

Diseño e Implementación del control electrónico de velocidad con freno regenerativo para una plataforma autónoma móvil terrestre con tracción diferencial

Eduardo Avila Verónica Cuásquer Leonardo Ortega, M.Sc. Marcelo Pozo, Ph.D.

*Escuela Politécnica Nacional
E-mail: sergio.avila@epn.edu.ec
E-mail: veroclan@hotmail.es
E-mail: leonardo.ortega@epn.edu.ec
E-mail: marcelo.pozo@epn.edu.ec*

Resumen.- En el presente trabajo se ha diseñado e implementado un controlador electrónico de velocidad (CEV) el cual regula la velocidad y dirección de movimiento de dos motores, de 1.7 HP de potencia cada uno, a través del control del voltaje de alimentación de armadura mediante convertidores DC-DC tipo puente completo. Para realizar el control se aplican lazos cerrados de control en cascada para la corriente y para la velocidad. Cuando se detecta que las máquinas DC actúan en modo de operación como generadores se direcciona dicha energía hacia un banco de ultracapacitores por medio de un sistema de frenado regenerativo. Si el nivel de carga de éstos es suficiente, apoyan a la batería durante requerimientos bruscos de corriente. La plataforma autónoma móvil terrestre utilizada tiene una masa total de 95 kg y se realizaron pruebas de funcionamiento en diferentes terrenos tanto planos como inclinados hasta alcanzar velocidades lineales de 1.5 m/s dando resultados muy satisfactorios.

Índices— controlador de corriente, controlador de velocidad, convertidores dc/dc, freno regenerativo, motor dc.

I. INTRODUCCIÓN

El Controlador Electrónico de Velocidad (CEV) es un dispositivo electrónico cuyo circuito principal es un convertidor formado por una red de transistores de efecto de campo (MOSFETs), los cuales regulan el paso de energía de la fuente hacia los motores, permitiendo una variación suave, precisa y eficiente de la velocidad, de la dirección y del torque del motor eléctrico.

Las empresas líderes en fabricación de vehículos se están centrando en investigar, crear y mejorar plataformas cuya propulsión provenga de motores eléctricos de alta eficiencia [1].

El control de velocidad en estos vehículos juega un factor indispensable determinado por las máximas velocidades alcanzadas, el peso soportado, los tiempos de aceleración y

desaceleración, entre otras variables a considerar. Un CEV permite que el movimiento del vehículo sea hacia adelante o hacia atrás, giros, e incluso algunos tienen las opciones de utilizar ya sea freno dinámico o freno regenerativo [1].

El objetivo del presente proyecto es diseñar e implementar un sistema que controle la velocidad de dos motores de una plataforma autónoma móvil terrestre y que re direccione la energía generada cuando las máquinas actúan como generadores hacia un banco de ultracapacitores.

Para la conversión estática de la energía se utilizan dos convertidores DC/DC tipo puente completo para controlar el flujo de energía desde baterías o ultracapacitores hacia los motores y viceversa. En la Fig. 1 se muestran los MOSFETs S1 y S2, que actúan como interruptores para direccionar la energía desde baterías hacia motores o desde motores hacia el banco de ultracapacitores, respectivamente.

Además de utiliza el diodo D1 para impedir que la energía regenerada regrese a baterías y asegurar su almacenamiento en los ultra capacitores. El esquema general del proyecto se presenta en la

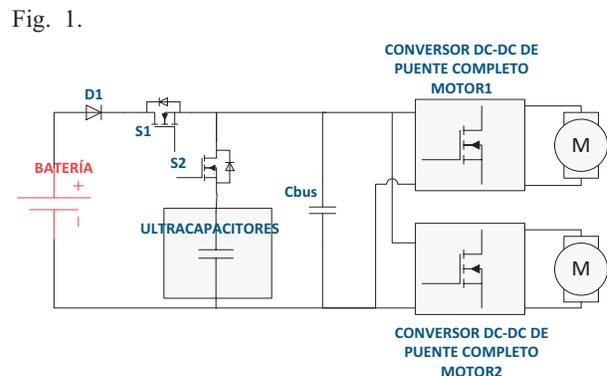


Fig. 1. Esquema General del CEV

II. CONTROL DE LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

A. Operación en cuatro cuadrantes

El convertidor DC/DC tipo puente completo mostrado en la Fig. 2 está constituido por cuatro semiconductores de potencia actuando como interruptores que son usados para la operación de un motor DC en cuatro cuadrantes, es decir, control bidireccional de voltaje y de corriente.

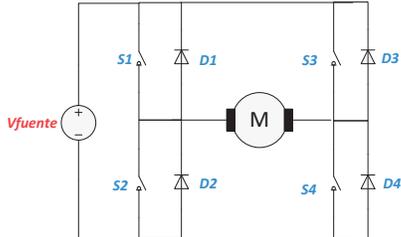


Fig. 2 Convertidor DC/DC de Puente Completo

III. ANÁLISIS DINÁMICO DE UN SISTEMA MÓVIL [2] [3]

En la Fig. 3 se observan las fuerzas involucradas en el ascenso de un móvil. En la ecuación (1) se realiza el análisis dinámico del sistema.

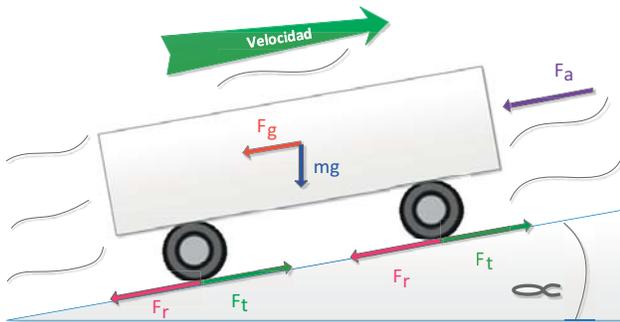


Fig. 3. Diagrama de fuerzas de un móvil en ascenso por una pendiente

$$\sum F_x = m \cdot a = F_t - (F_a + F_r + F_g) \quad (1)$$

Siendo:

m: Masa de la plataforma móvil en (kg).

a : Aceleración en $\left(\frac{m}{s^2}\right)$.

F_t : Fuerza resultante de tracción en (N).

F_a : Fuerza de resistencia aerodinámica (N).

F_r : Fuerza de resistencia a la rodadura (generada en el punto de contacto con el terreno) (N).

F_g : Fuerza generada por la aceleración de la gravedad cuando el vehículo sube una pendiente de ángulo α (N).

La fuerza de resistencia aerodinámica F_r se opone al movimiento y matemáticamente queda definida por [2]:

$$F_a = 0,5 \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot C_x \cdot v^2 \quad (2)$$

Siendo:

ρ_a : Densidad del aire en $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

A_f : Área frontal del vehículo en (m^2).

C_x : Coeficiente de penetración aerodinámica.

v : Velocidad lineal $\left(\frac{m}{s}\right)$.

