

Desarrollo de un sistema de control y potencia de bajo costo para sillas de ruedas motorizadas

Walter Gemin, Raúl Rivera, Ariel Nieto, Roberto Hidalgo, Juana Fernández, Miguel Revuelta

Facultad de Ingeniería – UNMDP

{agemin, rrivera}@fi.mdp.edu.ar

Abstract. Hoy día, la mayoría de las sillas de ruedas motorizadas son importadas, de diferentes fabricantes, sin servicio postventa, carecen de información técnica y repuestos para su mantenimiento. De las partes que componen un sistema de movilidad como este, la circuitería de control y potencia es clave, ya que es muy costosa su importación, representando en muchos casos hasta un 50% del valor de una silla nueva. Esto origina la necesidad de desarrollar tecnología nacional que reemplace a este sistema, con componentes de fácil adquisición en el mercado local y que se adapte a cualquier modelo de silla.

En este artículo, describimos el sistema de control y potencia de bajo costo desarrollado, basado en un microcontrolador PIC. Se presenta una introducción a los componentes de este equipamiento, el circuito construido, el método de interpretación de señales del Joystick, y la generación de las señales PWM para la excitación de los motores.

Keywords: Sillas de ruedas motorizadas - microcontroladores - sistema embebido - control de movimiento.

1 Introducción

Las sillas de ruedas motorizadas están formadas por cinco elementos, la batería que alimenta el vehículo, dos motores (uno por rueda trasera) que impulsa la silla, el sistema de transmisión y freno, incluidos en las ruedas, el circuito de control y potencia que comanda los motores y finalmente, el joystick, que permiten al usuario dirigir la silla [1],[3]. Los motores son de 24V para asegurar el movimiento en diferentes situaciones de: peso a transportar, superficies y espacio donde maniobrar.

Este proyecto abarca el desarrollo de un sistema de control para reemplazar el original de una silla de ruedas motorizada importada, comandada por joystick.

2 Características de la silla

Esta silla está construida en caño estructural, la tracción es mediante dos motores de corriente continua de 24 volts - 80 W, uno por rueda trasera, acoplados a una caja

reductora y frenos por electroimán. Delante del apoyabrazos derecho tiene montado el joystick movable y ajustable en posición, leds indicadores de funcionamiento y estado de la batería y una llave de encendido. En la parte posterior del chasis se encuentra el circuito electrónico de control y potencia original, que fue íntegramente desarrollado en este trabajo.

Los detalles técnicos más destacados de la silla marca Invacare se describen a continuación y una imagen de la misma se observa en la Figura 1.

- Ruedas delanteras de 20 cm y traseras de 30 cm macizas de alto impacto.
- Joystick electromagnético.
- Frenos por electroimán.
- Motor Dc 24 V- 80 W. Batería 12 v/U1 (34AH) 2 piezas.
- Velocidad 6,8 km/h. Autonomía 20 Km.



Fig. 1. Imagen de la silla

3 Movimientos

La silla de ruedas posee ocho movimientos, avance, retroceso, y giros en cuatro cuadrantes, más dos movimientos de giro corto hacia la derecha e izquierda. Estos últimos permiten maniobrar en lugares de poco espacio. Como ejemplo, varios de estos movimientos se encuentran resumidos en la Fig. 2, donde la longitud y dirección de las flechas indican la magnitud de la velocidad y dirección de giro de las ruedas.

Avanza, cuando los dos motores giran en sentido horario, estando el observador situado a la derecha de la silla. Al retroceder, los dos motores giran en sentido antihorario. El control permite girar de dos formas distintas. En la denominada giro largo, ambos motores están activos con diferente magnitud de velocidad. Por ello, para avanzar girando hacia la derecha, se activan en sentido horario, el motor izquierdo a mayor velocidad que el derecho y para doblar a la izquierda se activan en sentido horario, con el motor derecho a mayor velocidad que el izquierdo.

