

Control de Motores DC sin Escobillas para Vehículos Eléctricos usando un μ C Doble Núcleo

Brushless DC Motor Control for Electric Vehicles using a Dual Core Microcontroller

Ramiro A. Ghignone ¹, Federico J. Calá, Julián G. Giampetruzzi, Sharon M. Domanico, Cristian G. Juarez

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Haedo

Haedo, Buenos Aires, Argentina

embebidos@frh.utn.edu.ar

¹rgghignone@frh.utn.edu.ar

Recibido: 05/09/19; Aceptado: 22/10/19

Resumen — El presente trabajo describe el proceso de desarrollo y verificación de un sistema de potencia para motores de corriente continua sin escobillas para vehículos eléctricos. Esta propuesta está motivada por la actual expansión de las tecnologías de movilidad eléctrica como solución para reducir las emisiones contaminantes en actividades de transporte. El diseño implementa funcionalidades adicionales que son fundamentales para este tipo de aplicaciones, como frenado regenerativo y telemetría mediante una aplicación móvil. El prototipo fue construido y verificado mediante diversos ensayos de laboratorio.

Palabras clave: *BLDC; freno regenerativo; vehículo eléctrico; electrónica de potencia; ARM Cortex; multicore; CIAA*

Abstract — The present document describes the development and verification process of a power system for brushless direct current motors, specially designed for its usage in electric vehicles. This proposal is motivated by the current expansion of the electric mobility technologies as a solution to reduce the contaminant emissions in transport activities. The proposed design implements additional features which are fundamental for this kind of applications, as regenerative braking and telemetry through a mobile application. The prototype was built and verified through several laboratory tests.

Keywords: *BLDC, regenerative braking; electric vehicle; power electronics; ARM Cortex; multicore; CIAA*

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años los efectos del cambio climático a nivel mundial han motivado la investigación, desarrollo, financiamiento e implementación de nuevas tecnologías que reduzcan las emisiones de efecto invernadero. Como referencia, la inversión mundial en materia de eficiencia energética alcanzó los US\$ 231 billones en 2016 [1], siendo Europa el principal foco de inversiones en el área. En 2018, se agregaron 178 GW de generación a partir de fuentes renovables a nivel mundial [2].

Hoy en día, las actividades relacionadas al transporte representan el 32% del consumo de energía global, [2] y los Vehículos Eléctricos (VE) aparecen como la solución de mayor crecimiento para reducir las emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles en vehículos convencionales. Los VE representaron el 32% de las ventas mundiales de vehículos en 2017, y se estima que un 26% de la energía consumida en VE ese mismo año provino de fuentes renovables [2].

El formato de VE con mayor nivel de ventas en el mundo es la bicicleta eléctrica o *e-bike*: casi 30 millones se venden por año, siendo China el principal mercado [2]. Su popularidad se debe a que son más livianas, económicas y fáciles de recargar que otros vehículos eléctricos, lo cual las hace ideales para entornos urbanos, a pesar de su menor autonomía.

Como consecuencia del intenso trabajo en investigación y desarrollo de VE, surgieron varias tecnologías con un fuerte impacto en su eficiencia. Por ejemplo, los sistemas de frenado regenerativo permiten reutilizar la energía cinética del vehículo para recargar su batería [3]. Otra función común es el monitoreo y control de variables como el consumo de potencia, el estado de la batería y la velocidad del motor a través de aplicaciones móviles. Además, se han reemplazado las baterías de plomo por baterías de litio con cada vez mayor capacidad. Finalmente, hay una fuerte apuesta por el desarrollo de motores con imanes permanentes que puedan manejar alta potencia con reducido peso y volumen.

Bajo estas premisas, se desarrolló un controlador para motores de corriente continua sin escobillas (BLDC, del inglés *Brushless DC*) que soporta tanto frenado regenerativo como monitoreo remoto. Se utilizó para ello un microcontrolador LPC4337, que ofrece un costo accesible y un buen desempeño debido a su arquitectura de doble núcleo.

En la siguiente sección se dará una descripción general del prototipo, y en las secciones III y IV se analizarán en detalle los módulos de potencia y control respectivamente.

II. VISTA GENERAL DEL PROTOTIPO

La Fig. 1 muestra un diagrama en bloques del prototipo, en el cual podemos identificar los siguientes módulos, que serán desarrollados en las secciones subsiguientes:

- **Convertor DC/DC bidireccional:** Regula el flujo bidireccional de potencia entre la batería y el bus de continua (*DC Bus*) que interconecta ambos convertidores.
- **Convertor DC/AC bidireccional:** Genera una señal alterna trifásica a partir de la tensión del bus DC, y también rectifica la tensión alterna provista por el motor durante el frenado.
- **Unidad de control:** Mide tensiones y corrientes del sistema, genera las señales de conmutación para la electrónica de potencia, y se comunica con el usuario a través de la conexión Bluetooth o los botones de comando.

