

Modelo de Vehículo Terrestre con Motor Híbrido en Serie y Sistema Regenerativo

Nicolás Costa⁽¹⁾, Gustavo Domínguez⁽²⁾, Matías Micheloud⁽³⁾, Leandro Sabignoso⁽⁴⁾ y Norberto M. Lerendegui⁽⁵⁾

Instituto Tecnológico de Buenos Aires

Av. Eduardo Madero 399, (C1106ACD) Ciudad Autónoma de Buenos Aires

⁽¹⁾ *nicoscosta@hotmail.com*, ⁽²⁾ *dominguezgustavo@gmail.com*, ⁽³⁾ *mamichel@alu.itba.edu.ar*,
⁽⁴⁾ *leandro.sabignoso@gmail.com*, ⁽⁵⁾ *nlerende@itba.edu.ar*

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un móvil terrestre de cuatro ruedas del tipo híbrido serie (el motor de combustión interna acciona un generador eléctrico que alimenta los motores eléctricos de tracción), con control electrónico. El vehículo se denominó VHI (Vehículo Híbrido ITBA), y fue implementado con el objetivo de construir conocimiento y adquirir experiencia en estas tecnologías.

La estructura mecánica del VHI está constituida por el chasis de un karting, que fue modificado para montar un generador eléctrico de 220VCA/800 W con motor a nafta, dos motores eléctricos trifásicos de inducción tipo jaula de ardilla de 1KW para las dos ruedas traseras de tracción, y cinco sensores electrónicos de aceleración, frenado, dirección y velocidades de rueda.

Se desarrollaron cuatro placas electrónicas independientes para la recolección de datos de los sensores, el control general de vehículo, el control de velocidad de los motores y el manejo de éstos. El diseño incluyó un actuador diferencial electrónico para controlar las velocidades de giro de cada rueda motriz en función del radio de rotación, y la capacidad de recuperar la energía del frenado (proceso regenerativo) con miras a recargar baterías.

El VHI fue sometido a pruebas de banco para medir las velocidades de rotación en función del giro del volante y de las posiciones de los pedales de aceleración y frenado. Asimismo, se hicieron pruebas sobre piso con distintos conductores para evaluar el desempeño general y del diferencial electrónico, obteniéndose resultados satisfactorios. Los radios de giro interno y externo mínimos medidos fueron de 170cm y 270cm, respectivamente. La máxima velocidad alcanzada (con piloto) fue de 18 km/h, con las ruedas siempre en contacto con el piso. Futuras pruebas y mejoras permitirán profundizar aún más en el conocimiento de este tipo de vehículos.

Palabras Claves: Vehículo Híbrido, Sistema Regenerativo.

1. INTRODUCCIÓN

El motor a explosión ha sido el corazón de los medios de locomoción terrestre durante los últimos 100 años. En los últimos años ha habido una creciente preocupación en la comunidad científica y técnica por la utilización indiscriminada de este recurso natural agotable y por los efectos negativos sobre el medio ambiente de sus residuos de combustión. Para atenuar este problema se han estudiado varias alternativas y una de ellas es la fabricación de automóviles eléctricos. Un vehículo que no queme material alguno es, sin duda solución al problema de contaminación ambiental, pero para su impulsión es necesario contar con una fuente de energía eléctrica transportable. Hay actualmente dos alternativas serias de interés, obviando las celdas solares. Una primera consiste en utilizar baterías como medio de almacenamiento de la energía, pero hasta el momento la mayor autonomía lograda es de 400km [1]. Otra posibilidad la conforman las denominadas "celdas de combustibles", un dispositivo que transforma energía química en eléctrica, consumiendo alguna sustancia (hidrógeno o metano, por ejemplo). Aunque esta tecnología viene en constante desarrollo desde su utilización en las primeras misiones espaciales, tampoco ha logrado hasta el momento costos y potencias específicas razonables.

