

**UPDATE OF CATERPILLAR MOBILE ROBOT ALL TERRAIN - RAPPTER****ACTUALIZACIÓN DEL ROBOT MÓVIL ORUGADO TODO TERRENO -  
RAPPTER**

**MSc. Camilo Andrés Sanabria Totaitive, MSc. Luis Ariel Mesa Mesa  
MSc. Nelson Barrera Lombana.**

**Universidad de Pedagógica y Tecnológica de Colombia – UPTC**  
Grupo de Investigación en Robótica y Automatización Industrial GIRA-UPTC  
Escuela de Ingeniería Electrónica. Calle 4 Sur # 15-134, Sogamoso, Boyacá, Colombia.  
Tel.: (+578)-7705450, Ext. 241  
E-mail: {camilo.sanabria, ariel.mesa, nelson.barrera}@uptc.edu.co

**Abstract:** This paper presents the design procedure and implementation of some electronic modules used in updating the UGV (Unmanned Ground Vehicle) RAPPTER developed by the Robotics and Industrial Automation Research Group-GIRA of the Pedagogical and Technological University of Colombia Uptc. Between the different modules designed are: a power source flyback type, used for to isolate the command circuits of the power elements, a switched battery charger for efficient handling of the battery and a motor control that adjusts the speed of each caterpillar on any terrain according to the reference sent by the central embedded system. This central system performs all prototype functions of robotic navigation and wireless communication with a remote station of tele-operation by means of a link based on ZigBee technology.

**Keywords:** DC converter, UGV, robot.

**Resumen:** Este artículo presenta el procedimiento de diseño e implementación de algunos módulos electrónicos utilizados en la actualización del UGV (vehículo terrestre no tripulado) RAPPTER desarrollado por el Grupo de Investigación en Robótica y Automatización Industrial-GIRA de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Uptc. Entre los diferentes módulos diseñados se encuentran: una fuente de alimentación tipo flyback, utilizada para aislar los circuitos de comando de los elementos de potencia, un cargador de baterías conmutado para un manejo eficiente de la batería y un control de motores que ajusta la velocidad de cada oruga en cualquier tipo de terreno de acuerdo a la referencia enviado por un sistema embebido central. Este sistema central realiza todas las funciones de navegación del prototipo robótico y la comunicación inalámbrica con una estación remota de tele-operación por medio de un enlace basado en tecnología ZigBee.

**Palabras clave:** Convertidor DC, UGV, robot.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos terrestres no tripulados conocidos por sus siglas en inglés como UGV, han tenido un amplio desarrollo en los últimos años con la aparición de compañías como iRobot (página web oficial, 2013), que desarrollo un robot tipo oruga llamado PackBot para ser utilizados en ambientes no estructurados en operaciones civiles y militares donde la vida humana pueda correr algún tipo de riesgo (desactivación de explosivos, edificios colapsados, zonas de

peligroso tóxico, etc). Aunque los robots con orugas son solo uno de los posible tipos de robots todoterreno como se expresa en (Lagolnitzer, 1992), han sido unos de los más estudiados tanto en su cinemática (Song, *et al*, 2008) y dinámica como en su tele-operación, existiendo trabajos como (Horen, *et al*, 2007) donde se han implementado controles hápticos de realimentación de fuerzas entre el prototipo robótico y el operario para mejorar su manipulación y navegabilidad. En Colombia se ha presentado trabajos de robots móviles

teleoperados como el GEOBOT (García y González 2003) y el TMR-1 (González y Durán 2009) y estudios de la cinemática de robots todoterreno en aplicaciones de agricultura (Torres, et al. 2013).

RAPTTER (Robot móvil orugado multipropósito todoterreno) es un vehículo robótico terrestre no tripulado tipo oruga, desarrollado en el año 2007 por los Ingenieros Camilo Andrés Sanabria y Luis Ariel Mesa como un proyecto de investigación en el grupo GIRA de la Uptc, con la capacidad de ser controlado y monitoreado desde una computadora mediante el uso de un enlace inalámbrico. El robot está dotado de una cámara de video y un grupo de sensores, internos y externos que le permiten explorar ambientes inaccesibles o que pueden representar riesgos para la integridad humana.

El proyecto RAPTTER II, realizado por los Ingenieros Libardo Hernández y Nelson Barrera (Fig. 1), realiza la actualización tecnológica y corrige las fallas detectadas en diferentes pruebas realizadas desde el año 2007 al primer prototipo en los módulos de alimentación, control y teleoperación. Las mejoras establecidas y mostradas en este artículo, permitieron un uso eficiente de la energía de las baterías y un mayor control y operatividad del móvil.



