

# Diseño y construcción de un sistema de regeneración de energía con ultracapacitores para una bicicleta

Jorge Navarrete, Mario Vega, Nelson Sotomayor

Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador

**Resumen** – En este proyecto se presenta el diseño y construcción de una bicicleta asistida con regeneración de energía en ultracapacitores. Este tipo de bicicleta se presenta como un medio de transporte alternativo, cuyo uso está orientado al segmento de la población que no puede usar una bicicleta convencional por el gran esfuerzo físico que se debe realizar en ciertos trayectos.

La bicicleta cuenta con sensores de velocidad y torque los cuales le brindan al sistema la información necesaria para manejar el aporte de potencia del motor. La asistencia proporcionada por el motor cumple con las normas europeas correspondientes a la legislación de bicicletas eléctricas en la cual se establece que la potencia aportada por el motor es menor al 50% de la potencia total del sistema y disminuye progresivamente hasta ser nula a los 25 Km/h.

Para aumentar la autonomía del sistema se trata de aprovechar la energía mecánica de la bicicleta transformándola en energía eléctrica y luego regenerándola a los ultracapacitores. Para este proceso y el posterior uso de esta energía es necesario el uso de un convertidor bidireccional que administre tanto la energía que recibe como la que entregan los ultracapacitores.

**Índices** – *Bicicleta asistida, control difuso, convertidor bidireccional, PMSM, ultracapacitor.*

## I. FUNDAMENTOS BÁSICOS

### A. Bicicleta asistida [1]

La bicicleta eléctrica es un vehículo eléctrico cuya estructura básica es la de una bicicleta tradicional a la cual se ha acoplado un motor eléctrico para proporcionar ayuda al usuario durante su desplazamiento. La energía suministrada al motor proviene de una batería la misma que puede recargarse mediante un cargador que se conecta a la red eléctrica.

Las bicicletas que incorporan un sistema de pedaleo asistido denominado PAS por sus siglas en inglés (Pedal Assistant System), tendrán una asistencia por parte del motor solamente cuando el ciclista pedalee, es decir que el motor le sirve al ciclista únicamente como apoyo. La fuerza que el

J. Navarrete, (e-mail: jorge\_navarrete\_chang@hotmail.com).

M. Vega, (e-mail: mariovega.t@hotmail.com).

N. Sotomayor, es Profesor Principal T/C en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de La Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, (e-mail: nelson.sotomayor@epn.edu.ec).

ciclista aplica sobre el pedal es monitoreada mediante un sensor que envía su señal a la unidad de control que se encarga de activar el motor y regular la potencia del mismo dependiendo del esfuerzo del ciclista. La potencia que proporciona el motor disminuye progresivamente y se elimina por completo cuando el vehículo alcanza una velocidad de 25 Km/h o antes si el ciclista deja de pedalear.

### B. Motor sincrónico de imanes permanentes [2]

El motor sincrónico de imanes permanentes (PMSM), es un motor de corriente alterna sincronizado, cuyo campo de excitación es proporcionado por imanes permanentes. El estator del motor está construido por bobinados y el rotor que es la parte móvil está constituido por imanes permanentes.

Un PMSM es alimentado a través de un inversor. La velocidad del motor es fija y está sincronizada con la frecuencia del inversor con cualquier torque mientras se encuentre en el rango de funcionamiento del mismo. Por este motivo son ideales para equipos de alta precisión de velocidad fija.

### C. Ultracapacitor [3]

El término ultracapacitor o supercapacitor se emplea para dar nombre a nuevos dispositivos que llevan las capacidades de almacenamiento de energía de los condensadores tradicionales a una nueva escala (miles de faradios). Esto ha permitido que los condensadores se estén abriendo a múltiples campos de aplicación que antes eran impensables.

Los ultracapacitores serán de gran utilidad para la nueva generación de vehículos eléctricos, ya que a diferencia de las baterías pueden almacenar o proveer energía eléctrica de forma muy rápida.

Las aplicaciones de los ultracapacitores son variadas y entre las más importantes se tiene:

- Sistemas de freno regenerativo
- Vehículos híbridos como carros, trenes, buses, etc.
- Arranque de acondicionadores de aire
- Almacenamiento y acondicionamiento de energía con paneles solares, sistemas eólicos, etc.

### D. Convertidor DC-DC bidireccional [4]

Un convertidor bidireccional está conformado por un convertidor tipo Buck (Reductor) y un tipo Boost (Elevador) conectados en paralelo, consta de dos interruptores cada uno con un diodo en antiparalelo. El modo de operación depende

de los interruptores y se puede pasar de un modo al otro dependiendo de la configuración de los mismos. Los diodos del convertor son los que dan el carácter de bidireccionalidad.

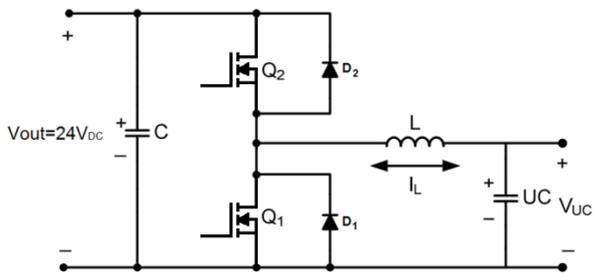


Fig. 1. Esquema del convertor bidireccional usado en el proyecto

E. Control difuso

Los controladores difusos son reguladores no lineales. Por medio de la selección adecuada de funciones de pertenencia y del establecimiento de una base de reglas se pueden compensar no linealidades en el sistema de regulación de procesos [5].

La estrategia de control difusa más usada es la denominada “Mamdani”, este método se caracteriza por su sistema de inferencia en el cual los grados de membreía de las variables de entrada se aplican sobre las reglas de base de conocimiento para generar grados de membreía en los conjuntos difusos de salida [6].