Existen, sin embargo, pasos previos en este cambio de paradigma. Hace unos años, varias automotrices (fundamentalmente japonesas) se han interesado en desarrollar vehículos híbridos. Un automóvil híbrido es aquel que se vale de un motor de combustión interna para generar la electricidad y utiliza motores eléctricos para la tracción. Sus componentes principales son: un motor de combustión interna, uno o dos motores de inducción, un banco de baterías y electrónica asociada [2]. Hay varias topologías para estos sistemas, las más utilizadas se denominan "serie", "paralelo" o "serie-paralelo" [3]. En el caso del automóvil híbrido serie, el motor de combustión interna mueve un generador que proporciona la energía eléctrica requerida para el funcionamiento de un motor asíncrono trifásico, generalmente del tipo jaula de ardilla, responsable de la tracción del vehículo. Adicionalmente, el vehículo posee un banco de baterías para almacenar energía extra.

Este diseño es ideal para un uso urbano, porque permite optimizar el consumo en varias formas. Por un lado, el generador se calibra para funcionar en su punto de mayor eficiencia, lo cual se traduce en un ahorro de combustible; y además, está dimensionado para una potencia máxima entregada menor a la que pueden consumir los motores de inducción. De esta forma, cuando el conductor quiere acelerar rápidamente, la energía extra la aportan las baterías; y cuando se estabiliza el régimen en un consumo menor al generado, las baterías se cargan. A estas ventajas se le agrega la posibilidad de "frenar con el motor", utilizando los motores de inducción como generadores, y recuperando parte de la energía normalmente desperdiciada en el frenado. Para que este sistema funcione, se requiere un circuito conversor de corriente continua en topología Step-Up/Step-Down que convierta los niveles de tensión del generador (y los motores eléctricos) a los de las baterías, y viceversa. Generalmente, se utiliza un bus de baja tensión (48 o 60 Volts) provisto por el banco de baterías, y un bus de alta tensión (350 o

500 Volts) para energizar el motor de inducción. Esto permite contar con una cantidad limitada de baterías, acotando el peso del vehículo. El automóvil Chevrolet Volt, presentado en I Show de Detroit de Enero 2007 (North American Internacional Autoshow) es el primer vehículo concept híbrido serie del mundo.

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un prototipo de vehículo híbrido con capacidad regenerativa de la energía de frenado. Su construcción se realizó en el marco de la materia "Proyectos Mecatrónicos" y al vehículo desarrollado se lo denominó VHI (Vehículo Híbrido ITBA).

2. DESARROLLO DEL VHI

2.1. Características generales

El Vehículo Híbrido ITBA (VHI) se realizó a escala, utilizando la estructura de un karting monoposto, por lo que muchas variables (velocidad final, aceleración, etcétera) están acotadas. La mayor particularidad del VHI es que cuenta con dos motores de tracción en sus ruedas traseras, lo cual implicó un gran cambio frente al original de eje rígido. Esto permite que el control electrónico se pueda efectuar por separado, dando lugar a diversas mejoras.

En primer lugar, la posibilidad de desarrollar un "diferencial electrónico", y mejorar el funcionamiento en curvas del karting original constituye un gran avance. En segundo término, la tracción eléctrica admite, por su naturaleza, la aplicación inmediata de un control digital de velocidad o torque, según se lo desee. Una tercera ventaja es el frenado regenerativo. En esta primera versión el VHI, se decidió disipar la energía obtenida por este medio en una luminaria de 500 Watts.

El VHI quedó constituido por un generador eléctrico naftero de 2 tiempos (utiliza mezcla de nafta y aceite), de 800 Watts de potencia de salida, y dos motores de inducción trifásicos, de 1000 Watts cada uno [4], que accionan las ruedas traseras mediante cadenas reductoras de relación 4 a 1, no existiendo caja de cambios. El VHI posee controles de velocidad, freno, dirección y sentido de avance utilizando sensado electrónico. La transmisión es completamente electrónica. Para alcanzar esta implementación se dividió el trabajo en 3 grandes partes:

1. Mecánica: Chasis, diseño de piezas, generador
2. Control y medición: Sensado y acondicionamiento de señales de acelerador, freno, dirección, sentido y velocidad (rpm) de cada rueda. Diferencial electrónico, rampas de aceleración y frenado, comunicaciones
3. Potencia: Drivers de motores (inverters), motores eléctricos, disipador de energía excedente de frenado.

2.2. Diseño Mecánico

El diseño mecánico tuvo por objetivo proveer un vehículo de 4 ruedas que permitiera un control de la dirección en las ruedas delanteras y tracción independiente en cada una de las dos

ruedas traseras, constituyendo además una plataforma apta para el montaje de todos los componentes eléctricos y electrónicos necesarios para alcanzar el objetivo del proyecto, resistiendo el peso de estos conjuntos y el del piloto. La Figura 1 muestra una imagen 3D donde se aprecia el diseño final a partir del chasis de un karting de competición usado, obtenido a costo nulo.

