

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE UN BIPEDESTADOR

Nelson Aros

Marcela Aros

Cristian Hernández

Universidad de La Frontera, Departamento de Ingeniería Eléctrica

Abstract

A vehicle currently being developed for people with mobility disabilities and a prototype low-cost child stander was built. For a person with motor disabilities is very important to have a device that allows you to navigate autonomously and safer, more important even when this device allows you to take a standing position, because from the medical point of view to remain upright has multiple benefits. From the technological point of view, it is important to take advantage existing technologies, in this case, in terms of efficiency and versatility to use solid state electronic devices and micro-controlled systems that allow this stander a more energy efficient and safe.

This paper presents the design of a control system for a microcontroller-based child standing frame devices and solid state power, achieving a shift system according to user requirements. Specifically, we implemented a speed control system of low cost, energy optimization system considering also the charging system and battery diagnostics, and an interface for viewing and modifying some parameters of the system to be adaptable to multiple users.

Keywords: *child Stander, energy efficiency, man-machine interface*

Resumen

Actualmente se está desarrollando vehículos para personas con discapacidad motriz, así nace un prototipo de bipedestador infantil de bajo costo y de contexto local. Para una persona con discapacidad motriz es muy importante disponer de algún dispositivo que le permita desplazarse de forma segura, más importante aún cuando este dispositivo le permite adoptar una posición bípeda, ya que desde el punto de vista médico el permanecer erguido tiene múltiples beneficios. Desde el punto de vista tecnológico, es importante el aprovechar las tecnologías existentes, en este caso, en términos de eficiencia y versatilidad el uso de dispositivos electrónicos de estado sólido y de sistemas microcontrolados permiten hacer de este bipedestador un sistema más eficiente energéticamente y seguro.

Este trabajo presenta el diseño de un sistema de control para un bipedestador infantil basado en microcontroladores y dispositivos de potencia de estado sólido, lográndose un sistema de desplazamiento según los requerimientos del usuario. Específicamente, se implementó un sistema de control de velocidad de bajo costo, considerando optimización energética del sistema, además el sistema de carga y diagnóstico de las baterías, y una interfaz que permita visualizar y modificar algunos parámetros del sistema para que sea adaptable a múltiples usuarios.

Palabras clave: *bipedestador infantil, eficiencia energética, interfaz hombre-máquina*

1. Introducción

El ser humano desde que nace y a medida que va creciendo, siente la necesidad de interactuar con el entorno y con quienes lo rodean, lamentablemente -por una u otra razón- hay personas que nacen con alguna discapacidad o bien la adquieren con el paso del tiempo, que les impide desenvolverse a gusto en su entorno diario. Para una persona con discapacidad motriz es muy importante disponer de algún dispositivo que le permita desplazarse de forma autónoma y sin correr riesgos, más importante aún cuando este dispositivo le permite adoptar una posición bípeda, ya que desde el punto de vista médico el permanecer erguido tiene múltiples beneficios.

Nuestra universidad ha desarrollado un prototipo de un bipedestador infantil de bajo costo de producción y acorde con el contexto local; en una primera etapa, el prototipo permitió que una persona con discapacidad para caminar adopte una posición bípeda y pueda trasladarse de un lugar a otro en forma autónoma (Aros, 2010). Para ello, el prototipo es impulsado por dos motores de corriente continua accionados por un actuador basado en relés, donde el usuario a través de un joystick puede dirigir el móvil.

Por otro lado, el acelerado crecimiento de la electrónica de potencia y los circuitos auxiliares en accionamientos eléctricos de motores -en las últimas dos o tres décadas- ha generado un auge en convertir la energía eléctrica en energía mecánica, siendo esta conversión cerca de dos tercios de la energía eléctrica mundial. Los accionamientos modernos son controlados mediante el uso de dispositivos basados en electrónica de potencia. La unión de la electrónica de potencia con los motores, principalmente ha logrado que los procesos puedan ser controlados de forma más eficiente y con más grados de flexibilidad que las técnicas antiguas (Rashid, 1995; Bose, 1986).

Para sistemas de tracción de baja potencia, un típico sistema de control para los motores de corriente continua disponen de puentes H basado en MOSFET's (el término "puente H" proviene de la típica representación gráfica del circuito y éste se construye con 4 interruptores de estado sólido.). En este caso, la fuente de alimentación es una batería de 12 V para los motores de corriente continua y para el control de la velocidad se manipula la tensión media a los motores, a través de los semiconductores del puente, la lógica de disparo y de control para el actuador está programado en un microcontrolador de propósito general. Una de las técnicas más utilizadas para el control es mediante una señal con modulación de ancho de pulso -PWM, Pulse Width Modulation-, para lo cual se necesitan dispositivos de interrupción o "switching" que operen a altas frecuencias, o sea, la mejor opción en este caso es un "driver" basado en MOSFETs, o bien IGBTs (Chauprade, 1986).

