables asignados a cada Rx se puede observar en la Fig. 14, notándose entre ellos una pequeña diferencia en el tiempo de llegada.

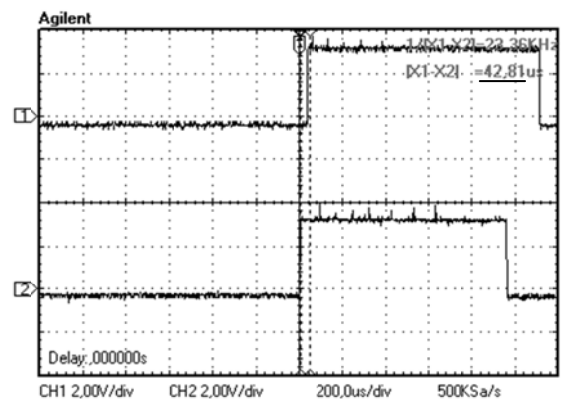


Fig. 14. Monoastable uno Vs Monoastable dos

Cálculo de la inclinación

Como se había mencionado al principio del documento, la distancia de cada modulo Tx-Rx asta la superficie de apoyo, cuando la plataforma se encuentra en perfecto equilibrio es de 8 cm, y la separación de los módulos Tx-Rx del eje central asta cada extremo es de 12 cm. La referencia de tiempo a seguir esta determinada por el tiempo de vuelo, cuando la plataforma se encuentra balanceada, es decir que cada extremo está a 8 cm de la superficie de apoyo.

$$V = \frac{d}{t} \quad (3)$$

Donde V es la velocidad del sonido (343 m/Seg a 20 °c) y se da en metros sobre segundos, d es la distancia en metros y t es el tiempo en segundos.

De (3)
$$t = \frac{d}{V} \quad (4)$$

La distancia real que recorrerá el pulso de ultrasonido es de dos veces la distancia de separación entre los transductores piezoeléctricos y el piso, por lo cual la distancia utilizada para calcular el tiempo de referencia es de 0.16 mts. Reemplazando en (3):

$$T_{ref} = \frac{0.16mts}{343mts/Seg} = 466.47\mu Seg$$

De la Fig. 14 tomamos esa diferencia de tiempo entre la activación de un monoastable con respecto al otro y hallamos los tiempos de vuelo para cada uno.

Es importante notar que el monoastable que se activa primero para este ejercicio, fue el correspondiente al Rx 2, lo cual dice de entrada que la plataforma está inclinada hacia la izquierda, y que la diferencia de tiempo con respecto a la activación del monoastable asignado al Rx 1 fue de 42.81 μ Seg –“ T_{dif} ” tiempo de diferencia entre la llegada del primer T_v respecto al segundo. Conociendo que el tiempo de referencia es de 466.47 μ Seg, el cual por simetría de diseño de la plataforma siempre estará ubicado en la mitad de la diferencia de ambos tiempos de vuelo, se procede a hallar T_{v1} y T_{v2} .

$$T_{v1}, T_{v2} = T_{ref} \pm (T_{dif} / 2) \quad (4)$$

El término $(T_{dif} / 2)$, se le restará al primer T_v en llegar y se le sumará al segundo T_v .

$$T_{v1} = 466,47\mu Seg + (42,81\mu Seg / 2) = 487,875\mu Seg$$

$$T_{v2} = 466,47\mu Seg - (42,81\mu Seg / 2) = 445,065\mu Seg$$

De (3) hallamos la ecuación para establecer ambas distancias d_1 , d_2 .

$$2d = V * T_v \rightarrow d = (V * T_v) / 2$$

$$d_1 = \frac{(343mts/seg * 487,875\mu Seg)}{2} = 0,08367mts$$

$$d_2 = \frac{(343mts/seg * 445,065\mu Seg)}{2} = 0,07632mts$$

Con estas distancias de cada extremo de la plataforma respecto a la superficie de apoyo y con ayuda de la Fig. 15, se determinará el ángulo α de

inclinación para este caso.