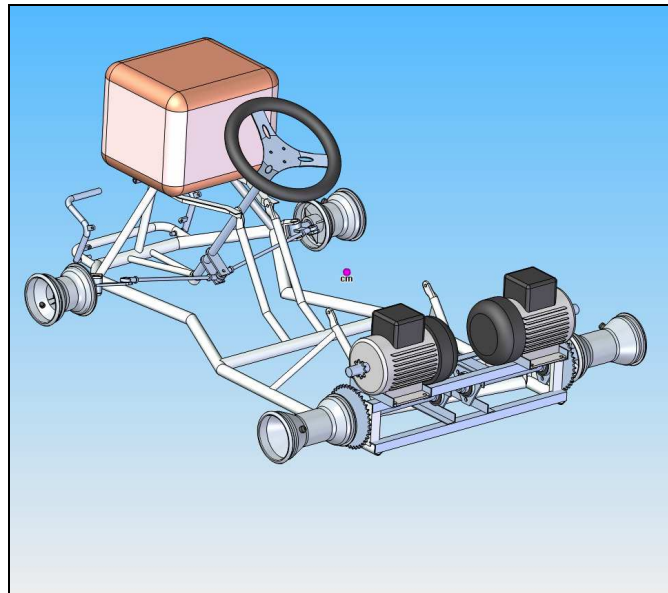


Figura 1: Imagen 3D del conjunto chasis – motores - generador

El chasis fue sometido a tres modificaciones importantes. La primera fue el reemplazo del eje rígido original por dos ejes independientes, con el agregado de los elementos de soporte necesarios (rodamientos y porta-rodamientos) para poder implementar el diferencial electrónico. Una segunda modificación fue el montaje de soportes para ambos motores eléctricos (ver Figura 1) de 1500 rpm nominales. Dado que se tomó como punto de partida que el vehículo alcanzaría una velocidad de traslación de 20 Km/h y se emplearían dos ruedas motrices de 25 cm de diámetro, fue posible calcular el Factor de Reducción de velocidad requerido:

$$\begin{aligned} V &= \omega \cdot R = 2\pi f R \\ f &= \frac{V}{2\pi R} = \frac{20 \text{ km/h} \cdot 1000}{6,28 \cdot 0,125 \cdot 3600} \cong 7 \text{ Hz} \cong 425 \text{ rpm} \\ FR &= \frac{1500}{425} \cong 3,53 \end{aligned} \tag{1}$$

siendo V , ω , f y R la velocidad tangencial, la velocidad angular, la frecuencia de rotación y el radio de la rueda, respectivamente, y FR el Factor de Reducción de velocidad entre el eje motor y el eje de la rueda. Para la implementación se tomó un valor de FR de 4:1, utilizándose una reducción basada en un conjunto cadena, corona y piñón para cada rueda.

La tercera modificación consistió en proveer un alojamiento al generador en la parte delantera del vehículo. Si bien entorpece la visión, se priorizó una adecuada distribución de masas y posicionamiento del centro de gravedad del vehículo.

2.3. Diseño eléctrico.

Para el diseño eléctrico se buscó simplicidad y confiabilidad. La Figura 2 muestra el circuito esquemático.