Fig 1. Estructura física RAPTTER II

## 2. FUENTES DE ALIMENTACIÓN

En su primera versión, RAPTTER tenía un sistema de alimentación compuesto por 3 bancos de baterías que se utilizaban para alimentar sus circuitos de control y potencia de forma independiente (siendo estos elementos los que tenían mayor influencia en el peso del móvil) y utilizaba reguladores lineales que no hacían un uso eficiente de la energía almacenada en las baterías, ocasionando que el robot solo fuera operativo por 20 minutos. Los problemas originados por este sistema son corregidos al cambiar los reguladores lineales del móvil por dos convertidores DC-DC conmutados tipo Buck

que proporcionen salidas de 12Vdc a 7W y 8Vdc a 8W respectivamente y un convertidor DC-DC tipo Flyback, el cual proporciona aislamiento eléctrico entre la entrada y la salida de 5Vdc-5W, permitiendo reducir la alimentación del robot a un solo banco de baterías de 23Vdc a 58W.

### 2.1 Diseño e implementación del convertidor tipo Flyback.

En la figura 2 se presenta el modelo del convertidor Flyback utilizado en el robot. Para efectos del diseño el transformador es modelado como un transformador ideal con relación de transformación  $a=n1/n2$  y una inductancia de magnetización  $Lm$  como se observa en la figura.

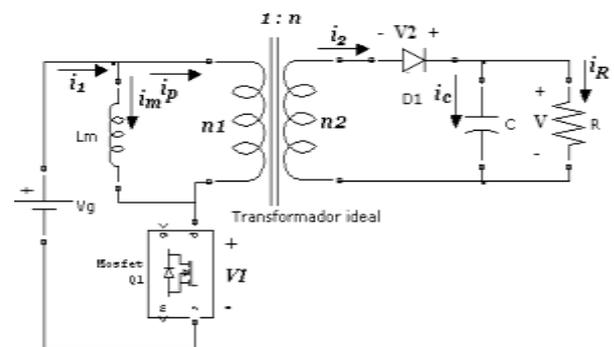


Fig. 2. Topología del convertidor tipo Flyback

Al realizar el modelamiento matemático del convertidor considerando un modo de conducción discontinuo (la corriente promedio del inductor es cero en un periodo de conmutación) y linealizando sobre el punto operación deseado como se detalla en (Erickson R. W, 2004), se obtiene la función de transferencia lineal  $G_{vd}(s)$  (1) que representa la relación entre el voltaje de salida de la flyback y las variaciones del ciclo útil  $D$  de conmutación del Mosfet. Como términos constantes se tiene el valor de la inductancia de magnetización  $Lm$ , el periodo de conmutación del convertidos  $Ts$ , la relación de vueltas del transformador  $a$ , el voltaje de entrada  $Vg$ , el voltaje de salida  $V$  y la carga del convertidor representada por el valor de la resistencia  $R$ .

$$G_{vd}(s) = \frac{2 \cdot V_1}{M \cdot D \cdot Re'} \frac{M^2 \cdot Re' \cdot R}{M^2 \cdot Re' + R} \frac{1}{1 + \frac{s}{\frac{M^2 \cdot Re' + R}{M^2 \cdot Re' \cdot R \cdot C}}} \quad (1)$$

$$M = \frac{V}{Vg} = \frac{1}{a} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot Ts \cdot D^2}{2 \cdot Lm/a^2}}$$

$$Re' = \frac{2 \cdot Lm}{a^2 \cdot Ts \cdot D^2}$$

La carga del convertidor en el robot móvil puede variar conforme este navegando sobre un terreno

determinado, así que es necesario analizar el efecto de este cambio en la función de transferencia  $G_v(s)$ , presentando en la figura 3 el efecto de tales variaciones en un diagrama de bode. En la figura se observa que la respuesta del convertidor cuando la resistencia de carga  $R$  es igual a  $5000\Omega$  (resistencia de sensado), presenta un menor ancho de banda, considerando esta situación como el peor caso de operación y por consiguiente la función candidata para el diseño del controlador, debido a que si el controlador otorga una buena respuesta a esta resistencia, para la demás cargas que tienen un mejor comportamiento, se presentaran mejores resultados en el ancho de banda y el margen de fase en lazo cerrado.

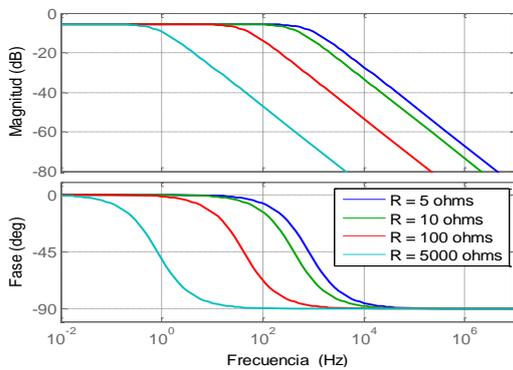


Fig. 3. Diagrama de Bode de la función de transferencia del convertidor.