La variación de cada extremo con respecto a la posición de equilibrio es de:

$$(8cm - 7,632cm) = (8,367cm - 8cm) = 0,367cm$$

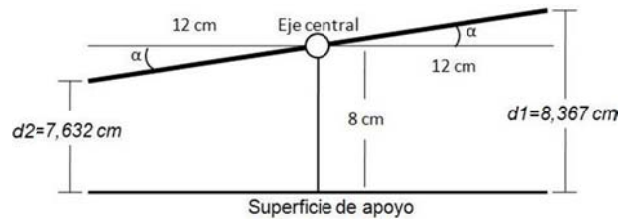


Fig. 15. Diagrama de inclinación

Con esta variación en las distancias de los extremos y conociendo con anterioridad que la separación respecto al eje central es de 12 cm, hallamos una relación geométrica para α , como se observa en la Fig. 16.

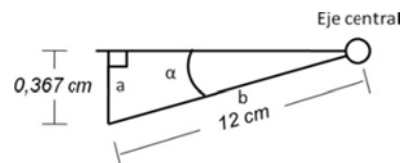


Fig. 16. Diagrama de α

Por geometría general, se deduce que la relación entre el cateto opuesto sobre la hipotenusa es:

$$\text{sen } \alpha = \frac{a}{b} \quad (5)$$

Reemplazando en (5), se halla a α .

$$\alpha = \text{sen}^{-1} \left(\frac{0,367cm}{12cm} \right) = 1.752569^\circ$$

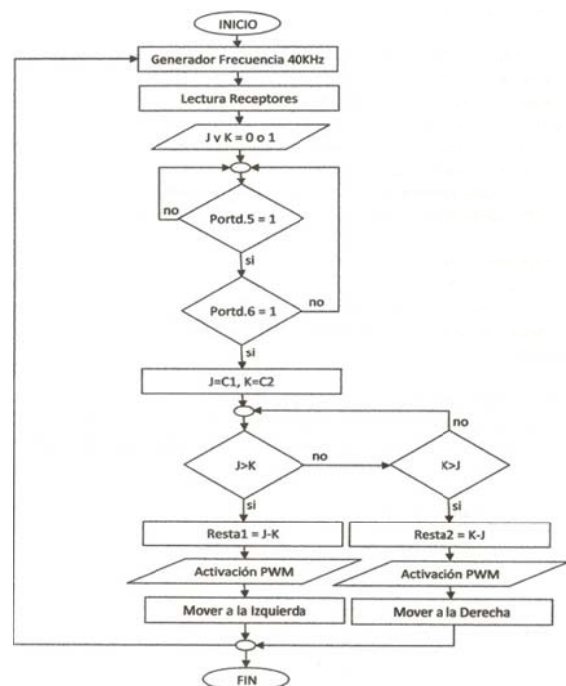


Fig. 17. Diagrama de flujo

Luego de que finalmente se halla el ángulo de inclinación para dicho momento de la captura de datos, se debe hacer la activación de los actuadores finales, dos motores de corriente continua DC, durante el tiempo suficiente para la corrección de la inclinación detectada.

Programa general de operación para el PIC 16F877A

El procesamiento de las señales de Rx, análisis de los tiempos de vuelo, calculo de la inclinación y activación de los actuadores finales, estará a cargo del microcontrolador PIC16F877A [10]. El cual mediante el programa que se describe a continuación ejerce el control necesario y adecuado para el funcionamiento de todo el hardware implicado en este diseño, Fig. 17.

CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

'declaración de variables.

```
i var byte
J var word
K var word
C1 var word
C2 var word
RESTA1 VAR WORD
RESTA2 VAR WORD
TRISD.5 = 1
TRISD.6 = 1
TRISD.7 = 0
```

'Frecuencia de 40 Khz

```
TIME:
k = 0
j = 0
C1 = 0
C2 = 0
I=0
repeat      'emisión de los 4 pulsos a 40 KHz'
HIGH PORTD.7 'pone en alto el puerto D.7'
@ nop
@ nop
@ nop
@ nop
@ nop
@ nop
@ nop
@ nop
LOW PORTD.7  'pone en bajo el puerto D.7'
@ nop
@ nop
@ nop
@ nop
@ nop
@ nop
@ nop
i = i + 1
UNTIL i > 3
'pauseus 1000
```

```
'IEER RECEPTORES
WHILE J = 0 AND K = 0      'Conteo de ambos tiempos e vuelo'
IF PORTD.5 <> 1 THEN
    C1 = C1+1
    ELSE
    J = C1
    ENDIF
IF PORTD.6 <> 1 THEN
    C2 = C2+1
```

```
ELSE
K = C2
ENDIF
WEND
J = C1
K = C2
```

'DIFERENCIA 'se diferencian los contadores para saber si un tiempo de vuelo es mayor de un lado que del otro'

```
IF J > K THEN
'HIGH PORTE.0
RESTA1 = J - K
ENDIF
IF K > J THEN
'HIGH PORTE.1
RESTA2 = K - J
ENDIF
```

'DURACION PWM 'Niveles de diferencias para saber la duración de activación de los motores'

```
'MOV_IZQ 'mover a la izquierda'
IF RESTA1 = 2 THEN HIGH PORTE.0
```

```
PAUSE 100
LOW PORTE.0
ENDIF
```

```
IF RESTA1 = 3 THEN
HIGH PORTE.0
PAUSE 150
LOW PORTE.0
ENDIF
```

```
IF RESTA1 = 4 THEN
HIGH PORTE.0
PAUSE 200
LOW PORTE.0
ENDIF
```

```
IF RESTA1 = 5 THEN
HIGH PORTE.0
PAUSE 250
LOW PORTE.0
ENDIF
```

'MOV_DER 'mover a la derecha'

```
IF RESTA2 = 2 THEN
HIGH PORTE.1
PAUSE 100
LOW PORTE.1
ENDIF
```

```
IF RESTA2 = 3 THEN
HIGH PORTE.1
PAUSE 150
LOW PORTE.1
ENDIF
```

```
IF RESTA2 = 4 THEN
HIGH PORTE.1
PAUSE 200
LOW PORTE.1
ENDIF
```

```
IF RESTA2 = 5 THEN
HIGH PORTE.1
PAUSE 250
LOW PORTE.1
ENDIF
```

```
GOTO TIME
END
```

2.5 Electrónica de control para los actuadores finales

Los actuadores finales son dos motores de corriente continua, los cuales funcionan a un voltaje nominal de 5,9 V. Cada uno contiene una caja de engranajes la cual transforma parte de la velocidad, en el torque necesario para mover el peso total de la plataforma [7].

Los motores fueron elegidos por su rápida reacción a voltajes transitorios de alimentación, debido a que la oportuna corrección de la inclinación detectada recae en la rapidez con la que se desplacen las llantas sujetas a los dos motores DC.

El control de giro de ambos motores se hace con el puente H L293D, en la Fig.18, se puede observar el diagrama y la tabla de función lógica para el control de dirección de ambos motores. El puente H L293D, cuenta con dos módulos como los mostrados en la Fig.18. Cada uno estará encargado de controlar un motor asignado, suministrándole la tensión de 5,9 V cuando el microcontrolador active los pines 1 y 9 "enable" [14].