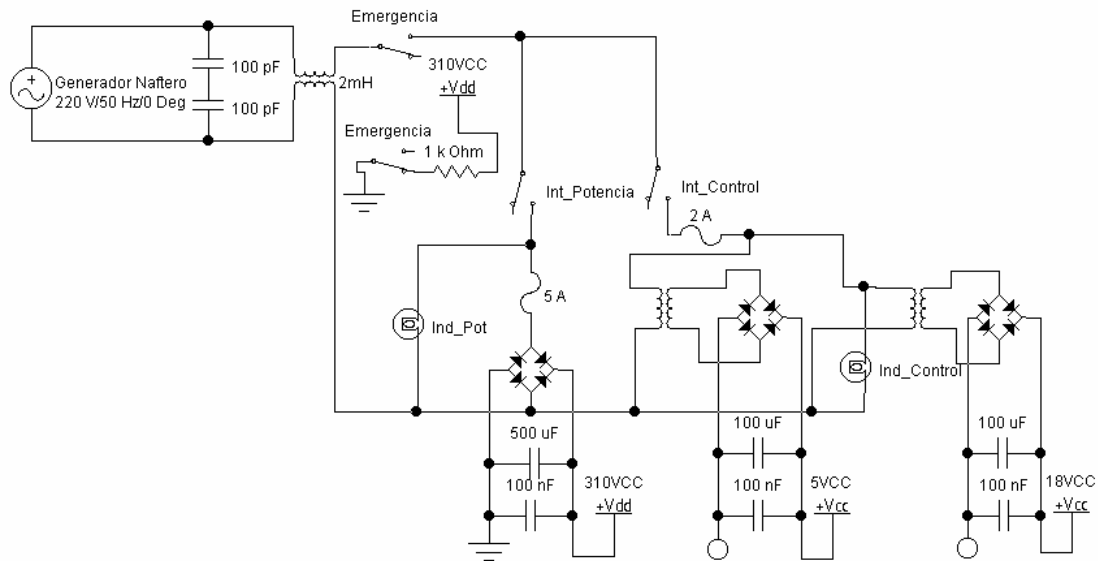


Figura 2: Circuito eléctrico del VHI

El generador eléctrico de combustión interna posee una salida de tensión monofásica de 220V/50 Hz. Dado que su forma de onda no es senoidal perfecta y contiene componentes armónicas de alta frecuencia, se empleó un filtro de línea para mejorar la calidad de la señal. Luego de este filtro se colocaron los interruptores de los circuitos de potencia y de control. El primero se encarga de suministrar la energía que se utiliza para los motores eléctricos y dentro del segundo se hallan las alimentaciones de los microprocesadores y la lógica de control de los “drivers” de potencia. Un tercer interruptor tipo “golpe de puño” se utiliza como parada de emergencia, interrumpiendo todas las alimentaciones y descargando la energía almacenada en los capacitores de alta tensión a través de una resistencia de 1 kohm.

Luego del interruptor de potencia se encuentra un fusible, elemento sumamente importante que protege a la electrónica de potencias de sobrecargas y cortocircuitos. A continuación se encuentra un rectificador de onda completa implementado con diodos discretos y un banco de capacitores de aproximadamente 500uF para realizar un filtrado de la señal rectificada. La tensión resultante de este circuito es de 310 voltios continuos. Con ella se alimentan los inversores (inverters) que generarán la alimentación trifásica de los motores de inducción. El circuito de alimentación de lógica posee un segundo fusible de 2 A de capacidad. Luego de

este fusible se encuentran dos transformadores en cuyos secundarios se colocaron puentes de diodos para realizar rectificaciones de onda completa para extraer tensiones de 5 VCC para los microprocesadores, y de 18 VCC para los drivers de potencia.

Se tuvo especial cuidado en que todos los cableados fueran distribuidos de modo tal de reducir al mínimo el "crosstalk" entre las señales. Las alimentaciones siempre van por caminos alejados de las señales.

2.4. Diseño electrónico y de software

La Figura 3 muestra el diagrama en bloques general y el conexionado de los distintos módulos del vehículo desarrollado. Para el control de los motores del vehículo, se utiliza la información de aceleración, frenado y dirección, recogida mediante potenciómetros, y la información de la velocidad de cada rueda, obtenida mediante sensores Hall.