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Diseñar un sistema de control para el desplazamiento de un bipedestador infantil basado en microcontroladores y dispositivos de potencia de estado sólido.

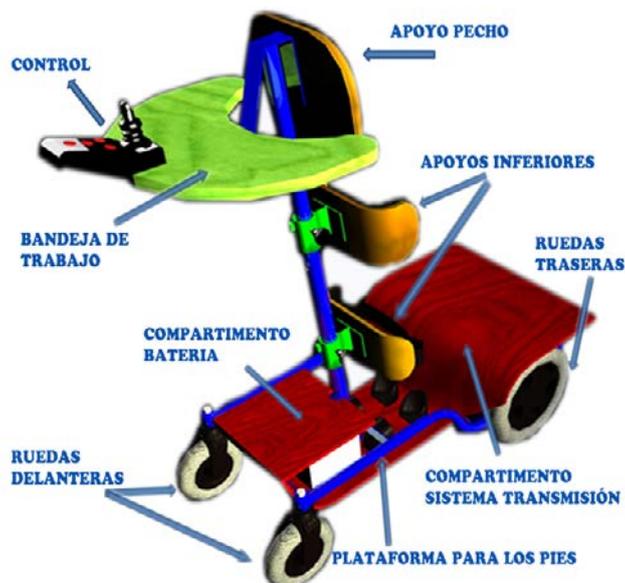
2.2 Objetivos Específicos

- Implementar un sistema de control de velocidad para el bipedestador de bajo costo, considerando además optimización energética del sistema al incorporar un sistema de carga de baterías en el equipo.
- Lograr un sistema de desplazamiento para discapacitados de fácil operación, que proporcione movimientos suaves al iniciar la marcha, al detenerse y al girar.
- Diseñar una interfaz que permita visualizar y modificar algunos parámetros del sistema para que sea adaptable a múltiples usuarios.

3. Materiales y Métodos

Se dispone de un bipedestador diseñado y ensamblado, ver figura 1, el cual consta estructuralmente de un chasis metálico, apoyos para el usuario (rodillas, cadera, y pecho), una bandeja de trabajo, compartimientos para la batería y la transmisión, ruedas delanteras (ruedas locas), y las ruedas traseras unidas a la transmisión (Aros, 2010).

Figura 1. Vista isométrica del bipedestador diseñado



Para el diseño del sistema de control, como también para el diseño del cargado integrado al equipo se cuenta con:

- (i) 2 puentes-H Robot-Power, 28 V, 25 A, PWM hasta 20 KHz, basado en MOSFETs, interfaz lógica de 3 a 5 V, con sensor de corriente,
- (ii) una batería VRLA recargable de 12 V, y 40 Ah,
- (iii) 2 motores DC de 12 V, 350 W, 55 rpm, con caja reductora 1/65,
- (iv) un microcontrolador de la serie PIC16F87XA,
- (v) un display LCD alfanumérico de 1 línea, 16 caracteres,
- (vi) un Joystick análogo de dos ejes,
- (vii) un entorno de desarrollo MPLAB (Lenguaje C, y compilador CC5X Free),
- (viii) para el sistema de carga de la batería, consiste en un convertidor DC-DC reductor conmutado tipo Buck.

El diseño de esquemáticos y simulación de los circuitos microcontrolados se realiza principalmente en el software ISIS de Proteus, el cual permite la carga de programas al microcontrolador como también emular su funcionamiento. Lo cual facilita la detección de posibles errores en las rutinas creadas, antes de implementar la aplicación real.

La implementación de los circuitos diseñados, se realiza inicialmente en Protoboard, para probar su correcto funcionamiento. Luego los componentes son montados en placas de circuito impreso, las cuales son diseñadas en el software ARES de Proteus, y posteriormente ruteadas en una Fresadora Bungard CCD.