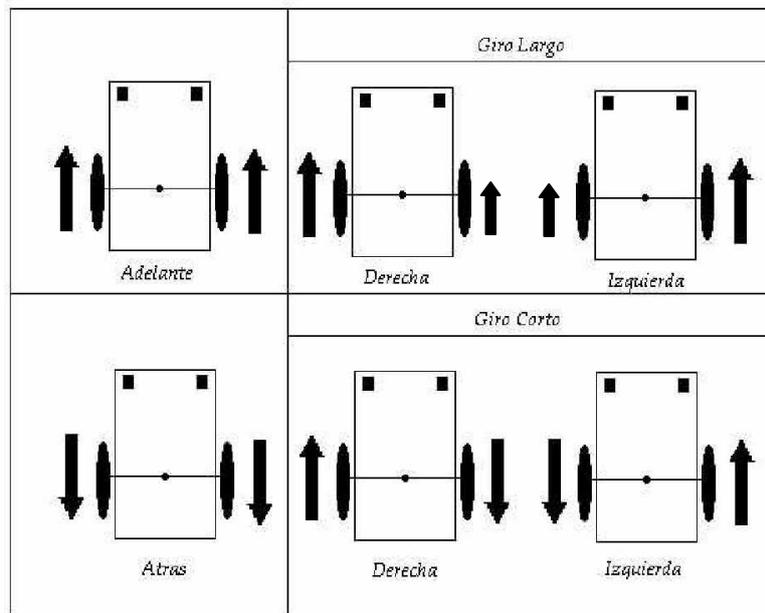


Fig. 2. Tipos de movimientos.

Para giros cortos, los dos motores funcionan simultáneamente. Cuando gira hacia la derecha, el motor izquierdo se activa en sentido horario y el motor derecho en sentido antihorario. Mientras que en el giro hacia la izquierda, el motor derecho gira en sentido horario y el motor izquierdo en sentido antihorario. El radio de giro es igual a la mitad del ancho de la silla de ruedas. Esto permite que la silla maniobre en lugares de poco espacio ya que la misma gira sobre su propio eje.[1],[4].

4 Circuito de Potencia

El circuito de potencia de excitación de los motores de CC en este trabajo es un puente H como el mostrado en la Fig. 3, que permite controlar el sentido de giro, velocidad y frenado del motor. En la última etapa de este circuito se utilizan transistores MOSFET (IRFZ44N) que permiten manejar tensiones máximas de 60V y corrientes hasta 50A. Estos transistores necesitan de una tensión en el terminal Gate $V_{GS}=4V$, para una conducción plena $R_{ON}<0,028$ ohms y el régimen de trabajo del motor en máxima potencia en todo momento.

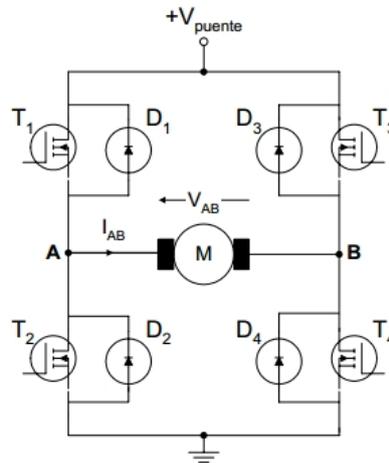


Fig. 3. Disposición del Puente H.

En este modo de funcionamiento los pares de transistores (T1, T4) y (T2, T3) son tratados como dos pares de conmutación, de forma que los transistores de cada par son conmutados simultáneamente. Los transistores T1 y T4 entran en conducción durante el estado on mientras que los transistores T2 y T3 se mantendrán en estado de corte. Durante el estado off, los transistores T2 y T3 entrarán en conducción mientras que los transistores T1 y T4 entrarán en corte. Uno de los dos pares está siempre en on (salvo el tiempo de cambio de estado, durante el cual ninguno de los transistores está en on). A continuación se muestra un gráfico Fig. 4, con la tensión de salida del puente en función del estado de los transistores.

