



**UNIVERSIDAD POPULAR AUTONOMA
DEL ESTADO DE PUEBLA**

**DECANATO DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGIENERIA UPAEP**

**Motor de corriente directa sin escobillas aplicado en vehículos
eléctricos.**

Monografía

para obtener el Título de:

Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica

Presenta:

Pablo Rafael García Gordillo.

Asesor académico:

Dr. Edgar Peralta Sánchez.



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyła**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Agradecimiento

Agradezco a mis padres por el apoyo emocional durante el transcurso de toda la carrera, a mis profesores que compartieron su vasto conocimiento conmigo, además de compartir sus experiencias profesionales y agradezco a mis amigos que estuvieron antes y después de mi carrera universitaria por apoyarme y escucharme en los momentos más frustrantes a lo largo de mis estudios y mi vida personal.



DEDICATORIA

Principal meten este trabajo es dedicado a mi padre José Pablo Garcia López, en la cual con su sudor, sangre y lágrimas me apoyo de manera económica tanto emocional, para finalmente concluir la carrera en ingeniería mecatrónica, en la cual tome la decisión de escoger esta carrera principalmente por enorgullecer a mi padre debido a los tiempos que él se encontraba no pudo concluir su carrera de ingeniería en comunicaciones, en la cual me sentí completamente comprometido en realizar una meta que no pudo realizar y así verse reflejado en mí que lo pudo lograr.

A mi madre Sugey Gordillo Ramírez la cual siempre tuvo fe en mi en superarme en todos los obstáculos que se me presentaban, darme ánimos en esas ocasiones que me sentía derrotado y sin ganas de salir adelante, diciéndome que todo tendrá su recompensa.

A mi novia Diana Ruiz Jacome en la cual cada momento se ha dedicado a darme ánimos en sobre salir en mi carrera a pesar de la distancia que nos encontramos, ella no se ha rendido en animarme entonces yo le respondo cumpliendo mi menta de ser ingeniero.

A todos mis profesores que tuvieron la paciencia y la dedicación de explicarme cada clase que lleve a lo largo de mi carrera, debido a que nunca fui un estudiante sobresaliente pero tampoco fui un estudiante que no le intereso el estudio y desarrollarse intelectualmente, ya que mi carrera me apasiona; cada momento que pase en mi universidad aprecie con asombro a todos mis profesores por la cantidad de información que recopilaron a lo largo de su preparación académica y de su experiencia en el ámbito laboral.

Y finalmente a todos mis amigos que conocí a lo largo de mi preparación académica, tanto en Acapulco, Puebla, Veracruz y el Estado de México; menciono todos esos estados en particular debido a que interactué con muchas personas en esos estados, ya que mis amigos eran los que escuchaban en mis momentos más frustrantes de mi carrera al pensar que no podía avanzar y ellos siempre me sermoneaba mejorando mi estado de ánimo para salir adelante.



Resumen

La presente Monografía nos habla sobre los motores de corriente directa sin escobillas aplicado en los vehículos eléctricos, con el propósito de informar y contribuir por medio de esta investigación sobre este tipo de motor.

Por ello el trabajo se divide en 4 capítulos, el primer capítulo se presentará el modelo dinámico de un vehículo eléctrico donde se tiene como objetivo mostrar las fuerzas dinámicas que interactúan en un vehículo en movimiento, también se hablara de la transmisión y como esta se acopla al motor del vehículo. El segundo capítulo se mostrará un marco teórico sobre los motores de corriente directa sin escobillas, hablando de su estructura, comportamiento, Factor KV, como funcionan y los dos tipos de motores que se conocen. El tercer capítulo el accionamiento de estos motores, que componentes se utilizan para su accionamiento y una explicación de paso a paso del proceso de principio a fin al momento de accionar este tipo de motores. El cuarto capítulo encontraremos las simulaciones, explicando que datos se utilizaron, que software se utilizó, como se desarrolló la programación, la demostración de los resultados de dicha simulación y las conclusiones generales.

Abstract

This Monograph tells us about brushless direct current motors applied in electric vehicles, with the purpose of informing and contributing through this research on this type of motor.

For this reason, the work is divided into 4 chapters, the first chapter will present the dynamic model of an electric vehicle where the objective is to show the dynamic forces that interact in a moving vehicle, the transmission will also be discussed and how it is coupled to the vehicle's engine. The second chapter will show a theoretical framework on brushless direct current motors, talking about their structure, behavior, KV Factor, how they work and the two types of motors that are known. The third chapter is the drive of these motors, which components are used for their drive and a step-by-step explanation of the process from start to finish when driving this type of motor. The fourth chapter we will find the simulations, explaining what data was used, what software was used, how the programming was developed, the demonstration of the results of said simulation and the general conclusions.



Índice

INTRODUCCIÓN.....	7
Objetivos	7
• Objetivo general	7
• Objetivos específicos	7
CAPÍTULO I.....	8
MODELO DINÁMICO DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO	8
1.1 Conceptos básicos para el modelo dinámico del vehículo.....	8
1.2 Transmisión del vehículo	12
1.3 Fuerzas en el vehículo	13
1.3.1 Resistencia de rodadura.....	15
1.3.2 Resistencia Aerodinámica.....	18
1.3.3 Resistencia a la Pendiente.....	20
1.3.4 Ecuación dinámica	20
1.4 Acoplamiento a la transmisión.....	21
1.5 Acoplamiento al motor eléctrico	24
CAPÍTULO II.....	27
MOTOR BRUSHLESS	27
2.1 Estructura del motor brushless:	27
2.2 Comportamiento del motor brushless:.....	28
2.3 Factor KV.....	28
2.4 Cómo funcionan los motores brushless	29
2.5 Tipo de motores Brushless.....	29
2.5.1 Motores Brushless Sensorless.....	29
2.5.2 Motores Brushless sensed	30
CAPÍTULO III.....	31
ACCIONAMIENTO DEL MOTOR BRUSHLESS	31
3.1 ESC (Electronic Speed Controller).....	32
3.1.1 PWM.....	32
3.1.2 Circuito integrado	33
3.1.3 Transistores.....	34
3.2 Inversor	35
3.3 Sensor de efecto hall.....	36