Los controladores difusos del tipo Mamdani constan de cuatro componentes principales:

- Sistemas de codificación
- Base de conocimientos
- Sistemas de inferencia
- Sistemas de decodificación

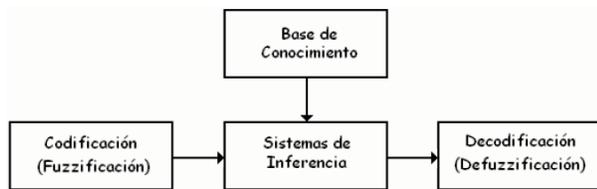


Fig. 2. Estructura general de un controlador difuso Mamdani

II. DISEÑO DEL HARDWARE DEL PROTOTIPO

Para el diseño del prototipo se consideró las normas europeas sobre bicicletas asistidas que establece que la asistencia del motor depende de la fuerza y velocidad con la que pedalee el ciclista. El motor consta de dos baterías como fuente de energía principal y un banco de ultracapacitores (UCs) como respaldo de las baterías. Gracias a las características de los ultracapacitores se puede regenerar la energía proveniente del motor cuando este trabaja como generador (ejemplo: ciclista sin pedalear en una bajada) y posteriormente alimentar al motor con la energía regenerada, la principal ventaja obtenida con este proceso es el aumento de la autonomía energética del prototipo. Para acoplar los voltajes entre motor y UCs (regeneración) y entre UCs y motor (UCs como fuente de

energía) se usa un convertor bidireccional.

El esquema general de prototipo se muestra a continuación:

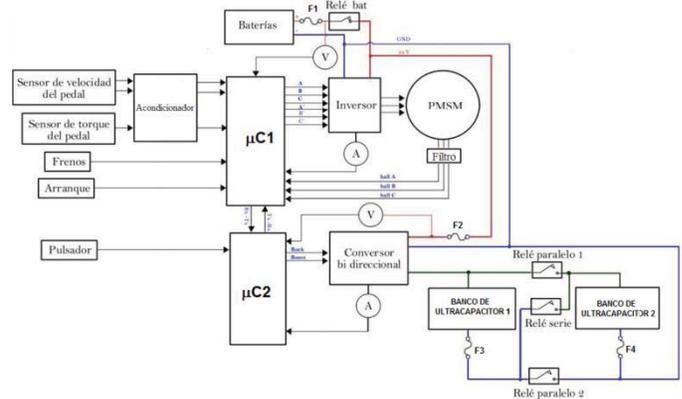


Fig. 3. Esquema general del prototipo implementado

A. Asistencia máxima del motor

El motor que se va a utilizar cumple con los requerimientos establecidos por las normas europeas. Es un motor sincrónico de imanes permanentes que tiene las siguientes características:

TABLA I  
CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR USADO EN EL PROTOTIPO

<b>Voltaje</b>	24V	
<b>Potencia</b>	250W	
<b>Dimensiones</b>	<b>Diámetro</b>	186mm
	<b>Ancho</b>	166mm
<b>RPM/V</b>	10	
<b>Peso</b>	4.5Kg	
<b>Conectores</b>	3 cables de fase, 5 cables de hall	
<b>Montaje</b>	Rueda delantera	

Es importante definir cual es el peso máximo que puede tener el conductor para poder usar la bicicleta. Por norma la ayuda máxima del motor debe ser del 50% de la potencia total necesaria para desplazar la bicicleta, lo cual quiere decir que cuando el motor esté entregando toda su potencia de 250W el ciclista deberá aportar también con 250W de potencia. Entonces la potencia máxima del sistema cuando el motor está asistiendo será de 500W.

Para realizar el cálculo del peso máximo del ciclista se hace la suposición que la pendiente más elevada que se puede sortear con esta potencia es del 14% a una velocidad de 10 Km/h (2.78m/s). La potencia de la bicicleta es igual al producto de la fuerza necesaria para desplazarla y la velocidad con la que lo hace. El resultado de los cálculos da como peso máximo 94Kg, que será el máximo que podrá tener una persona para usar este prototipo.

**B. Circuito de Potencia –Puentes inversor**

El puente inversor es el encargado de realizar las conmutaciones de forma correcta para activar el motor y controlar su velocidad.

Para poder controlar el voltaje aplicado en un determinado período se recurren a las técnicas de modulación PWM, con esto se puede realizar el control de velocidad y torque del motor. Uno de los métodos más simples de control es el llamado conmutación trapezoidal o six-step [6]. Este tipo de conmutación será usada para controlar el motor de este proyecto.

Dado que se va a trabajar en un solo cuadrante con el puente trifásico y con detección de la posición del rotor con sensores de efecto hall, se usará la configuración en modo independiente asimétrico para manejar el motor [6]. Cabe aclarar que la regeneración de energía implica trabajar en otro cuadrante más, pero esto se manejará con el convertidor bidireccional y no con el puente trifásico.

Las señales de control que se entregan al inversor siguen una secuencia específica, esta es determinada por la posición del rotor [7]. Para sensar esta posición se utilizarán sensores de efecto hall que dan una señal digital.