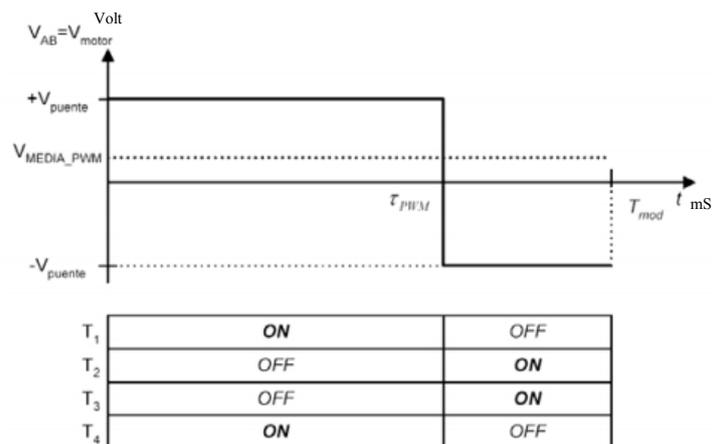


Fig. 4. Tensión de salida en función del ciclo de conducción

De esta forma, a partir de una señal PWM se puede controlar el sentido y velocidad de giro del motor, de acuerdo al siguiente diagrama de tiempos de la Fig. 5. Para anchos de pulso largos se obtienen tensiones positivas altas, a medida que el ancho de pulso disminuye a partir del 100%, baja la tensión y para un ciclo de trabajo 50% el valor medio de tensión es cero. Siguiendo, para anchos de pulso debajo del 50% y hasta 0%, se obtienen tensiones negativas que aumentan su amplitud negativa a medida que disminuye el ancho. Es decir que, para anchos de pulso entre 100% y 50% del período, la tensión varía de un valor máximo positivo a cero respectivamente y para anchos del 50% a 0%, desde cero hasta un máximo negativo.

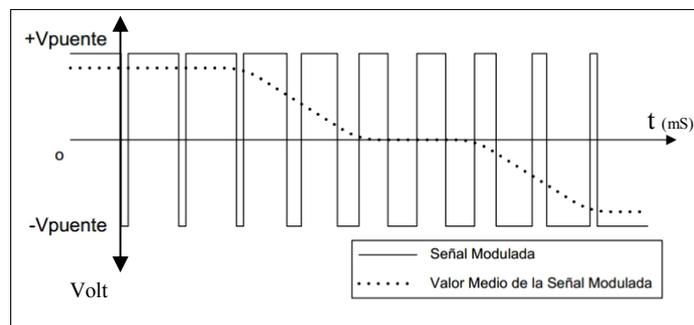


Fig. 5. Tensión de salida del puente en función del ancho de pulso

Este proceso de conversión de ancho de pulso (PWM) a ciclo de trabajo a la salida del puente H lo realiza un circuito integrado (CI) HIP4082 (H-Bridge FET Driver), con salidas de excitación para los MOSFET del puente H, a partir de las entradas compatibles con PWM (modulación por ancho de pulso), Fig. 6. La carga (LOAD) representa el motor de CC a controlar.

En las entradas BLI y ALI del convertor PWM-Puente H se aplican las señales PWM generadas por el circuito de control, basado en un microcontrolador PIC, que producirán el movimiento esperado[3].

5 Circuito de Control

El microcontrolador PIC utilizado es el 18F2550. En este se conectan dos entradas analógicas para las señales del joystick, correspondientes a las tensiones que representan la direcciones X e Y del desplazamiento buscado y dos salidas PWM que producen la velocidad y sentido de giro de los dos motores de propulsión de la silla. La Fig. 6 muestra el circuito de control y su conexión con el circuito de potencia. Los pines 12 y 13 del PIC, son las salidas PWM, que se conectan a los CI HIP4082, estos inyectan a la excitación de los puentes H, que entregan potencia sobre los motores izquierdo y derecho[2],[6].

