

PROYECTO DE INGENIERÍA APLICADA

Diseño de la etapa de potencia y de control para un vehículo eléctrico experimental

Power and control stage design for an experimental electric vehicle

Brenda Nicole Arnez Mercado¹ . Edson Gaston Montaña Bautista² .

¹ Ing. Mecánico y de Automatización Industrial (Mecatrónico). Cochabamba. Bolivia.
brendarnez@outlook.com

² Ing. Mecánico y de Automatización Industrial (Mecatrónico). Coordinador del Departamento Académico de Electromecánica. Universidad del Valle. Cochabamba. Bolivia.
mbautistaedson@gmail.com

RESUMEN

Se realizó el diseño del circuito de control y la etapa de potencia para un vehículo eléctrico experimental con dos motores de corriente continua sin escobillas (motor *Brushless* - BLDC) en rueda de 40 kW cada uno, que distribuye la energía proveniente del banco de baterías de litio seleccionado LiFeMnPO₄ de 230 Vdc y 100 Ah, definido por el consumo de voltaje y corriente de ambos motores de 205 Vdc y 500 A, según la necesidad de torque de un vehículo de 1000 kg, calculado a partir del análisis dinámico y el cálculo de los parámetros eléctricos de consumo según las gráficas de performance del motor.

La etapa de control recibe las señales de entradas definidas como el acelerador, el freno, la dirección de marcha y el giro del volante, estas se procesan y envían la información a los microcontroladores esclavos de cada motor; según la secuencia de los tres sensores de posición *hall* de cada rueda, además de controlar las señales de giro por medio del modelo Ackerman-Jeantand con un sistema electrónico diferencial.

La etapa de potencia se diseñó para recibir las señales de activación y la distribución de energía por señales de modulación de ancho de pulso (PWM), que activan el inversor trifásico de cada motor conformado por grupos de seis pares de transistores de efecto de campo metal –óxido – semiconductor (MOSFET) conectados en paralelo para cada bobina de los motores. Se calculó y seleccionó la protección, la instrumentación del banco de baterías y los conductores de conexión de los motores. Finalmente, mediante el análisis de costos se determinó que los elementos, que constituyen el total del proyecto, tienen un costo de 11521 dólares americanos.

Palabras clave: Banco de baterías. Etapa electrónica de control. Fuerza de tracción total. Inversor trifásico. Motor sin escobillas.

ABSTRACT

The control circuit and the power stage design was carried out for an experimental electric vehicle with two Brushless direct current motors in-wheel (Brushless motor - BLDC) of 40 kW each, which distributes the energy from the power bank selected lithium batteries LiFeMnPO₄ of 230 Vdc and 100 Ah, defined by the voltage and current consumption of both 205 Vdc and 500 A motors, according to the torque need of a 1000 kg vehicle, calculated from the dynamic analysis and the calculation of the electrical consumption parameters according to the motor performance graphs.

The control stage receives the signals from defined inputs, such as the accelerator, the brake, the direction of travel, and the rotation of the steering wheel, and these are processed and sent information to the slave microcontrollers of each motor, according to the sequence of the three sensors hall position of each wheel, in addition of controlling the turn signals using the Ackerman-Jeantand model with an electronic differential system.

The power stage was designed to receive the activation signals and the power distribution by pulse width modulation (PWM) signals, which activate the three-phase inverter of each motor, made up of six pairs groups of metal field-effect transistors (MOSFET) connected in parallel for each motor coil. The protection, the instrumentation of the battery bank, and the connection conductors of the

motors were calculated and selected. Finally, through the cost analysis, it was determined that the elements, which constitute the total project, have a cost of \$ 11521 US dollars.

Keywords: Battery bank. Electronic control stage. Total traction force. Three-phase inverter. Brushless motor.

1. INTRODUCCIÓN

Un vehículo eléctrico experimental requiere de un diseño previo de los componentes que lo conforman y cómo estos deben funcionar simultáneamente. Anteriormente, fue presentado en el Departamento de Electromecánica de Univalle un proyecto de diseño de un motor *Brushless* de 40 kW, con la intención de que el mismo sea parte del vehículo eléctrico que se está proyectando. El vehículo eléctrico experimental contará con dos de estos motores acoplados directamente en cada rueda delantera, descartando así la transmisión y el diferencial mecánicos de giro.

Al tratarse de dos motores en rueda, estos deben recibir señales de control (según el conductor del vehículo decida) por medio de entradas que indiquen la velocidad, radio de giro y dirección de avance. Las señales de entrada deben ingresar a una etapa de control, que convertirá las mismas en instrucciones adecuadas para la performance de ambos motores, estas señales de instrucción por medio de la etapa de potencia suministrarán de manera adecuada la energía almacenada en el banco de baterías. Por esta razón es necesario el diseño de la etapa de potencia eléctrica y electrónica para un vehículo eléctrico experimental de 80 kW.

Los datos del motor de 40 kW fueron obtenidos de Cáceres (2018), los cuales se muestran en la Tabla 1.

El diámetro de la rueda en la cual está acoplado el motor es de 14” (Cáceres, 2018), y la transmisión directa cuyos datos se muestran en la Tabla 2.

Parámetros	Valor	Unidad
Corriente	53	Amper [A]
Voltaje de alimentación	800	Volt [V]
Potencia nominal	4000	Watt [W]
Eficiencia	94	%
Velocidad promedio	2609	[RPM]
Torque promedio	143	[N.m]
Peso total	29	[kg]

Tabla 1. Datos del Motor Brushless

Fuente: Cáceres, 2018.