3.4	Señales de un sensor de efecto Hall.....	37
3.5	Motor Brushless en operación.....	38
CAPÍTULO IV		44
SIMULACIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO BASADO EN UN MOTOR BRUSHLESS		44
4.1	Modelo dinámico aplicado en un vehículo Nissan Sentra.....	44
4.2	Motor brushless aplicado en un vehículo Nissan Sentra	50
4.3	Resultados de la simulación.....	51
CONCLUSIONES		58
Conclusión general		58
Conclusiones específicas		58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		59



INTRODUCCIÓN

En la actualidad los autos de combustión interna han afectado a largo plazo el medio ambiente por la emisión de gases, específicamente CO₂, esto afectando a la industria automotriz, creando otras alternativas como la implementación de vehículos eléctrico y como su nombre lo dicen es necesario un motor que rompa la inercia del auto utilizando energía eléctrica. Es en este punto que se menciona el motor de corriente directa sin escobillas, donde a lo largo de esta investigación se le mencionara como motor brushless para una simple mención.

La problemática con la que nos enfrentamos es la poca información de estos motores implementados en vehículos ya existentes, donde nos tenemos que enfrentar a las características físicas y dinámicas del vehículo a utilizar.

El propósito de esta investigación es informar y contribuir a la implementación de estos motores a los vehículos eléctricos, ya que estos tienen unas grandes ventajas como su escaso mantenimiento preventivo y correctivo, además de presentar simulaciones que sirvan como evidencia del comportamiento de estos.

Por los acontecimientos que sufrimos estos años, hablando específicamente por la pandemia, tenemos las limitaciones de tener un trabajo físico, así que los resultados de la investigación se hicieron de manera de una simulación a través de un software que se mencionara a lo largo de la presente monografía.

Objetivos

- **Objetivo general**
 - ✓ Evaluar la viabilidad del motor de corriente directa sin escobillas en tracción eléctrica (motor brushless).
- **Objetivos específicos**
 - ✓ Implementar el modelo dinámico del vehículo.
 - ✓ Acoplar la transmisión mecánica y el motor eléctrico.
 - ✓ Analizar el funcionamiento del motor.
 - ✓ Simular el inversor.
 - ✓ Simular el sistema de tracción basado en parámetros de un vehículo Nissan Sentra.



CAPÍTULO I

MODELO DINÁMICO DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

1.1 Conceptos básicos para el modelo dinámico del vehículo.

Los conceptos que hay que tomar en cuenta son **Energía** y **Potencia** la cual son parte fundamental para el entendimiento dinámico del vehículo, donde las definiciones siguientes son:

Energía: La energía es la capacidad de los cuerpos para realizar un trabajo y producir cambios en ellos mismos o en otros cuerpos. Es decir, el concepto de energía se define como la capacidad de hacer funcionar las cosas. La unidad de medida que utilizamos para cuantificar la energía es el joule (J), en honor al físico inglés James Prescott Joule [2].

$$e = \int_{t_0}^t p(t)dt \quad (1.1)$$

Potencia: es la cantidad de trabajo que se realiza por unidad de tiempo. Puede asociarse a la velocidad de un cambio de energía dentro de un sistema, o al tiempo que demora la concreción de un trabajo. Por lo tanto, es posible afirmar que la potencia resulta igual a la energía total dividida por el tiempo [3].

$$p = \frac{de(t)}{dt} \quad (1.2)$$

Donde el significado de las variables son las siguientes:

e = energía

p = potencia

t = tiempo



Debido a estos primeros conceptos podemos hablar de **Torque o par**: es una magnitud física que mide el momento de fuerza que se ha de aplicar a un eje que gira sobre sí mismo a una determinada velocidad. O lo que es lo mismo, la tendencia de una fuerza para girar un objeto alrededor de un eje, punto de apoyo, o de pivote [4].

Tomamos en cuenta el concepto de Torque o par ya que la mayoría de los motores de vehículos de combustión interna y eléctricos entregan su potencia mecánica a través de un movimiento angular.

Para un mayor entendimiento usaremos la siguiente figura y se mostrara las siguientes ecuaciones:

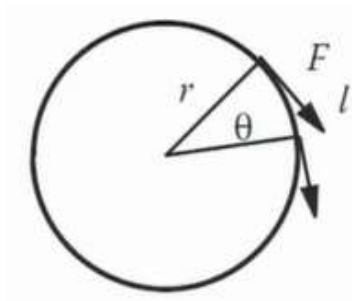


FIGURA 1.1 Par [1].

F = fuerza

r = radio

θ = ángulo

l = longitud

Para movimiento angular tenemos como distancia el arco que se muestra en la FIGURA 1.1 la cual es $r * \theta$ por eso podemos visualizar que esta la letra l de longitud debido que el par de manera lineal es $F * l$, pero estamos tomando en cuenta el movimiento angular lo cual la primera ecuación es:

$$e(t) = F * r * \theta(t) \quad (1.3)$$



El par se puede expresar con la letra T donde $T = F * r$ así que la siguiente ecuación es la siguiente:

$$e(t) = T * \theta(t) \quad (1.4)$$

Donde podemos despejar el par como se mostrará a continuación:

$$T = \frac{e(t)}{\theta(t)} \quad (1.5)$$

Debido a la ecuación anterior podemos ver que la potencia se expresa a continuación:

$$P = \frac{de(t)}{dt} = T \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1.6)$$

La derivada del ángulo con respecto al tiempo ($\frac{d\theta(t)}{dt}$) se conoce en otras palabras como la velocidad mecánica en rad/s (ω_{mech}).

Tomando en cuenta esto podemos deducir que la potencia se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$P = \omega * T \quad (1.7)$$

Donde las unidades de P es Watts (W), ω es (rad/s) y T es (N/m). Donde esta ecuación representa la potencia mecánica desarrollada por una flecha de un motor.

Se tiene que aclarar de qué manera se saca ω :

Primordialmente en un eje de motor o incluso en los neumáticos, tomamos en cuenta que son geometrías circulares, de ese modo tomamos en cuenta que contienen un radio, además que se puede obtener cierta cantidad de revoluciones por minuto (rpm) también conocido por la letra n donde también se puede expresar como $n = 60 * f$ donde f es la frecuencia (Hz), ya que también su valor puede ser en revoluciones por segundo (rps) es ahí que vemos esa relación.