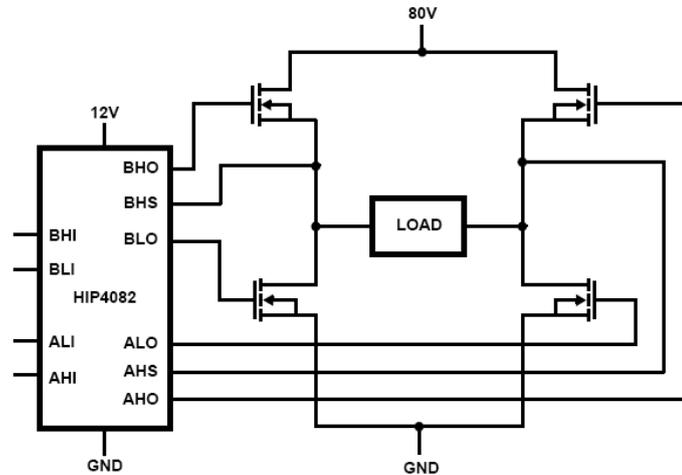


Fig. 6. Conexión del circuito puente H

6 Descripción de los movimientos

En la Fig. 7, se observa la silla en el centro, representando el punto de referencia donde se inicia el movimiento, de acuerdo a la velocidad y sentido de giro de los motores descritos en la sección 3. Los movimientos de la silla se distinguen de acuerdo a diferentes zonas denominadas, cuadrantes (I a IV) limitados por líneas de trazos y las franjas (A a D). Se observa que a partir del movimiento del joystick se producen los valores de tensión en los potenciómetros V_x y V_y , que serán interpretados como valores de desplazamiento en X y en Y respectivamente. Como resultado, mediante un algoritmo que se describirá a continuación, se generan las señales PWM para accionar los dos motores de CC, en velocidad y sentido de giro, que generen los movimientos deseados.

El rango de las tensiones entregadas por los potenciómetros del joystick, van de 0 a 5V, correspondiendo a una tensión de reposo de 2,5V. A partir de estos valores, se determina sobre que cuadrante se va a desplazar la silla. La Tabla 1, muestra la relación entre los rangos de tensión generados por el joystick y el cuadrante correspondiente[5], [7],[8].

Table 1. Relación entre tensiones del joystick y cuadrantes

V_x	V_y	Cuadrante
2,5 V – 5 V	2,5 V - 5V	I
0 V – 2,5 V	2,5 V – 5V	II
0 V – 2,5 V	0 V – 2,5 V	III
2,5 V – 5 V	0 V – 2,5 V	IV

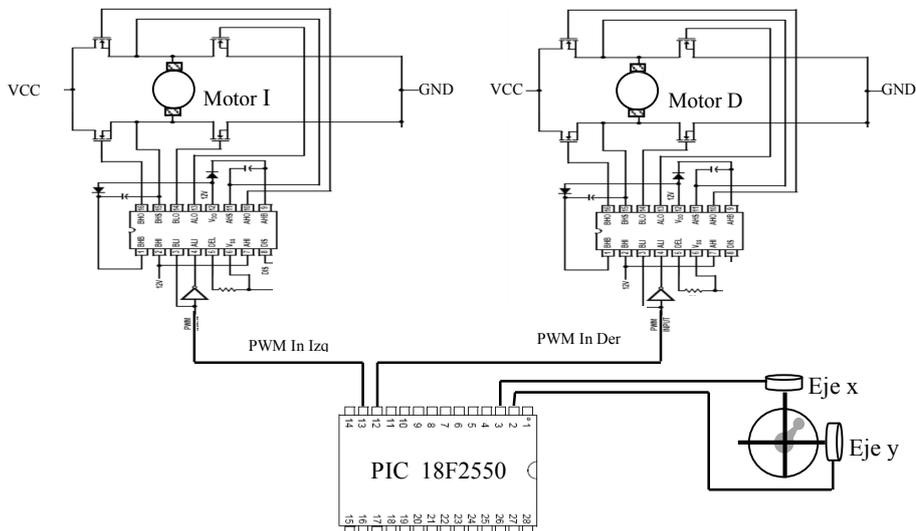


Fig. 7. Circuito de control y potencia

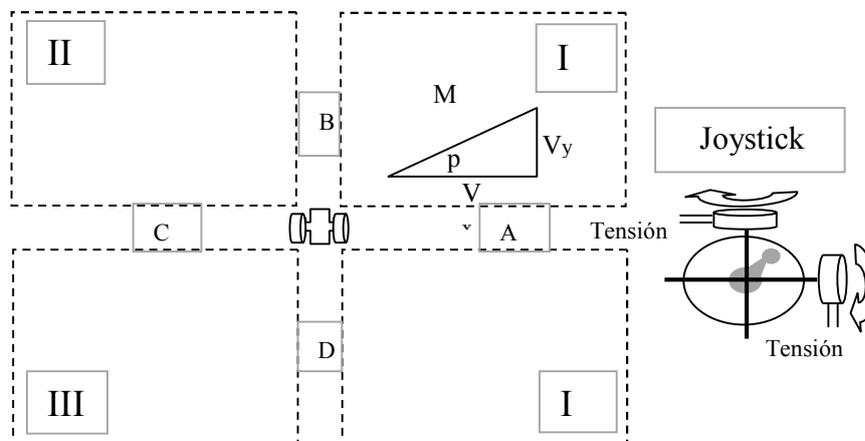


Fig. 8. Movimiento del Joystick y desplazamiento en el cuadrante

En la práctica el convertor A/D del microcontrolador, es de 10bits y $V_{ref}=5V$, por lo tanto los valores digitales convertidos varían entre 0 y 1023 y son utilizados directamente en los cálculos efectuados por el algoritmo.