Relación de Transmisión	1:1 G=1
Diámetro de la Rueda	d=0,628 m
Radio de la Rueda	r=0,315 m

Tabla 2. Datos de la rueda acoplada al motor

Fuente: Elaboración Propia, 2019.

La masa de un vehículo eléctrico tiene un efecto crítico en el rendimiento, el alcance y el costo. Se evalúa un modelo de 1000 kg de masa total.

2. METODOLOGÍA

El diseño inició con un análisis dinámico por medio de un diagrama de cuerpo libre (DCL) de un vehículo modelo, en el que se consideraron todas las fuerzas que actúan en el vehículo en movimiento con un rango de velocidades y grados de inclinación, todo ello para obtener el torque necesario total y de cada motor para la propulsión del vehículo.

Los datos con los que se cuenta para este análisis se refieren a la potencia de los motores que fueron tomados como potencia límite mecánica, considerando un rendimiento del motor del 94% (Cáceres, 2018), y una ausencia de pérdidas en la transmisión directa 1:1 de los motores en rueda.

Los valores de torque deben estar en el rango de los datos de simulación del motor sin escobillas para obtener los valores de corriente y voltaje mínimo y máximo que será necesario para la propulsión del vehículo, dentro del rango de velocidades e inclinaciones propuestas.

El voltaje y corriente mínima y máxima permiten definir los parámetros para el circuito de potencia además de la capacidad y cantidad de las baterías para formar la fuente de alimentación (banco de baterías).

Una vez calculado y seleccionado el banco de baterías, se debe definir las entradas y salidas de los circuitos de control y de potencia, los cuales configurarán una señal PWM, la cual es modificada según las entradas del circuito de control.

Las entradas al circuito de control están directamente relacionadas con el accionar del conductor, para que el vehículo pueda moverse a voluntad de este; por esa razón, y al no contar con transmisión mecánica, se emplea un sistema electrónico diferencial (Electronic Differential System EDS) por medio del sistema de giro Ackerman-Jeantand (Zhou y Fang, 2010).

3. RESULTADOS

3.1 Análisis Dinámico

Considerando una masa m que avanza a una velocidad v , por una pendiente de ángulo φ , el vehículo modelo debe ser capaz de: superar la resistencia a la rodadura, superar la resistencia aerodinámica, proporcionar la fuerza necesaria para superar el componente de su propio peso que actúa cuesta abajo y acelerar; entonces, la velocidad no es constante, por medio de la Fuerza de Tracción Total resultante de la sumatoria de las fuerzas presentadas en el diagrama de cuerpo libre (DCL) de la Figura 1 (Larmine y Lowry, 2012).

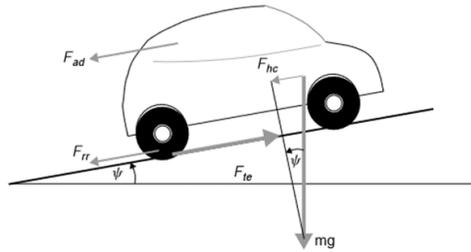


Figura 1. Diagrama de cuerpo libre del vehículo modelo

Fuente: Larminie y Lowry, 2012.

La fuerza total de tracción F_{te} es la suma de todas estas fuerzas, dada por la ecuación (1).

$$F_{te} = F_{rr} + F_{la} + F_{wa} + F_h + F_{ad} \quad (1)$$

F_{la} y F_{wa} serán negativos si el vehículo se está desacelerando, y F_h será negativo si va cuesta abajo.

La ecuación (2) describe a detalle las fuerzas denotadas en la ecuación (1).

$$F_{te} = \mu_{rr}mg + ma + I \frac{G^2}{n_g r^2} a + mg \sin \varphi + \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (2)$$

El esfuerzo de tracción total está dado por la ecuación (3).

$$T_{te} = \frac{r}{G} F_{te} \quad (3)$$

Donde:

T_{te} = esfuerzo de tracción total [N.m]

r = radio del neumático [m]

G = ratio de transmisión

La ecuación (4) es resultado de remplazar la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en la ecuación (2).

$$T_{te} = \frac{r}{G} \left(\mu_{rr} mg + ma + I \frac{G^2}{n_g r^2} a + mgsin\phi + \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \right) \quad (4)$$

Los datos para el cálculo son:

La masa del vehículo $m = 1000 \text{ kg}$, Inercia del motor $I = 0,434 \text{ kg.m}^2$ (Cáceres, 2018) coeficiente de arrastre $C_d = 0.32$ para un vehículo tipo sedán, densidad del aire en función a la altura $\rho = 0.8410 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, el área frontal del vehículo tipo medio $A = 1,9 \text{ m}^2$, el coeficiente de resistencia a la rodadura en asfalto plano, $\mu_{rr} = 0,017$, relación de transmisión: $G = 1$ y el diámetro de la rueda de 14" con un radio de $r = 0,3143 \text{ m}$ (Cáceres, 2018).

A través de la ecuación y los datos proporcionados se hace una variación de los valores de velocidad y grados de inclinación del vehículo modelo, de modo que se obtiene un rango de torque. Para el vehículo modelo de 1000 kg. Se requiere de un Rango de torque necesario por motor de:

$$\text{Torque mín} - \text{máx} = 467,20 - 1101,48 \text{ N.m}$$

Los rangos resultantes de los cálculos mecánicos muestran la necesidad de torque del vehículo, pero no significa que los dos motores de 40 kW puedan cumplir con todos los valores para mover el vehículo a velocidades de 10 a 100 km/h según la pendiente de inclinación. Dependiendo de los parámetros de voltaje y corriente de consumo de los motores se define el límite de velocidad e inclinación alcanzable.