Motor brushless aplicado en vehículos eléctricos

Podemos obtener la distancia que en este caso la distancia en una circunferencia es $d = 2 * \pi * r$, esto es mencionado ya que con estos datos podemos sacar la velocidad (v (km/h)), como sabemos la velocidad es: $v = d/t$

Las ecuaciones que están relacionadas son la siguientes:

$$n = 60 * f \quad (1.8)$$

$$\omega = 2 * \pi * f \quad (1.9)$$

Podemos apreciar que las dos ecuaciones anteriores están relacionadas con la frecuencia donde la primera ecuación es rpm y la otra es rad/s.

Retomando la velocidad sabemos que el t (tiempo) es igual a $1/f$.

Así que la ecuación del tiempo sería la siguiente:

$$t = \frac{1}{f} \quad (1.10)$$

Donde la ecuación 1.9 podemos despejar f :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1.11)$$

Como resultado de la ecuación 1.11 podemos hacer lo siguiente en la ecuación 1.10

$$t = \frac{1}{f} = 1 \frac{1}{\frac{\omega}{2\pi}} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1.12)$$

Gracias a este resultado finalmente podemos encontrar la velocidad:

$$V = \frac{d}{t} = \frac{2\pi r}{\frac{2\pi}{\omega}} = \omega r \quad (1.13)$$



Cabe destacar que también podemos encontrar la velocidad de un vehículo con respecto a n utilizando la ecuación 1.8 y 1.9.

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30} \quad (1.14)$$

Debido a la ecuación 1.14 podemos sacar la velocidad relacionada con n :

$$V = \frac{\pi}{30} nr \quad (1.15)$$

1.2 Transmisión del vehículo

El sistema de transmisión es un conjunto de piezas que transmiten la potencia generada por el motor directamente hacia las ruedas, para que el vehículo pueda desplazarse; dicho de otra manera, es el instrumento encargado de transformar la energía térmica en energía mecánica, para que se produzca el movimiento. Durante este proceso, el par motor se adapta a las necesidades de conducción, determinadas por unas condiciones de marcha que varían en función de la velocidad, del tipo de carretera y de la carga. [5].

Para entrar más en contexto hay que tomar en cuenta los elementos que conforman una transmisión, además de cómo se interrelacionan, ya que, como todo engranaje, estos componentes trabajan en forma conjunta y coordinada. Empezando por el **Clutch**, este se ubica entre la caja de velocidades y el motor, se encarga de acoplar o desacoplar el volante de inercia cada vez que se pisa el pedal, así logrando desconectar la transmisión del motor, logrando un cambio de marcha y un arranque progresivo. Después esta **la caja de cambios o de velocidad**, esta puede variar en ser automática o manual y se encuentra entre el clutch y el eje motriz. Es la que provoca la modificación de la velocidad de giro del propulsor mediante cambios de marcha. Continuando con el **eje de transmisión** este componente tiene la función de transmitir la potencia hacia el diferencial, provocado por el movimiento procedente de la caja de cambios. El **diferencial** se encarga de compatibilizar el movimiento giratorio del eje longitudinal hasta el eje transversal, facilitando el movimiento lineal, es parte



fundamental al tomar curvas, ya que deja que sus ruedas exteriores giren más que las interiores y finalmente los **Palieres** o también conocidos como semiejes de transmisión, estas son unas barras que giran a la misma orientación de las ruedas motrices, y tienen como tarea transmitir hacia estas al movimiento que sale del diferencial.

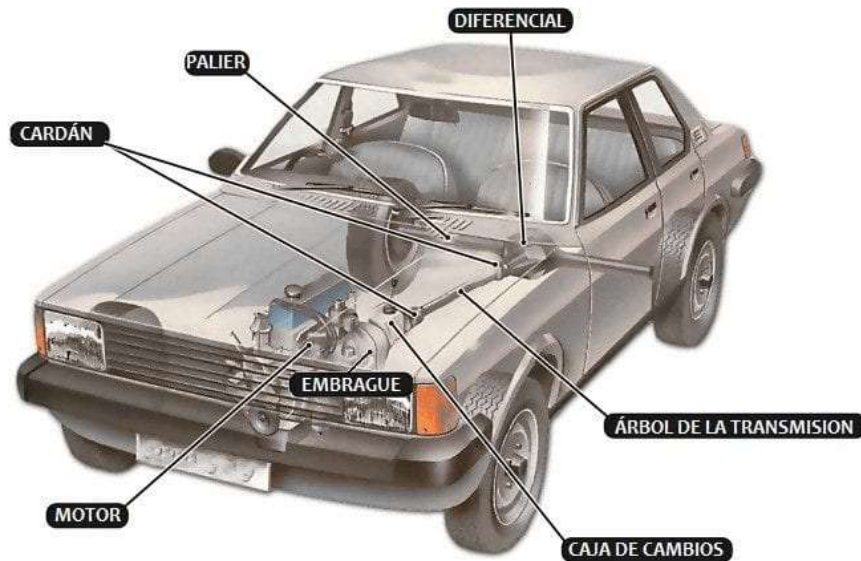


FIGURA 1.2 Partes de una transmisión del vehículo. [6].

1.3 Fuerzas en el vehículo

Normalmente consideramos en un vehículo su movimiento longitudinal, pero para entrar a grandes rasgos en la siguiente figura se mostrará las fuerzas físicas en la cual está sometido el vehículo.