La fuerza de resistencia a la rodadura F_r que también se opone al movimiento está dada por:

$$F_r = C_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (3)$$

Siendo:

C_r : Coeficiente de rodadura

g : Aceleración de la gravedad en $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

α : Ángulo de elevación ($^\circ$)

La fuerza gravitatoria F_g se opone al movimiento del vehículo cuando éste asciende, caso contrario favorece al movimiento.

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (4)$$

A. Fuerza de tracción

Es la fuerza ejercida por la máquina motriz para conseguir que el vehículo se desplace. Está determinada por características intrínsecas como el torque del motor, caja de cambios, rendimiento del sistema entre otros.

Durante el arranque desde el reposo hasta el valor de velocidad deseado se tiene que la fuerza total ejercida por el motor se obtiene a partir de la ecuación (1).

$$F_t = m \cdot a + F_a + F_r + F_g \quad (5)$$

Cuando el móvil ha alcanzado una velocidad constante la aceleración es nula y la fuerza de tracción disminuye a:

$$F_t = F_a + F_r + F_g \quad (6)$$

B. Fuerza total durante el descenso

Una de las condiciones durante la cual se puede regenerar energía y direccionarla hacia una fuente de almacenamiento es la situación en la cual la plataforma se mueve por una bajada y no se requiere que el motor ejerza una fuerza de tracción F_t porque la fuerza del peso F_g (debido a la inclinación del terreno) se encarga de acelerar al móvil. Bajo esta situación, se determina la fuerza total del móvil F_{total} a partir de las fuerzas indicadas en la Fig. 4.

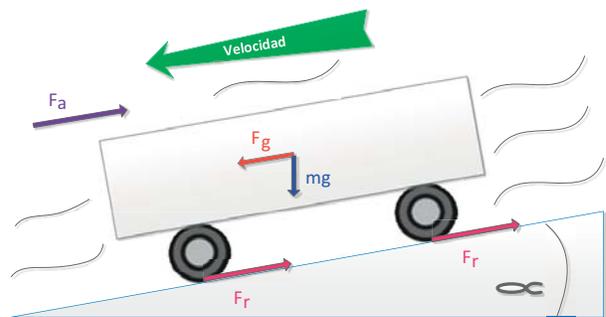


Fig. 4. Diagrama de fuerzas de un móvil en descenso por una pendiente

$$\sum F = m \cdot a = F_g - (F_a + F_r) \quad (7)$$

$$F_{total} = F_g - F_a - F_r \quad (8)$$

IV. ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA

En la TABLA I se muestra el valor de los parámetros explicados en la sección III.

TABLA I
PARÁMETROS DINÁMICOS

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Masa m	95.38 kg	Densidad del aire ρ_a	0.94 kg/m ³
Área frontal Af	0.34 m ²	Coefficiente de penetración aerodinámica Cx	0.7
Velocidad lineal v	1.5 m/s	Radio de las llantas r	0.285 m
Velocidad angular de motores $\dot{\phi}$	5.26 rad/s (50 rpm)	Aceleración en el arranque a	1.25 m/s ²
Ángulo de elevación α	10°	Aceleración de la gravedad g	9.81 m/s ²
Coefficiente de rodadura Cr (tierra labrada)	0.2	Coefficiente de rodadura Cr (terreno asfaltado)	0.02

Cuando las máquinas DC actúan como motores deben lograr mover a la plataforma incluso en terrenos de tierra labrada (Cr=0.2) mientras que cuando están actuando como generadores se requiere un terreno más uniforme como lo es el asfalto de manera que el coeficiente de rodadura sea menor (Cr=0.02).

La potencia que deben entregar los motores está ligada a la fuerza de tracción Ft y a la velocidad v a la cual se está moviendo la plataforma.

$$P_{motores} = F_t \cdot v \quad (9)$$

Bajo estas condiciones, la fuerza ejercida por los motores durante el arranque en una pendiente $\alpha=10^\circ$ según la ecuación (5), resulta ser 464.33N que implica una potencia de 697 Vatios (0.93 HP). En estado estable (es decir $v=cte$) se ejerce una fuerza de tracción menor cuyo valor es de 345.58 N que se asocia con una potencia de 518.37 Vatios (0.69 HP).

La fuerza total durante el descenso se obtiene a partir de la ecuación (8) y resulta ser de 143.23 N que implica una potencia de 214 Vatios (0.28 HP) cuando desciende a una velocidad constante de 1.5 m/s.

Los motores utilizados en este proyecto presentan en la TABLA II:

TABLA II
DATOS DE PLACA DEL MOTOR

Descripción	Valor
Voltaje nominal	24 V (máximo 36 V)
Potencia nominal	1.7 HP (1266.5 W)
Masa	14.4 lbs
Velocidad nominal	245 RPM
Relación de caja reductora	20:1

Tipo de motor	DC de Imán permanente
Sentido de giro	Reversible

V. SISTEMA DE FRENADO

A. Dimensionamiento de ultracapacitores

La energía regenerada está en función de la potencia regenerada durante un determinado intervalo de tiempo t y es igual a la energía que se almacena en el banco de UC

$$E_{regenerada} = \int Potencia_{regenerada} dt \quad (10)$$

$$= \frac{1}{2} C_{total} V^2$$

Así, la capacitancia total del banco de UC se calcula en función del voltaje final Vf y del inicial Vo [4].

$$C_{total} = \frac{2E_{regenerada}}{V_f^2 - V_o^2} \quad (11)$$

Se requiere el acoplamiento en serie de n capacitores de igual valor Ci.

$$\frac{1}{C_{total}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} = \frac{n}{C_i} \quad (12)$$

Se toma como base a la potencia de regeneración (214 W) que se estimó en la sección IV.A por lo cual se usan 10 capacitores de 400 F, 2.7 V. El banco de UC resulta ser de 40 F capaz de cargarse hasta 27V.

VI. MODELAMIENTO DE LOS MOTORES

A. Parámetros eléctricos

Los valores de los parámetros eléctricos pueden ser determinados a partir de la ecuación del circuito equivalente obtenido del devanado del inducido:

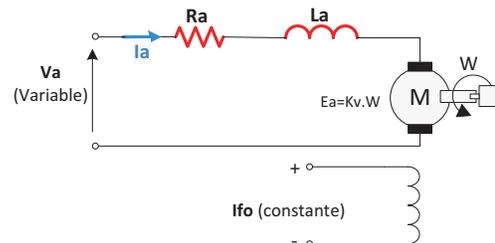


Fig. 5 Modelo electro-mecánico de un motor DC de imán permanente

El valor instantáneo del voltaje de armadura Va está dado por la ecuación (13).

$$V_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_a \quad (13)$$

Dónde:

Va : Voltaje de armadura aplicado a los terminales (V).

i_a : Corriente de armadura (A).
 R_a : Resistencia de armadura (Ω).
 L_a : Inductancia del bobinado de armadura (H).
 E_a : Fuerza contraelectromotriz (V).