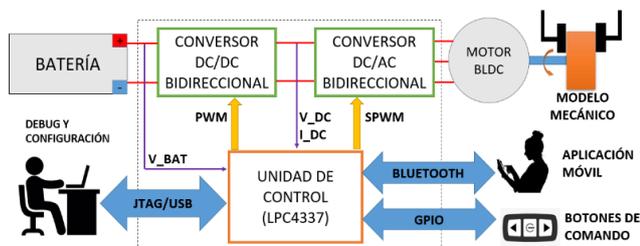


Fig. 1 – Arquitectura general del prototipo

- **Motor BLDC:** Para este prototipo se utilizó un motor BLDC A2212/13T [4] sin sensor de posición, el cual puede entregar hasta 150 W de potencia mecánica.
- **Batería:** En lugar de una batería de ion de litio, esta versión emplea una batería de Polímero de Litio (LiPo) de 2200 mAh, con una tensión de 11,1V y una capacidad de descarga de 30C. Este modelo fue sugerido por el proveedor del motor como una opción óptima.
- **Interfaz de usuario:** La unidad de control se conecta de forma serial con un módulo Bluetooth HC-06 [5], que se comunica con la aplicación móvil. También se lee el estado de los botones de comando y se provee conexión JTAG/USB para funciones de depuración.

El subsistema compuesto por los convertidores de potencia y la unidad de control se denominó IRMA (*Inertial Regenerative Motor Assistant*).

III. ETAPAS DE POTENCIA

A. Control y Estructura de Motores BLDC

Un motor DC sin escobillas [6] está compuesto por un rotor de imanes permanentes y un estator de bobinado trifásico. Usualmente, los motores BLDC de mediana y alta potencia también tienen integrados sensores de posición de efecto Hall, que proveen la realimentación necesaria para mejorar el control del motor [7].

La principal diferencia entre este tipo de motor y otro sincrónico de imán permanente o PMSM (del inglés *Permanent Magnet Synchronous Motor*) es que los devanados del BLDC se concentran en cada polo del estator. En cambio, los devanados del motor PMSM están distribuidos de forma homogénea alrededor del estator, como ilustra la Fig. 2.

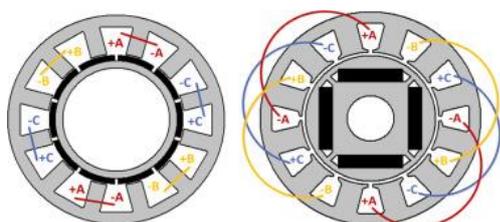


Fig. 2 – Devanados de un motor PMSM (derecha) y BLDC (izquierda)

Como resultado de esta configuración, su fuerza contraelectromotriz o BEMF (del inglés *Back Electro-Motive Force*) es trapezoidal. Muchas técnicas de control de motores BLDC sin sensores de posición se basan en este principio [7]. Sin embargo, también pueden ser controlados usando modulación de ancho de pulso senoidal (SPWM, por sus siglas en inglés) [8], el cual es sencillo de implementar en microcontroladores y no requiere de realimentación. Por esta razón se eligió el uso de control SPWM para el motor *sensorless* A2212/13T utilizado.

Existen métodos más avanzados, basados en técnicas de control orientado al campo (FOC, del inglés *Field Oriented Control*) o en el uso de modulación vectorial en lugar de SPWM [9]. Estas técnicas requieren medir tensión y corriente en las tres fases del motor, pero permiten obtener un mayor rendimiento y un torque mecánico más estable. La ventaja adicional de estos enfoques, es que son también aplicables a motores PMSM e incluso a motores de inducción, al igual que el SPWM.

B. Conversor DC/AC Bidireccional

A fin de mantener un diseño simple pero flexible, se implementó un inversor trifásico básico, que se muestra en la Fig. 3. Este circuito emplea SPWM, pero también puede adaptarse a las otras técnicas de control antes mencionadas.