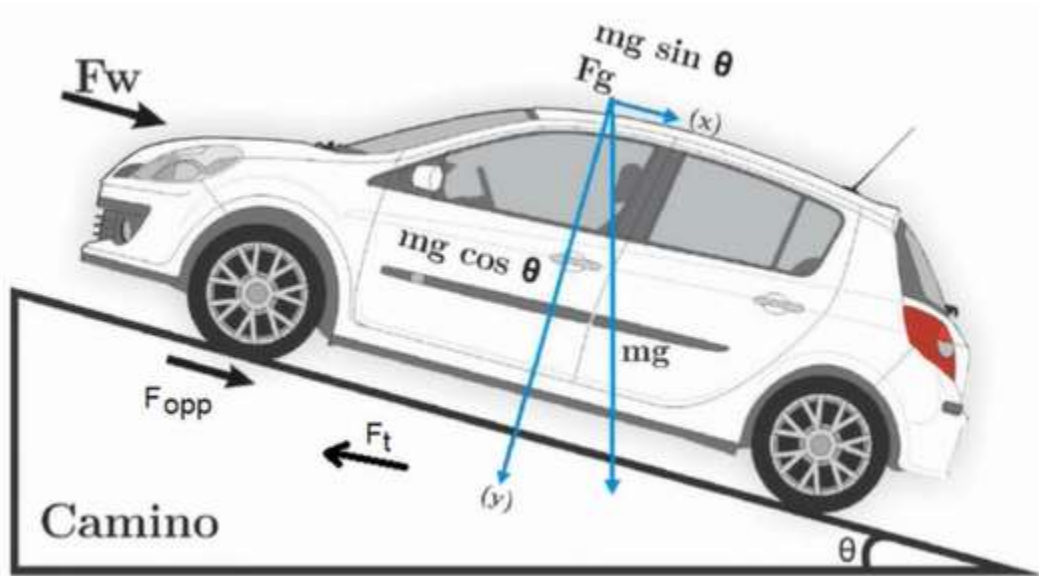


FIGURA 1.3 Vehiculó subiendo una pendiente. [1].

Como apreciamos en la figura 1.3 el vehículo está subiendo por una pendiente, se aprecia diferentes fuerzas a la que está sometido el vehículo, ya que la mayoría están descritas en esta imagen, en la cual se explicara una por una.

Vemos que la única fuerza que el vehículo vaya hacia arriba es F_t (Fuerza total) y por lo tanto se observa que las demás fuerzas se oponen a que el vehículo se mueva.

Principales fuerzas que se opone es F_w la cual esta es la fuerza del viento debido a que el vehículo se mueve atreves del aire, después la fuerza marcada como F_{opp} , esta fuerza se ubicada en todos los neumáticos y se le conoce mejor como fuerza de resistencia a la rodadura, que depende a las características a la cual este fabricado el neumático, tenemos el peso del vehículo donde este marcado como mg (masa por gravedad), la cual está la podemos descomponer en dos componentes, la cual una es perpendicular al plano que se está moviendo el vehiculó ($mg \cos \theta$) y otra que es paralela al movimiento del vehículo ($mg \sin \theta$).

Hay que dejar en claro que el vehículo está sometido a la segunda ley de Newton la cual es la aceleración del vehículo (dv/dt) como podemos ver en la siguiente ecuación:



$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{\Sigma F_t - \Sigma F_{opp}}{m} \quad (1.16)$$

a = aceleración

dv/dt = la derivada de la aceleración

F_t = fuerzas de tracción

F_{opp} = fuerzas que se oponen al movimiento

m = masa del vehículo

1.3.1 Resistencia de rodadura

Esta resistencia es debida al material que este fabricado el neumático donde se presenta un efecto llamado **histéresis**.

Histéresis: es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado [7].

En otras palabras, cuando un material está sometido a una fuerza donde se compresión tiene una posición, pero al momento de descomprimir y ver que la fuerza donde se registró la compresión no está a la misma posición.

Este fenómeno de histéresis es de suma importancia en la resistencia de rodadura ya que el neumático sufre una deformación y una formación al momento de girar.

Se explicará más a detalle con ayuda de la siguiente figura:

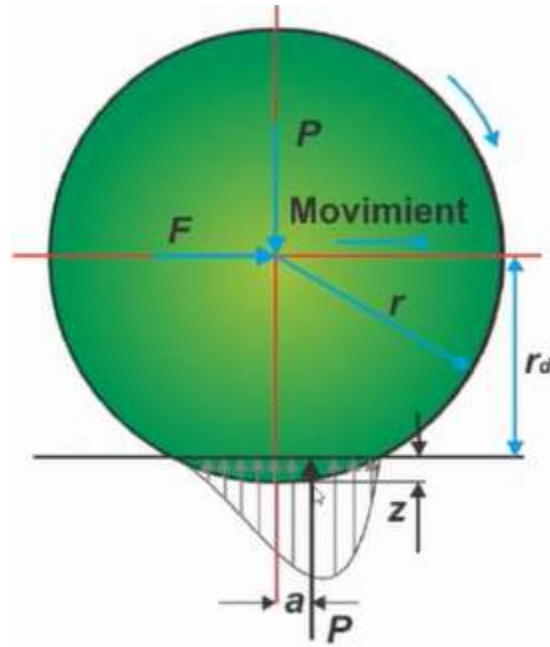


FIGURA 1.4 Resistencia de rodadura [1].

En este caso el neumático está rotando a la derecha y se aprecia que hay una mayor zona de contacto de lado derecho a diferencia del lado izquierdo por lo tanto el eje del peso del vehículo se recorre hacia la derecha debido a que ese lado hay una mayor área de contacto y al recorrerse el peso la cual es una fuerza que responde el piso donde se está generando en un movimiento angular como resultado tenemos un par de arrastre (T_r).

$$Tr = Pa \quad (1.17)$$

Tr = par de arrastre

P = peso

a = distancia que se desplazó p

Ahora ese par se transforma en una fuerza en la cual tiene que lidiar el vehículo donde se explicara más a detalle en la siguiente ecuación:

$$Fr = \frac{Tr}{r_d} = \frac{Pa}{r_d} = Pfr \quad (1.18)$$



Motor brushless aplicado en vehículos eléctricos

F_r = fuerza de resistencia de rodadura

T_r = par de arrastre

r_d = radio efectivo de la rueda

P = peso

a = distancia la que se desplazó P

f_r = coeficiente de resistencia a la rodadura

Hay que aclarar que se toma en cuenta el radio efectivo y no el radio de la rueda original, como observación, nos damos cuenta que al momento de que r_d es más pequeño tenemos una mayor fuerza como resultado.

f_r se crea por una relación con respecto el desplazamiento del punto de apoyo con respecto al peso sobre el radio, donde es muy común obtenerla de diferentes vehículos e incluso de diferentes tipos de caminos donde se crea el coeficiente de resistencia a la rodadura. Como se muestra en la siguiente figura.