3.2 Diseño Eléctrico

Una vez obtenido el torque máximo necesario, se realizó un análisis de las características del motor BLDC de 40 kW, usando las gráficas de las curvas Torque-Velocidad y la curva Corriente-Velocidad de la Figura 2.

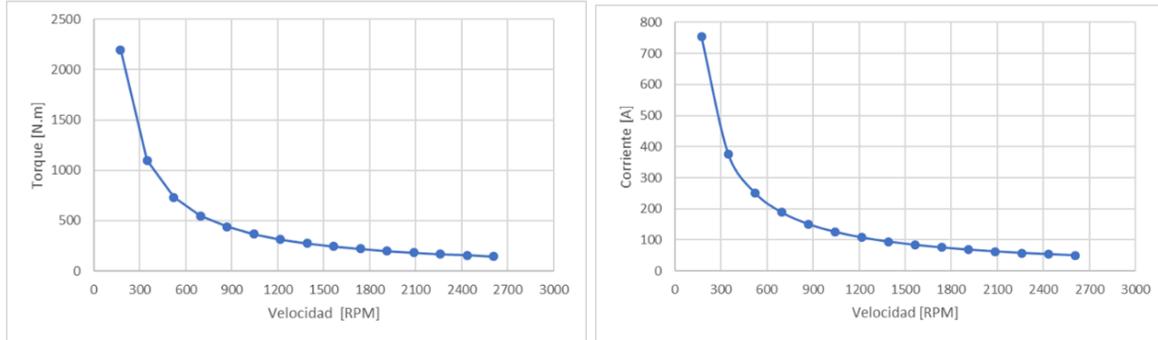


Figura 2. Relación torque-velocidad y corriente-velocidad del motor sin escobillas de 40 kW

Fuente: Elaboración Propia en base a Cáceres (2018), 2019.

Según la velocidad, el grado de inclinación y los datos obtenidos de las curvas anteriormente mencionadas, se calcula la capacidad del motor mostrado en la Tabla 3. El consumo del motor está definido por el cálculo de la potencia de consumo según el torque necesario y la velocidad en rad/s según la ecuación (5).

$$P = \frac{\omega * T}{1000 * n} \quad (5)$$

Donde: ω = Velocidad del angular [rad/s],

T = Torque [N.m],

n = Rendimiento del motor 94%

Una vez calculado el voltaje se calcula el voltaje y corriente de consumo según la ecuación (6).

$$P = V * I \quad (6)$$

Donde: P = Potencia eléctrica [W],

V = Voltaje [V],

I = Corriente [A]

Masa del Vehículo = 1000 [kg]									
Grado de Inclinación = 0%									
VELOCIDAD		NECESIDAD DEL VEHICULO POR RUEDA	CAPACIDAD DEL MOTOR			CONSUMO DEL MOTOR			
RPM	Velocidad [km/h]		Torque [N.m]	Torque [N.m]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Velocidad [rad/s]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
84	10	467,2	2764	25	950	8,82	3,87	25	154,91
126	15	467,97	2499	38	859	13,23	5,82	38,39	151,58
168	20	469,06	2234	51	768	17,64	7,78	51,18	151,95
253	30	472,16	1697	77	583	26,45	11,74	77,09	152,3
337	40	476,5	1121	105	385	35,27	15,8	104,9	150,62
421	50	482,08	944	128	324	44,09	19,98	128,31	155,71
505	60	488,9	767	154	264	52,91	24,32	153,94	157,95
589	70	496,96	661	180	227	61,73	28,84	179,58	160,57
674	80	506,26	572	205	197	70,55	33,57	205,36	163,48
758	90	516,8	510	231	175	79,36	38,55	230,85	167,01
842	100	528,58	457	256	157	88,18	43,82	256,43	170,86

Tabla 3. Cálculo de consumo eléctrico del motor

Fuente: Elaboración Propia, 2019.

Los valores en rojo son aquellos que sobrepasan la potencia del motor de 40 kW, por lo tanto, delimita la performance del vehículo. Se realiza el mismo procedimiento para los diferentes grados de inclinación de 0% al 40%, obteniendo así un rango de parámetros eléctricos de consumo de corriente y necesidad de voltaje de ambos motores mostrados en la Tabla 4.

Vehículo de 1000 kg de masa	
Rango de Voltaje por motor	25-205 [V]
Rango de Corriente por motor	155-338 [A]
Rango de Voltaje total	25-205 [V]
Rango de Corriente total	310-676 [A]

Tabla 4. Rango de Voltaje y corriente de consumo del vehículo

Fuente: Elaboración Propia, 2019.

Con los datos obtenidos se delimita el funcionamiento del vehículo eléctrico a un rango de consumo de corriente máximo de 500 A debido a la instrumentación.

3.3 Cálculo del Banco de Baterías

Para definir el banco de baterías, se tomó en cuenta el porcentaje de masa que ocupará respecto a la masa total del vehículo y el rango de voltaje que se desea abarcar. Según la regla de porcentaje, solo el 30% de la masa total del vehículo está destinado al banco de baterías (Leitman y Brant, 2009). Por lo tanto, la masa define la cantidad de baterías que se puede contar en el vehículo, y también el voltaje y potencia total en [Wh].