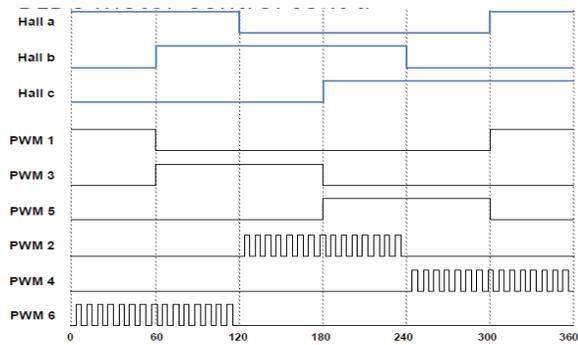


Fig. 4. Señales de control del modo independiente asimétrico

Las señales de control se aplican a un puente inversor trifásico como el de la figura:

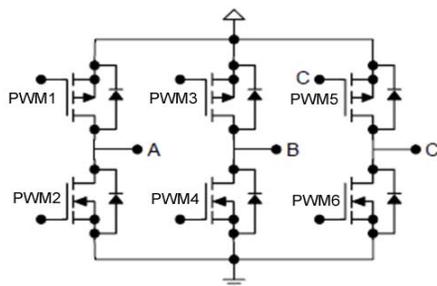


Fig. 5. Puente inversor

El puente de la Fig. 5. está constituido por con seis mosfets canal N, la frecuencia de operación es de 16KHz y debe estar en la capacidad de manejar una carga de 10A, 24V. Se escogieron los mosfets IRFZ44N que son capaces de manejar 49A y 55V además poseen una resistencia de conducción bastante baja de 17.5mΩ lo cual permite disminuir las pérdidas.

**C. Selección de los ultracapacitores**

Para la selección de los ultracapacitores se tomó en cuenta las dos funciones que deberán cumplir, estas son:

- Fuente de energía del motor
- Medio de almacenamiento de la energía regenerada.

Si el voltaje de los UC (ultracapacitores) es pequeño en relación a los 24V de salida, la corriente que estos deben entregar es alta lo que implica que los UC se descargaran mucho más rápido. Teniendo esto en cuenta se decide que el voltaje del banco de UC sea de 15V. Con este voltaje la relación entre el voltaje de salida y el voltaje de entrada (24V/15V), también conocido como factor de conversión, es de 1.6 con lo cual la corriente que deben entregar los UC será 1.6 veces mayor que la corriente de salida. Para conseguir los 15V será necesario poner 6 UC en serie de 2.5V cada uno.

Para que exista regeneración hay que recordar que el voltaje en los terminales del inversor debe ser mayor que el voltaje de los UC. Una persona de condiciones físicas normales puede circular en la ciudad con una velocidad promedio de 20Km/h y según los datos del motor a esta velocidad le corresponde un voltaje de 15V aproximadamente. Esto quiere decir que para que haya regeneración el ciclista debe ir a más de 20 Km/h lo cual dependiendo del trayecto y de la capacidad del ciclista puede resultar complicado. Para solucionar este inconveniente se divide a los UC en dos bancos de 7.5V cada uno con tres condensadores conectados en serie por cada banco. En la siguiente figura se muestra la conexión de UC que se va a utilizar.

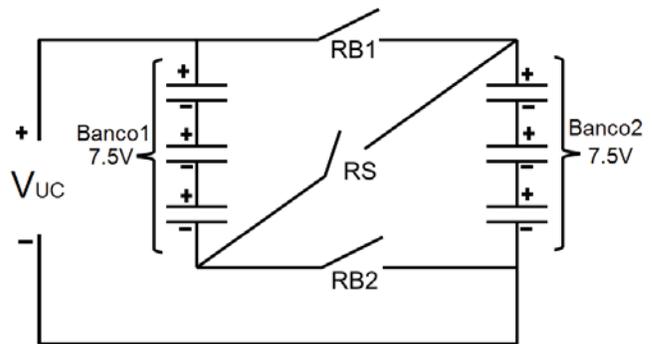


Fig. 6. Conexión de los bancos de ultracapacitores

Para la conexión y desconexión de los bancos se usará tres relés. Cuando se necesite alimentar al motor se cierra RS para poner los dos bancos en serie y obtener los 15V necesarios para esta operación. Cuando se active la regeneración se abre RS y se cierra RB1 o RB2 con lo cual el voltaje que el reductor ve en su salida es 7.5V. Para superar este voltaje y que pueda haber regeneración el ciclista debe ir a más de 10Km/h que es una velocidad mucho más fácil de superar que la velocidad anterior de 20km/h. La decisión de que relé se debe activar para cargar el Banco 1 o 2 se hará vía software.

La capacidad total que tendrá el banco de UC será de 433.33F con los 6 capacitores conectados en serie y tendrá un

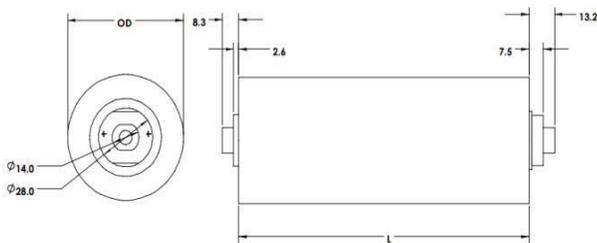
peso total de 3.15Kg. Con esta capacidad se puede calcular la energía que del banco de UC:

$$E_{UC} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{2600F}{6} (15V^2 - 12V^2) = 17550J$$

Si el motor trabaja a su potencia nominal el tiempo que durará la energía de los UC se encuentra con:

$$t = \frac{E_{UC}}{W_{UC}} = \frac{17550J}{250W} = 70.2s$$

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente mencionado se selecciona el Ultracapacitor BCAP0010, fabricado por la compañía MAXWELL, el cual tiene una capacidad de 2600F, un voltaje de 2.5V, una resistencia en serie equivalente (ESR) de 0.7mΩ y pesa 525g.



Modelo	Dimensiones (mm)		Peso[g]	Volumen [L]
	L	OD		
BCAP0010	150	60	525	0.42



Fig. 7. Ultracapacitor seleccionado BCAP0010.

**D. Conversor bidireccional**

Cuando se usa la energía de los ultracapacitores como fuente principal del motor el conversor bidireccional opera en el modo elevador, mientras que si la energía es regenerada hacia los ultracapacitores (PMSM funcionando como generador) el conversor funciona en el modo reductor.