Condiciones	Coefficiente de resistencia a la rodadura
Neumáticos en concreto o asfalto	0.013
Neumáticos en grava	0.02
Alquitrán macadán	0.025
Carretera sin pavimentar	0.05
Campo	0.1-0.35
Neumáticos para camiones en concreto o asfalto	0.006-0.01
Ruedas de ferrocarril	0.001-0.002

FIGURA 1.5 tabla de Coeficiente de rodadura [1].

Que pasa con la fuerza de rodadura si está sometida como se muestra en la figura 1.3, para este caso se tiene que sacar la componente del peso del vehículo perpendicular al camino como se muestra en la siguiente ecuación.



$$Fr = fr * m * g * \cos\theta \quad (1.19)$$

1.3.2 Resistencia Aerodinámica

El vehículo cuando viaja a una velocidad (V) encuentra una fuerza de resistencia formada por el aire y esta se divide en 2 componentes las cuales son resistencia por la forma del vehículo y la fricción inducida.

Resistencia por la forma: El movimiento del vehículo crea dos zonas de presión que se oponen a su avance, empujando en contra del movimiento (alta presión en el frente) y tirando de él hacia atrás (baja presión en la parte posterior) como se muestra en la siguiente figura.



FIGURA 1.6 Resistencia por la forma [1].

Fricción inducida: El aire cercano al vehículo se mueve casi a la misma velocidad de este, mientras que el aire que se encuentra aún lejos de él permanece casi inmóvil, como resultado se produce fricción.

Por lo tanto, la fuerza de arrete aerodinámica se expresa a continuación:

$$Fw = \frac{1}{2} \rho * Cd * Af (v \pm vw)^2 \quad (1.20)$$



Motor brushless aplicado en vehículos eléctricos

Donde:

ρ = densidad del aire

C_d = coeficiente de resistencia aerodinámica

A_f = área frontal del vehículo

v = velocidad lineal del vehículo

v_w = velocidad del viento

Si el aire está a favor del movimiento del vehículo v_w tiene signo negativo (-) y si se opone es será signo positivo (+).

Respecto al coeficiente de resistencia aerodinámica va de la mano a la forma del vehículo por lo tanto cambia su valor como se verá a continuación.

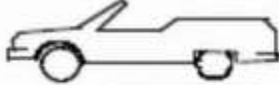

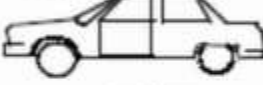




Tipo de Vehículo	Coeficiente de Resistencia Aerodinámica
	0.5-0.7
	0.5-0.7
	0.4-0.55
	0.3-0.4
	0.2-0.25
	0.23
	0.15-0.20

FIGURA 1.6 Tabla de coeficiente de resistencia aerodinámica [1].



1.3.3 Resistencia a la Pendiente

En esta parte es muy simple, ya que es que el mismo peso del vehículo provoca una fuerza que se opone al movimiento del vehículo, en este caso tenemos que utilizar la componente paralela al movimiento del vehículo presentada en la figura 1.3, veremos a continuación como se expresa en una ecuación.

$$F_g = m * g * \sin\theta \quad (1.21)$$

Donde:

F_g = fuerza de resistencia a la pendiente

m = masa

g = gravedad

θ = ángulo de la pendiente

1.3.4 Ecuación dinámica

Anteriormente se ha mencionado a detalle las resistencias a las que está sometida el vehículo al momento de avanzar ya sea linealmente o como se observa en la figura 1.3 en la cual el vehículo está pasando sobre una pendiente, en la cual aún nos falta mencionar la fuerza que se encuentra presente y se opone a su movimiento, esta fuerza no es exclusiva solo de los vehículos, si no que esta afecta a todo cuerpo, la cual esta fuerza se opone al estado de reposo o velocidad constante en la cual se opone al cambio y esta fuerza es debido al fenómeno de **inercia**.

Inercia: Es la resistencia que oponen los cuerpos a modificar su estado de movimiento o de quietud, ya sea para alterar su velocidad, su rumbo o para detenerse; aunque el término también aplica para las modificaciones de su estado físico [9].

Para la fuerza total requerida para que el vehículo pueda entrar en movimiento se muestra a en la siguiente ecuación:

$$F_t = F_r + F_g + F_w + m \frac{dv}{dt} \quad (1.22)$$



Despejando la ecuación 1.22 obtenemos la velocidad:

$$v = \int (F_t - F_r - F_g - F_w) \frac{1}{m} \quad (1.23)$$

F_t = fuerza total

F_r = fuerza de resistencia a la rodadura

F_g = fuerza de resistencia a la pendiente

F_w = fuerza de resistencia aerodinámica

$m \, dv/dt$ = es la fuerza de inercia la cual es masa por aceleración

1.4 Acoplamiento a la transmisión

En este tema se estará mencionando relaciones de transmisión, pero en general manejaremos dos tipos de transmisión las cuales son la de la caja de transmisión (i_g) y la del diferencial (i_o).

El par transmitido desde un motor de CD hasta el eje impulsor de las llantas está relacionado con la siguiente ecuación.

$$T_w = i_g * i_o * n_t * T_p \quad (1.24)$$

Donde:

T_w = par en las llantas

i_o = razón de engranes del impulsor

i_g = razón de engranes de la transmisión

n_t = eficiencia del motor hasta el eje impulsor

T_p = par de salida del motor

El par que llega a las ruedas es igual al par del motor multiplicado por las relaciones de transmisión del motor, podemos ver que se presenta un factor que es la eficiencia de la transmisión, si esta eficiencia es 1, es decir que no hay pérdidas internas, se puede concluir que la energía o potencia que entra es igual a la que sale, esto si fuera en condiciones ideales, pero generalmente la eficiencia es menor que 1.