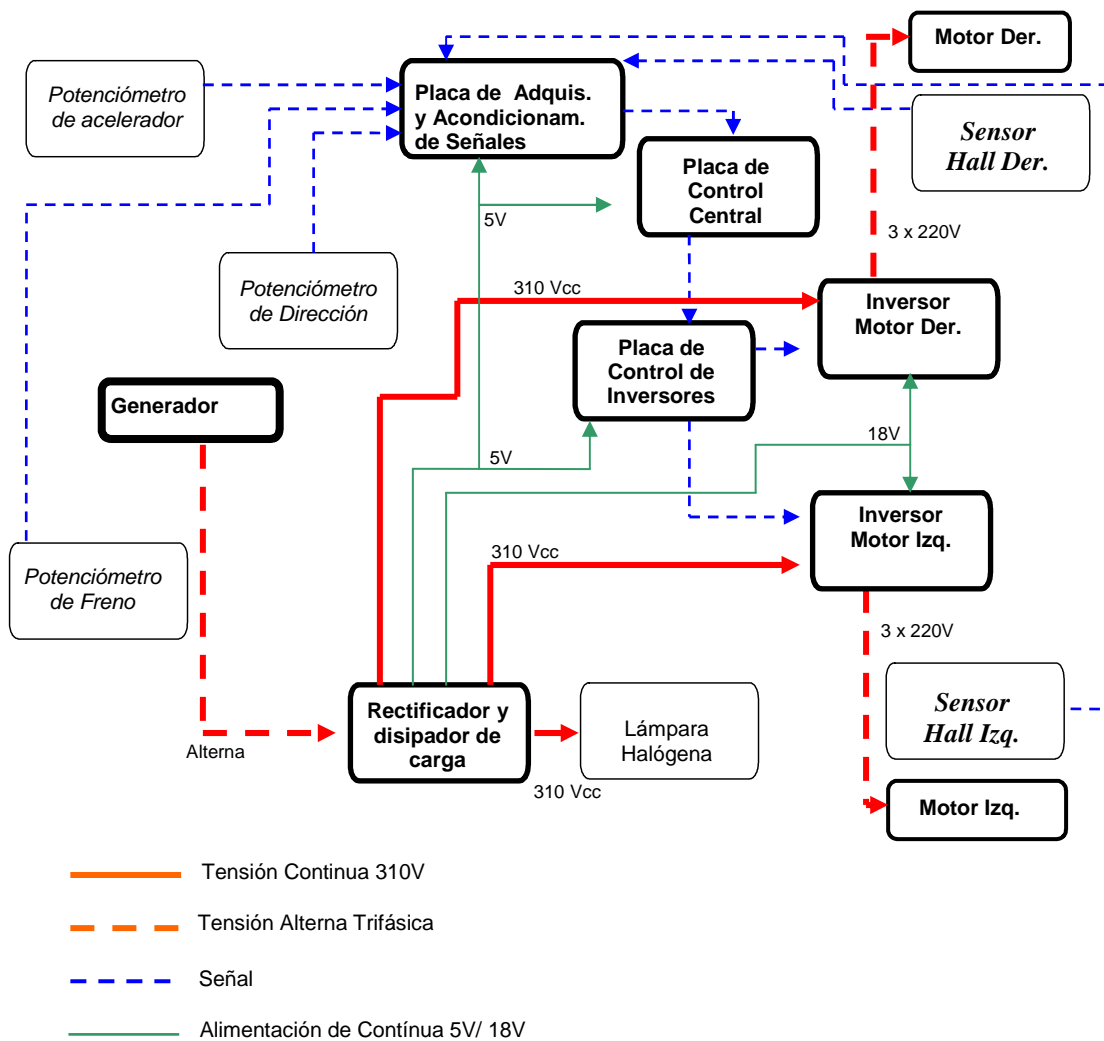
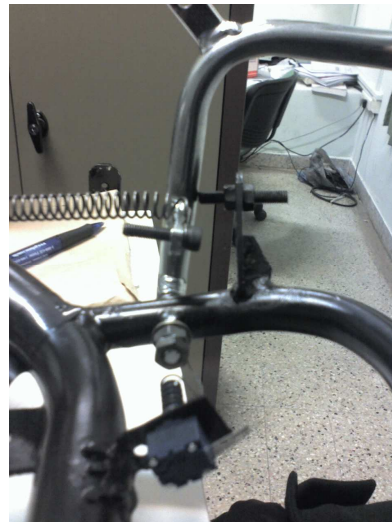


Figura 3: Diagrama en Bloques del Vehículo Híbrido ITBA

La electrónica del vehículo se encuentra dividida en cinco bloques claramente separados:

- Placa de Adquisición y Acondicionamiento de Señales, llamada SCB (Sensor Control Board). Esta placa se encarga de tomar las señales de todos los sensores, filtrarlas y ponerlas a disposición del control central.
- Placa de Control Central, denominada MCB (Main Control Board). Es la que se encarga de centralizar todos los cálculos de control que se requiera implementar. A su vez es la que entronca las comunicaciones entre los otros bloques y con una computadora externa.
- Placa de Control de Inversores, denominada ICB (Inverter Control Board). Su única misión es generar las señales requeridas para el control de los inversores de potencia.
- Inversores (Inverter) de Potencia. La función de estas placas es manejar los motores de inducción trifásicos. Generan juegos trifásicos de tensión y frecuencia variable con suficiente capacidad para manejar los motores de 1 KW [5].
- Disipador de carga. Su única misión es disipar la energía excesiva que puede aparecer en los capacitores de alta tensión debido al frenado regenerativo. Protege al resto de los elementos de potencia.