El controlador se implementó utilizando como base el integrado TL431 (Ridley R., 2007), en la configuración mostrada en la figura 4, que corresponde a la función de transferencia mostrada en (2).

$$G_c(s) = \frac{1}{R1 \cdot s} \cdot \frac{R3 \cdot C_2 \cdot s + 1}{R3 \cdot C_2 \cdot C_1 \cdot s + C_1 + C_2} \quad (2)$$

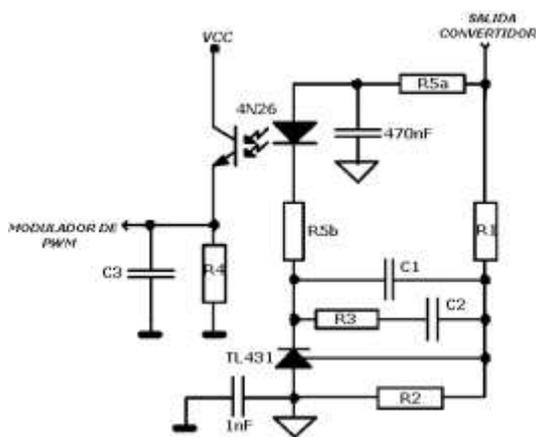


Fig. 4. Topología de control con el TL431

La función de ganancia del lazo directo  $T$  del sistema de control se observa en la figura 5a, como se describe en (Erickson, 2004; Alfaro,

2003; Chen); esta función describe algunos rasgos importantes sobre el comportamiento del convertidor, así de la gráfica se aprecia como la ganancia de lazo a bajas frecuencias es grande, por tanto las influencias de las perturbaciones sobre el voltaje de salida son pequeñas debido a variaciones lentas de la entrada y de la carga. La respuesta en frecuencia en lazo cerrado del convertidor *flyback* a cambios de carga se observa en la 5b, comprobándose la suposición realizada para el diseño del controlador con la peor función.

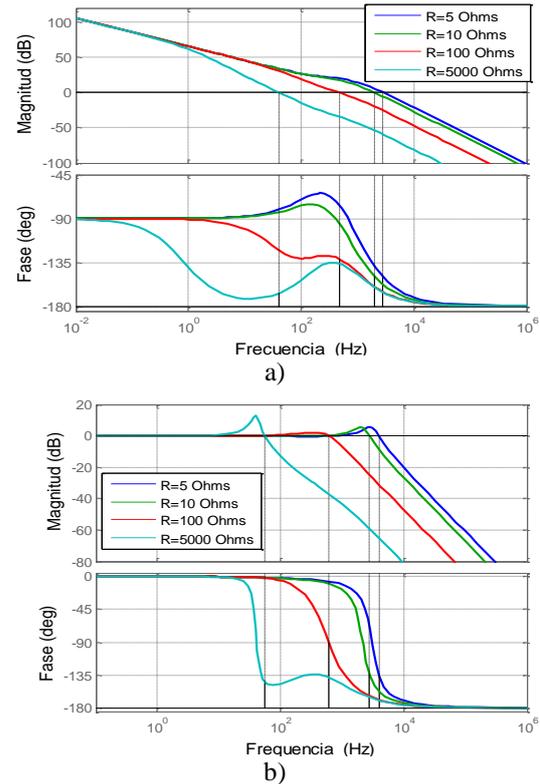


Fig. 5. a) Diagrama de lazo  $T$  del sistema. b) Respuesta del convertidor ante variaciones de carga en lazo cerrado.

## 2.2 Fuentes de sensores y cámara abordo.

En las aplicaciones de robótica, el espacio juega un papel importante a la hora de decidir utilizar elementos eléctricos o electrónicos, por lo tanto para el proyecto RAPTTER II, se decidió utilizar para las fuentes auxiliares convertidores tipo Buck integrados como el TL2575, el cual solo necesita unos pocos componentes pasivos externos para realizar la conmutación del convertidor y el control del voltaje de salida mediante un controlador del tipo PI.

## 2.3. Cargador de baterías

Se construyó un cargador rápido de baterías en base al circuito integrado MAX712/713, dedicado a la carga de las baterías Níquel

Cadmio (NiCd), con un lazo de control interno de voltaje y un lazo externo de corriente, cargando las baterías de acuerdo con la curva que entrega el fabricante.

### 3. CONTROL DE MOTORES

Con el objetivo de lograr que el robot móvil logre realizar de manera confiable las trayectorias ordenadas desde la estación base o programadas en las rutinas autónomas, es necesario garantizar que las orugas se muevan a una determinada velocidad.