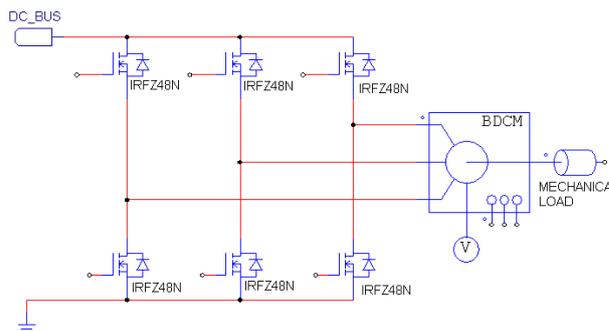


Fig. 3 – Conversor DC/AC bidireccional

El circuito tiene dos modos de trabajo:

- **Modo motor:** los transistores son conmutados por la unidad de control y alimentan al motor.
- **Modo regenerativo:** los transistores permanecen apagados, y los diodos en antiparalelo rectifican la BEMF del motor.

La Fig. 4 muestra las formas de onda típicas para la modulación SPWM. La señal resultante equivale a la comparación de una señal modulante senoidal de referencia con una señal triangular o portadora de alta frecuencia. La relación entre las amplitudes de ambas señales se conoce como “índice de modulación” y se simboliza como ‘m’:

$$m = \frac{A_{modulante}}{A_{portadora}} \quad (1)$$

Se puede demostrar que, para minimizar la distorsión total armónica de la señal SPWM, es necesario usar un valor de ‘m’ igual a uno [10]. Esto implica que la amplitud de tensión de la componente fundamental solo depende de la tensión del bus DC, la cual será regulada por el convertidor DC/DC, como se explica en la próxima sección.

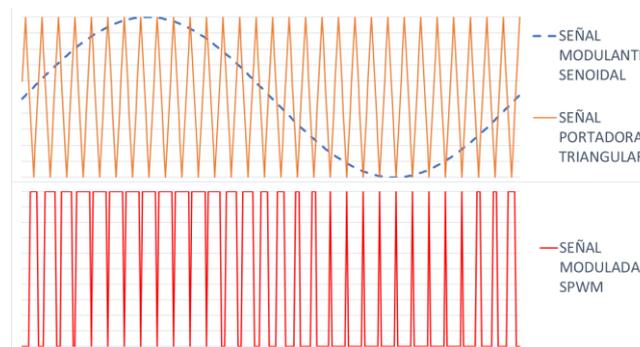


Fig. 4 – Formas de onda típicas de la modulación SPWM

La Fig. 5 muestra el convertor DC/AC construido. Los seis transistores MOSFET que lo componen conmutan según las señales SPWM recibidas desde la unidad de control y amplificadas por los *drivers* integrados que se observan en la parte izquierda de la imagen.



Fig. 5 – Placa del convertor bidireccional DC/AC

C. Convertor DC/DC Bidireccional

Como se mencionó en la sección II, el convertor DC/DC tiene una doble función: reducir la tensión de batería para proveer un nivel de bus DC adecuado para el inversor y además aumentar la tensión entregada por el motor y rectificadora por el convertor DC/AC para recargar la batería durante el frenado regenerativo.

Ambos objetivos se alcanzan mediante la estructura semipunte propuesta en la Fig. 6, que muestra un convertor DC/DC bidireccional capaz de implementar una topología Buck o Boost, según el flujo de potencia y el estado de sus transistores. Este esquema se conoce como *pulsador de Clase C* o de “dos cuadrantes” [11]. Se empleó dicho circuito dado que no era necesario poder reducir y elevar en ambos sentidos; en tal caso se hubiese empleado una topología de puente completo o *Clase E*, como se propone en [11] o [12].

Al igual que el circuito DC/AC, este módulo también tiene dos modos de trabajo, según el sentido del flujo de potencia:

- **Modo motor:** el transistor T2 permanece al corte, mientras que los componentes T1 y D2 forman un convertor Buck que reduce la tensión de la batería al valor necesario en el bus DC.
- **Modo regenerativo:** el transistor T1 permanece al corte, mientras que los componentes T2 y D1 forman un convertor Boost que aumentan la tensión del bus DC para cargar la batería.

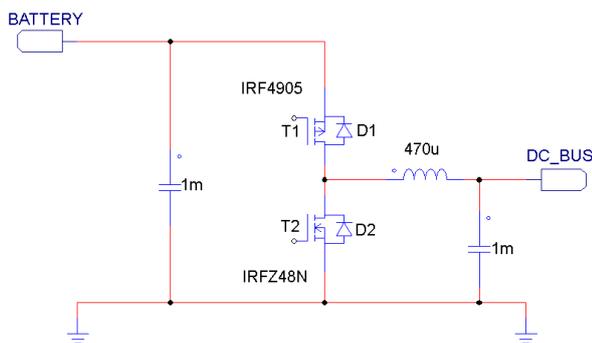


Fig. 6 – Convertor DC/DC bidireccional

La Fig. 7 muestra el convertor DC/DC terminado. El inductor de almacenamiento de energía magnética fue diseñado y construido usando un toroide de ferrita cuya sección fue intencionalmente sobredimensionada. Esto reduce el riesgo de saturación de flujo magnético en caso de producirse altas corrientes al manejar potencias mayores [13]. La Fig. 8 muestra el montaje de las dos etapas de potencia.