Tomando en cuenta el uso de baterías de tracción y buscando la mejor opción de densidad energética se seleccionó un banco de baterías conformado por Baterías LiFeMnPO₄ GBS Lítico-Hierro-Fosfato, un tipo de batería usada en aplicaciones de vehículos eléctricos (Electromovilidad, 2018), cumpliendo los requerimientos mostrados en la comparativa Tabla 5.

Banco de baterías LiFeMnPO ₄ GBS	Requerimientos de la batería del vehículo
Cantidad de baterías de 12,8 [V] = 18	Voltaje máximo requerido = 205 [V] 30% de masa total = 300 [kg]
Capacidad = 100 [Ah]	
Voltaje total = 230,4 [V]	
Masa total = 232,2 [kg]	
Potencia total = 23 [kW]	
Porcentaje de la masa total del vehículo 23,2%	

Tabla 5. Comparación con los requerimientos del banco de baterías

Fuente: Elaboración propia, 2019.

3.4 Instrumentación del Banco de Baterías

El esquema de la Figura 3 muestra la conexión del banco de baterías con la instrumentación. El sistema de instrumentación es el responsable de monitorear el estado del banco de baterías y el sistema de manejo de energía, esta conexión sigue el manual de operación del EMS, y la conexión de ambos motores.

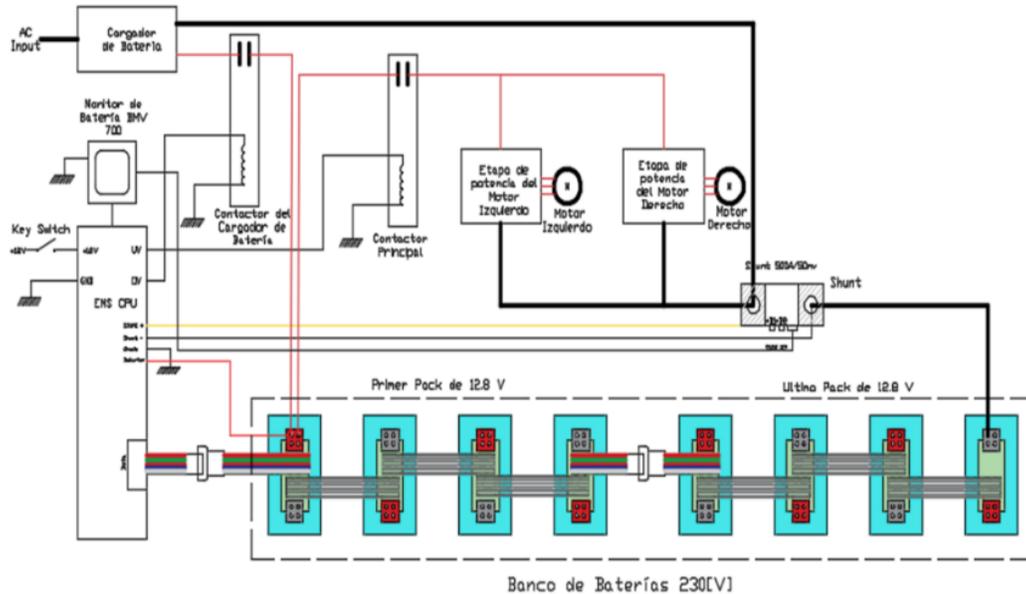


Figura 3. Esquema típico de conexión del banco de baterías

Fuente: Elaboración Propia en base a EMS Operation Manual, 2019.

El tiempo de carga del banco de baterías es determinado por la ecuación (7).

$$T_c = \frac{CAh}{CA} \quad (7)$$

Donde: T_c = Tiempo de carga [h],

CAh = Capacidad Amper-hora del banco de baterías [Ah], 100 [Ah]

CA = Capacidad del cargador [A], 3 cargadores en paralelo con un total de 30 [A]

$$T_c = 6,666 [h]$$

El tiempo de carga del banco de baterías es de aproximadamente 6,66 horas o 6 horas y 40 min.

3.5 Diseño del circuito de protección

La protección es necesaria para el circuito eléctrico, esta permite evitar las consecuencias de un posible corto circuito, además de la conexión y desconexión de la fuente de energía de los motores por medio de un contactor (Electromovilidad, 2018). La Figura 4 muestra el diagrama de

protección cuyos elementos fueron seleccionados mediante las consideraciones del apartado de Instalaciones con motores de uso industrial y dispositivos de protección (Cossío, 2011).

Los elementos de protección serán el interruptor principal, los fusibles, el contactor principal y el contactor para la etapa de potencia de cada lado.

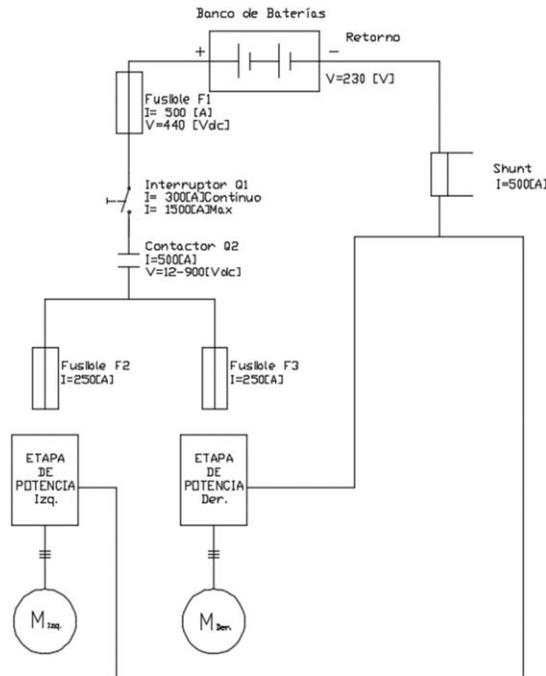


Figura 4. Diagrama de Protección

Fuente: Elaboración Propia, 2019.