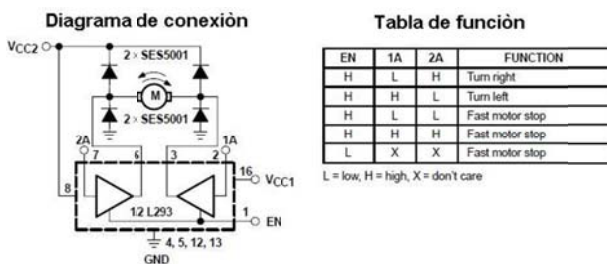


Fig. 18. Control bidireccional de motor DC

3. TRABAJOS FUTUROS

Como trabajo futuro, se plantea la implementación de diferentes tipos de controladores, con el fin de establecer cual es el controlador óptimo para el prototipo planteado. También se sugiere la implementación de otros tipos de sistemas de detección de inclinación, con el fin de ser usados en el prototipo de plataforma implementado, para con esto hacer una comparación de la eficiencia del método desarrollado, el cual es novedoso y poco convencional.

4. CONCLUSIONES

La utilización de transductores piezoeléctricos, es una alternativa confiable en calidad y favorable en costos, para realizar mediciones de inclinación para el prototipo propuesto.

El método implementado para la medición de inclinación, por medio de ultrasonido da como resultado gran precisión en las medidas realizadas, ya que se puede establecer la inclinación en fracciones de ángulos, en cortos periodos de tiempo.

El diseño electrónico, para el acondicionamiento de las señales Rx, proporciona confiabilidad sobre el índice de inclinación obtenido en cada medición realizada.

La correcta elección de los actuadores finales, permite una rápida reacción en el sistema de

control de ambos motores DC, con lo cual se hace siempre una oportuna corrección de la inclinación detectada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen las contribuciones del Ingeniero Electrónico Andrés Mauricio Cárdenas Torres de la UAM, por su aporte en el área del control robusto así como metodológico y su constante apoyo en el desarrollo del proyecto.

También se hace mención del Ingeniero electricista Camilo Flórez de la UN, por su aporte en el área de la electrónica, pues siempre a sido un gran referente en cuanto al diseño electrónico.

REFERENCIAS

1. D. Muñoz, N. A. Andrade, C. Londoño O. "Diseño y construcción de un robot móvil orientado a la enseñanza e investigación". *Ingeniería y Desarrollo*, No. 19, pp. 114-127, ene-jun 2006.
2. C. Carvajalino y C. Manjarres, "Medición de nivel por ultrasonidos", *Electrónica y computadores*, No. 29, pp.17-19. 1997.
3. J. Robby G., "Detector Ultrasónico de Movimiento", *Electrónica y Computadores*, No. 76, pp. 6-10. 2001.
4. J. Iovine, "PIC Microcontroller Basic Compilers", *Poptronics*, Vol. 2, No. 7, pp. 50-53, 2001.
5. Sedra y K. C. Smith, "Circuitos Microelectrónicos". México: Mc Graw Hill, 2006.
6. R. A. Serway, "Física para Ciencias e Ingeniería", vol. 2, México: Cengage Learning, 2005.
7. S. Segui C., "Electrónica de potencia". México: Alfaomega, 2004.
8. S. S. Ge, y F. Lewis, "Autonomous mobile robots: sensing, control, decision making and applications". USA: Taylor & Francis, 2006.
9. H. R. Everett. "Sensors for mobile Robots: Theory and application". Canada: A K Peters, 1995.
10. J. M. Angulo U. "Microcontroladores "PIC". Diseño practico de aplicaciones". España: McGraw-Hill, 2000.
11. Fairchild Semiconductor, LF353 datasheet, "Amplificador Operacional Dual (JFET)", en: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/LF353.pdf>, noviembre de 2010.
12. ST Microelectronics, LM311 datasheet, "VOLTAGE COMPARATORS", en: http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/120/61293_DS.pdf, noviembre de 2010.
13. Fairchild Semiconductor, DM74121 datasheet, "One-Shot with Clear and Complementary Outputs", en: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/DM74121.pdf>, noviembre de 2010.
14. Texas Instruments, L293D datasheet, "Quadruple Half-H Drivers", en: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/l293d.pdf>, noviembre de 2010.