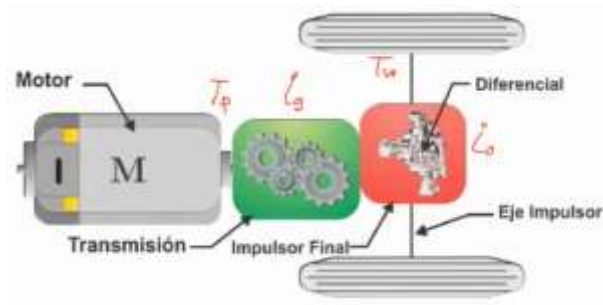


FIGURA 1.7 Acoplamiento a la transmisión [1].

La fuerza de tracción sobre el eje impulsor de las ruedas se relaciona con T_w y el radio efectivo de la rueda r_d como se muestra en la siguiente ecuación.

$$F_t = \frac{T_w}{r_d} \quad (1.25)$$

Sustituyendo la ecuación (1.23) en la (1.24) se obtiene la expresión para la fuerza de tracción en términos del par de la máquina, la relación de engranes y la eficiencia.

$$F_t = \frac{i_g \cdot i_o \cdot n_t \cdot T_p}{r_d} \quad (1.26)$$

Hay que tomar en el momento de tener un incremento en el par, tenemos como resultado una menor velocidad, esto se debe al cumplimiento del principio de conservación de la energía. Entonces la velocidad de rotación del eje impulsor de las llantas N_w dada en rev/min se encuentra a partir de la velocidad mecánica del motor N_p (velocidad del rotor en rad/seg) dada en rev/min y la relación de engranes de la transmisión y el impulsor final:

$$N_w = \frac{N_p}{i_g \cdot i_o} \quad (1.27)$$

Para convertir la velocidad mecánica del eje impulsor de rev/min a velocidad lineal m/s primero se convierte en rad/s:



$$Nw \left(\frac{rad}{s} \right) = Np \left(\frac{rev}{min} \right) * \left[\frac{1m}{60s} \right] * \left[\frac{2\pi}{rev} \right] \quad (1.28)$$

La relación entre la velocidad angular ω (rad/s) y la velocidad lineal v (m/s) de la llanta se encuentra en la siguiente ecuación:

$$\omega \frac{rad}{s} = \frac{v}{r_d} \quad (1.29)$$

Donde ω es la velocidad angular de la rueda y r_d es el radio efectivo de la rueda.

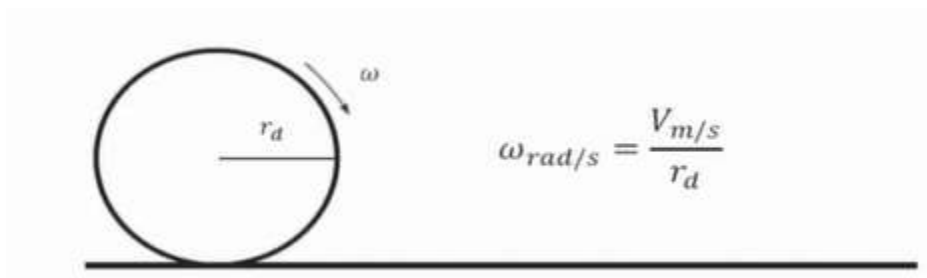


FIGURA 1.8 Ejemplo de la velocidad y radio de la rueda [1]

En la figura 1.8 se observa que la velocidad lineal del vehículo se encuentra con la velocidad angular del eje impulsor de las ruedas. Sustituyendo la velocidad angular de la rueda en la ecuación 1.28 se obtiene la velocidad lineal del vehículo:

$$v = \frac{\pi * Nw * r_d}{30} \quad (1.30)$$

Sustituyendo la ecuación 1.26 en 1.29 se obtiene finalmente la velocidad lineal en m/s del vehículo.

Tomando las ecuaciones 1.19, 1.20, 1.21 y 1.26

$$Fr = fr * m * g * \cos\theta \quad (1.19)$$

$$Fw = \frac{1}{2} \rho * Cd * Af (v \pm vw)^2 \quad (1.20)$$

$$Fg = m * g * \sin\theta \quad (1.21)$$

$$Nw = \frac{Np}{ig * io} \quad (1.27)$$

Y sustituyendo en la ecuación 1.23



$$v = \int (F_t - F_r - F_g - F_w) \frac{1}{m} \quad (1.23)$$

Llegamos a la ecuación que describe la dinámica del vehículo

$$v = \int \left[\left(\frac{ig \cdot in \cdot nt \cdot Tp}{rd} \right) - (mg(fr \cdot \cos\theta + \sin\theta)) - \left(\frac{p \cdot Cd \cdot Af(v-vw)^2}{2} \right) \right] * \frac{1}{m} \quad (1.31)$$

1.5 Acoplamiento al motor eléctrico

En esta parte se habla del elemento que le da la posibilidad de romper el momento de inercia del vehículo. Con anterioridad se habló de la transmisión del vehículo, esto es importante ya que la parte del clutch se encarga de unir el eje del motor con el eje de la transmisión para el cambio de velocidad.

Para esta unión necesitamos algún tipo de acoplamiento, ya que sus respectivos ejes son distintos estriados o son cilindros planos con una muesca. Pueden conectarse directamente los acoplamientos o se puede usar el embrague original si el objetivo es la conversión de un vehículo de combustión a eléctrico.



FIGURA 1.9 Ejemplo de acoplamiento [19].

Después de tener el acoplamiento también se toma en cuenta lo que es la placa base que esta se monta en el motor, de tal manera que el volante de inercia se mantenga en la misma posición con relación a la caja de cambios, por lo general esta placa es mandada hacer por



Motor brushless aplicado en vehículos eléctricos

un tornero basándose en la tornillería del motor eléctrico y también la tornillería que esta se tiene que acoplar a la transmisión.



FIGURA 1.10 Placa base acoplada al motor eléctrico [19].

Ya que se tiene el volante de inercia montado al motor, se puede ensamblar el embrague al volante de inercia, donde se requiere una instalación básica de un clutch, como se fuera de cualquier vehículo de combustión, ya que esto es una mera instalación mecánica.



FIGURA 1.11 Clutch acoplado al volante de inercia [19].



Motor brushless aplicado en vehículos eléctricos

Como resultado, se obtiene el ensamblado del motor a la caja de cambios del vehículo como se muestra en la siguiente figura.



FIGURA 1.12 Ensamble final de un motor eléctrico a la transmisión [19].