Para determinar los parámetros L_a y R_a se realiza la prueba de motor con el rotor bloqueado ($E_a = 0$) y se obtiene la curva de corriente de armadura en función del tiempo. Con el valor de corriente en estado estable y usando la ecuación (13) se obtiene R_a . Con el valor R_a y usando la ecuación (14) se obtiene L_a [5] [6].

$$L_a = - \frac{R_a \cdot t}{\ln \left(1 - \frac{i_a(t)}{I_a} \right)} \quad (14)$$

Siendo t el tiempo en el cual la corriente llega al 63.2% de su valor en estado estable.

B. Parámetros mecánicos

La ecuación del equilibrio mecánico del sistema queda expresada en función de los torques en la ecuación (15).

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_f + T_L \quad (15)$$

Dónde:

T : Torque, momento o par de fuerza desarrollado por la máquina (N.m).

J : Momento de inercia del rotor (kg.m²).

ω : Velocidad angular (rad/s).

$\frac{d\omega}{dt}$: Aceleración angular (rad/s²).

B : Constante de rozamiento viscoso (N.m.s).

$B\omega$: Torque de rozamiento viscoso (N.m).

T_f : Torque de rozamiento seco (N.m).

T_L : Torque de carga (N.m).

Para obtener los parámetros mecánicos de la máquina se realizaron mediciones de corriente de armadura y velocidad del eje de los motores para diversos valores de voltaje aplicados a los terminales del motor [6].

Al trabajar con la ecuación (15) se considera que no se aplica carga al eje del motor por lo que T_L se anula y se obtiene la ecuación (16).

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_f \quad (16)$$

Cuando la velocidad llega a su valor estable, el término $\frac{d\omega}{dt}$ se anula quedando la ecuación (17).

$$T = B\omega + T_f \quad (17)$$

La ecuación (17) representa a una función lineal donde el torque T depende directamente de la velocidad angular ω y B es la pendiente de la función lineal.

El torque se relaciona con la corriente a través de la expresión (18) siendo k_T la constante de torque expresada en Nm/A.

$$T = k_T \cdot I_a \quad (18)$$

Para la determinación de J se utiliza la ecuación (16) considerando la situación en la cual se tiene al motor girando a una velocidad estable ω_o y se desconecta la alimentación a los terminales, es decir $V_a = 0$ con la consecuente anulación del torque $T = 0$; con lo que se consigue que la máquina vaya perdiendo energía cinética rotacional hasta detenerse en un valor de tiempo t_{off} .

$$0 = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_f \quad (19)$$

Al resolver la ecuación diferencial se obtiene la respuesta en el dominio del tiempo.

$$\omega(t) = \left(\omega_o + \frac{T_f}{B} \right) e^{\left(-\frac{B}{J}t \right)} - \frac{T_f}{B} \quad (20)$$

Despejando J y considerando que se va a llegar a $\omega = 0$ se obtiene la ecuación (21).

$$J = \frac{B \cdot t_{off}}{\ln \left(\frac{\omega_o + \frac{T_f}{B}}{\frac{T_f}{B}} \right)} \quad (21)$$

La constante de tiempo eléctrica τ_e se obtiene por medio de la ecuación (22).

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} \quad (22)$$

La constante de tiempo mecánica τ_m se la calcula a partir de la ecuación (23).

$$\tau_m = J \left(\frac{R_a}{k_T \cdot k_v + BR_a} \right) \quad (23)$$

Con el procedimiento mencionado anteriormente se obtuvieron los parámetros eléctricos y mecánicos de los motores presentados en la TABLA III.

TABLA III
 PARÁMETROS DETERMINADOS EXPERIMENTALMENTE

Parámetro	Motor 1	Motor 2
R_a (m Ω)	213.5	215.5
L_a (μ H)	107	118
J (kg.m ²)	0.1513	0.1788
B (N.m.s)	0.0446	0.0532
k_T (Nm/A)	0.8906	0.9048
k_v ($\frac{V}{rad/s}$)	0.8906	0.9048
τ_e (ms)	0.501	0.547
τ_m (ms)	40.73	47.06

C. Obtención del modelo

Las ecuaciones (13) y (15) se representan en variables de estados en la ecuación (24), en donde quedan planteadas en función de la corriente i_a y de la velocidad ω del motor como variables de estado, teniendo como entradas del sistema el voltaje de armadura V_a y el torque de carga T_L .

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_v}{L_a} \\ \frac{K_T}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_L \end{bmatrix} \quad (24)$$

Al aplicar la transformada de Laplace, las ecuaciones del modelo quedan expresadas en el dominio de la frecuencia como:

$$I_a(s) = \left[\frac{1}{L_a s + R_a} \right] [V_a(s) - K_v \omega(s)] \quad (25)$$

$$\omega(s) = \left[\frac{1}{J s + B} \right] [K_T I_a(s) - T_L] \quad (26)$$

Al expresar al ecuación (25) como función de transferencia se obtiene la ecuación (27) con salida del sistema I_a y con entrada V_a , siendo E_a la perturbación eléctrica del sistema.

$$\frac{I_a(s)}{V_a(s) - E_a(s)} = \frac{1/R_a}{1 + \tau_e s} \quad (27)$$

Por lo tanto para el diseño del controlador se compensa el valor de E_a (Fig. 6) obteniendo así una planta de corriente en función del voltaje de armadura.

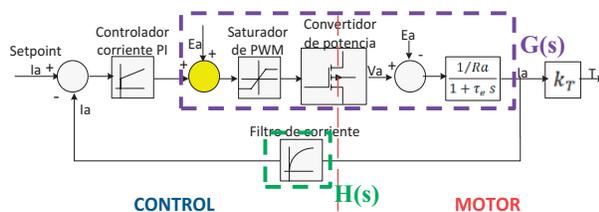


Fig. 6. Diagrama de bloques del lazo de control de corriente

Reemplazando los parámetros de cada motor se tiene las plantas de corriente de ambos motores en la TABLA IV.

TABLA IV
PLANTAS DE CORRIENTE

Motor 1	Motor 2
9349	8483
$\frac{1}{s + 1996}$	$\frac{1}{s + 1828}$

D. Diseño de los controladores

La técnica de control utilizada aborda lazos anidados de control, y se caracteriza por tener dos lazos de control en cascada, uno interno de corriente y uno externo de velocidad.

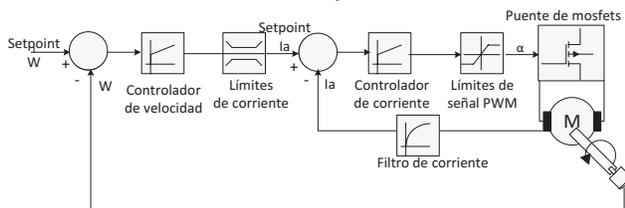


Fig. 7. Diagrama de bloques del sistema de control con doble lazo de realimentación [7]

1) Controlador de corriente

El tiempo de muestreo Ts_i utilizado para la discretización de los controladores es igual al período de la PWM (25 kHz) escogida para la conmutación de los MOSFETs [8], por lo que se utiliza $Ts_i = 40 \mu s$.