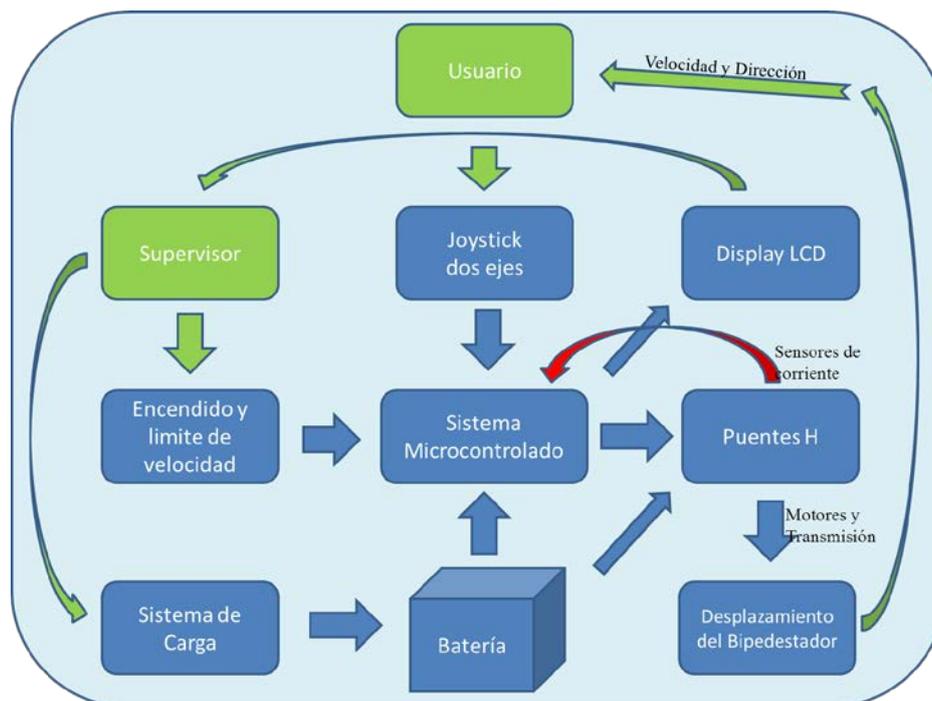
Por otro lado, los microcontroladores pueden ser programados utilizando el lenguaje Assembly creado por el fabricante de estos, pero resulta más fácil crear programas en lenguajes de alto nivel y utilizar un compilador para convertirlos al lenguaje de cada familia de microcontroladores. Un programa codificado en lenguaje C resulta muy útil en la aplicación de microcontroladores, dado que su compilación es bastante eficiente y óptima acercándose a la codificación de lenguaje de máquina. Lo descriptivo de la sintaxis permite elaborar de mejor forma los algoritmos olvidándose de los molestos 'push' y 'pop' usados en el lenguaje de máquina cuando se usan saltos a subrutinas.

El entorno de desarrollo MPLAB de Microchip permite el trabajo con el microcontrolador incorporando al editor y herramientas de simulación, y un compilador proporcionado por otro fabricante, en este caso el compilador C -CC5X desarrollado por B. Knudsen-. Para este trabajo fue de mucha utilidad el escribir las rutinas en lenguaje de programación C, mediante el compilador CC5X, ya que los registros del microcontrolador vienen definidos en un archivo de cabecera (.h), así se puede acceder directamente a los registros al igual que a sus bits individuales.

4. Sistema de Control

El diagrama de bloques del sistema propuesto se puede ver en la figura 2.

Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de control del bipedestador



A grandes rasgos, el sistema de control del bipedestador consiste en sistema en lazo abierto, donde el usuario entrega las consignas al sistema a través del joystick –velocidad y dirección-. Luego, el sistema microcontrolado es el encargado de procesar los datos adquiridos (consignas, estado batería, corriente consumida por los motores), y de suministrar las señales PWM de comando a los Puentes-H, de este modo se controla la energía aplicada a los motores DC -teniendo así el control de la velocidad y la dirección en lazo abierto-. La velocidad de giro de cada motor es proporcional al voltaje promedio aplicado en sus terminales de armadura, que depende del ciclo de trabajo o duty del PWM

proporcionado por la posición en que se encuentra el joystick, al igual que el sentido de giro de los motores.

Por otro lado, el bloque supervisor se encarga de energizar el bipedestador, seleccionar el límite de velocidad, conectar el sistema de carga cuando sea necesario, además puede visualizar en un display LCD el estado de carga de la batería, el límite de velocidad seleccionado, y algunos mensajes de seguridad.

4.1 Sistema Microcontrolado

Como se mencionó anteriormente, el bipedestador es impulsado por dos motores DC de 12 V, los cuales son accionados por dos Puentes-H Robot Power. Cada Puente-H dispone de dos entradas PWM para su funcionamiento, así el sistema de control dispone de 4 salidas PWM, además de las salidas y entradas digitales, como también de las entradas analógicas para la captura de datos.