Se observa que el motor este acoplado al vehículo donde se le creó una base que va acoplada a la carrocería evitando el movimiento, ya que se retiró varios componentes del motor de combustión interna, tenemos como beneficio menor peso y mayor eficiencia al hacer este tipo de conversión.



CAPÍTULO II

MOTOR BRUSHLESS

Un motor brushless es un motor que no utiliza escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor.

Los motores eléctricos solían tener un colector de delgas o un par de anillos rozantes. Estos sistemas producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, desprenden calor y ruido, requieren mucho mantenimiento y pueden producir partículas de carbón que manchan el motor de un polvo que, además, puede ser conductor.

Los primeros motores sin escobillas fueron los motores de corriente alterna asíncronos. Hoy en día, gracias a la electrónica, se muestran muy ventajosos, ya que son más baratos de fabricar, pesan menos y requieren menos mantenimiento, pero su control es mucho más complejo. Esta complejidad prácticamente se ha eliminado con los controladores electrónicos de velocidad ESC (Por sus siglas en inglés). [10].

2.1 Estructura del motor brushless:

Estos motores están compuestos por una parte móvil que es conocido como rotor, donde se encuentran los imanes permanentes además contiene una parte fija denominada estator o carcasa, sobre la cual van dispuestos los bobinados de hilo conductor, que por lo general son de cobre como podemos ver en la siguiente figura.

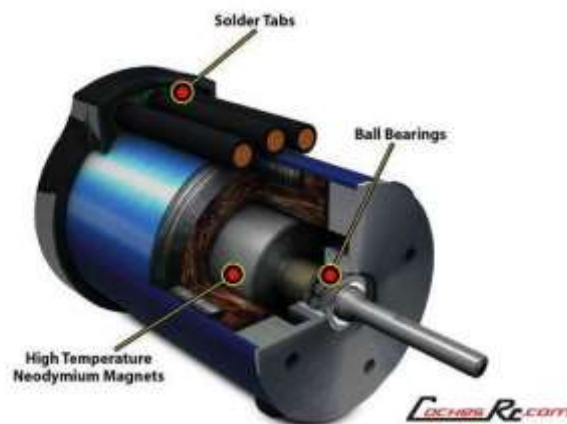


FIGURA 2.1 Motor brushless [10].



2.2 Comportamiento del motor brushless:

Como su nombre lo indica, brushless quiere decir “sin escobillas. En este tipo de motor la corriente eléctrica pasa directamente por los bobinados del estator o carcasa, por lo que no son necesarias las escobillas, ni el colector que se utiliza en los motores con escobilla o también conocido brushed. La corriente eléctrica que pasa por el motor genera un campo electromagnético que interactúa con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor, como resultado se obtiene una fuerza que provoca el giro del rotor la cual es el eje del motor.

No tiene escobillas, colector y delgas; por lo que ahora el elemento que controla el giro del rotor, ya sea su posición es el variador electrónico; básicamente es ver que posición se encuentra el rotor, para que la corriente sea la adecuada para provocar el movimiento de rotación que le corresponde. El variador es capaz de hacer esta función, gracias a unos sensores integrados en el motor. Por lo cual estos variadores empleados en este tipo de motor son más complicados a comparación de los motores brushed, ya que analizan la respuesta y los datos de funcionamiento del motor en tiempo real.

2.3 Factor KV

Este factor es un parámetro muy importante al momento de hablar de los motores brushless. Por lo general aparece junto al número de vueltas de bobinado del motor, la cual nos indica el número de revoluciones por minuto a la que es capaz de girar el motor por cada Voltio de electricidad por la cual es aplicada.

Esto decir, si tenemos un motor brushless de 3000kV, y aplicamos a sus bornes 10 voltios, tenemos una velocidad de 30000 rpm. Hay que tomar en cuenta que este motor también tiene algunas desventajas ya que, a mayor kV, mayor velocidad, pero menor valor de par y viceversa.



2.4 Cómo funcionan los motores brushless

Como se ha mencionado anteriormente estos motores no contienen escobillas, por lo tanto, no hay ningún elemento que provoque rozamiento entre el rotor y la carcasa del motor.

Para lograr que el motor gire, necesitamos que el bobinado sea capaz de generar un campo magnético que sea perpendicular a la dirección del campo magnético de los imanes permanentes, ya que es en estas condiciones cuando el par generado es máximo, ya que se busca que este par tenga un valor máximo en todo momento.

Hay que tomar en cuenta que una vez que el rotor inicie su movimiento de giro, la dirección del rotor es variable en cada instante, y por lo tanto en cada momento, tenemos que conocer en qué posición se encuentra el rotor, para poder excitar las bobinas correspondientes y así conseguir ese par máximo en ese instante determinado.

Para conocer la posición del rotor en cada momento se pueden utilizar dos procedimientos, dependiendo de cual se utilice, el motor será sensored o sensorless. Donde los motores Sensored cuentan con varios sensores que determinan la posición mediante un algoritmo de control. En el caso de los motores Sensorless no se cuentan con sensores, de firma que la posición se determina realizando cálculos sobre el comportamiento que se observa en la corriente inducida en el motor.

2.5 Tipo de motores Brushless

2.5.1 Motores Brushless Sensorless

Este tipo de motores no contiene sensores, por lo tanto, el variador es menos complicado y debe servirse de otro método para determinar la posición del rotor. Para ello los variadores asociados a estos motores realizan una monitorización de impulsos o señales que son enviadas al motor; por esto tiene como inconveniente, que el motor gira a velocidades más bajas en las cuales la intensidad generada por el campo magnético tiene un valor inferior la cual puede resultar ser difícil al analizar esto con exactitud.



2.5.2 Motores Brushless sensored

En este tipo de motor como se mencionó anterior mente cuenta con sensores que determinan la posición durante el giro del rotor, incluso a bajas velocidades, la cual permite conocer el momento más idóneo para aplicar el valor de tensión adecuado en la bobina adecuada. Para lograr esto, el motor debe ir asociado a un variador electrónico, que se conecta al motor mediante el cableado necesario para enviar los niveles de tensión, más otro conector que es el que permite recibir la información acerca de la posición del rotor (que también es una señal de tensión), y en base a la cual realiza sus ajustes y modifica sus señales de salida en cada bobinado.