El retardo debido al PWM digital es representado mediante la aproximación de Padé de la ecuación (28) en donde T_s es el período de la PWM [9], es decir $40 \mu s$.

$$DPWM \approx \frac{1 - s \frac{T_s}{4}}{1 + s \frac{T_s}{4}} \quad (28)$$

Para obtener el valor medio de la corriente de armadura y discriminar las interferencias electromagnéticas (EMI), ruido u otras señales no deseadas, se emplea un filtro digital de primer orden que permite calcular la salida $y[n]$ en función del valor de la señal de entrada $x[n]$ y del valor anterior de la salida $y[n-1]$, multiplicados por las constantes a_0 y b_1 respectivamente [10].

$$y[n] = a_0 x[n] + b_1 y[n-1] \quad (29)$$

La Fig. 8 resume las funciones de transferencia de todos los bloques integrantes del lazo de control de corriente en donde se ha denominado $H(s)$ a la función de transferencia del filtro de corriente en el dominio de la frecuencia 's'.

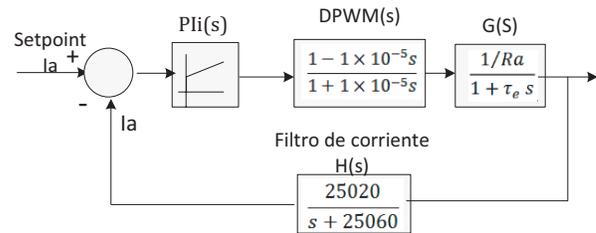


Fig. 8. Diagrama de bloques del lazo de control de corriente de los motores DC

El diseño de los controladores de corriente, tipo proporcional-integrador PI, se realiza utilizando la herramienta de Matlab llamada Sisotool con la cual se determina los parámetros del controlador PI aplicando la técnica de cancelación de polos y ceros [11].

Con este software se ha colocado un cero del controlador en la misma ubicación del polo de la planta de corriente y posterior a un ajuste de los parámetros del controlador para obtener un máximo sobrepico $M_p \leq 10\%$ ante una entrada paso y un tiempo de establecimiento de la señal $t_s \leq 4\tau_e$ [8] [12], se obtuvieron los controladores de corriente presentados en la siguiente TABLA V.

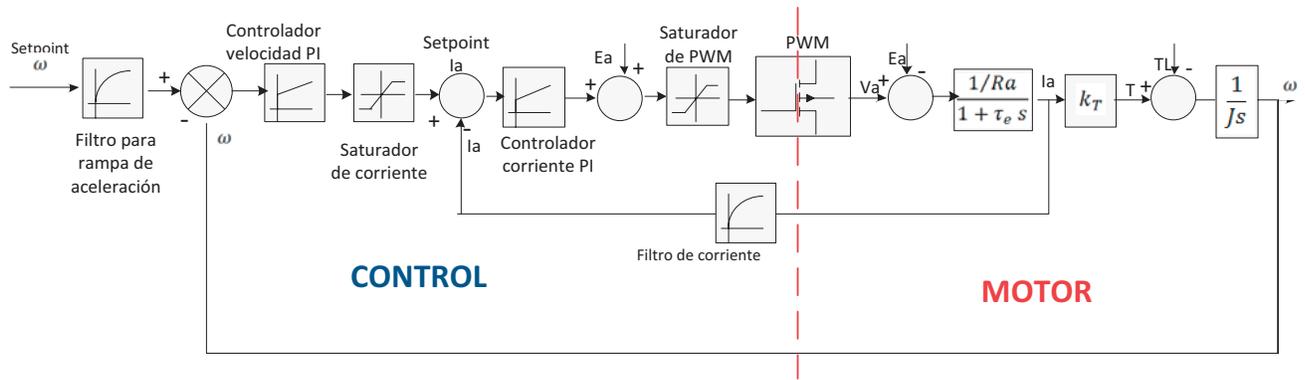


Fig. 9. Diagrama de bloques del doble lazo de control para un motor DC

TABLA V
CONTROLADORES DE CORRIENTE

	Motor 1	Motor 2
$PI_i(s)$	$\frac{s + 2000}{s}$	$\frac{1.1 s + 2000}{s}$

La función de transferencia de la planta de corriente en lazo cerrado TFI_{aLC} se obtiene por medio de la ecuación (29) para cada motor.

$$TFI_{aLC}(s) = \frac{PI_i(s) \cdot DPWM(s) \cdot G(s)}{1 + PI_i(s) \cdot DPWM(s) \cdot G(s) \cdot H(s)} \quad (29)$$

2) Controlador de velocidad

El lazo de control de velocidad es más externo que el de corriente y por lo tanto se encarga de fijar el valor de referencia para este último como está representado en la Fig. 9. El diagrama de Bode de la función $TFI_{aLC}(s)$ para ambos motores se muestra en la Fig. 10 en donde se ha ubicado la frecuencia (f_e) correspondiente a la constante de tiempo eléctrica τ_e y la frecuencia (f_m) correspondiente a la constante mecánica τ_m .

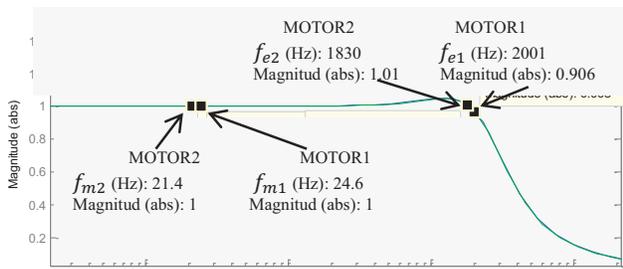


Fig. 10. Diagrama de bode de $TFI_{aLC}(s)$

Como se puede observar, la frecuencia de 114 rads/s corresponde a la región de ganancia constante del diagrama de bode y además es de muy bajo valor respecto a 1.56×10^5 rads/s por lo tanto $TFI_{aLC}(s)$ puede ser considerada como una ganancia K igual a 1 para ambos motores.

El controlador de velocidad actúa sobre la función de transferencia $TF\omega(s)$ constituida por la ganancia k , la ganancia k_T y el bloque integrador con el término $1/s$ (Fig. 11).

$$TF\omega 1(s) = \frac{5.8863}{s} \quad (30)$$

$$TF\omega 2(s) = \frac{5.0604}{s} \quad (31)$$

Al igual que el controlador de corriente, el controlador de velocidad se diseña aplicando la técnica de cancelación de polos y ceros.

Se plantea así mismo que el máximo sobrepico sea de $M_p \leq 10\%$. Como se conoce la constante de tiempo mecánica τ_m de los motores, se tiene que el tiempo de establecimiento del sistema de velocidad controlado debe ser $t_s \leq 4\tau_m$, por lo cual para el motor 1: $t_s \leq 162 \text{ ms}$ y para el motor 2: $t_s \leq 188 \text{ ms}$.

Dada la similitud de las plantas de velocidad, se obtiene el mismo controlador de velocidad para los dos motores.

$$PI_\omega = \frac{300.577 s + 1534.6}{s} \quad (32)$$

El tiempo de muestreo $T_{s\omega}$ utilizado para discretizar el controlador de velocidad es el período de la PWM (40 us) de manera que en cada ciclo de trabajo se actualizará el valor del ancho de pulso de la PWM, consiguiendo una acción de control más robusta y sincronizada.