#### 3.1 Modelamiento del sistema

Para obtener una función de transferencia que describa matemáticamente la dinámica entre la oruga del robot móvil y el motor DC, se utilizó el método de curva de reacción como se define en (Alfaro, 2003), obteniéndose los resultados de la figura 6. Con base en el método de dos puntos de Smith (Alfaro, 2003) y la información recolectada se obtiene la función de transferencia del movimiento de la oruga del prototipo:

$$Gp(s) = \frac{1.02 \cdot e^{-0.0021}}{0.0129 \cdot s + 1} \quad (3)$$

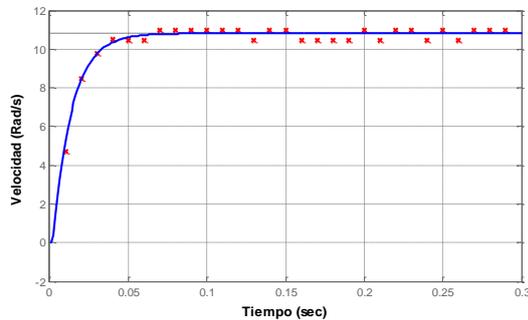


Fig. 6. Curva de reacción de la oruga

#### 3.2 Diseño del controlador

Se implementó un controlador Proporcional-Integral PI, debido a su amplia aplicación en sistemas de velocidad de primer orden y a su excelente desempeño en sistemas de control de motores.

Utilizando el método de Chien, Hrones y Reswick (Alfaro 2007), se determinaron los parámetros de ganancia proporcional y tiempo integral del controlador PI, los cuales fueron ajustados mediante simulación obteniéndose los resultados mostrados en la figura 7.

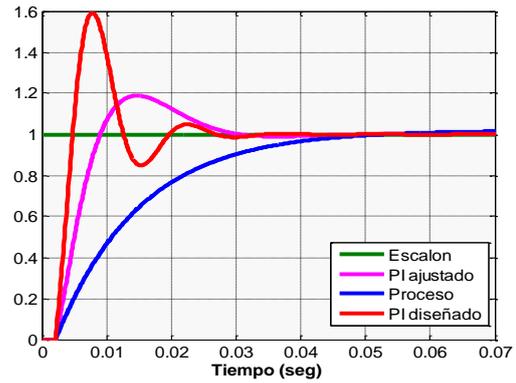


Fig. 7. Respuesta de los parámetros PI

El controlado PI fue implementado en un microcontrolador de la familia dsPIC, obteniéndose primero una función discretizada mediante la aproximación trapezoidal de la integral, con un tiempo de muestreo de 2ms como se muestra en (4), y luego para su programación se encuentra la ecuación de diferencias en (5).

$$G_{CT}(z) = 1.6875 + \frac{0.625}{1 - z^{-1}} \quad (4)$$

$$U(k) = U(k-1) + 2.3125R(k) - 1.6875R(k-1) - 2.3125Y(k) + 1.6875Y(k-1) \quad (5)$$

#### 3.3 Diseño del software de control de motores

Para la implementación del control de velocidad para los motores del prototipo robótico se deben cumplir las siguientes tareas: lectura de los encoders ópticos de cada motor, cálculo de dos controladores PI discretizados, y manejo del hardware asociado al funcionamiento de los motores compuesto por dos puentes H DRV8432 de Texas Instruments. Teniendo en cuenta las anteriores tareas se diseñó el software con un módulo central que realiza el manejo del programa y que utiliza otros módulos de software y hardware-software para el desarrollo de la aplicación como se muestra en la figura 8. El software desarrollado para el control de motores se divide en módulos de software (módulos de color azul y rojo) y hardware-software (módulos de color naranja) que permite al diseñador concentrarse en la tarea de programar un módulo a la vez, utilizando estructuras de datos y apuntadores de memoria para poder transferir la información entre módulos de una forma rápida y eficiente para el microcontrolador. Cada módulo cuenta con un archivo del tipo C que contiene el código de las funciones a ejecutar y un archivo .H o librería que le permite definir los tipos de datos y funciones para poder comunicarse con los demás módulos. Los módulos hardware de color verde

corresponden a los periféricos del microcontroladores, siendo estos, los únicos módulos que se deben reprogramar si el software se migra a otro dispositivo