3.6 Diseño electrónico

El diseño electrónico contempla la parte de control y potencia para ambos motores en rueda del vehículo, y el sistema electrónico diferencial para el control de los giros.

3.7 Sistema electrónico de control (Control Electronic System - CES)

El CES comprende desde la interacción del conductor con el vehículo, hasta el envío de las señales al circuito de potencia, considerando lo desarrollado en la parte del modo de accionamiento y operación del motor sin escobillas, obteniendo en total el circuito de control para ambos motores (Zhang *et al.*, 2017). Este sistema sigue el diagrama de bloques presentado en la Figura 5.

La función de la etapa de control es el de recibir las señales de las entradas, procesarlas y obtener las salidas que comandan la etapa de potencia, pero pasando previamente por los optoacopladores, debido a que los valores de voltaje de alimentación, entrada y salida de la etapa de control es de 0 a 5 VDC.

La etapa de potencia es diferente para cada motor, debido a que recibe señales independientes, llegando la señal de 0 a 12 VDC a los interruptores de la etapa de potencia activada por transistores de unión bipolar (BJT) de 0 a 12 VDC, a MOSFETS alimentados de 0 a 230 VDC.

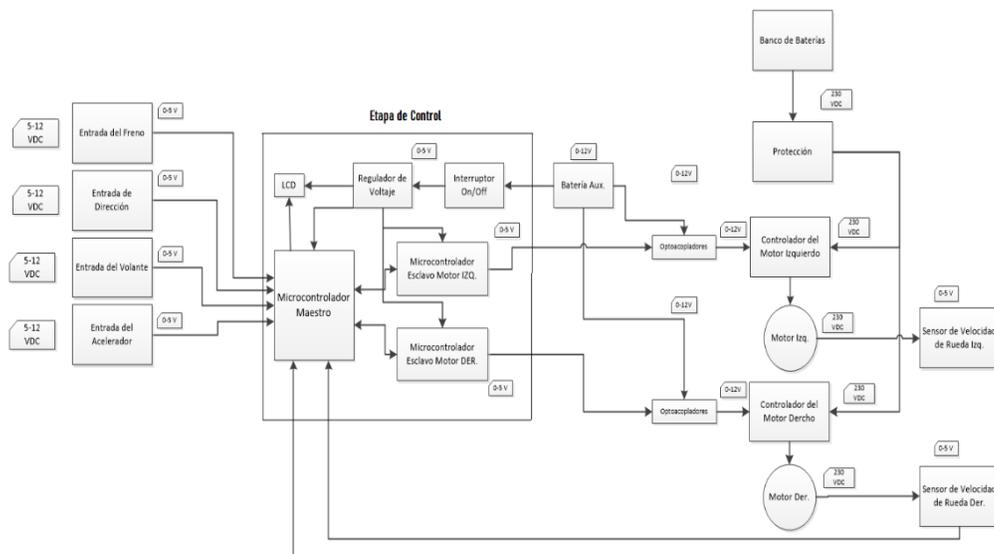


Figura 5. Diagrama de Bloques del Sistema electrónico de control

Fuente: Elaboración Propia, 2019.

Los elementos de protección están contemplados en el diseño de circuito de protección, tiene la funcionalidad de actuar frente a cortocircuitos, sobretensiones y picos de corriente, para proteger las etapas de potencia y los motores (Cossío, 2011). El banco de baterías que cuenta con su instrumentación correspondiente explicada anteriormente en el apartado del banco de baterías es la fuente de energía de 0 a 230 VDC. La entrada del freno es un potenciómetro con una alimentación de 5 a 12 VDC, con una señal de salida de 0 a 5 VDC.

La entrada de la dirección es un interruptor de 2 posiciones en la cual 0 VDC indica el sentido antihorario y 5 VDC indica en sentido horario. La entrada del volante es una entrada analógica de 0 a 5 VDC, en el cual se considera el valor de giro del volante.

La entrada del acelerador es por medio de un *potbox* con una alimentación de 5 a 12 VDC, con una señal de salida de 0 a 5 VDC. Los sensores *hall* de velocidad para ambos motores tienen una alimentación de 0 a 5 VDC, con una salida en el mismo rango.

3.8 Diseño de la Etapa de Potencia

La etapa de potencia consiste en un inversor trifásico de dos niveles, cuya función es convertir un voltaje de corriente directa a un voltaje de corriente alterna, el cual debe operar según el modo de operación electrónica del motor *Brushless* (Morales *et al.*, 2016). Por medio de un inversor trifásico con carga estrella de neutro flotante que es desarrollado mediante una célula de conmutación elemental conectada a cada bobina del motor, y conectados en paralelo con la intención de reducir la carga de corriente en cada elemento para asegurar su funcionalidad y duración (Torres *et al.*, 2008). Estas células deben ser activadas por medio de señales PWM, las cuales son obtenidas de la etapa de control que está aislada por los optoacopladores. La Figura 6 muestra la etapa de potencia de ambos motores.

Los optoacopladores permiten el aislamiento del circuito de control respecto al circuito de potencia, la Figura 7 muestra el esquema de conexión y las señales de entrada y salida de este. Las señales de entrada son: AH1-1, AH2-1, AH3-1, BL1-1, BL2-1 y BL3-1, que provienen de la etapa de control. Las señales de salida son: A1-1, A2-1, A3-1, B1-1, B2-1 y B3-1 las cuales se conectan a la etapa de potencia respectivamente.