La SCB está compuesta principalmente por un microcontrolador Motorola MC68HC08GP32. El sensado de los pedales y la dirección se realiza mediante tres potenciómetros de precisión ubicados en el acelerador, en el freno y debajo de la columna de dirección. Estos potenciómetros, se conectan mediante un filtro pasabajos de primer orden a los pines del conversor analógico-digital del microcontrolador (ver Figuras 4a y 4b).



Figuras 4a y 4b: Acoplamiento de potenciómetros de precisión en pedales.

Los potenciómetros son lineales y de una sola vuelta, y están montados de forma tal que su eje sea colineal con el de los pedales (o la columna de dirección). La variación máxima de los que están en los pedales es aproximadamente $\frac{1}{4}$ de vuelta, resultando en un rango de salida de

aproximadamente 1 Volt. En el caso de la dirección un valor "0" del conversor analógico-digital indica que la columna de dirección se encuentra en su extremo izquierdo, un valor "250" indica que la dirección se encuentra en su extremo derecho, aproximadamente 60 grados para cada lado. Un valor entre 123 y 126 es considerado como posición central, es decir, el conductor quiere conducir en línea recta.

Por otro lado, y con objeto de medir la velocidad en las ruedas traseras, se ubicó un sensor de efecto Hall en cada una de ellas y cuatro imanes equidistantes en el eje del motor correspondiente. Los sensores son unipolares de colector abierto, por lo que para conectarlos se los provee de una tensión de referencia a través de una resistencia de "pull-up". Además, se utiliza un filtro de primer orden para eliminar ruidos indeseados. Al utilizar más de un imán se logra una mejor resolución a velocidades bajas. Dado que la señal rectangular generada ingresa al microcontrolador por su módulo de Input Capture, y según la configuración adoptada del mismo se puede medir como máximo 100ms entre flancos ascendentes, es posible calcular la velocidad mínima medible. Para el caso más lento, se tendría un intervalo de tiempo de 100ms entre imanes, lo que significa 400ms por vuelta, o una frecuencia de 2.5Hz en el rotor. Como la reducción de velocidad es aproximadamente de 4 a 1, la rueda de 25 cm de diámetro giraría con una frecuencia de 0.625Hz (o una vuelta cada 1.6 segundos), resultando:

$$V_{med \min} = 0,625 \frac{\text{vueltas}}{\text{seg}} \cdot (\pi \cdot 25) \frac{\text{cm}}{\text{vuelta}} = 49,06 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \cong 1,8 \text{ km/h} \quad (2)$$

Tanto los conversores A/D como el módulo Input Capture funcionan con sus interrupciones independientes [6]. El software "embebido" realiza, además, un muestreo cada $T_s = 0,1$ segundos y lo retransmite a la MCB a una velocidad de 9600 baudios. El formato del paquete de datos se compone de los siguientes 5 bytes: TH (Throttle: Acelerador – Freno) – DIR (Dirección) – WRI (Velocidad de la Rueda Izquierda) – WRD (Velocidad de la Rueda Derecha) – END (Aviso del final del paquete; número 255 en decimal o 0xFF en hexadecimal). Los cuatro primeros bytes constituyen la información enviada y poseen valores entre 0 y 250, para no confundirlos en ningún caso con el fin de paquete.