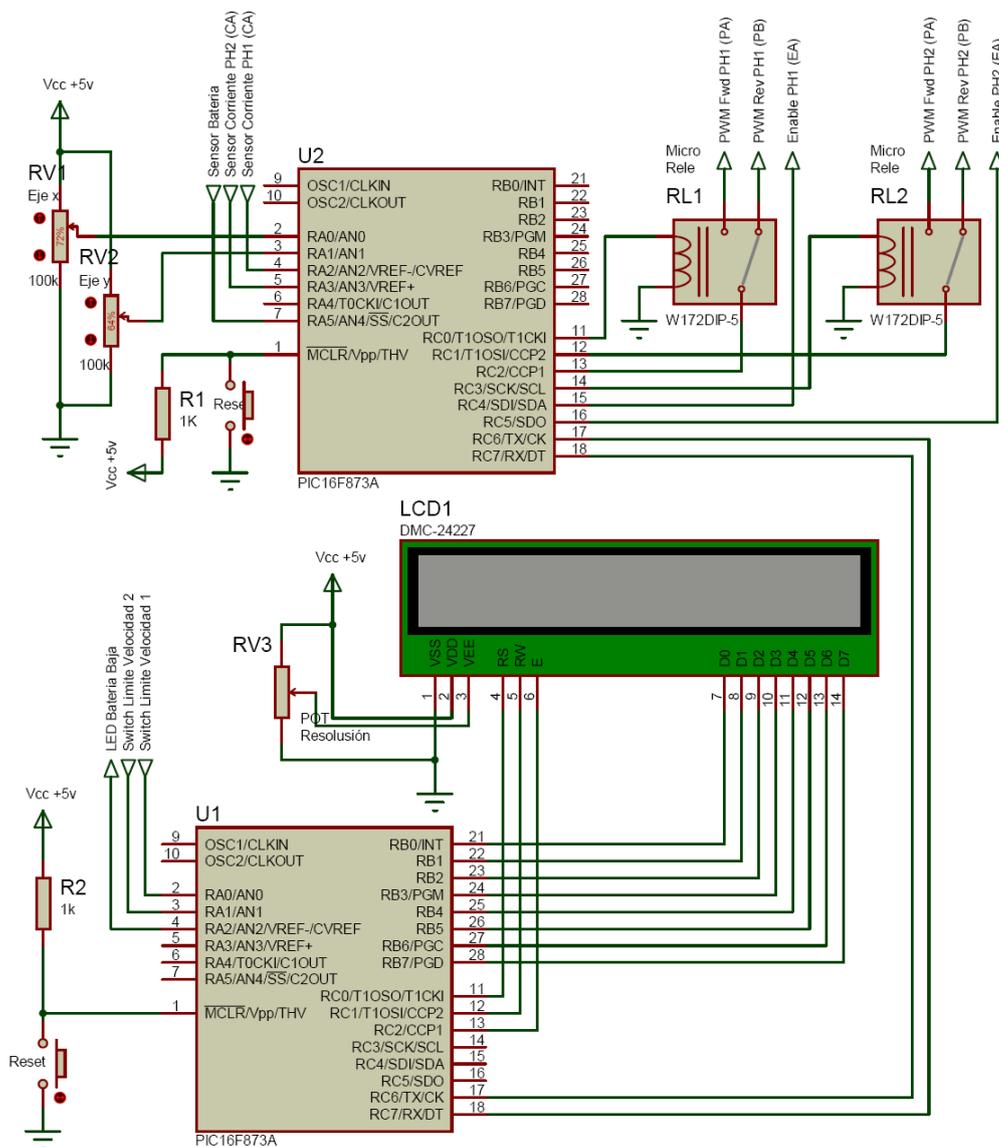
Ya que el sistema de control está basado en microcontroladores, se escogió uno que cubría la cantidad de requerimientos solicitados -el microcontrolador PIC16F873A-. Éste posee tres puertos entrada/salida que pueden ser configurados bit a bit, algunos de éstos pueden tener más de una función. De esta manera se pudo contar con 2 módulos PWM, 5 entradas analógicas, módulo de comunicación USART, y varios pines de entrada/salida digitales, además de tener una memoria de programa de 4 kb, que opera con un reloj desde 4 hasta 20 [MHz]. Dado que el PIC16F873A posee solo dos módulos PWM, y que existió la necesidad de contar con 4 puertos PWM para conectar los Puentes-H. A pesar de contar con más de un microcontrolador, se desea que sólo uno se encargue de controlar ambos motores, y otro que provea una interfaz que permita visualizar y modificar algunos parámetros del sistema.

Dadas estas condiciones se presenta la siguiente solución - ver la figura 3-:

- Cada Puente-H requiere de dos señales PWM, una para polarizar el motor en directa (PA), y otra para polarizarlo en reversa (PB), las cuales se utilizan una a la vez. Por esta razón se decidió utilizar un dispositivo capaz de llevar la señal de PWM proveniente de un puerto del PIC, a dos puertos del Puente-H. Inicialmente se disponía de dos opciones, usar dispositivos digitales como decodificadores o demultiplexores, o utilizar un micro-relé SPDT. Finalmente se opta por utilizar un micro-relés Magnecraft W172DIP-5 tipo SPDT, ya que estos no requieren de líneas de alimentación, líneas de selección de salidas, o dispositivos extras como compuertas lógicas, haciendo que el diseño del circuito impreso sea más sencillo de implementar. Por otra parte, los micro-relés serán accionados solo en los cambios de giro de los motores por lo tanto no se necesita un dispositivo capaz de conmutar a alta velocidad.
- El microcontrolador U1, se encarga de presentar información a un supervisor a través de un display LCD, también tiene conectado dos switches para seleccionar límites de velocidad para el bipedestador. Adicionalmente, se cuenta conectado un LED -montado en el joystick- que parpadea cuando la batería se encuentra con un bajo nivel de carga, de esta forma el usuario es alertado que la batería debe ser recargada. Este microcontrolador tiene incorporados varios retardos en sus rutinas, debido a que el display LCD opera a una frecuencia mucho más baja que el microcontrolador y la información que muestra el visor debe permanecer el tiempo suficiente como para ser leída por el usuario. Debido a esto, este PIC no puede ser utilizado para el accionamiento de los motores, ya que opera muy lento en comparación con el microcontrolador U2.
- El microcontrolador U2, se encarga de controlar la velocidad y dirección del bipedestador accionando los motores a través de los Puentes-H, mediante señales