A partir de la determinación del cuadrante se relaciona al movimiento de los motores, como muestra la Fig. 2. La velocidad de cada motor se determina en base al módulo M (Ec. 3) de la hipotenusa resultante de las variaciones en los valores ΔV_x y

ΔV_y de los potenciómetros de joystick, respecto del punto de reposo de 2,5V representados por el número 512 en las ecuaciones 1 y 2. Las expresiones que resultan son:

$$\Delta V_x = |V_x - 512| \quad (1)$$

$$\Delta V_y = |V_y - 512| \quad (2)$$

$$M = \sqrt{(\Delta V_x^2 + \Delta V_y^2)} \quad (3)$$

El ángulo real ρ se obtiene mediante la ecuación 4:

$$\rho = \arctg (\Delta V_y / \Delta V_x) \quad (4)$$

La velocidad en cada motor, derecho (Ec. 5) e izquierdo (Ec. 6), tomando como ejemplo el cuadrante I, dependen del módulo M y el ángulo normalizado α (Ec. 7):

$$Vel_D = M \quad (5)$$

$$Vel_I = \alpha M \quad (6)$$

Donde:

$$\alpha = \rho / (\pi / 2) \quad (7)$$

La normalización de ángulo real ρ para obtener α , es necesaria debido a que el rango de valores angulares está expresado en radianes entre 0 y $\pi/2$, y la máxima velocidad de los motores no puede ser mayor al módulo M, de esta forma se asegura que el producto αM sea un porcentaje de M y nunca supere su valor.

En la tabla 2, se observan estas relaciones para los casos de giro largo, que permiten determinar la velocidad y sentido de giro, de los motores izquierdos (M_I) y derecho (M_D) de la silla, respecto de los cuadrantes donde se desplaza.

Table 2. Relación entre cuadrantes, velocidad y sentido de giro.

Cuadrante	Motor Izquierdo		Motor Derecho	
	Velocidad	Sentido	Velocidad	Sentido
I	M	Adelante	αM	Adelante
II	αM	Adelante	M	Adelante
III	αM	Atrás	M	Atrás
IV	M	Atrás	αM	Atrás

Fuera de estos cuadrantes existen zonas que determinan dos franjas de movimiento, una horizontal que abarca desde la derecha de la silla denominada A hasta la izquierda C y otra vertical, que está delante de la silla denominada B y hacia atrás D. Los movimientos sobre la franja horizontal (zonas A y C), son de giro corto, donde los motores giran a la misma velocidad y sentidos opuestos. El movimiento en la franja vertical hacia adelante (zona B) con los dos motores a la misma velocidad y

sentido adelante y hacia atrás (zona D), con los dos motores a la misma velocidad y sentido atrás. Estos movimientos se resumen en la Tabla 3.

Table 3. Franjas de movimiento respecto de la velocidad y sentido de giro.

Franja	Motor Izquierdo		Motor Derecho	
	Velocidad	Sentido	Velocidad	Sentido
A	M	Adelante	M	Atrás
B	M	Adelante	M	Adelante
C	M	Atrás	M	Adelante
D	M	Atrás	M	Atrás

7 Control PWM

El entorno de desarrollo integrado CCS C utilizado en este proyecto, es un compilador C cruzado para microcontroladores de microchip PIC. En particular se usaron las funciones de librería descritas en la Tabla 4.

Tabla 4. Funciones para manejo de PWM del CCS C

Función	Descripción
<code>setup_timer_2 (mode, period, postscale)</code>	Configura el funcionamiento del timer2 en base al clock utilizado.
<code>setup_ccp1 (CCP_PWM)</code>	Configura el modo para la salida PWM1.
<code>set_pwm1_duty (value)</code>	Configura el ciclo de trabajo del PWM1, en un rango desde 0 a 1000.