El esquema de conexión del conversor se muestra a continuación:

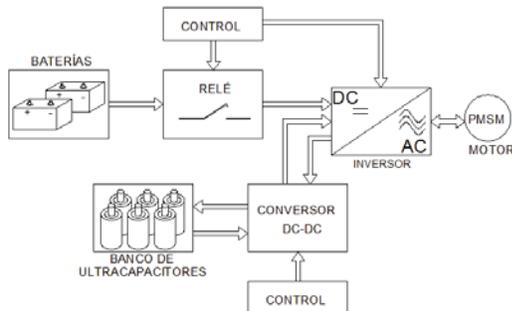


Fig. 8. Esquema general de conexión del conversor DC-DC.

El circuito de potencia del conversor bidireccional debe ser capaz de entregar una salida de 24V a 10 A en el modo elevador y en el modo reductor de 7.5V a 5A.

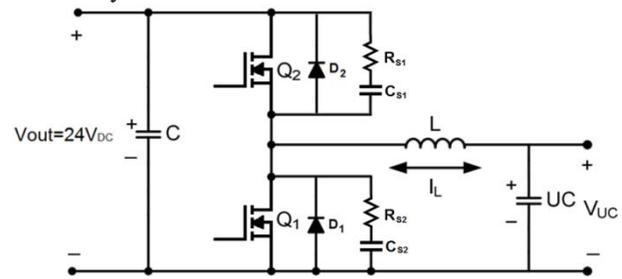


Fig. 9. Circuito de potencia del conversor bidireccional

Para la selección de los elementos del conversor se tomó en cuenta los voltajes y corrientes que se deben manejar principalmente en el modo elevador, otro factor a tomar en cuenta es la frecuencia de conmutación en la cual trabajarán los elementos del conversor. Para Q1, Q2 y D1 se ha seleccionado el mosfet IRFZ44N que cumple con los requerimientos mencionados. Este mosfet es el mismo que se está utilizando en el puente inversor para controlar el motor. Soporta un voltaje de 55V entre drenaje y fuente, soporta una corriente de 49A y su resistencia en conducción es de 17.5mΩ. El diodo D2 debe ser de rápida conmutación por lo que se ha seleccionado el diodo Schottky SBL3040PT que soporta 30A y 40V de polarización inversa.

**E. Selección del inductor del conversor**

Para la selección de inductor del conversor hay que tomar en cuenta las corrientes de operación y las inductancias críticas en cada modo de trabajo. Estos dos factores son más críticos en el modo elevador, por lo que la elección del inductor se realiza para satisfacer las necesidades del conversor en el modo elevador.

El valor medio de la corriente que va a circular por el inductor en las condiciones nominales en el modo elevador es igual a la corriente máxima que circula por el inversor que alimenta al motor multiplicada por el factor de conversión que en las peores condiciones sería de 2. Si el voltaje de salida del inversor es de 10A entonces el voltaje medio en el inductor será de 20A.

La inductancia crítica para lograr el modo de conducción continua con una corriente de salida de 1A trabajando a 50Khz en el modo elevador es de 60uH.

En base a las condiciones planteadas y considerando que el inductor debe ocupar poco espacio y tener la menor cantidad de peso posible, se escoge un inductor modelo AIRD-02-150K fabricado por la Corporación Abracom, su núcleo es de ferrita, está diseñado para altas corrientes, posee una baja resistencia DC con lo cual se disminuyen las pérdidas y pesa aproximadamente 75g.

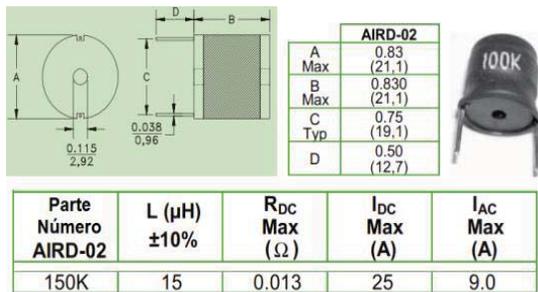


Fig. 10. Inductor del convertor bidireccional

III. DISEÑO DEL SOFTWARE DEL PROTOTIPO

A. Control de la asistencia eléctrica en la bicicleta

Se maneja al motor para que luego de un determinado tiempo alcance una velocidad proporcional a la del pedaleo. Con este método no se tiene un control exacto del porcentaje de potencia aportado por el motor, ya que depende de muchas variantes en especial del impulso alcanzado y a las características de pedaleo del ciclista. El aporte de potencia del motor es menor al 50% y trata de ser inversamente proporcional a la velocidad todo el tiempo.

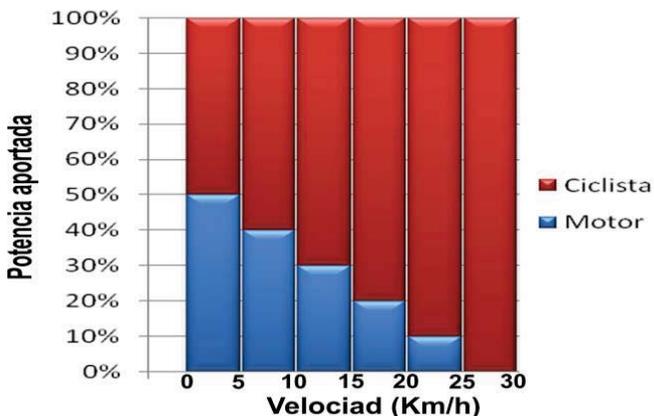


Fig. 11. Rangos de velocidad y asistencia

B. Control del convertor bidireccional en modo reductor

Dado que los bancos de ultracapacitores son elementos muy robustos, el único cuidado que se debe tener en estos son los sobre voltajes que pueden ocurrir luego de que se han cargado completamente. Se podría enviar la señal rectificadora del generador (PMSM) directamente a los ultracapacitores pero se tendría un frenado mecánico exagerado, incómodo para el ciclista. Además la corriente que circularía no tendría control y se podría elevar a un valor muy superior al de las características nominales del PMSM.