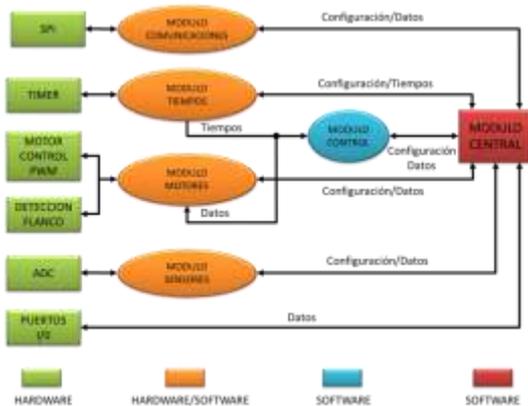


Fig. 8. Diagrama del sistema embebido para el control de motores

#### 4. CONTROL CENTRAL DEL ROBOT MÓVIL RAPTTER

El control central es el corazón del funcionamiento del robot móvil, se encarga de la comunicación con la estación base para recibir los parámetros de funcionamiento del robot y enviar los datos de telemetría para la supervisión del prototipo robótico.

Controla cada una de las funciones que realiza el robot, entre las que se tiene la comunicación con el microcontrolador encargado de realizar el control de velocidad de las orugas, lectura de sensores, lectura del estado las baterías, encendido de los periféricos como la cámara de video, así como su posicionamiento axial mediante un servomotor para ampliar el rango de visión del robot.

Además se cuenta con la posibilidad de programación de rutinas autónomas de desplazamiento del móvil o algoritmos para que el robot pueda navegar en ambiente no estructurados. En la figura 9, se muestra el esquema del diseño del software para responder a las diversas tareas que deba cumplir el control central.

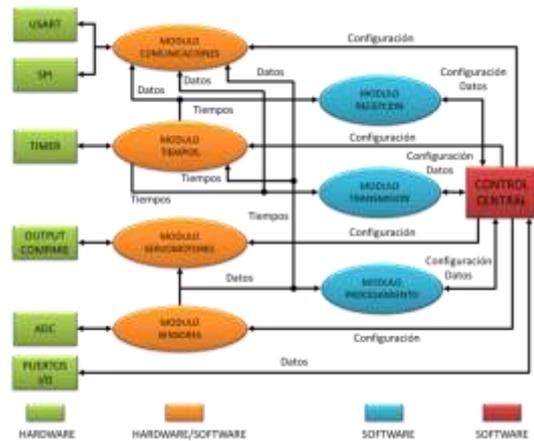


Fig. 9. Diagrama del software del control central

#### 5. ESTACIÓN BASE DE TELE- OPERACIÓN

El sistema de tele-operación realiza la transmisión de datos bidireccional entre la estación base y el prototipo robótico por medio de una comunicación inalámbrica implementada por módulos Xbee Pro. Para la implementación del sistema de teleoperación se diseñaron dos sistemas embebidos basados en microcontroladores PIC en una “estación base” remota y en el prototipo robótico.

El software programado en el microcontrolador ubicado en la estación base remota establece una comunicación USB con la interfaz HMI (interfaz hombre maquina) del PC para el intercambio de la información de control de las funciones de navegación del robot y la visualización de los datos de telemetría del vehículo. Para lograr el envío y recepción de los datos se utiliza un protocolo de comunicación diseñado específicamente para esta tarea.

El programa del microcontrolador de la estación base se diseñó de forma modular dividiendo las tareas, haciendo el código más legible y estructurado como se muestra en la figura 10. Estos módulos agrupan las funciones de cada uno de los elementos que componen el software de la estación base. Estas funciones son posteriormente utilizadas por el programa principal o por otras librerías logrando de esta manera un código fácil de usar y reutilizable.

El módulo de color rojo hace referencia al control central encargado de controlar el flujo de programa y realizar la configuración de las funciones utilizadas en la aplicación. Los módulos de color azul contienen el software encargado de la recepción y transmisión de los datos que se envían a través de la red

inalámbrica. Los módulos de software-hardware de color naranja sirven de interfaz entre los módulos de software y el hardware realizando mediante un manejo de la memoria RAM, utilizando los conceptos de estructuras de datos y apuntadores de lenguaje C y la distribución de los registros de los periféricos del microcontrolador.

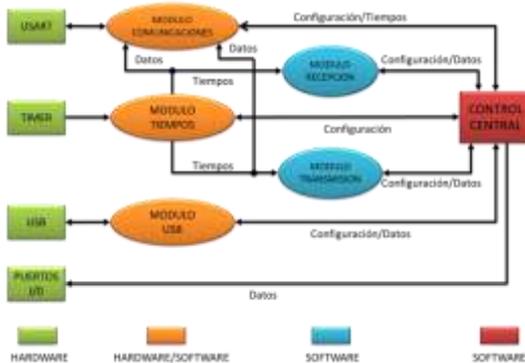


Fig. 10. Diagrama del sistema embebido implementado

## 6. INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA

La interfaz hombre maquina (HMI) es la encargada de establecer la comunicación con la estación base de tele-operación para enviar los datos de control de las funciones de navegación y recibir la información de telemetría del robot a través de una conexión USB. La interfaz se desarrolló en el programa LabVIEW que permite adquisición, procesamiento y visualización de la información utilizada en la tele-operación del vehículo. Las funciones del robot son controladas con un control de mando tipo gamepad (control de mando) que permite facilitar las tareas de tele-operación como se menciona en (Horen, 2007), además el vehículo también dispone de una cámara de video inalámbrica para observar el ambiente exterior en el que navega el prototipo robótico.