En este trabajo se utilizaron dos PWM, uno por motor para lo cual las funciones mostradas en la Tabla 4 se ajustan de acuerdo a la salida PWM utilizada. A modo de ejemplo el siguiente segmento de código, muestra una aplicación de estas funciones, basada en un clock de 10MHz.

```
#use delay(clock=10000000)//Configura f clock 10MHz
setup_ccp1(CCP_PWM); // Configura el CCP1 en PWM
setup_ccp2(CCP_PWM); // Configura el CCP2 en PWM
setup_timer_2(T2_DIV_BY_1, 127, 1); // Frecuencia del
//PWM de 20 KHz
```

Luego dentro del lazo principal del programa, se varía el ciclo de trabajo mediante las funciones:

```
set_pwm1_duty(value); // Ciclo de trabajo del PWM1
set_pwm2_duty(value); // Ciclo de trabajo del PWM2
```

Estas dos últimas funciones son las que determinan la velocidad y dirección de giro de los motores, lo cual implica un proceso de cálculo de los argumentos “value” que es fundamental en el funcionamiento del circuito de potencia.

Dos consideraciones importantes antes de mostrar el cálculo de los argumentos, son, primero tener en cuenta la relación que existe entre el ciclo de trabajo entregado por el PWM y el sentido de giro del motor.

Como se observa en la Fig. 5, para ciclos de trabajo mayores al 50% (en este caso 500 a 1000) el sentido de giro es hacia adelante, mientras que menores al 50% (en este caso 0 a 500), el sentido es hacia atrás. La segunda consideración, es normalizar los valores del módulo M al rango que permite el PWM, dado que el máximo valor será $M=\sqrt{(512^2+512^2)}$, resultando $M=724$ por lo que debe normalizarse a un máximo de 500, dividiendo su valor por 1,45.

La Tabla 5, describe la relación entre las franjas A a D y cuadrantes I a IV, con los ciclos de trabajo de los PWM, esto permite entender la relación entre las distintas zonas de movimientos y las salidas PWM hacia los motores.

Table 5. Relación entre ciclos de trabajo y zonas de movimiento

Zona	PWM1 – Motor Izquierdo	PWM2 – Motor Derecho
I	$M/1,45 + 500$	$\alpha M/1,45 + 500$
II	$\alpha M/1,45 + 500$	$M/1,45 + 500$
III	$500 - \alpha M/1,45$	$500 - M/1,45$
IV	$500 - M/1,45$	$500 - \alpha M/1,45$
A	$M/1,45 + 500$	$500 - M/1,45$
B	$M/1,45 + 500$	$M/1,45 + 500$
C	$500 - M/1,45$	$M/1,45 + 500$
D	$500 - M/1,45$	$500 - M/1,45$

8 Diagrama de Flujo

El diagrama de flujo se muestra en la Fig. 9. Cada 100ms se repite este proceso que consiste en leer el joystick que entrega los valores de tensión V_x y V_y y permiten determinar si se produjo algún movimiento del mismo, de producirse se calculan el módulo M y ángulo ρ del mismo. A partir de estos valores se determina la zona donde se producirá el movimiento, clasificadas como cuadrantes I hasta IV y franjas A hasta D. Por último aplicando las relaciones de la Tabla 5, se calculan los ciclos de trabajo de las salidas PWM para los motores derecho e izquierdo.