Para limitar la corriente que le llegará al banco de ultracapacitores se optó por un control proporcional de corriente, en el cual se varía una señal PWM dependiendo del error generado entre la medición de corriente y su valor deseado.

Por medio de pruebas se escogió una corriente promedio de 5A sobre los ultracapacitores. La corriente elegida es soportada tranquilamente por los dispositivos de conmutación y no frena bruscamente al motor.

C. Control PID para convertor bidireccional en modo elevador

El primer controlador implementado para el convertor elevador fue un PID digital, que varía el ciclo de trabajo de una señal PWM que controla el voltaje de salida del elevador dependiendo de una señal de error. Para el diseño del controlador se tomó en cuenta el “modelo de pequeña señal” del convertor [5]. Se analizó las respuestas de frecuencia del sistema, con eso se ajustó las ganancias del controlador PID y se determinó que solo se necesitan las acciones proporcional e integral para el controlador del convertor usado.

La ecuación digital del controlador PID implementado es la siguiente:

$$u(k) = Kp \cdot e(k) + Ki \cdot Ts \sum_{n=0}^k e(n) \quad (1)$$

D. Control difuso para convertor bidireccional en modo elevador

Los controladores difusos son diseñados en base a los conocimientos generales de las plantas a controlar, para este caso del convertor elevador. El controlador difuso es entonces ajustado utilizando un método de prueba y error para obtener una respuesta satisfactoria. Dado que un controlador difuso es no lineal, puede adaptarse a diferentes puntos de funcionamiento.

Para el diseño del controlador difuso se usó el tool box “FIS” de Matlab. En este se seleccionó el sistema difuso tipo Mamdani, este se caracteriza por su sistema de inferencia en el cual los grados de membresía de las variables de entrada se aplican sobre las reglas de base conocimiento para generar grados de membresía en los conjuntos difusos de salida. El método de implicación seleccionado es el de mínimo y el método de agregación máximo.

Las entradas del sistema difuso son el error (e) y la variación de error (Δe); la salida es el ancho de pulso.

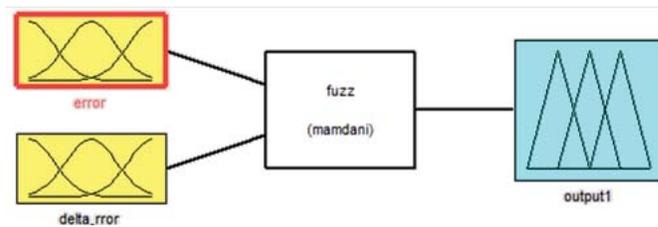


Fig. 12. Entradas y salida del sistema difuso tipo Mamdani

El controlador será un PID difuso, para su construcción se analiza el comportamiento de un PID clásico. Se parte del análisis de un controlador PD donde la respuesta es en base al error y la variación del error. La base de reglas difusas se muestra en la Tabla II [8].

Para regular la ganancia del controlador PD difuso simplemente se multiplica por una ganancia que afecta a la acción proporcional y derivativa.

Para conseguir un controlador PI difuso se realiza una sumatoria de las salidas del controlador difuso y luego se multiplica por una ganancia que afecta a la acción integral y

proporcional.

TABLA II  
BASE DE REGLAS DIFUSAS

$\Delta e / e$	Negativo	Cero	Positivo
Negativo	Negativo	Negativo	Positivo
Cero	Negativo	Cero	Positivo
Positivo	Negativo	Positivo	Positivo

En una etapa posterior se suman las acciones de control obteniéndose un controlador PI + PD difuso, cuya salida luego es saturada en los rangos de 0 a 1 correspondiente a la señal PWM que se entrega al elevador.

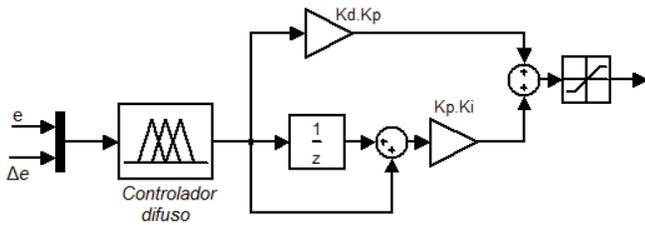


Fig. 13. Esquema del controlador difuso PI + PD

IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

A. Señales correspondientes al PMSM

Las señales necesarias para activar los mosfets del inversor son generadas por el microcontrolador ATmega164P. En la Fig. 14. se muestra la señal que genera el microcontrolador para una de las ramas del puente. La señal del CH1 corresponde a la señal de control para la parte alta de una rama del puente y la señal del CH2 corresponde a la señal de control de la parte baja. En esta última se aprecia la señal PWM de 16KHz que permite variar la velocidad del motor.

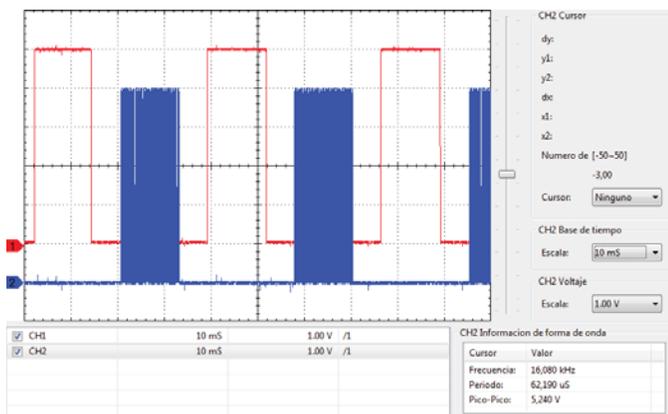


Fig. 14. Señales de control del PMSM en el microcontrolador

Para la correcta activación de los mosfets se utilizó el

driver IR2101. Las señales a la salida del driver, medidas respecto a GND, se muestran en la Fig. 15., se puede apreciar que estas señales tienen la amplitud adecuada para activar los mosfets.