lógicas y PWM. El control de la velocidad se realiza en lazo abierto, depende únicamente de la posición del joystick (potenciómetros RV1 y RV2, conectados a los puertos análogos AN0 y AN1, de U2), para evitar movimientos bruscos en el desplazamiento del bipedestador, se incorporaron rampas de aceleración en las rutinas.

Figura 3. Sistema de control propuesto



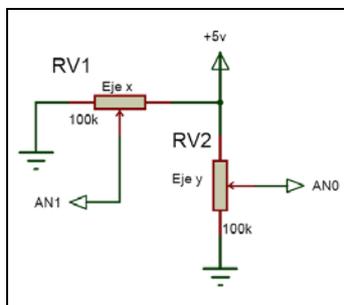
4.2 Joystick (Interfaz Hombre-Máquina)

Se utiliza un joystick de dos ejes -proporciona dos señales analógicas que reflejan la posición en que se encuentra-, consta de dos potenciómetros, uno por cada eje, los cuales se usan como un doble divisor de tensión. Ambos potenciómetros se encuentran montados en un mecanismo que permite el retorno a una posición central de reposo, cuando se deja de accionar la palanca. El joystick fue reciclado, se utilizaba para juegos de PC.

La figura 4 muestra el esquema eléctrico interno del joystick. En situación de reposo el eje de cada potenciómetro se supone centrado. La tensión de salida que ofrece en esa posición

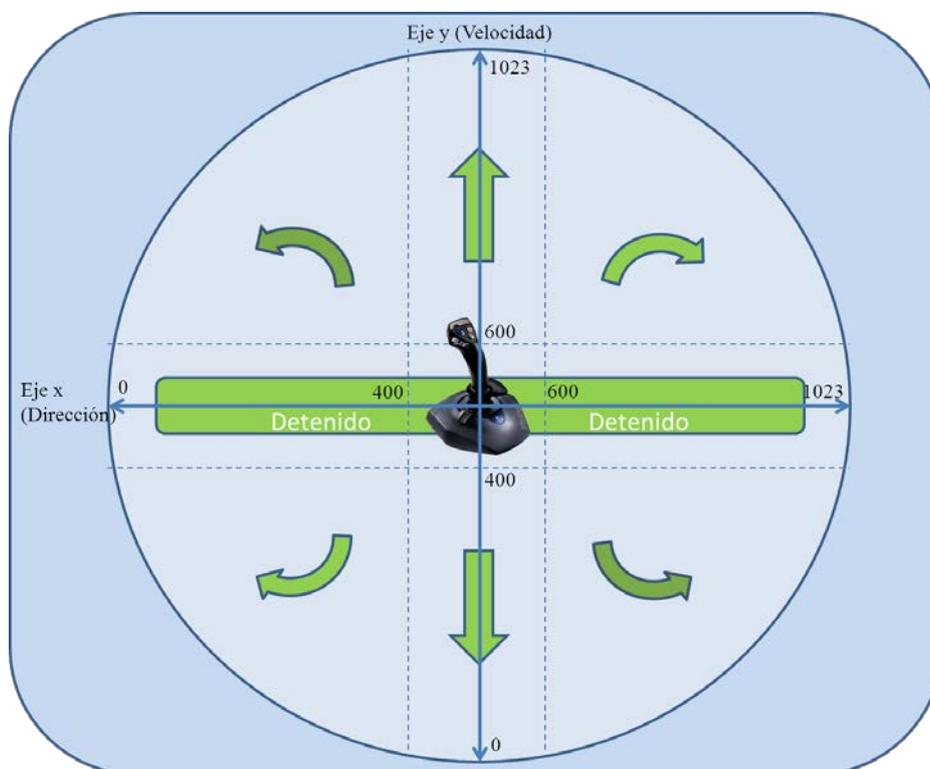
es aproximadamente 2.5 V. A medida que se vayan moviendo en un sentido o en otro la tensión de cada salida aumenta hasta 5 V, o disminuye a 0 V.