La MCB se encarga de realizar el control del VHI. Son sus funciones principales realizar un control de la velocidad del vehículo, y efectuar la acción del diferencial, ya que dispone de un motor en cada rueda trasera. Para esto, debe recibir los datos de la SCB y retransmitirlos luego de procesados a las ICB. A su vez, puede remitirlos a una computadora personal para ser visualizados. El componente principal de la placa es un microcontrolador Motorola MC68HCS12DP256 de 16 bits, habiendo además de componentes auxiliares para conectar sus módulos principales. Se dispone de dos interfaces RS232, una de ellas para la conexión con la SCB (con el protocolo definido anteriormente) y la otra para enviar datos de telemetría a una computadora personal. Para este último fin se desarrolló un "script" en MATLAB que muestra

por pantalla los datos enviados. Una vez obtenidos los datos de la SCB, se procesan de modo tal de asignar una potencia de salida instantánea a cada motor. Para esto, se evalúa el Throttle recibido y la posición de la barra de dirección. Como se explicó, cuando la barra se posiciona entre los números 123 y 125, se considera que se está circulando en línea recta; cualquier desvío de esta posición dará lugar a un cálculo que ponderará los presets de los lazos de control de cada rueda. La forma en la que se calcula la tracción diferencial, se indica en el gráfico de la Figura 5. El ángulo de giro de la rueda interna (A_{vi}) es distinto al de la rueda externa (A_{ve}) dado que ambas deben describir circunferencias concéntricas (con centro en el punto O). Los radios de giro interno (R_i) y externo (R_e) cumplen con las relaciones:

$$R_i = R - \frac{a}{2} = \frac{b}{\operatorname{tg}(A_{vi})} \quad R_e = R + \frac{a}{2} = \frac{b}{\operatorname{tg}(A_{ve})} + a \quad (3)$$

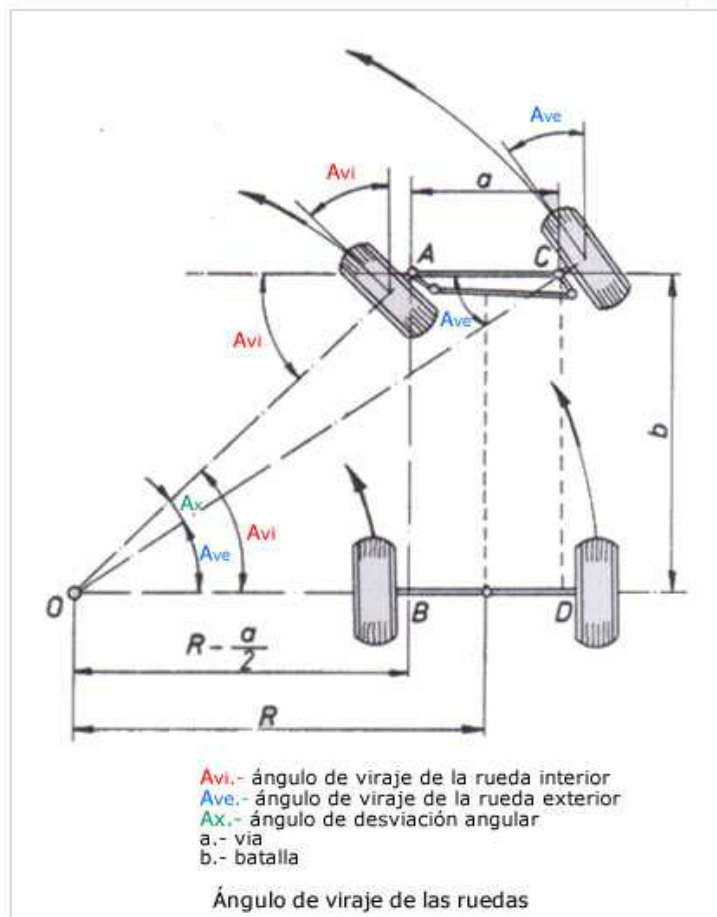


Figura 5: Ángulo de viraje de las ruedas

Para efectuar el escalamiento diferencial se busca encontrar una relación entre la velocidad de las ruedas traseras. Si se considera que cada una de ellas sigue aproximadamente la trayectoria de su rueda delantera correspondiente (esto no es exactamente así, pero se toma de esta manera para simplificar los cálculos), se tiene que:

$$V_{in} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (R - a/2)}{t} \quad \text{y} \quad V_{out} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (R + a/2)}{t} \quad (4)$$

y finalmente:

$$V_{out} = 1 + \frac{a}{b} \cdot \text{tg}(A_{vi}) \cdot V_{in} \quad \text{y} \quad \omega_{out} = 1 + \frac{a}{b} \text{tg}(A_{vi}) \omega_{in} \quad (4)$$

Si bien para el caso del VHI la distancia BD es mayor que la AC (ver Figura 5), en la fórmula anterior se puede utilizar BD como el parámetro “a” sin mayor error.