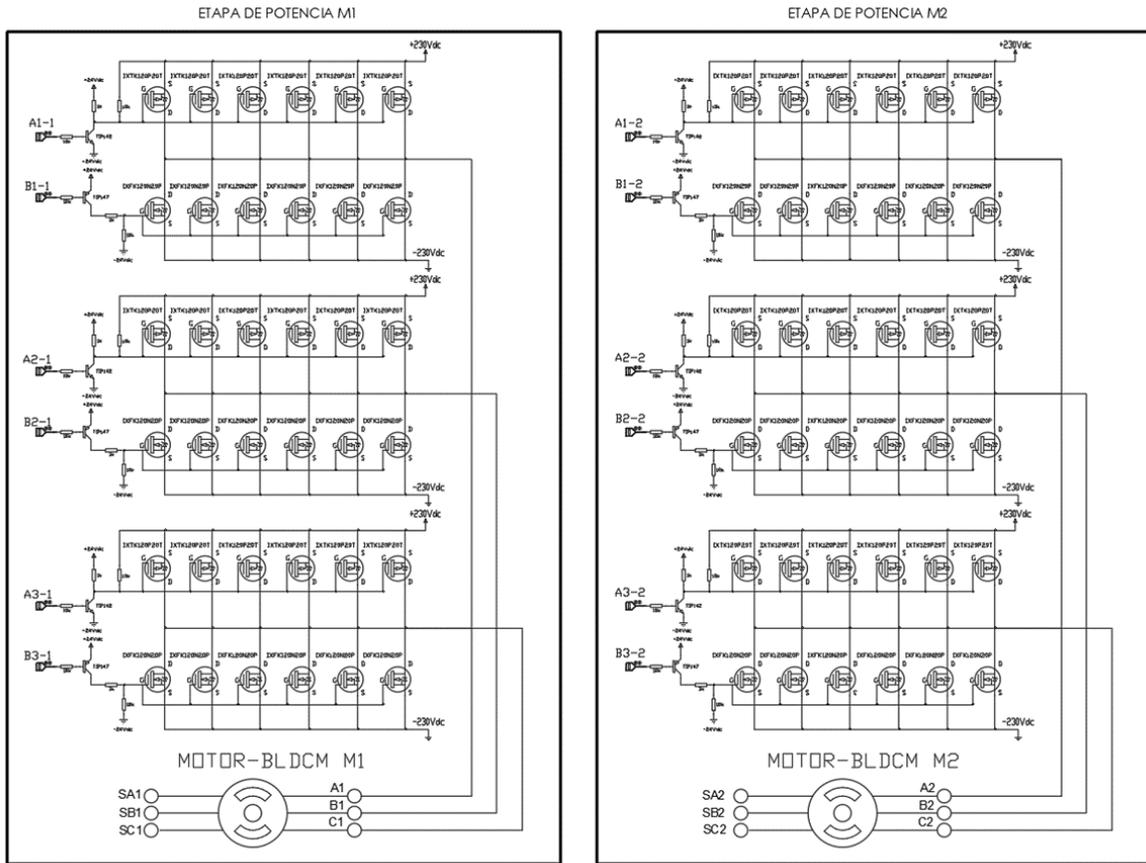


Figura 6. Esquema electrónico de conexión de ambos motores Brushless

Fuente: Elaboración Propia, 2019.

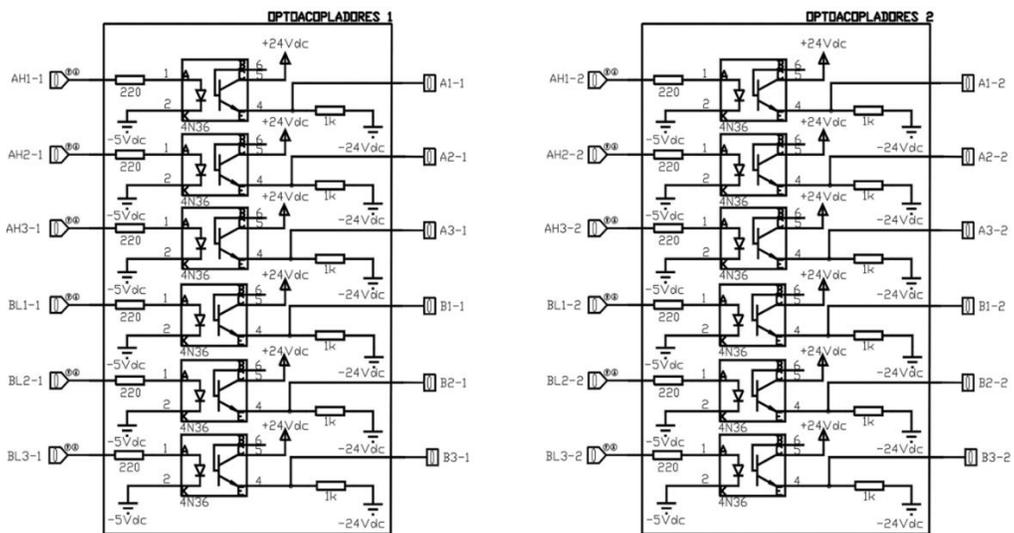


Figura 7. Esquema electrónico de conexión de los optoacopladores

Fuente: Elaboración Propia, 2019.