Figura 4. Diagrama eléctrico Joystick análogo de dos ejes



En la figura 5 se presenta un diagrama de las posiciones del joystick, respecto a los valores resultantes de la conversión del módulo análogo/digital del microcontrolador PIC16F873A; el cual codifica un dato análogo entre 0-5 V a binario de 10 bits. Cuando la palanca del joystick se encuentra centrada en reposo, teóricamente ambos potenciómetros debieran estar en la misma posición central y los valores leídos por el microcontrolador en ambos ejes debieran ser idénticos. Esto no es exactamente así debido a los errores típicos de cualquier sistema mecánico. Por esta razón se divide el área de posiciones posibles, en rangos de valores que son válidos para diferentes rutinas en el microcontrolador. Luego de algunos arreglos matemáticos en las rutinas, el valor 0 tanto para eje X como para eje Y, se ajunta cuando el joystick se encuentra totalmente en reposo (centrado). Así, todos los movimientos se consideran relativos respecto al centro.

Figura 5. Diagrama conversión ADC Joystick



4.3 Puentes-H (Interfaz de Potencia)

El puente H Robot Power -figura 6- es un amplificador de potencia de bajo costo y fácil conexión, que puede ser utilizado como un puente H (H-bridge), o como dos semi-puentes (Half-bridge). Este puente H, fue diseñado para motores DC de imán permanente, pero puede ser utilizado para una gran variedad de cargas DC, siempre que estén dentro de los límites de voltaje y corriente que soporta el módulo. Está construido con dos chips Half-bridge BTS7960B, de Infineon Technologies, los cuales pueden ser accionados juntos o de forma independiente, según la configuración de los Jumpers y entradas presentes en el módulo. La tabla 1 presenta las características del Puente-H Robot Power.

Figura 6. Puente H Robot Power

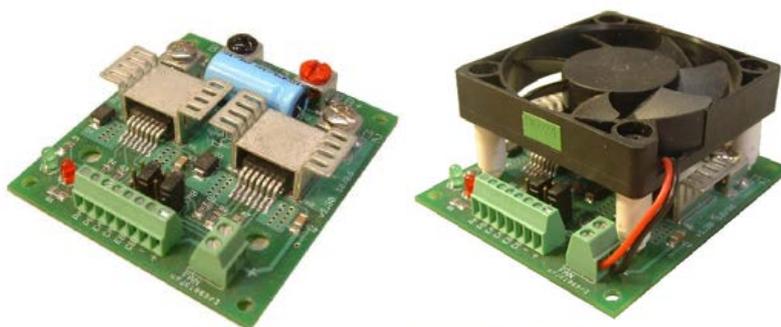


Tabla 1. Características Puente-H Robot Power

	Sin ventilador	Con ventilador
Rango de voltaje	5-24 [V] (Maximo 28 [V])	5-24 [V]
Corriente a 100% Duty Cycle	20 [A]	25 [A]
Corriente a 70% Duty Cycle	17 [A]	20 [A]
Peak de corriente	45 [A] por 5 segundos	45 [A] por 5 segundos
Frecuencia del PWM	DC-20 [kHz]	DC-20 [kHz]
Salida sensor de corriente	$V_c = I * 0.075$	$V_c = I * 0.075$
Rango de voltaje entradas de control PA,PB,EA,EB	2.5-5.5 [V] = 1 Logico <1.7 [V] = 0 Logico	2.5-5.5 [V] = 1 Logico <1.7 [V] = 0 Logico
Dimensiones	2.5" x 2.25" x 0.5"	2.5" x 2.25" x 0.75"
Peso	37 [g]	61 [g]
Ventilador	---	50 [mm] x 10 [mm] 12 [V]

Este módulo puede ser configurado para utilizarse de varias formas, ver su manual. Para esta aplicación, solo se utilizara como Puente-H, para controlar la velocidad y sentido de giro de motores DC mediante PWM. En la figura 7, se presenta la conexión para la batería y el motor en el módulo. Mientras que en la tabla 2 se encuentra la configuración de los jumpers, y las entradas y salidas necesarias para su funcionamiento.

El Puente-H cuenta con dos Jumpers para seleccionar la forma en que se habilitan los chips Half-bridge, y la forma en que son leídos los sensores de corriente. En el conector J1 de la Figura 7, cuando los jumpers se posicionan en EA y CA, ambos chips se habilitan juntos y la corriente leída provendrá de los sensores de ambos chips. Si se desea habilitar los chips y/o sensor la corriente por separado, los jumpers deben ser cambiados a la posición EAB o CAB respectivamente. Se debe tener en cuenta que si los jumpers no están montados en alguna posición, no se podrá habilitar el chip B, o no podrá ser medida la corriente de éste.