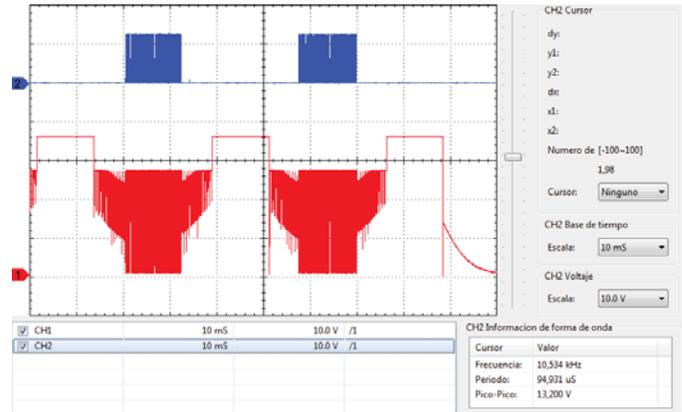


Fig. 15. Señales de control del PMSM en el driver

A continuación se muestran las formas de onda que se obtienen entre dos fases del motor:

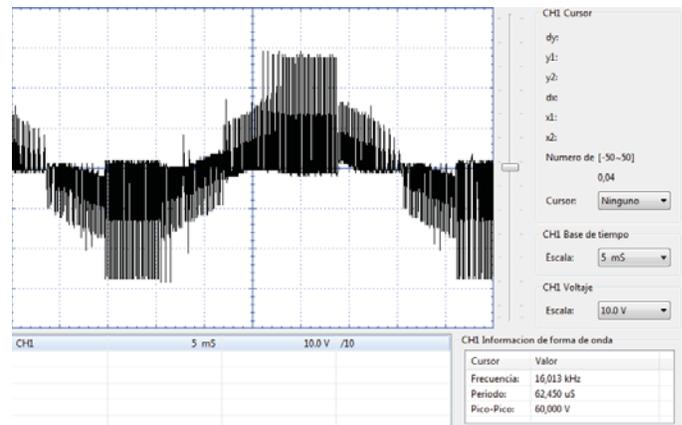


Fig.16. Señal entre dos fases del motor con 20% del ciclo de trabajo

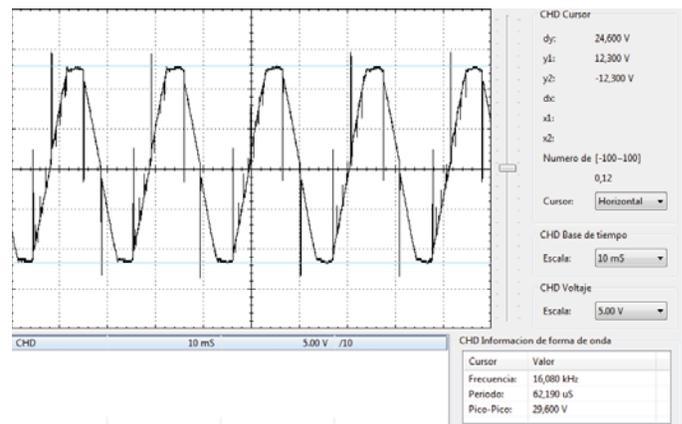


Fig. 17. Señal entre dos fases del motor con 100% del ciclo de trabajo

B. PRUEBAS en el convertidor bidireccional

En la Fig. 18. se muestra el rizado de corriente generado en la regeneración de energía en cada periodo de la señal PWM.

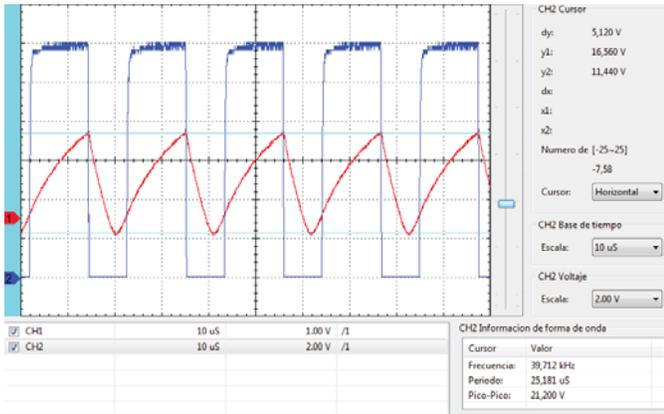


Fig. 18. Corriente por el inductor (CH1) y señal de control (CH2) del convertor en modo reductor

En la Fig. 19. se muestra la señal de control del mosfet del convertor elevador y el rizado de corriente que se genera en cada ciclo de trabajo a una frecuencia de aproximadamente 50 KHz.

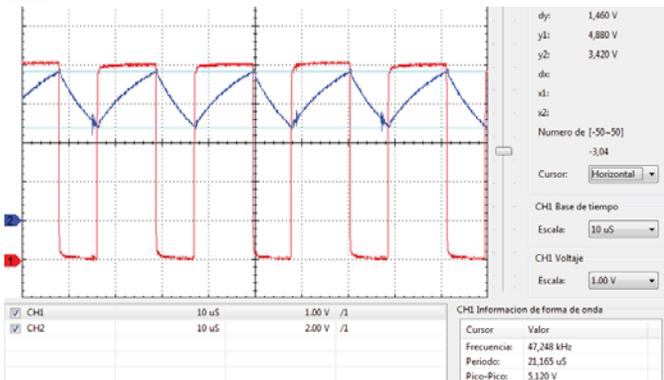


Fig. 19. Señal de control (CH1) y corriente por el inductor (CH2) para el modo elevador

C. Comparación entre el controlador difuso y el PID en el modo elevador del convertor bidireccional

En la Fig. 20. se muestra la respuesta paso en la salida del convertor elevador con el controlador difuso, el voltaje inicial es 12 V y el final de 24 V, con un tiempo de establecimiento de 483 mS.