Fig. 7 - Placa del convertor bidireccional DC/DC

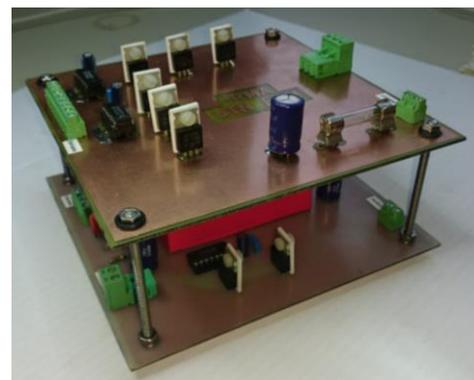


Fig. 8 – Montaje final de las etapas de potencia

IV. UNIDAD DE CONTROL

A. Placa EDU-CIAA-NXP y Microcontrolador LPC4337

Para el desarrollo de este proyecto, se usó una placa EDU-CIAA-NXP como unidad de control. Esta placa es resultado del Proyecto CIAA (*Computadora Industrial Abierta Argentina*) [14], que tiene por objetivo diseñar y producir sistemas embebidos de propósito general con múltiples aplicaciones en ámbitos industriales y académicos.

La placa EDU-CIAA-NXP se basa en un microcontrolador LPC4337 [15], el cual contiene dos núcleos ARM Cortex de 32 bits, así como un gran número de periféricos (USART, I2C, SPI, ADC, DAC, Ethernet, SCT, GPIO, etc.) que permiten su uso en un amplio espectro de aplicaciones.

El núcleo principal del LPC4337 es un ARM Cortex-M4F [16] que cuenta con soporte de instrucciones SIMD (del inglés *Single Instruction Multiple Data*) para procesamiento digital de señales (DSP, por sus siglas en inglés) y unidad de punto flotante en hardware para realizar operaciones sobre datos en formato IEEE 754 [17] en un único ciclo de reloj.

El segundo núcleo es un ARM Cortex-M0 [18], el cual actúa como un coprocesador para el M4F. Está diseñado para gestionar los periféricos y así liberar al núcleo principal para tareas de mayor complejidad computacional. Ambos núcleos pueden funcionar hasta una frecuencia máxima de 204 MHz, y están conectados a los periféricos a través de una matriz AHB (del inglés *Advanced High-performance Bus*). Además, pueden intercambiar datos a través de una zona compartida de memoria, e interrumpirse mutuamente a través de una línea dedicada, con la instrucción *SEV* (del inglés *Send Event*).

B. Arquitectura de Firmware

La Fig. 9 resume la arquitectura del firmware embebido representando los núcleos, periféricos y tareas involucradas. Éste fue escrito en C, y las secciones críticas se optimizaron en lenguaje ensamblador.

El núcleo ARM Cortex-M4F funciona como maestro, y sus tareas incluyen:

- **Selección del modo de operación:** según los comandos del usuario, el sistema configura diversos valores de referencia, principalmente la frecuencia de salida trifásica y la tensión del bus DC. Dicha tensión se calcula a partir de una función lineal conocida como “relación V/f” o “relación tensión-frecuencia”, que depende de cada motor y expresa la tensión que debe aplicarse según la frecuencia modulante SPWM, a fines de mantener un flujo magnético constante en el interior de la máquina.
- **Controlador DC/AC:** En modo motor, se usa la frecuencia de referencia para actualizar fase y ciclo de trabajo de las señales trifásicas de salida provistas al inversor. Se utiliza para ello una LUT (del inglés *Look-Up Table*) precargada que reduce el tiempo de cálculo.
- **Driver ACS712:** La unidad de control mide la corriente en el bus DC mediante un sensor de efecto Hall ACS712 de la empresa Allegro [19], el cual debe ser adecuadamente calibrado y filtrado para obtener una medición exacta.
- **Gestión Bluetooth:** Este bloque reporta el estado del sistema (tensión, corriente y frecuencia) y los eventos asíncronos (comandos) a la aplicación móvil mediante un módulo Bluetooth HC-06 [5] conectado al LPC4337 mediante USART. También recibe comandos del usuario a través de dicha aplicación y actualiza el modo de operación.