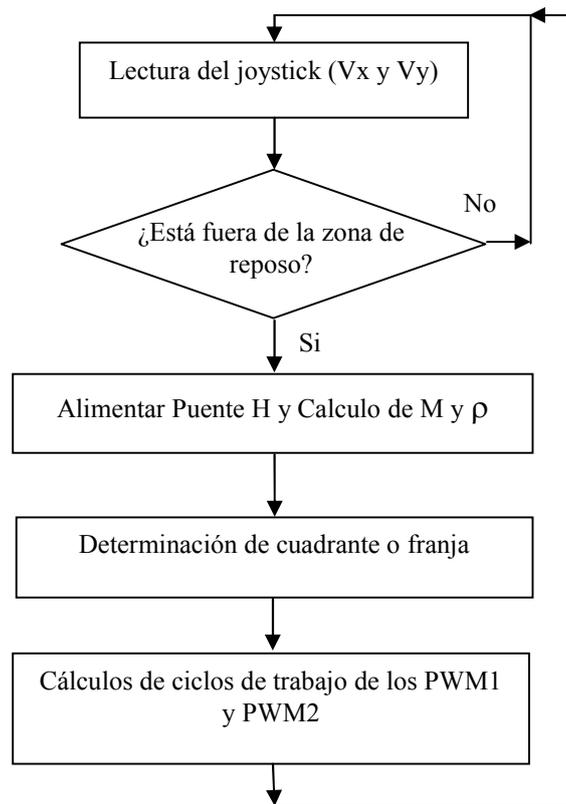


Fig. 9. Diagrama de flujo

9 Resultados y discusión

El sistema descripto fué probado en tres diferentes modelos de sillas inyectando las señales de PWM, generadas por el circuito desarrollado, al circuito denominado puente H que excitan los motores de continua. Esta adaptación funcionó en todos los casos ya que el puente H es un circuito típico para esta aplicación y solamente cambia la capacidad de manejo de corriente, y las entradas al mismo son comunes en todos.

Es importante tener presente que los problemas habituales en este tipo de sillas es la falla en el circuito de control que comprende en todos los casos a un procesador y un algoritmo propietarios, que en este trabajo se proponen reemplazar. En el caso poco probable de dañarse el puente H, el mismo es de fácil sustitución basandose simplemente en las especificaciones de potencia de los motores a controlar.

En cuanto al desplazamiento se logró que sea suave gracias a la disposición de cuadrantes implementada, que logra una distribución de velocidad y sentido de giro de los motores que sigue en todo momento el desplazamiento del joystick.

Conclusiones

El desarrollo descrito en este trabajo, se caracteriza por su sencillez, bajo costo y eficiencia de funcionamiento.

Los resultados obtenidos mostraron un comportamiento estable y altamente maniobrable al disponer en todo momento del conjunto completo de movimientos. Esto último se debió principalmente a la distribución de zonas de movimiento descriptas.

Es de destacar la autonomía obtenida, respecto del circuito original y de otros modelos de sillas. La razón de esta característica, es el bajo consumo del circuito de control debido a su sencillez y el hecho de contemplar en el algoritmo, encender el puente H únicamente cuando se detecta un movimiento del joystick. De esta forma el consumo en reposo es de solo 30 mA.

El sistema fue optimizado durante las pruebas de funcionamiento sobre la silla descripta y posteriormente se aplicó en dos sillas de diferentes características logrando su adaptación inmediata.

Todos los componentes electrónicos utilizados en este desarrollo están disponibles en el mercado local, posibilitando una sustitución rápida y económica de estos sistemas. Estos aspectos son fundamentales para el usuario habitual de este medio de movilidad.

Referencias

1. C.D. Rigano, J.P. Bottani, A. Romano, R. Moro Zubillaga y O.A.A. Orqueda, Sistema de control de una silla de ruedas motorizada para personas cuadripléjicas. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Bahía Blanca.
2. C. Huddleston, Intelligent Sensor Design using the Microchip dsPIC. Amsterdam ; Boston: Elsevier/Newnes, 2007, pp. 283.
3. D. Ding and R. A. Cooper, "Electric powered wheelchairs," Control Systems magazine, IEEE, vol. 25, pp. 22-34, 2005.
4. H. Ghaffari Nik, Hum-Power Controller for Powered Wheelchairs, Graduation thesis, George Mason University, 2007.
5. J. Miyata, Y. Kaida, M. Toshiyuki, "v-ψ CoordinateBased Power-Assist Control of Electric Wheelchair for a Caregiver," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, pp. 2517-2524, June 2008.
6. J. Sanchez and M. P. Canton, Microcontroller Programming : The Microchip PIC. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007, pp. 804.
7. P.W. Hsueh, M.C. Tsai, H.T. Pan, and A. Grandjean, "Integrated synchronized motion control for a force sensorless power-assisted wheelchair," Proceedings of the 18th IFAC World Congress, pp. 5956-5961, 28 Aug.-2 Sept. 2011
8. Synchronized motion control for 2D joystick-based electric wheelchair driven by two wheel motors Mi-Ching Tsai ; Po-Wen Hsueh Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2012 IEEE/ASME International Conference on Digital Object Identifier: 10.1109/AIM.2012.6266027 Publication Year: 2012 , Page(s): 702- 707.