VII. SISTEMA DE COMUNICACIONES

A. Módulos de radiofrecuencia

Se necesita controlar el movimiento de la plataforma de manera remota, por lo cual se utilizan dos módulos de radiofrecuencia XBee PRO que trabajan en la banda de 2.4GHz, tienen una velocidad de transferencia de 250kbps y pueden comunicarse entre sí hasta una distancia de 1500 metros.

Cada XBee transfiere los datos que ha recibido mediante comunicación serial hacia una PC y hacia el microcontrolador del CEV como se indica en la Fig. 12.

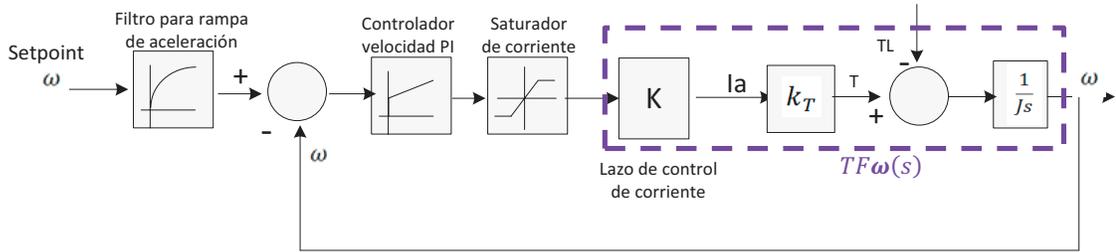


Fig. 11. Diagrama de bloques del lazo de control de velocidad

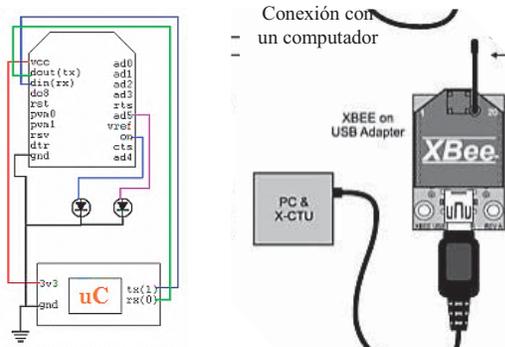


Fig. 12. Conexión física del XBee

Para enviar o recibir datos de una computadora, se conecta el módulo a la tarjeta “USB adapter” y es necesario configurarlo a través de distintos paquetes de software existentes en el mercado, siendo el más destacado el X-CTU.

VIII. PRUEBAS Y RESULTADOS

La interfaz de comunicación que permite fijar el valor de los parámetros del CEV (velocidad angular independiente para cada motor y dirección de movimiento) y mostrar al usuario los datos recibidos entre la PC y el microcontrolador ubicado en la plataforma se ha realizado usando el software LabView 2013. Dicha comunicación se realiza a 115200 baudios, con 8 bits de datos, sin paridad.

A. Pruebas en vacío

Se procedió a utilizar soportes en la parte inferior de la plataforma para conseguir que las llantas giren libremente sin tener contacto con el suelo.

1) Pruebas del controlador de velocidad

En la Fig. 13 y Fig. 14 se puede observar que se cumplen los parámetros de diseño, es decir $M_p \leq 10\%$ para ambos motores, y $t_s \leq 162\text{ms}$ para el motor 1, $t_s \leq 188\text{ms}$ para el motor 2.

Prueba de controlador de velocidad de motor 1 a 60 RPM

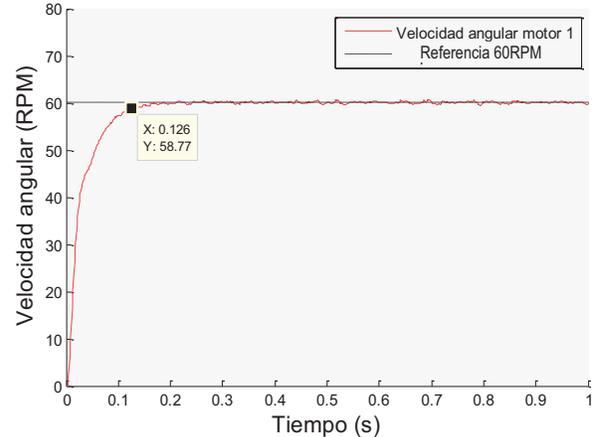


Fig. 13. Respuesta de velocidad del motor 1 en lazo cerrado

Prueba de controlador de velocidad de motor 2 a 60 RPM

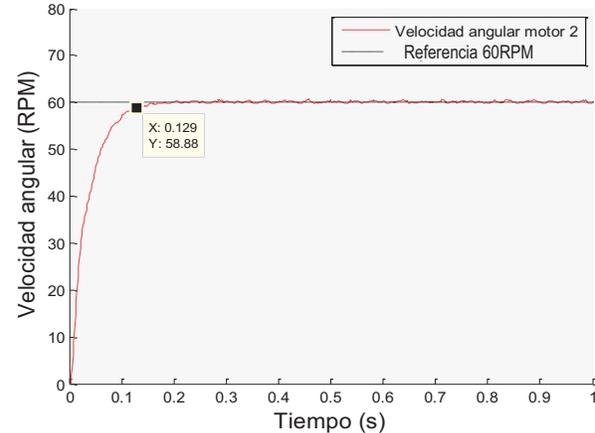


Fig. 14. Respuesta de velocidad del motor 2 en lazo cerrado

B. Pruebas de velocidad y regeneración de energía en terrenos planos

Estas pruebas se han realizado en un espacio plano, aproximadamente de 50 m de longitud, asfaltado pero con irregularidades que actúan como perturbaciones, como se observa en la Fig. 15.



Fig. 15. Terreno plano para realización de pruebas

En la Fig. 16, Fig. 17 y Fig. 18 se muestran los resultados de las pruebas de velocidad así como también el voltaje en el banco de UC para 15, 60 y 120 RPM respectivamente.