- **DSP y control digital DC/DC:** Como se ve en la Fig. 10, el núcleo M4F implementa un controlador digital PI (Proporcional - Integral) para calcular el ciclo de actividad que regula la tensión del bus DC a un valor de referencia dado por la relación V/f configurada en la unidad de control. Este método de control de la tensión aplicada a la máquina se conoce como *control escalar* [20]. Los coeficientes del controlador se calcularon inicialmente mediante simulaciones y luego se ajustaron empíricamente.

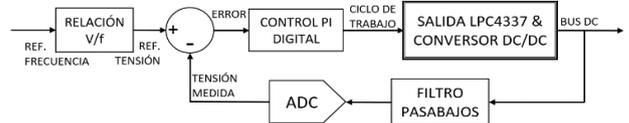


Fig. 10 – Esquema de regulación de la tensión del bus DC

El controlador PI fue implementado como una estructura IIR (del inglés *Infinite Impulse Response*) canónica o de forma directa II [21]. Para evaluar el desempeño de este filtro se escribió el mismo algoritmo usando tres variantes: lenguaje C, lenguaje ensamblador ARM Thumb y lenguaje ensamblador optimizado mediante instrucciones SIMD. La tabla I muestra el tiempo medio de filtrado por muestra para cada variante y la mejora obtenida respecto al caso base de código en C.

TABLA I - C VS ASM VS SIMD EN EL NÚCLEO ARM CORTEX-M4F

Mediciones al filtrar 256 muestras en formato Q14	Implementación del filtro		
	C	ASM	SIMD
Ciclos de reloj consumidos	55148	17456	16428
Tiempo por muestra en nseg (a 204 MHz)	1055,98	334,25	314,56
Mejora respecto de código C	0%	68,35%	70,21%

Se puede ver que la implementación en C insume 3,36 veces más tiempo de cálculo que la variante optimizada mediante SIMD. Al aumentar la tasa de muestreo del lazo de control para mejorar su desempeño o agregar nuevas funcionalidades al núcleo, el consumo excesivo de tiempo podría llevar a la sobrecarga del microcontrolador y el mal funcionamiento del firmware. Esto podría provocar fallas en las secuencias de conmutación de las etapas de potencia. Por lo tanto, es importante optimizar las secciones de procesamiento para mejorar la confiabilidad del sistema.

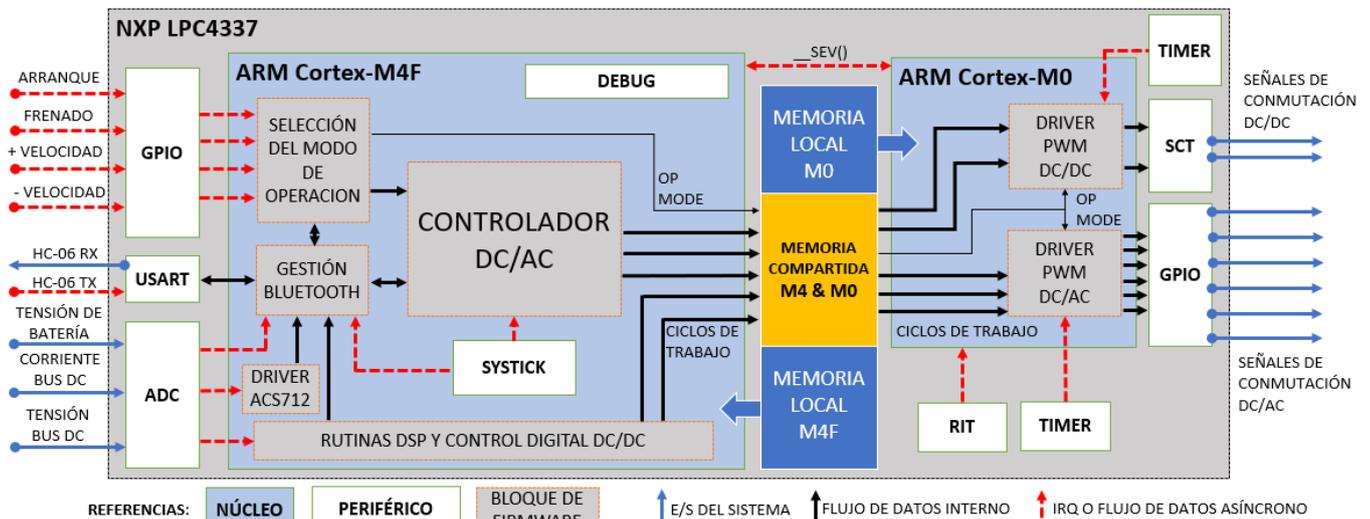


Fig. 9 – Arquitectura de firmware y uso de hardware del microcontrolador LPC4337

El modo de operación y los ciclos de trabajo calculados en los lazos de control son almacenados por el M4F en una región de memoria accesible por ambos núcleos. El ARM Cortex M0 lee estos valores y genera las salidas PWM a 20 kHz. Como el M0 carece de un System Timer (SysTick) dedicado, depende de timers periféricos para actualizar su estado. Además, usa el SCT (del inglés *State Configurable Timer*) para automatizar la conmutación del convertor DC/DC.