3.9 Diseño de la Etapa de Control

Según el diagrama de bloques de la Figura 5, se hará uso de tres microcontroladores, un maestro que podrá recibir las señales del sistema de gobierno, aquellas que son comandadas por el conductor, y dos microcontroladores esclavos son los encargados del control específico de cada motor, que enviarán las señales de activación y desactivación a cada puente trifásico inversor de potencia, y además recibir las señales de los sensores de posición de cada motor. La Figura 8 muestra el diagrama electrónico de la etapa de control.

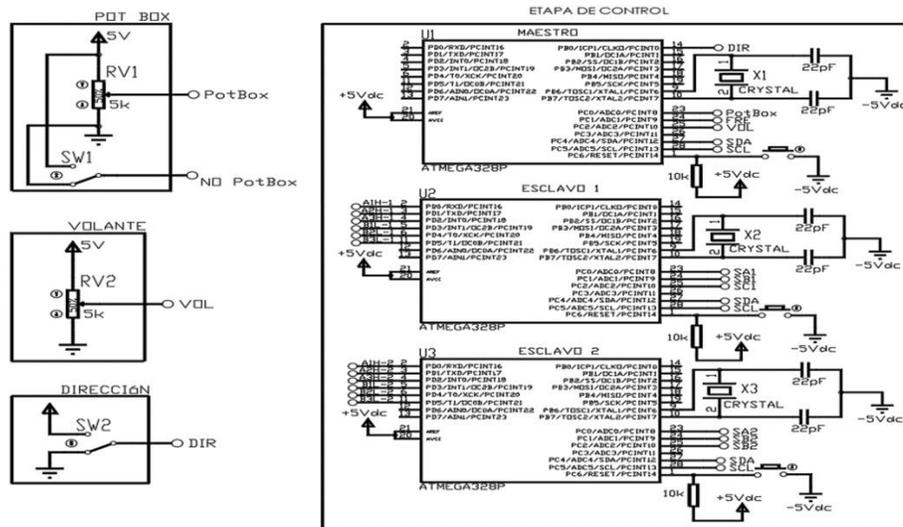


Figura 8. Esquema electrónico de control de los motores Brushless M1 y M2

Fuente: Elaboración Propia, 2019.

3.10 Sistema electrónico diferencial (EDS)

El sistema electrónico diferencial permite el control de los dos motores en rueda del vehículo que, a través del volante, acelerador y marcha pueden proporcionarse ordenes tales como arranque, aceleración, desaceleración, giro, frenado, etc. (Zhang *et al.*, 2017).

Las órdenes se convierten en señal analógica a través de varios sensores de desplazamiento lineal, y luego la señal analógica se transferirá al controlador; por lo tanto, la fuerza de giro en este

vehículo eléctrico proviene de cada motor en la rueda en lugar del motor giratorio como un vehículo tradicional (Zhou *et al.*, 2010).

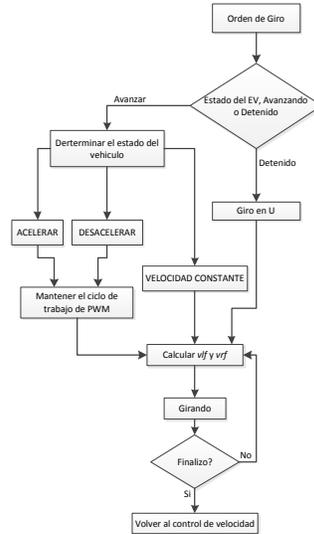


Figura 9. Diagrama de Flujo del Control de Giro

Fuente: Elaboración Propia con base en Zhou et al., (2010), 2019.

El diagrama de flujo de la Figura 9 muestran cómo se realiza la programación y ejecución de las instrucciones para el vehículo, se recomienda reemplazar las medidas del vehículo una vez diseñado para aplicar las ecuaciones de radio de giro.

4. DISCUSIÓN

Se recomienda que el valor de las revoluciones por minuto nominales del motor sea menor y el torque mayor, debido a que la transmisión es directa (Leitman y Brant, 2009), esto ayudaría a reducir la corriente de consumo del motor proporcionando una mejor performance al vehículo eléctrico. Los valores comerciales de motores en rueda en cuanto a velocidad no sobrepasan las 1600 RPM y son capaces de proporcionar un torque nominal de 620 N.m.

Se pudo corroborar la importancia del valor del diámetro de la rueda del vehículo, el cual al ser mayor puede ayudar a reducir la necesidad de torque del vehículo, por lo cual aumentar el tamaño de la rueda incide directamente en la reducción del voltaje necesario para los motores. Se sugiere

aplicar el mismo procedimiento del proyecto para otros diámetros de rueda ya sean mayores o menores.

La configuración del banco de baterías dentro del proyecto está conectada en serie, debido a los altos valores de corriente y voltaje que se maneja, se recomienda no realizar configuraciones en paralelo, en caso de querer aumentar la capacidad de corriente de las baterías, sin previamente no verificar los valores de tolerancia máxima de las baterías y sus conectores.

La instrumentación del banco de baterías es la sugerida por el fabricante, en caso de encontrar instrumentación similar se sugiere realizar pruebas previas y verificar la capacidad de esta en el valor de corriente.