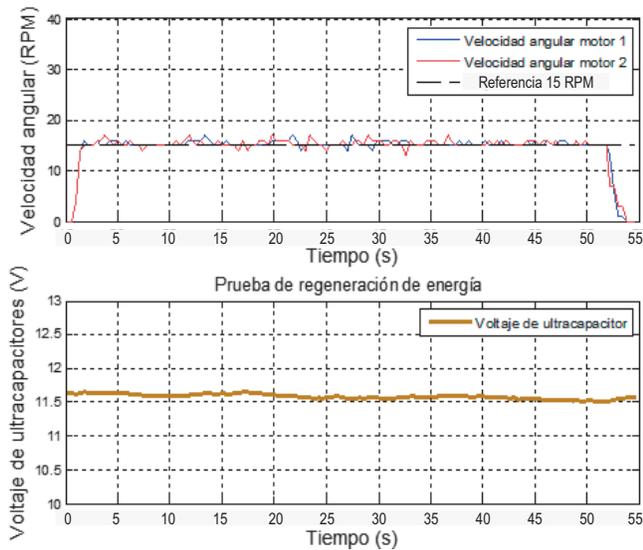


Fig. 16. Pruebas con la plataforma en plano a 15 RPM

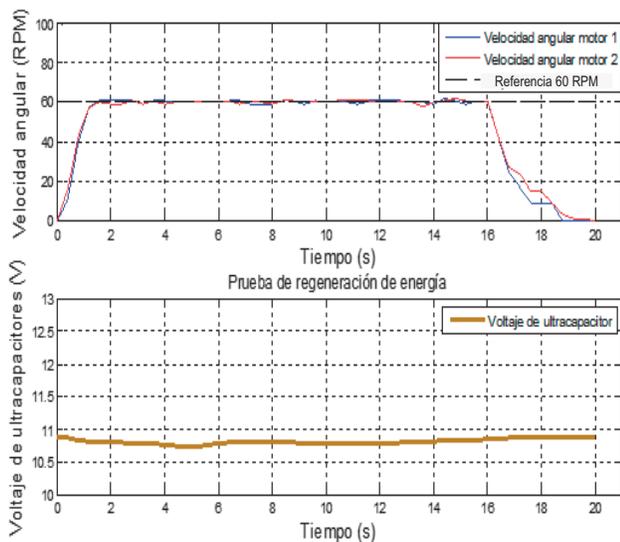


Fig. 17. Pruebas con la plataforma en plano a 60 RPM

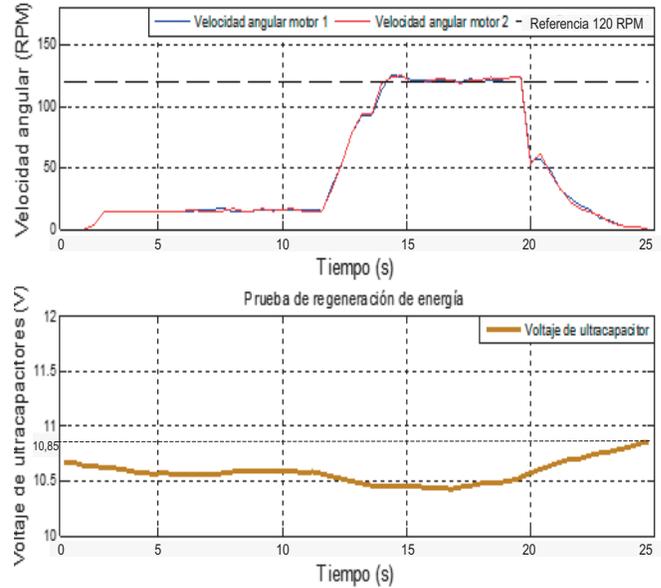


Fig. 18. Pruebas con la plataforma en plano a 120 RPM

Para determinar los errores porcentuales en la TABLA VI se ha calculado el valor promedio de los datos de velocidad mostrados en la HMI.

TABLA VI
ERRORES DE VELOCIDAD EN TERRENO PLANO

Valor de referencia		Valores mostrados en HMI			
Velocidad Lineal v (m/s)	Velocidad angular ω (RPM)	Motor 1		Motor 2	
		ω (RPM)	Error (%)	ω (RPM)	Error (%)
0,45	15	15,29	1,93	15,36	2,40
1,80	60	60,3	0,50	60,15	0,25
3,60	120	121,2	1,00	121,53	1,28

El mayor error obtenido es 2.4% que ratifica el correcto desempeño del CEV.

TABLA VII
CUADRO COMPARATIVO DE ENERGÍA ALMACENADA EN EL BANCO DE UC

Valor de referencia		Banco de UC		
Velocidad Lineal v (m/s)	Velocidad angular ω (RPM)	Voltaje inicial V_0 (V)	Voltaje final V_f (V)	Variación de voltaje ΔV (V)
		0,45	15	11,51
0,90	30	11,07	11,1	0,04
1,80	60	10,84	10,88	0,04
3,60	120	10,5	10,85	0,35

En la TABLA VII se observa que a bajas velocidades la variación del voltaje del banco de UC resultó ser prácticamente nula, mientras que cuando la velocidad fue de 3.6 m/s con las llantas girando a 120 RPM (Fig. 18), el banco se cargó desde 10,5V hasta 10,85V que resultó ser una variación de 350 mV en 6 segundos.

C. Pruebas de velocidad durante el ascenso por una pendiente

Este tipo de pruebas se ha llevado a cabo en dos terrenos (Fig. 19) con pendientes diferentes para poder apreciar la influencia del ángulo de inclinación.



Fig. 19. Terrenos inclinados para pruebas

Se realizaron pruebas con la plataforma ascendiendo a diferentes velocidades; para comparar el desempeño en ambas pendientes se muestran las curvas de velocidad a 30 RPM en la Fig. 20 y Fig. 21.

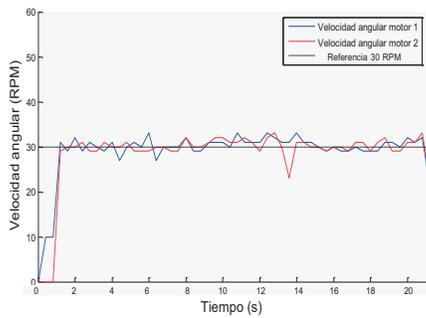


Fig. 20. Curvas de velocidades con la plataforma ascendiendo a 30 RPM por una pendiente de 6.5°

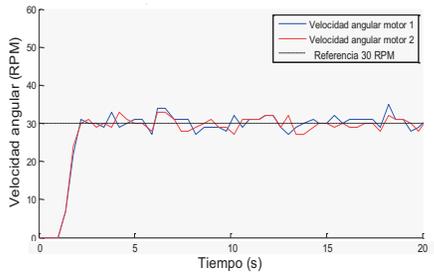


Fig. 21. Curvas de velocidades con la plataforma ascendiendo a 30 RPM por una pendiente de 10°

En el caso de la pendiente más elevada (10°) se observa mayor desviaciones de la velocidad respecto al valor de referencia que se justifican porque dicha pendiente está construida con adoquines que generan más vibración en la estructura durante el movimiento. La pendiente de 6.5° es de cemento con menos irregularidades.

En la TABLA VIII y TABLA IX se exponen los errores porcentuales obtenidos para diferentes velocidades en las dos

pendientes de prueba demostrándose así una operación óptima del sistema.