La arquitectura doble núcleo que se propone en este trabajo ofrece varias ventajas respecto a una implementación mononúcleo. Por un lado, al reducir las tareas del M4F se reduce el riesgo de sobrecarga y se mejora su confiabilidad. En aplicaciones donde el consumo o disipación de potencia sean factores críticos, esto se puede aprovechar para dejar al núcleo en un estado inactivo. Por el otro, al dedicar el M0 de forma exclusiva a la gestión de periféricos, éstos se utilizan más eficientemente y no se requieren dispositivos externos. El firmware diseñado sigue un patrón *productor-consumidor*, y los núcleos M4F y M0 asumen respectivamente esos roles.

C. Diseño de una Nueva Unidad de Control

Una vez que el firmware fue implementado y verificado con la placa EDU-CIAA-NXP se diseñó una unidad de control *ad-hoc* también basada en el LPC4337. El objetivo de este nuevo diseño fue obtener un controlador de menor costo y tamaño, más adecuado para una eventual versión de producción del sistema propuesto.

La nueva placa (cuya fotografía se muestra en la Fig. 11) usa un módulo *step-down* para reducir la tensión de la batería a 5V, y un regulador lineal LM7833 [22] para generar la alimentación de 3,3 V. También incluye los módulos HC-06 y ACS712, así como la interfaz de debug [23] y los diversos componentes auxiliares necesarios para la operación del microcontrolador (capacitores, cristal, reset, interfaz JTAG).



Fig. 11 – Unidad de control final, conectada a las etapas de potencia

V. APLICACIÓN MÓVIL

Como se explicó en la sección I, este prototipo se comunica con el usuario mediante un enlace Bluetooth, reportando datos y recibiendo comandos. A este fin se diseñó una aplicación móvil para sistemas operativos Android, empleando la herramienta libre *Android Studio* [24].

La aplicación muestra una interfaz gráfica que se muestra en la Fig. 12 y que permite al usuario conectarse al dispositivo, monitorear su velocidad o estado de batería, enviar comandos y ver o almacenar gráficos de potencia consumida y regenerada.



Fig. 12 – Pantalla principal de la aplicación Android

La arquitectura de la aplicación se compone por seis clases escritas en Java, mientras que los recursos gráficos y el layout de la interfaz están descritos en archivos XML.

VI. RESULTADOS

A. Prototipo Mecánico

Además de los sistemas descritos, se construyó un modelo mecánico de una *e-bike*, a fin de simular un entorno de operaciones real para el prototipo. Dicho modelo se muestra en la Fig. 13, y está compuesto por la batería LiPo y el motor BLDC conectado a un volante de inercia realizado mediante impresión 3D. Además, se agregó un manubrio real que contiene los botones de comando, un soporte para teléfono móvil y un freno de bicicleta modificado para combinar los frenos mecánico y eléctrico (regenerativo) según la fuerza ejercida.

B. Mediciones

Se realizaron diversas pruebas y mediciones a cada uno de los módulos del proyecto durante su desarrollo. Por ejemplo, la Fig. 14 muestra la salida del inversor DC/AC en modo motor. Las formas de onda de la tensión coinciden con las observadas en las simulaciones realizadas en la fase de diseño.



Fig. 13 – Prototipo final y modelo mecánico

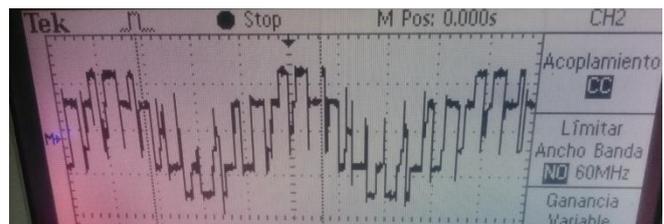


Fig. 14 –Salida del inversor (tensión fase-neutro)

Haciendo uso del conector USB para *debug* en la placa se realizaron mediciones sobre el regulador DC/DC. La Fig. 15 muestra la tensión del bus DC en función de la frecuencia de salida, y la recta de regresión lineal entre ambas variables. Por acción del controlador PI, el regulador sigue la relación V/f configurada, de 100 mV/Hz con un valor a 10 Hz de 500 mV. El error cuadrático medio de la tensión de salida fue de 39,85 mV; es decir, un error relativo del 2,66%.