La misión de las ICB es generar las señales de comando de los inversores de potencia. Se trata de dos juegos de tres señales de PWM que se encuentran desfasadas 120 grados eléctricos entre sí. Dichas señales se utilizan para encender y apagar los transistores que modulan la tensión continua a tensión alterna. El microprocesador utilizado para este bloque debe cumplir los siguientes requisitos mínimos: 3 módulos de PWM independientes, 1 módulo de IC, capacidad de cálculo elevada y capacidad de memoria elevada para soportar almacenar una tabla de valores seno con elevado número de puntos. Estos requisitos son satisfechos por el procesador Microchip PIC18F8720. El PIC18F8720 posee una arquitectura RISC, un encapsulado de 80 pines y un reloj de hasta 40 MHz. El software se encarga de comandar las llaves para transformar la tensión continua en un sistema trifásico de alterna. Utiliza tres salidas de PWM que se conectan a las placas de potencia y una entrada de PWM que se utiliza para la comunicación con la placa MCB. Se decidió utilizar una frecuencia de “switching” de 2,557KHz. Esta frecuencia permite tener una reducida distorsión sin tener elevadas pérdidas de conmutación. La tensión que se aplica desde la frecuencia de corte mínima (2Hz) hasta los 10Hz es de 44 volts. A partir de los 10 Hz el valor de tensión que se aplica es el que surge del cálculo $V/f = cte$.

Para generar el sistema trifásico de tensiones senoidales las dos placas inversoras del VHI utilizan modulación de ancho de pulso sobre tres medios puentes con 2 llaves cada uno. Estas llaves de conmutación son transistores MOSFET IRFP460 de 500 volts de tensión máxima “drain – source” y 18A corriente máxima. Cada “pierna” de este invertir trifásico se encuentra comandada por un CI IR2110. Este dispositivo posee los circuitos necesarios para generar una tensión flotante para el correcto disparo del MOSFET que se encuentra en la parte superior de la pierna, cuyo “source” puede tener una tensión entre 0v y 310v. Se logró montar un inversor trifásico sobre una placa simple faz de 10 cm x 10 cm, que ha mostrado ser muy confiable y de bajo ruido. La placa también incluye un fusible de 1 A para la alimentación de la lógica del circuito. La conexión con el ICB se realiza a través de opto acopladores rápidos CNY74-2, que permiten separar eléctricamente las señales y alimentaciones de los microprocesadores de los componentes de la sección de potencia.

3. CONCLUSIONES

El VHI fue sometido a pruebas de banco para medir las velocidades de rotación en función del giro del volante y de las posiciones de los pedales de aceleración y frenado. Asimismo, se hicieron pruebas sobre piso con distintos conductores para evaluar el desempeño general y del diferencial electrónico, obteniéndose resultados satisfactorios. Los radios de giro interno y externo mínimos medidos fueron de 170cm y 270cm, respectivamente. La máxima velocidad alcanzada (con piloto) fue de 18 km/h, con las ruedas siempre en contacto con el piso.

Estas pruebas permitieron verificar que la tracción eléctrica mediante motores trifásicos de inducción resulta adecuada para este tipo de vehículos, y que el frenado regenerativo funciona correctamente, transformando durante el frenado la energía cinética del vehículo en energía eléctrica, que permitiría recargar un conjunto de baterías. En la implementación realizada, se utilizó para encender una lámpara.

La implementación ha generado gran experiencia en el tema, y ha provisto una plataforma que permanecerá en la Universidad para futuros trabajos de alumnos, con miras a profundizar en el conocimiento de este tipo de vehículos.

4. REFERENCIAS

- [1] <http://www.teslamotors.com/>
- [2] T. Denton, *Automobile Electrical and Electronic Systems*, SAE / Elsevier Butterworth-Heinemann, (2004)
- [3] <http://www.hybridcars.com/>
- [4] S. J. Chapman, *Máquinas eléctricas*, 2da Edición, Mc-Graw Hill, (1997)
- [5] Mohan, Undeland, Robbins, *Power Electronics – Converters, Applications, and Design*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, (1995)
- [6] P. Spasov, *Microcontroller Technology: the 68HC11*, Prentice Hall, USA, 2001