TABLA VIII

PRUEBAS DE VELOCIDAD CON LA PLATAFORMA SUBIENDO (6.5°)

Valor de referencia		Valores mostrados en HMI			
Velocidad Lineal v (m/s)	Velocidad angular ω (RPM)	Motor 1		Motor 2	
		ω (RPM)	Error (%)	ω (RPM)	Error (%)
0,60	20	20,31	1,55	20,3	1,50
0,90	30	30,44	1,47	30,22	0,73

TABLA IX

PRUEBAS DE VELOCIDAD CON LA PLATAFORMA SUBIENDO (10°)

Valor de referencia		Valores mostrados en HMI			
Velocidad Lineal v (m/s)	Velocidad angular ω (RPM)	Motor 1		Motor 2	
		ω (RPM)	Error (%)	ω (RPM)	Error (%)
0,90	30	29,8	0,67	30,3	1,00
1,05	35	35,23	0,66	34,74	0,74
1,5	50	49,8	0,40	50,4	0,80

D. Pruebas de velocidad y regeneración de energía durante el descenso por una pendiente

Estas pruebas fueron realizadas en una calle asfaltada de 130 m con una pendiente de inclinación de 7°, como se muestra en la Fig. 22.

Se logró mantener el movimiento controlado y uniforme con referencias de velocidad angular de 30 RPM (Fig. 23) y 45 RPM (Fig. 24).



Fig. 22. Terreno inclinado para pruebas de regeneración de energía

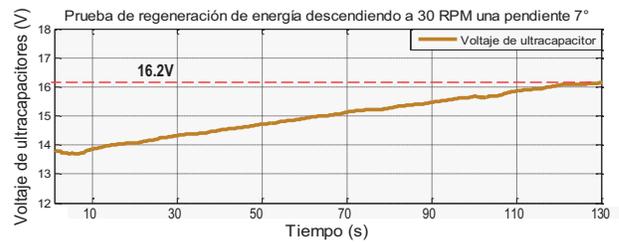
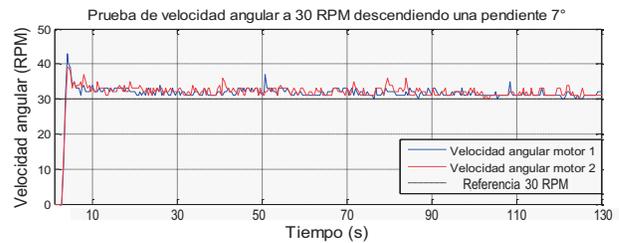


Fig. 23. Velocidades y voltaje del banco de UC con la plataforma regenerando energía en una bajada a 30 RPM

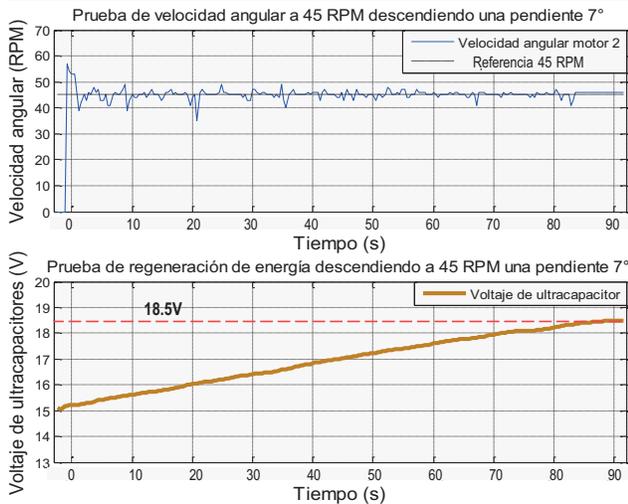


Fig. 24. Velocidades y voltaje del banco de UC con la plataforma regenerando energía en una bajada a 45 RPM

En todas las pruebas de regeneración presentadas se puede observar que el CEV es capaz de controlar la velocidad en descenso y a la vez regenerar energía, condiciones que dependen de la pendiente de la superficie a descender y de la masa de la plataforma. Los errores de velocidad para estas pruebas se resumen en la TABLA X.

TABLA X
ERRORES DE VELOCIDAD DURANTE FRENO REGENERATIVO

Valor de referencia		Valores mostrados en HMI			
Velocidad Lineal v (m/s)	Velocidad angular ω (RPM)	Motor 1		Motor 2	
		ω (RPM)	Error (%)	ω (RPM)	Error (%)
0.9	30	31.65	5.50	32.02	6.73
1.05	35	35.42	1.20	35.72	2.06
1.2	40	40.25	0.63	40.49	1.23
1.35	45	44.09	2.02	44.11	1.98

En la TABLA XI se realiza la comparación de la cantidad de energía y potencia regenerada a diferentes velocidades en una misma pendiente y en el mismo intervalo de tiempo, lográndose regenerar mayor cantidad de energía cuando el movimiento se realiza con mayor velocidad.

TABLA XI
CUADRO COMPARATIVO DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA REGENERADA

Valor de referencia		Banco de UC					
Velocidad Lineal v (m/s)	Velocidad angular ω (RPM)	Voltaje inicial V_i (V)	Voltaje final V_f (V)	Variación de voltaje ΔV (V)	Intervalo de tiempo Δt (s)	Energía almacenada ΔE (J)	Potencia transferida P (W)
		0.9	30	13.8	15.56	1.76	93.2
1.05	35	11.97	14.78	2.81	93.2	1503.35	16.13
1.2	40	14.09	17.05	2.966	93.2	1847.58	19.82
1.35	45	15.11	18.5	3.39	93.2	2278.76	24.45

E. Pruebas de entrega de energía de los ultracapacitores frente a requerimientos bruscos de corriente

En estas pruebas se prioriza el análisis del comportamiento del banco de UC cuando los motores exigen una gran demanda de corriente y éste se encuentra cargado a un voltaje mayor o igual a 15V. Para esto se realizaron pruebas en las superficies de la Fig. 19.

En la Fig. 25 se muestran las velocidades y el voltaje del banco de UC cuando la plataforma arranca estando en la mitad de la pendiente de pruebas (Fig. 19) por ello la corriente se incrementa hasta 26 A y causa que en el arranque el voltaje del banco descienda 1.5 V.

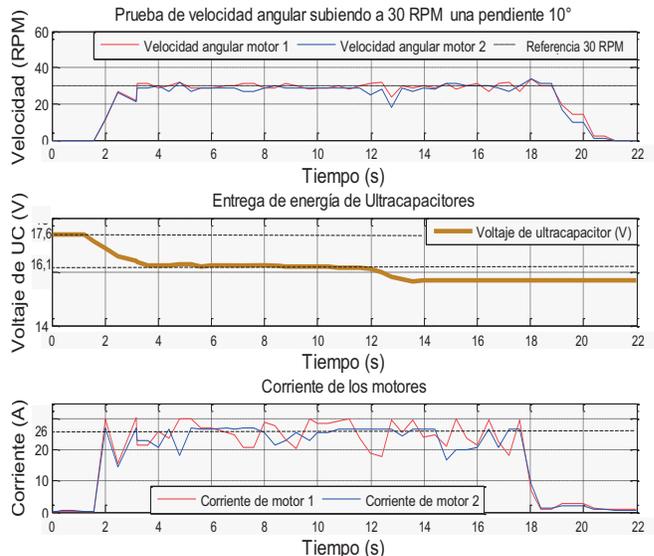


Fig. 25. Pruebas de extracción de energía del banco de UC en una pendiente

En la Fig. 26 se muestran los resultados cuando la plataforma arranca estando en terreno plano y después de 1m de avance empieza la subida. Por ello se observan dos periodos de descarga del banco de UC.