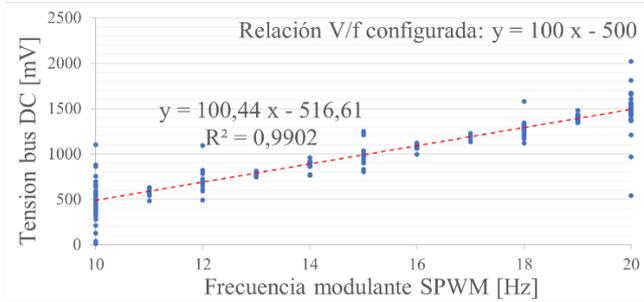


Fig. 15 – Mediciones y regresión lineal de la relación tensión-frecuencia

Las Fig. 16 y 17 muestran el comportamiento de la tensión y la corriente en el bus DC durante una rampa de aceleración seguida de frenado del motor.

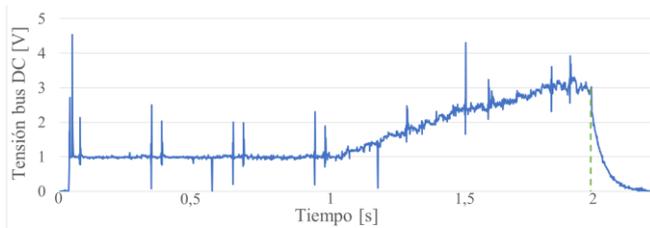


Fig. 16 – Tensión en el bus DC

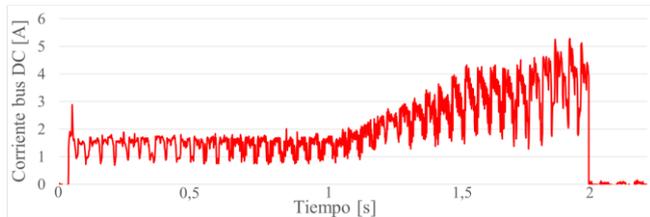


Fig. 17 – Corriente en el bus DC

El volante de inercia utilizado posee una masa de 198 g, con un diámetro de 10 cm, dando por resultado un momento de inercia aproximado de $495 \mu\text{Kg.m}^2$. Para estos valores, la energía cinética acumulada en los ensayos está en el orden de 2,71 J a una velocidad de 1000 RPM.

Las mediciones de energía regenerada están en torno al 3%, muy cerca del 5% típico para vehículos eléctricos livianos como *e-bikes*. Para VE con mayor masa, como automóviles, la recaptura de energía se ubica entre el 20 y el 30 %. Sin embargo, estos valores dependen en gran medida del escenario, entorno y forma de manejo del usuario [25].

VII. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se describe el desarrollo de una unidad completa de control y potencia para motores BLDC en vehículos eléctricos. El diseño partió de un estudio de las tendencias actuales y la definición de una arquitectura capaz de cumplir con las especificaciones surgidas de ese análisis.

De acuerdo a los requerimientos de flujo de potencia entre la batería y el motor, se desarrollaron dos convertidores bidireccionales DC/DC y DC/AC, los cuales se diseñaron, ensayaron y verificaron individualmente.

Se ensayaron dos placas (EDU-CIAA-NXP y la diseñada *ad-hoc* para el presente trabajo) basadas en el microcontrolador LPC4337 como unidades de control, aprovechando su arquitectura de doble núcleo. Las tareas de firmware se distribuyeron entre los núcleos ARM Cortex M4F y M0, y las secciones de DSP se optimizaron empleando instrucciones SIMD, obteniendo mejoras notorias en los tiempos de cálculo. También se diseñó una aplicación móvil que facilita la interfaz de usuario mediante una conexión Bluetooth.

En este punto, se demuestra que el estudio profundo de las posibilidades ofrecidas por el microcontrolador empleado (arquitectura doble núcleo, periféricos, set de instrucciones) fue clave para optimizar el desempeño del mismo en términos de costo, consumo y capacidad de procesamiento.

Finalmente, el sistema completo fue ensayado mediante el modelo mecánico de una *e-bike*. El tren de potencia y la interfaz de usuario cumplieron las funciones esperadas, y se identificaron varios puntos de posible mejora para trabajo futuro. Por ejemplo, mediante la adición de nuevos sensores para implementar técnicas de control vectorial o FOC.