El panel frontal de la interfaz HMI se compone de tres pestañas que clasifican los datos en dos grupos: configuración y supervisión; las variables de supervisión se dividen en variables externas y variables internas que le permiten al usuario lograr una mejor visualización de la información de tele-operación.

En la figura 11 se muestra los parámetros de configuración de la comunicación inalámbrica con el robot móvil, el estado del dispositivo de video y los tiempos de transmisión y recepción de datos, además de indicadores de la información enviada y recibida por el robot.

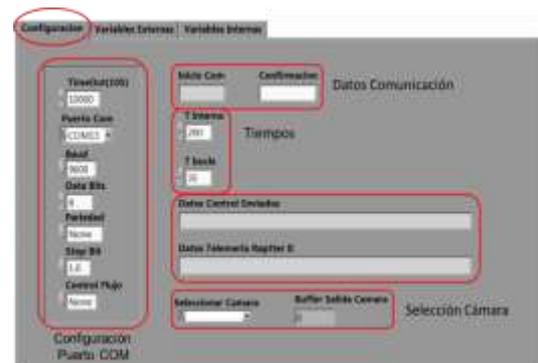
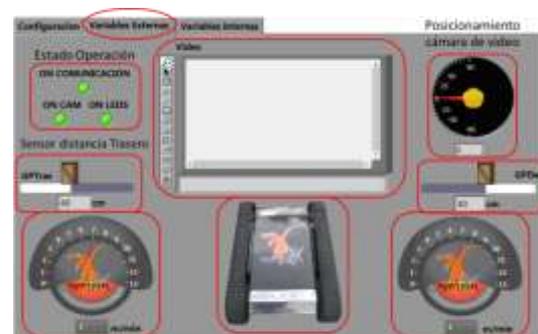
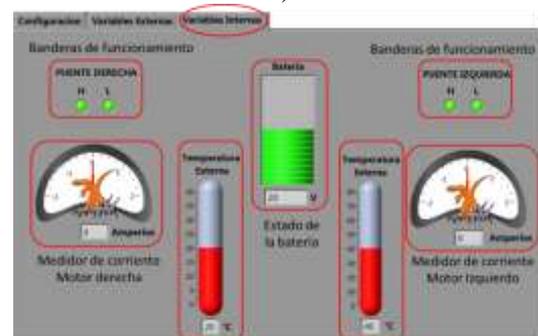


Fig. 11. Configuración de los parámetros de comunicación y selección de la cámara de video.

En la figura 12a se muestra la distribución e indicadores de las variables externas del prototipo robótico, donde se encuentra la velocidad y sentido de giro de la oruga izquierda y derecha, el posicionamiento vertical de la cámara de video y el sensor de distancia delantero, el panel de visualización y estado de la cámara de video inalámbrica, lectura de los sensores de distancia delantero y trasero, estado de la comunicación y los sistema de iluminación. En la figura 12b se observa la distribución e indicadores de las variables internas del prototipo robótico, se encuentra el nivel de voltaje de la batería, temperatura, sensores de corriente y estado de funcionamiento de los drivers de corriente de los motores.



a)



b)

Fig. 12. a) Visualización en la interfaz de las variables externas, b) Visualización en la interfaz de las variables internas

## 7. RESULTADOS

En la figura 13a se observa la respuesta del convertidor flyback implementado en robot cuando pasa del estado de apagado a encendido con plena carga, presentando un tiempo de estabilización de 1.6ms, un error en estado estable del 2%, un rizo de voltaje del 4% del voltaje de salida (200mV) y un 20% de sobrepaso máximo. En la figura 13b y 13c se observan los oscilogramas del rizo de voltaje de salida de los convertidores tipo Buck de 12V y 8V respectivamente implementados con el TL2575. Los valores del ripple de voltaje de salida son de 1.41% para 12.4 V y 1.9% para 8 V, resultados obtenidos a plena carga, estando dentro de la tolerancia de voltaje de los elementos conectados a estas fuentes.