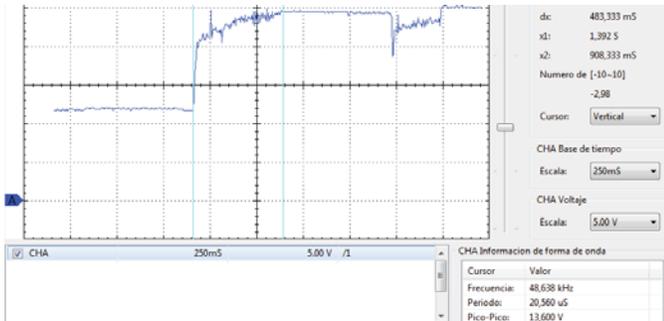


Fig. 20. Respuesta paso del controlador difuso del convertor en modo elevador

En la Fig. 21. se muestra la respuesta paso en la salida del convertor elevador con el controlador PID, el voltaje inicial es 12 V y el final de 24 V, con un tiempo de establecimiento de 367 mS.

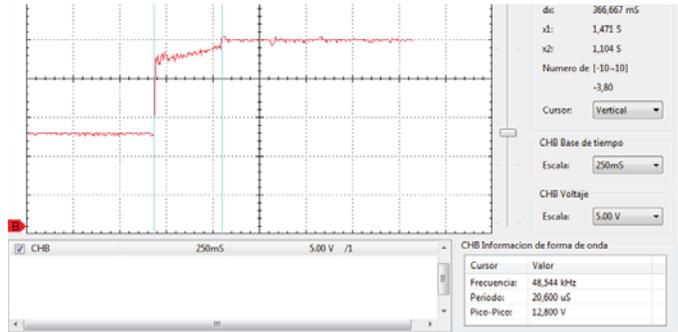


Fig. 21. Respuesta paso del controlador PID del convertor en modo elevador

El convertor elevador con ambos controladores presentó resultados similares en cuanto a la corriente máxima que pueden entregar.

El controlador PI logra una respuesta más rápida debido a que tiene un tiempo de muestreo tres veces menor al del controlador difuso esto debido al algoritmo implementado en el microcontrolador.

El controlador PID funciona adecuadamente a pesar de ser un controlador lineal con una planta no lineal, esto se debe a que el controlador trabaja alrededor de un punto donde el comportamiento del convertor es aproximadamente lineal.

El controlador difuso igualmente trabaja adecuadamente con una respuesta más lenta que el PID que se podría mejorar disminuyendo el tiempo de muestreo.

D. Pruebas del funcionamiento del prototipo

En la Fig. 22. se muestra el sistema de control de la bicicleta asistida y el convertor bidireccional y en la Fig. 23. el prototipo de bicicleta asistida con regeneración de energía.

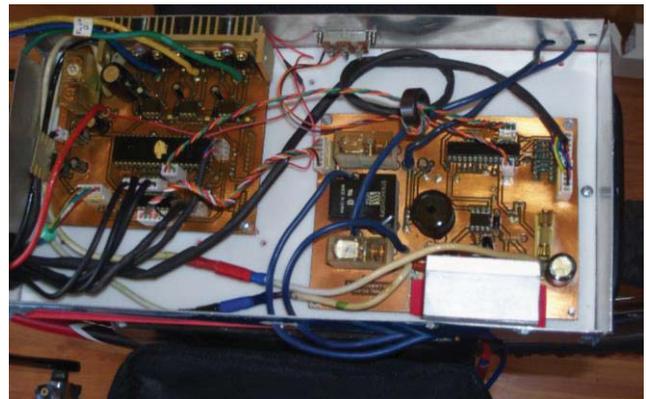


Fig. 22. Sistema de control implementado (Convertor y Control del motor)



Fig. 23 Prototipo de la bicicleta asistida con regeneración de energía terminado

Para comprobar el funcionamiento de la bicicleta asistida se realizaron varias pruebas sobre un mismo trayecto, el cual tiene varios niveles de pendientes, y con el mismo ciclista, el cual luego de cada vuelta dio su impresión de la sensación de asistencia por parte del motor.



Fig. 24 Pruebas del prototipo en el campus de la EPN

La sensación de asistencia es un parámetro subjetivo que muestra la apreciación del ciclista de la ayuda del sistema en comparación al nivel 0 de asistencia, donde el motor está apagado todo el tiempo.

Se midió los voltajes iniciales y finales en los dos bancos de ultracapacitores para comprobar el funcionamiento de la regeneración y uso de energía en el trayecto.

El tiempo medido es el transcurrido en completar una vuelta en el circuito de prueba.

Los resultados muestran que el tiempo en completarse cada vuelta es ligeramente menor mientras es mayor el nivel de asistencia y el ciclista siente la ayuda por parte del motor dependiendo del nivel de asistencia seleccionado.

Los voltajes en los ultracapacitores en el “nivel de asistencia 0” aumenta al final del trayecto debido a que solo se está regenerando energía y no usándola, dado que el motor siempre está apagado. En el resto de niveles el voltaje final de los ultracapacitores es ligeramente menor, ya que es más la

energía que se usa que se regenera de los mismos.

Los resultados obtenidos con el uso del controlador PID y el difuso son similares, las diferencias son imperceptibles por el usuario.

## V. CONCLUSIONES

El prototipo de bicicleta asistida con regeneración de energía en ultracapacitores se ha diseñado y construido con las especificaciones de funcionamiento propuestas.

El uso de ultracapacitores en el sistema pretende complementar las funciones de la batería, en especial en la regeneración de energía debido a la imposibilidad de cargar por goteo una batería sellada de plomo-ácido, mientras a los ultracapacitores se los puede cargar de forma intermitente o continuamente.