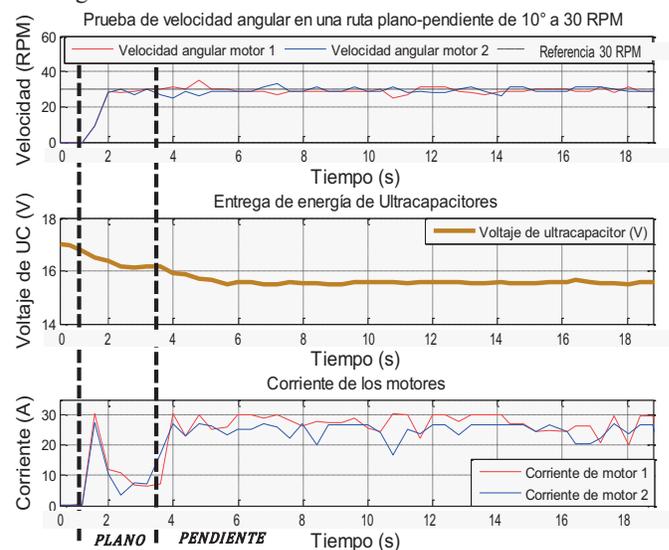


Fig. 26. Pruebas de extracción de energía del banco de UC en terreno plano-pendiente

IV. CONCLUSIONES

* El controlador electrónico de velocidad funciona correctamente presentando porcentajes de error bajos (menores al 5% en estado estable) en terrenos planos, subidas y bajadas mientras se controla la velocidad angular de dos motores que permiten a una plataforma moverse mediante tracción diferencial y además permite que el sistema pueda almacenar la energía regenerada por los motores.

* La realización del controlador electrónico de velocidad mediante control en cascada resulta bastante aplicable para el control de máquinas motrices de corriente continua debido a que el lazo más interno (de corriente) permitió obtener una rápida respuesta ante perturbaciones del torque de carga y además posibilitó limitar el máximo valor de corriente circulante por los motores y por los circuitos electrónicos implicados.

* En la etapa de regeneración de energía existe mucha incidencia de variables cinéticas, dinámicas y estructurales de la plataforma móvil como la masa, la velocidad, el tiempo durante el cual las máquinas actúan como generadores y el diseño mecánico. En este trabajo la plataforma utilizada tiene 95 kg de masa y para una velocidad de 1.35 m/s (45 RPM) se logró regenerar 24.45 W cuando descendía por un terreno inclinado.

REFERENCIAS

- [1] Everything explained today, 2012. [Online]. Available: http://everything.explained.today/Electronic_speed_control/.
- [2] A. Ravey, 2012. [Online]. Available: <http://www.utbm.fr/la-universidad-de-tecnologia-de-belfort-montbeliard.html>.
- [3] P. Luque, D. Álvarez, "Investigación de Accidentes de Tráfico", Netbiblo S.L., 2007, pp 126-130.
- [4] J. Navarrete, M. Vega, Abril 2012. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4582>.
- [5] S. Z. Muhammed, "Parameters indentification of a permanent magnet DC motor", Universidad Islámica de Gaza, 2004.
- [6] C. Morales, Abril 1986. [Online]. Available: bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10404/3/T653.pdf.
- [7] C.-M. Ong, in *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, London, Prentice Hall, 1998, pp. 376-380.
- [8] Schönfeld, R, in "*Regelungen und Steuerungen in der Elektrotechnik*", Berlín, Verlag Technik, 1993.
- [9] S. Buso, P. Matavelli, "Digital Control in Power Electronics", Jerry Hugins, 2006.
- [10] Smith S. W., "Digital Filters," in *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, Second Edition, 1999, pp. 261-319.
- [11] B. C. Kuo, "Sistemas de control automático", Séptima Ed., pp. 761 ed., Prentice Hall, 1996.
- [12] K. Ogata, "Ingeniería de control moderna", Tercera, pp. 135-157 ed., Prentice Hall, 1995.

BIOGRAFÍAS



Verónica Cuásquer, nació en Quito-Ecuador el 27 de Diciembre de 1990. Obtuvo su título de Bachiller en la especialidad de Físico- Matemático y Electrónica Básica en el Colegio Nacional de Señoritas Hipatia Cárdenas de Bustamante donde se graduó con altos honores académicos. Los estudios superiores los realizó en la Escuela

Politécnica Nacional obteniendo su título de Ingeniera en Electrónica y Control en el año 2016. Se ha desempeñado como auxiliar en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia de la Escuela Politécnica Nacional.

Áreas de interés: Electrónica de potencia, neumática, instrumentación industrial y biomédica, domótica y docencia. (veroclan@hotmail.es).



Eduardo Avila, nació en Quito-Ecuador el 04 de Enero de 1991. Obtuvo su título de Bachiller en la especialidad de Físico-Matemático en el Colegio Nacional Experimental "Juan Pío Montúfar". Los estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional obteniendo su título de Ingeniera en Electrónica y Control en el año 2016. Se desempeñó como auxiliar en el Laboratorio de Informática de la Facultad de

Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional.

Áreas de interés: Electrónica de potencia, Robótica, Instrumentación biomédica, Domótica, Automatización y Control Industrial. (makuack3352@hotmail.es).



Leonardo Ortega, Nació en Quito el 14 de Diciembre de 1985. Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el grado de Ingeniero en Electrónica y Control en el año 2010 en la Facultad de Ingeniería Eléctrica. Obtuvo el grado de Master en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática en la Universidad Carlos III

de Madrid-España en el año 2013. Actualmente se desempeña como docente a tiempo completo en el Área de Electrónica de Potencia tanto a nivel de pregrado como de postgrado, trabajando también en proyectos de investigación como colaborador y como director.

Áreas de Interés: Electrónica de Potencia, Convertidores estáticos de energía, Energías Renovables Redes Inteligentes. (leonardo.ortega@epn.edu.ec)



Marcelo Pozo, nació en Quito-Ecuador. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 1999. Gracias a una beca del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) estudió su Masterado en la Universidad Técnica de Dresden-Alemania obteniendo el título de M.Sc.E.E en Septiembre del 2002. Entre el 2003 y 2009 se dedicó al trabajo en la

industria. A partir de Septiembre del 2009 se desempeña en el cargo de Profesor Principal a tiempo completo en el Departamento de Automatización y Control Industrial (DACI) de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional-Quito, Ecuador. Entre finales del 2010 y principios del 2015 realizó su proyecto de Doctorado en Ingeniería en la Universidad de Siegen-Alemania, especializándose en Electrónica de Potencia y Control Electrónico de Máquinas Eléctricas.

Sus áreas de interés son: Electrónica de Potencia, Control Electrónico Industrial, Control Electrónico de Máquinas Eléctricas, Calidad y Uso Eficiente de la Energía, Conversión Estática a partir de Fuentes de Energía Alternativas, Regenerativas y Renovables, Sistemas de Transporte- y Vehículos-Eléctricos. (marcelo.pozo@epn.edu.ec)