Figura 7. Conexión de batería y motor al Puente-H Robot Power

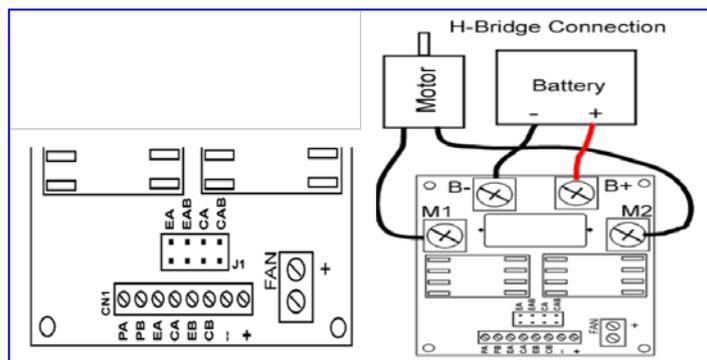


Tabla 2. Conector CN1 Puente-H Robot Power

PA	Entrada de PWM-A, acciona el chip Half-bridge IC1.
PB	Entrada de PWM-B, acciona el chip Half-bridge IC2.
EA	Habilita IC1 e IC2 cuando el jumper EA está montado, o solo el chip IC1 cuando el jumper está en EAB.
EB	Habilita IC2, solo cuando el jumper está en EAB.
CA	Salida del sensor de corriente de IC1 cuando el jumper CAB está montado, o la combinación de los sensores de IC1 e IC2 cuando el jumper está en CA.
CB	Salida del sensor de corriente de IC2, solo cuando el jumper CAB está montado
-	Terminal negativo de la batería (GND), se conecta a la referencia de las señales de control.
+	Terminal positivo de la batería, salida para conectar un regulador de voltaje para el sistema de control. No se debe conectar una fuente de alimentación externa a este terminal.

5. Sistema de Carga de la batería

El sistema de carga de la batería, consiste en un convertidor DC-DC reductor conmutado tipo Buck, el cual es muy sencillo de implementar, ya que solo utiliza un transistor para controlar el flujo de energía, y además tiene una alta eficiencia, sobre el 90%. Un inconveniente que se presenta es polarizar el transistor para activarlo y desactivarlo, para lo cual es necesario disponer de una segunda fuente de energía con una referencia independiente.

En este caso se dispone de una batería recargable VRLA (Valve Regulated Lead Acid), de 12 V, 40 Ah, de libre mantención. Para recargar esta batería se decidió utilizar un método de carga lenta, para lo cual se implementó un convertidor DC-DC reductor tipo Buck, capaz de proveer una corriente de carga promedio de 3 A, y un voltaje en torno a los 14 V. De esta manera la batería podrá recargarse durante las noches, durante un tiempo aproximado de 15 horas.

El cálculo de los elementos para la implementación se realizó basándose en los materiales disponibles, por ejemplo el transformador AC 220-29 Vrms, fue reciclado, al igual que la bobina de la etapa de conmutación, la cual fue extraída de una fuente de alimentación, para rescatar el núcleo tipo toroide y luego rebobinarlo. Luego mediante simulaciones de ensayo y error, con configuraciones conocidas y basándose en los requerimiento de carga, se determinó el valor de condensadores, características de diodos, el transistor, y la frecuencia y ciclo de trabajo del PWM. Las simulaciones del regulador se realizaron en Matlab,

utilizando Simulink, la batería se emuló utilizando un valor de resistencia acorde a los requerimientos de carga, y un transistor MOSFET como conmutador, ver figura 8.