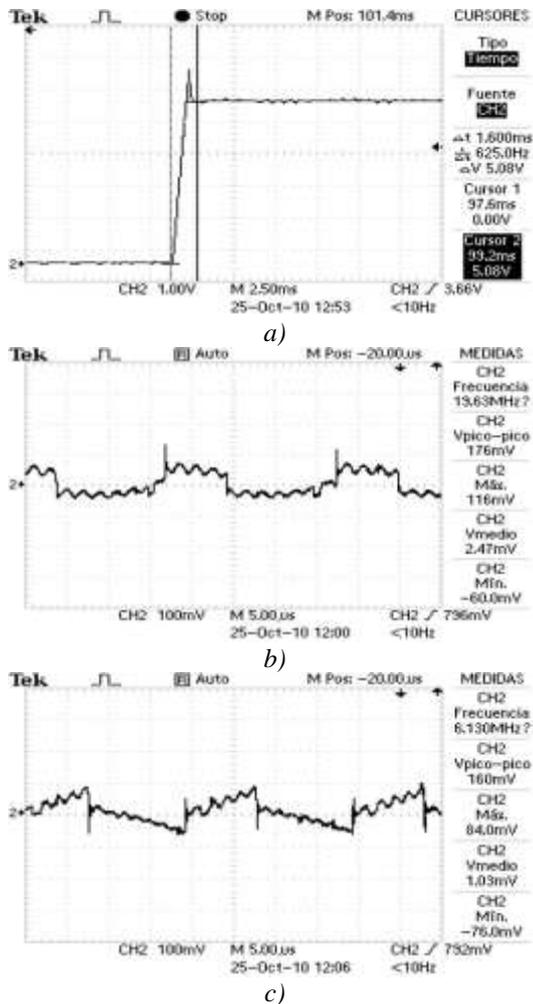


Fig. 13 a) Respuesta del convertidor flyback. b) y c) Rizo del convertidor Buck de 12V y 8V.

En la figura 14, se presentan las tarjetas desarrolladas para el robot móvil en sus diferentes módulos mencionados en las secciones anteriores: fuente de alimentación, control de motores y control central. Las dos últimas tarjetas se diseñaron con la posibilidad de

cambiar los microcontroladores y debido a que son tarjetas de un prototipo robótico para realizar diferentes pruebas en el grupo de investigación GIRA y construidas por el mismo, se han permitido la posibilidad de reemplazar los circuitos integrados si son dañados y reprogramar los microcontroladores directamente en las tarjetas. La tarjeta de control de motores cumple entre otras funciones, la tarea de adquirir y procesar la temperatura de los motores, recibir la información de los encoders ópticos, medición la corriente de cada motor y el mando de las características del Puente H implementado.

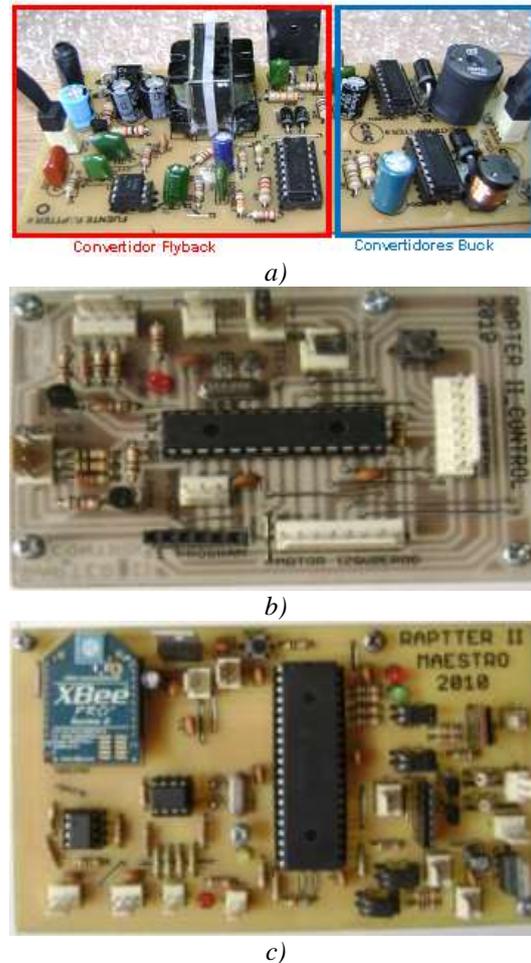


Fig. 14. Circuito impreso de los diferentes modulo del robot RAPTER.

a) Fuentes de alimentación, b) Control de motores, c) Control central.

En la figura 15 se presentan las tarjetas de la estación remota y el cargador de baterías desarrollado para el prototipo. El cargador de baterías permite la configuración de dos tipos de carga rápida y del número de pilas a recargar en el banco teniendo como límite un total de 16 conectadas en serie. La tarjeta de la estación remota tiene un módulo XBee PRO Serie 2 configurado como maestro, con la posibilidad de comunicación con hasta 128 robots esclavos.