El proyecto desarrollado muestra las numerosas cuestiones técnicas involucradas en el desarrollo de subsistemas para vehículos eléctricos, que involucran desde el diseño de etapas de potencia y el estudio de máquinas eléctricas a la programación de sistemas embebidos. Estos temas serán ampliamente estudiados en los próximos años, a medida que los sistemas de movilidad eléctrica evolucionen y se vuelvan más utilizados en todo el mundo.

VIII. AGRADECIMIENTOS

El prototipo descrito conforma el Proyecto Final para la carrera de Ingeniería Electrónica de los autores, quienes desean agradecer a todos aquellos que ayudaron en su desarrollo, incluyendo amigos, colegas, docentes, tutores y familiares.

También agradecen al Departamento de Ingeniería Electrónica y al grupo de Aplicaciones de Sistemas Embebidos de la UTN FRH por poner a disposición los laboratorios, instrumentos y recursos técnicos requeridos para este desarrollo.

Finalmente, se agradece a CITEDEF (*Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa*) por su colaboración en la fabricación de la unidad de control.

IX. REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, “*World Energy Investment 2017*” (executive summary), 2017
- [2] Renewable Energy Policy Network for the 21th Century (REN21), “*Renewables 2018 Global Status Report*”, 2018
- [3] J. Cody et al, “*Regenerative Braking in an Electric Vehicle*”, University of South Australia, 2009.
- [4] A2212/13T Technical Data
- [5] Guangzhou HC Information Technology Co. Ltd., “*HC-06 Product Data Sheet*”, Rev. 2.0
- [6] P.C. Krause, O. Wasynczuk and S. D. Sudhoff, “*Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*” (IEEE Series on Power Engineering), 2nd edition, Wiley & Sons Inc, 2002, chapter 6.
- [7] W. Brown, “*Brushless DC Motor Control Made Easy*” (AN857 Application Note), Microchip Technology Inc., 2002
- [8] H.M. Rashid, “*Power Electronics Circuits, Devices and Applications*”, 2nd edition, 1995, Prentice Hall, chapter 10
- [9] E. Klintberg, “*Comparison of Control Approaches for Permanent Magnet Motors*” (Master of Science Thesis), Chalmers University of Technology, Sweden, 2013.
- [10] M.H. Rashid, “*Power Electronics Handbook*”, 3rd edition, Butterworth-Heinemann, 2013, chapter 15, p. 361
- [11] M.H. Rashid, “*Power Electronics Circuits, Devices and Applications*”, 2nd edition, 1995, Prentice Hall, chapter 9.
- [12] A. Agatep, M. Ung, “*Design and simulation of V2G Bidirectional Inverter and DC-DC Converter*”, Electrical Engineering Department, California Polytechnic State University, 2011
- [13] P.C. Krause, O. Wasynczuk and S. D. Sudhoff, “*Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*” (IEEE Series on Power Engineering), 2nd edition, Wiley & Sons Inc, 2002, chapter 1
- [14] Proyecto CIAA: http://www.proyecto-ciaa.com.ar/index_en.html
- [15] “*UM10503 LPC43xx ARM Cortex-M4/M0 dual-core microcontroller User Manual*”, NXP Semiconductors, Rev 1.2, 2012
- [16] “*Cortex-M4 Technical Reference Manual*”, ARM Ltd., rev. r0p0, 2010
- [17] R. Ghignone, I. Castellucci Vidal, J. Giampetruzzi, F. Larosa, “*Implementación y optimización de una biblioteca embebida para receptor GPS*”, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, 2016.
- [18] “*Cortex-M0 Technical Reference Manual*”, ARM Ltd., rev. r0p0, 2010
- [19] “*ACS712 Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*”, Allegro Microsystems Inc., rev. 17, 2018
- [20] P.C. Krause, O. Wasynczuk and S. D. Sudhoff, “*Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*” (IEEE Series on Power Engineering), 2nd edition, Wiley & Sons Inc, 2002, chapter 14
- [21] D. Stranneby, “*Digital Signal Processing: DSP and Applications*”, 1st edition, Newness, 2001, chapter 1
- [22] “*LM7833/LM7847 1A Positive Voltage Regulator*”, Taitron
- [23] “*IEEE 1149.1-2013 – IEEE Standard for Test Access Port and Boundary-Scan Architecture*”, IEEE-SA Standards Board, 2013
- [24] Android Studio main page : <https://developer.android.com/studio/>
- [25] “*Regenerative Braking: how it works and is it worth en small EVs ?*”, nota del 24/04/2018 en Electrek.co [Online]. Disponible en: <https://electrek.co/2018/04/24/regenerative-braking-how-it-works/>