Figura 8. Esquema del regulador conmutado en ambiente Simulink

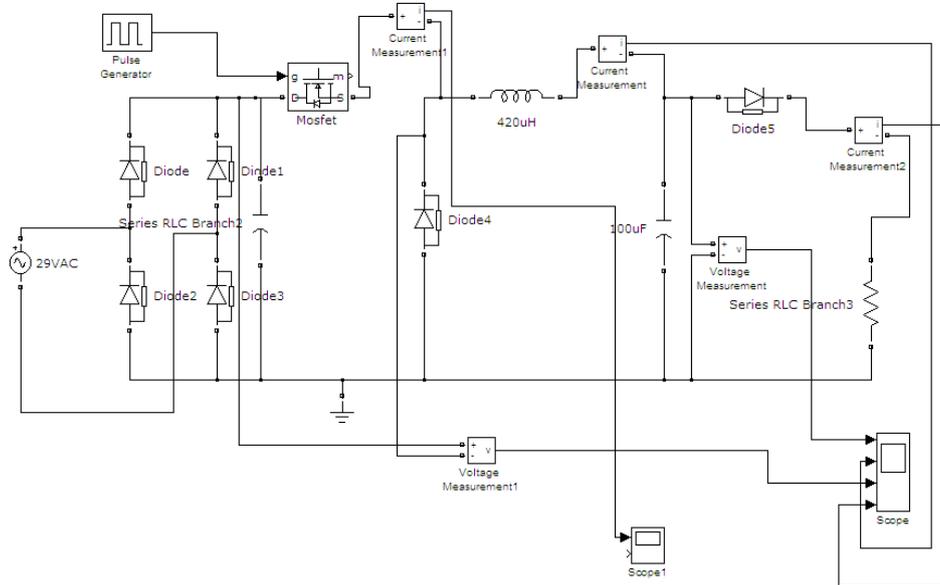
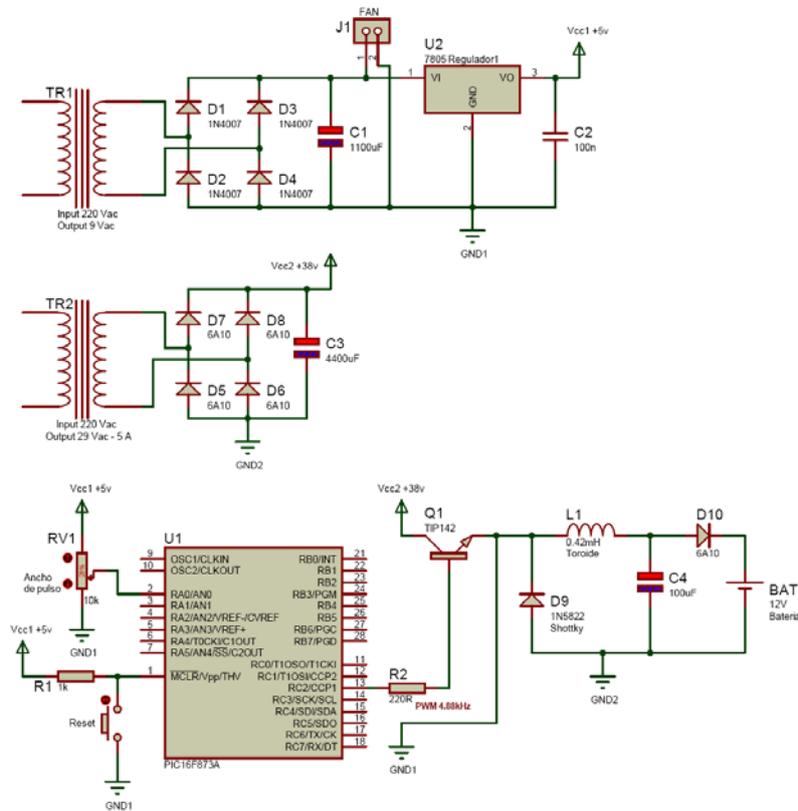


Figura 9. Esquemático del sistema de carga de batería



Como resultado de las simulaciones se obtiene un regulador de voltaje conmutado, que entrega un voltaje de salida en torno a 14 V, corriente de salida en torno a 3 A, corriente

promedio en la bobina en torno a 3 A, esto, conmutando el transistor con una señal PWM de 5 kHz, a un ciclo de trabajo del 40%.

5.1 Circuito implementado

El circuito consta de dos transformadores, uno que alimenta el microcontrolador que genera el PWM, y el otro que provee la energía para la carga de la batería, cada uno con referencia a tierra distintas. El ancho del pulso depende de la posición del potenciómetro RV1, y la frecuencia de operación es de 4.88 kHz. Como dispositivo de conmutación se utiliza un transistor TBJ TIP142 ya que es mucho más fácil de accionar que un MOSFET.

5.2 Pruebas al Convertidor Buck

Una vez implementado el convertidor Buck se procedió a probarlo cargando la batería, inicialmente el potenciómetro que determina el ancho del pulso se encuentra en el mínimo, luego con los instrumentos de medición conectados (Voltímetro, Amperímetro y Osciloscopio), se procede a aumentar el ancho del pulso hasta conseguir una corriente de carga de aproximadamente 3 A.

6. Conclusiones

En relación con la propuesta del diseño de sistema de control del bipedestador presentado en este trabajo, se concluye que los cambios en el prototipo actual permiten obtener un prototipo más competitivo en el mercado y con mayor proyección, en autonomía y eficiencia energética.

Para finalizar, el presente trabajo deja en manifiesto que es posible dar respuestas apropiadas a las necesidades específicas de los discapacitados y brindar un apoyo para su integración.

Referencias

- Aros, M., Aros, N., & Castillo, R., (2010) Equipamiento para la Discapacidad: Propuesta de un Bipedestador Eléctrico Infantil. XIV International Congress on Project Engineering. Madrid - España, 2010.
- Bose, B.I., (1986) *Power electronics and AC drives*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall Inc., 1986, 402 p.
- Chauprade, R., (1986) *Control electrónico de los motores de corriente continua*. Barcelona, Editorial Gustavo Gili, 2ª Edición, 1986. 208 p.
- Rashid, M., (1995) *Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones*, 1995, México, Prentice-Hall Hispanoamericana, 702 p.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nelson Hernán Aros Oñate.
Phone: + 56 45 325520 Ext. 5547
Fax: + + 56 45 325550
E-mail: naros@ufro.cl