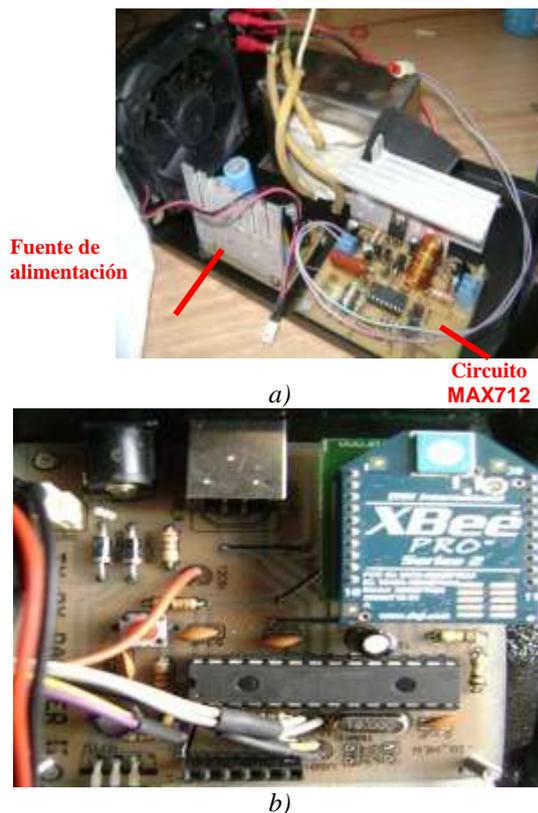


Fig. 16. a) Cargado rápido de baterías de RAPTTER II, b) Tarjeta de control remoto.

## 8. CONCLUSIONES

El aislamiento eléctrico entre el voltaje de entrada del robot y el voltaje de salida para las tarjetas de control de motores y control central, provisto por el convertidor flyback permitió tener bajo ruido eléctrico en los sistemas de comunicación y control del móvil, favoreciendo así su desempeño.

La implementación de los convertidores tipo Buck y Flyback como fuentes de alimentación, permitieron que el prototipo pasara de utilizar 52 baterías AA de 2500mAh a solo 16, y se logró incrementar el tiempo de operación de 20 minutos a 60 minutos.

El diseño de una interfaz hombre máquina que permite el control de las funciones de navegación del prototipo robótico a través de un control de mando tipo gamepad, hace posible una operación remota más cómoda e intuitiva para el usuario y esto sumado a la utilización del protocolo ZigBee en la implementación del enlace inalámbrico entre el robot y la estación base de teleoperación aumento el rango de cobertura a 200 m con línea de vista y la confiabilidad en la comunicación de datos.

## RECONOCIMIENTO

Los autores, expresan su gratitud al Grupo de Investigación “GIRA”, adscrito a la Escuela de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Uptc, Sede Seccional Sogamoso y a los ingenieros Librado Hernández y Nelson Barrera Toca.

## REFERENCIAS

- iRobot. “Robots de defensa y seguridad - Robots terrestres” (2014). [http://www.irobot.com/global/es/explore\\_irobot/government\\_industrial\\_robots.aspx](http://www.irobot.com/global/es/explore_irobot/government_industrial_robots.aspx) (Consultado: 20 de marzo de 2014).
- Lagolnitzer, M., et al. (1992) “Locomotion of an all-terrain mobile robot”. Robotics and Automation, 1992. Proceedings, Vol 1, pp 104-109.
- Song, X., Wang, Y., Wu, Z. (2007) “Kinematical model-based Yaw calculation for an all-terrain mobile robot”. Advanced Intelligent Mechatronics, pp 274-279.
- Horen, B., et al. (2007). “Bilateral haptic teleoperation of an articulated track mobile robot”. System of Systems Engineering. SoSE '07. IEEE International Conference, pp 1-8.
- García H., N. y González P., M. (2003), “Robot de exploración terrestre “GEOBOT”. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol 1.
- Gonzalez P., M. y Durán A., C. (2009) “El TMR-1. Un robot Móvil teleoperado” Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol 2, No 14.
- Torres, C. et al. (2013). “Estudio Cinemático de una plataforma robótica para agricultura” Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol 2, No 22.
- Erickson R., W. (2004). *Fundamentals of power electronics*. 2ed. USA: Kluwer Academic Publisher, pp. 147.
- Ridley, R. (2007) “Using the TL431 in a Power Supply”. En: Power Systems Design Europe, pp.16-18.
- Alfaro, M. (2003) “Laboratorio de Control Automático [apuntes de clase]”. Universidad de Costa Rica. Departamento de automática.
- Chen C., T. *Analog and digital control design: Transfer-function, State-Space and Algebraic Methods*. Saunders College Publishing.