5. CONCLUSIONES

Los parámetros de funcionamiento del vehículo eléctrico fueron definidos a partir de los cálculos en primera instancia del análisis dinámico, en el cual mediante un diagrama de cuerpo libre se realiza la sumatoria de fuerzas que actúan sobre el vehículo en movimiento como la fuerza de resistencia a la rodadura, fuerza de aceleración lineal, fuerza de escalada y la fuerza de resistencia aerodinámica. Calculando así la fuerza de tracción total que es aplicada directamente al eje de la rueda por transmisión directa del motor en rueda, lo cual permitió calcular el esfuerzo de tracción total para diferentes velocidades de 0 a 100 km/h y diferentes grados de inclinación de 0 a 40% y con un aro de rueda de 14 pulgadas, obteniendo de esta manera los rangos de 1103,92 a 468,22 N.m para un vehículo de masa de 1000 kg.

Los rangos de torque son la necesidad del vehículo, por lo tanto, se definió la capacidad de los motores para cumplir con el rango del esfuerzo de tracción por medio de los datos del motor para los tres casos de masas diferentes, obteniendo de esta manera un rango de voltaje y corriente total de ambos motores de 25-205 VDC y 310-676 A para un vehículo de 1000 kg.

El Banco de baterías fue seleccionado según los parámetros de necesidad calculados para el vehículo de 1000 kg, con un máximo de 205 VDC y en el caso de la corriente, que no sobrepase los 500 A debido a los valores de corriente soportados por la instrumentación del banco de baterías.

Además, se consideró la densidad energética y que la masa total del banco de baterías no debe ocupar más del 30% de la masa total del vehículo, 300 kg del total. Finalmente, se determinó que el banco de baterías serán de tipo LiFeMnPO_4 , siendo la seleccionada la más conveniente de los tres grupos de banco de baterías debido al espacio a ocupar, la masa total y la potencia energética. El banco de baterías LiFeMnPO_4 tiene un voltaje nominal de 230 VDC, conformado por 18 baterías de 12,4 VDC, 100 Ah, masa de 232 kg, menor a 300 kg, y una potencia total de 23 kW. La masa solo ocupa un 23,3% de la masa total del vehículo.

El cálculo y selección de protecciones se realizó según la norma boliviana de instalaciones eléctricas NB 777 (IBNORCA, 2007), apartado Dispositivos de Protección, diseñando previamente el diagrama de protección, para ambos motores y los circuitos de potencia correspondientes, según presentado por Cossío (2011).

El diseño del controlador se definió primeramente por las entradas de acelerador, dirección de marcha, volante y freno, que determinan el funcionamiento del vehículo según lo decida el conductor, por lo tanto, se definió los dispositivos de entrada a la etapa de control, compuesta por un maestro y dos esclavos, cada esclavo es determinado para recibir la retroalimentación de cada motor por medio del grupo de 3 sensores *hall*, que luego de un estudio de secuencia define el funcionamiento de la etapa de potencia a través de las señales PWM.

La simulación realizada por medio de Proteus ayudó a definir el funcionamiento del controlador y la activación de la etapa de potencia que se conforma de 36 MOSFET organizados según el modelo de inversor trifásico, con 6 MOSFETS en paralelo para cada bobina.

El sistema de giro del vehículo sigue el modelo de giro Ackermann-Jeantand, los diagramas de programación de giro y aceleración del vehículo con la configuración de tracción frontal por medio de dos motores en rueda sin transmisión mecánica, no se tienen valores finales calculados debido a la falta de los datos de estructura mecánica del vehículo como distancia entre ejes y ancho del vehículo, que ya son externos a este proyecto pero que pueden ser fácilmente incluidos una vez definidos dichos datos.

REFERENCIAS

- Cáceres, J. A. (2018). *Diseño De Un Motor Eléctrico En Rueda Para Vehículos Eléctricos Experimentales*. Proyecto De Grado de Licenciatura En Ingeniería Mecánica Y de Automatización Industrial. Universidad del Valle, Facultad de Tecnología, Bolivia.
- Cossío W. C. C. (2011) *Instalaciones Eléctricas Industriales I*. Libro guía de la asignatura de Instalaciones Electromecánicas. UMSS, Facultad de Ciencias y Tecnología, Cochabamba. Bolivia.
- Electromovilidad (2018). *Tipos de Batería para coche eléctrico* [versión electrónica]. Recuperado el 15 de octubre de 2018 de: <http://electromovilidad.net/tipos-de-bateria-para-coche-electrico/>
- Guirong, Z., Henghai, Z., Houyu, L. (2011). *The driving control of pure electric vehicle*. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 433-438. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.071>
- IBNORCA (2007). NB 777: Diseño y Construcción de Instalaciones Eléctricas Interiores en Baja Tensión. La Paz- Bolivia.
- Larminie, J., Lowry, J. (2012). *Electric Vehicle Technology Explained*. 2^a ed. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Leitman, S., Brant, B. (2009). *Build Your Own Electric Vehicle*. 2^a ed. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Morales-Capora, R., Montiel-Gomez, G., Pérez-López, A., Hernández-Castañeda, K. E., Vázquez-Tonix, F. A., (2016) *Diseño de un inversor trifásico e implementación del control escalar para accionar una máquina de inducción con aplicaciones en vehículos eléctricos*.
- Torres, C. A., Murillo, D., Patiño, C. R. (2008). Diseño y construcción de un inversor trifásico. *Scientia et technica*, 14(40), 37-42.
- Zhou, Y., Li, S., Zhou, X., Fang, Z. (2010, May). The control strategy of electronic differential for EV with four in-wheel motors. In: *2010 Chinese Control and Decision Conference* (pp. 4190-4195). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2010.5498381>

Fuentes de financiamiento: Esta investigación fue financiada con fondos de los autores.

Declaración de conflicto de intereses: Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

Copyright (c) 2021 Brenda Nicole Arnez Mercado. Edson Gaston Montaña Bautista.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)