Se eligió una frecuencia de conmutación de 16 KHz en el control “seis pasos” del PMSM, con esto no se generan sonidos molestos para el ciclista en los elementos inductivos del motor, debido a que el sonido producido está en el umbral de los rangos de audición de los seres humanos.

El control del reductor de voltaje usado en la regeneración de energía no necesita ser tan preciso, debido a que los ultracapacitores son elementos muy robustos que pueden ser cargados con una corriente no estable.

Dado que el motor no se activa antes de que el ciclista realice un esfuerzo que impulse la bicicleta, no existen problemas de corriente altas en el arranque del motor.

El uso de un controlador difuso para el elevador de voltaje es una alternativa al control clásico lineal, que trata de adaptarse a las no linealidades del convertidor elevador.

Los resultados entre el uso de un controlador difuso o un PID clásico para el convertidor elevador son similares. Al tener un set point fijo el controlador PID trabaja alrededor de un punto con un comportamiento casi lineal del convertidor.

Para el ciclista es imperceptible la diferencia entre el uso del control difuso o el PID para el elevador de voltaje, los efectos de asistencia obtenidos en las pruebas son similares para ambos casos.

La frecuencia de 50KHz seleccionada para los elementos de conmutación del convertidor permite que el tamaño del inductor sea pequeño lo cual es fundamental para construir un equipo compacto y ligero, y a pesar de que la inductancia real del inductor no fue la calculada esta se mantiene por encima de la inductancia crítica permitiendo que el convertidor trabaje en modo de conducción continua.

El banco de ultracapacitores que se escogió tiene la capacidad suficiente para almacenar la energía durante la regeneración del motor y además permite que el convertidor alimente al inversor a su plena carga lo cual permite que la

bicicleta se desplace haciendo uso de la energía de los ultracapacitores.

El uso de drivers para mosfets resultó ser la forma más fácil de implementar el circuito de disparo para la compuerta del mosfet porque simplifican la circuitería y proporcionan una señal con la amplitud adecuada para el disparo.

El sistema construido resulta muy agradable de conducir para el ciclista sobre todo si se utiliza la bicicleta para hacer ciclismo recreativo no así si lo que se pretende es utilizarla para hacer deporte con más exigencia, por ejemplo para una competencia, debido que su peso limita el desempeño en altas velocidades.

El diseño e implementación de la red snubber para el convertidor fue indispensable para el funcionamiento del convertidor ya que se logró reducir en gran medida los esfuerzos a los cuales están sometidos los mosfets alargando así su vida útil.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cycles - Electrically power assisted cycles - EPAC bicycle, European Standard prEN15194, March 2005.
- [2] Padmaraja, Yedamale; "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals", Microchip Technology Inc. 2003.
- [3] NREL, "Ultracapacitors", <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/ultracapacitors.html>
- [4] Calderón, A.; Gómez, I., "Diseño y Construcción de un Convertidor DC-DC Elevador de 96VDC a 310VDC para ser utilizado en un Vehículo Eléctrico", Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Mar. 2009.
- [5] GUNT Hamburg, "Conocimientos básicos control difuso", [http://www.gunt.de/download/fuzzy\\_control\\_spanish.pdf](http://www.gunt.de/download/fuzzy_control_spanish.pdf)
- [6] López, Jesús; "tipos de sistemas de logica difusa", [http://members.tripod.com/jesus\\_alfonso\\_lopez/FuzzyIntro2.html](http://members.tripod.com/jesus_alfonso_lopez/FuzzyIntro2.html)
- [7] Lepka, Jaroslav; Grasblum, Pavel; "Aplicaciones de la tecnología de microprocesadores en el control de accionamientos eléctricos". República Checa, 2011.
- [8] Harold, René; Chamorro, Vera; Toro, Billy; Trujillo, César; "Diseño y simulación de un controlador PD difuso para el control de la velocidad de un motor de inducción", Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia, Jun, 2010

## VII. BIOGRAFÍAS

**Jorge Navarrete**, nació en Quito-Ecuador el 1 de agosto de 1987. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Tecnológico Superior Central Técnico. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 2012. Actualmente trabaja como Ingeniero de Mantenimiento en Halliburton-Ecuador.

Áreas de interés: Estándares y normas industriales en soldadura, registros eléctricos

para análisis de zonas petroleras, robótica, control de procesos, microprocesadores, sistemas de amplificación de audio.

([jorge\\_navarrete\\_chang@hotmail.com](mailto:jorge_navarrete_chang@hotmail.com)).

**Mario Vega**, nació en Quito-Ecuador el 24 de junio de 1987. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Tecnológico Superior Central Técnico. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 2012. Actualmente trabaja como Ingeniero de Mantenimiento en MEVGAServicios.

Áreas de interés: Aplicaciones RFID, Equilibrado de mecanismos rotativos, Análisis

de vibraciones, energías renovables, mantenimiento de equipos electrónicos especiales.

([mariovega.t@hotmail.com](mailto:mariovega.t@hotmail.com)).

**Nelson Sotomayor**, nació en Quito-Ecuador el 9 de Septiembre de 1971. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Nacional Mejía. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 1999. Obtuvo su título de Magíster en Ingeniería industrial en junio del 2006 en la Escuela Politécnica Nacional. En septiembre del 2008 como becario del Gobierno de México y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), participó en

el IV Curso Internacional de Robótica Aplicada, en el Centro Nacional de Actualización Docente CNAD ubicado en México DF. Actualmente desempeña el cargo de Profesor Principal T/C.

Áreas de interés: robótica móvil, informática y redes, microcontroladores, automatización y control industrial.

([nelson.sotomayor@epn.edu.ec](mailto:nelson.sotomayor@epn.edu.ec))