CAPÍTULO III

ACCIONAMIENTO DEL MOTOR BRUSHLESS

Para el accionamiento de estos motores, llevan conectados ciertos componentes que se explicaran a lo largo del capítulo.

Principalmente el componente que utilizamos para romper la inercia en un vehículo es el pedal, siendo más específicos el acelerador, está ubicado debajo del volante con la cual controlamos la dirección del vehículo, a su vez tiene contacto con los pies del conductor.



Coche Manual - Coche Automático

FIGURA 3.1 Pedales de un auto manual y automático [12].

El acelerador en los vehículos eléctricos es un accionador que mandara una señal mecánica transformándose en señal eléctrica para así pasar corriente hacia el motor brushless y lograr mover el vehículo.

Estos motores por lo general son trifásicos, por lo que en su base se encuentran tres cables con **conexión estrella** para controlar el motor y en su base se cuenta con **sensores de efecto hall**, este ayuda a determinar la posición del rotor. En algunos motores no traen sensores por lo que se pueden encontrar en los controladores electrónicos de velocidad **ESC** (por sus siglas en inglés). En el estator este compuesto por 12 bobinas, embobinados de forma intercalada, esto a su vez están separados en 3 grupos de electro imanes, dicho en otra forma, son 3 electro



imanes armados de tal forma que se arman 4 bobinas por cada electroimán teniendo un total de 12 bobinas.



FIGURA 3.2 Ejemplo de embobinado de un motor brushless [17]

Después en la carrasca se puede encontrar 14 imanes colocados estratégicamente intercalando su polaridad teniendo un orden positivo, negativo y así sucesivamente.

3.1 ESC (Electronic Speed Controller)

Es el dispositivo electrónico capaz de controlar el motor brushless permitiendo hacer el intercambio de conexiones o polaridades en los embobinados. Se controla por medio de pulsos o **PWM**.

3.1.1 PWM

PWM son las siglas de Pulse Width Modulation (Modulación por ancho de pulso). Para transmitir una señal, ya sea analógica o digital, se debe modular para que sea transmitida sin perder potencia o sufrir distorsión por interferencias.

PWM es una técnica que se usa para transmitir señales analógicas cuya señal portadora será digital. En esta técnica se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal o una cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. [13].

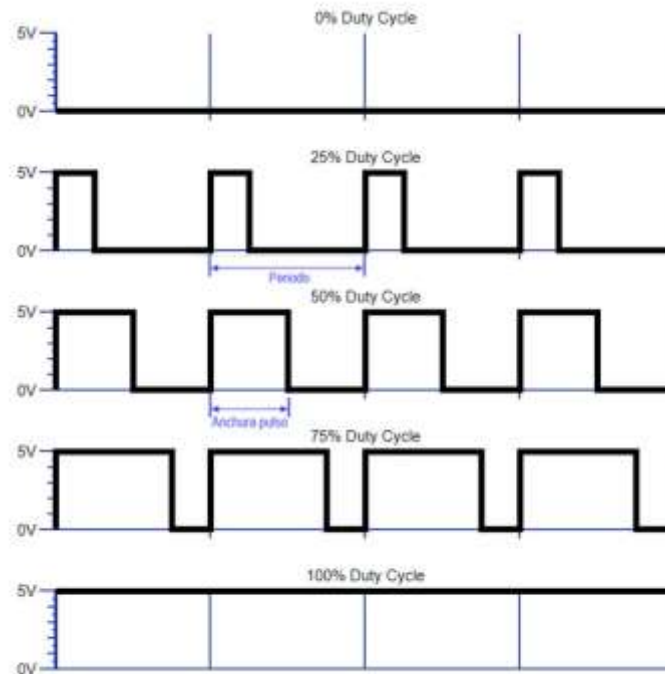


FIGURA 3.1.1 Señales PWM [13].

El ESC cuenta con una serie de componentes electrónicos que en conjunto son capaces de hacer los movimientos necesarios para hacer funcionar el motor. Dependiendo del motor y de la potencia del mismo se pueden utilizar distintos tipos de controladores. Los más comunes y comerciales son los de **circuitos integrados** que puede hacerlo funcionar con una potencia baja, pero con una facilidad de instalación y funcionamiento.

3.1.2 Circuito integrado

Un circuito integrado (CI), también conocido como chip o microchip, es una estructura de pequeñas dimensiones de material semiconductor, normalmente silicio, de algunos milímetros cuadrados de superficie (área), sobre la que se fabrican circuitos electrónicos generalmente mediante fotolitografía y que está protegida dentro de un encapsulado plástico o de cerámica. El encapsulado posee conductores metálicos apropiados para hacer conexión entre el circuito integrado y un circuito impreso. [14].



FIGURA 3.1.2 Circuito integrado [14].

Básicamente están compuestos por transistores encargados de la etapa de potencia y a su vez sirven como interruptores de dos vías que permiten alternar la polaridad. La otra parte importante es la de los Half-Bridge Drivers que son los que reciben las respuestas de los pulsos para hacer el cambio de polaridad en los **transistores**. La parte más importante en este tipo de controladores es la del controlador, ya que sin esta parte sería imposible hacer el movimiento del motor, no se puede hacer solamente mecánicamente, necesita una manipulación electrónica.

3.1.3 Transistores

El transistor es un dispositivo electrónico semiconductor utilizado para entregar una señal de salida en respuesta a una señal de entrada. Cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador. El término transistor es la contracción en inglés de transfer resistor (resistor de transferencia). [15].

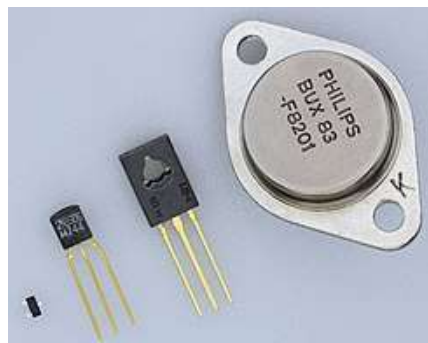


FIGURA 3.1.3 Diferentes transistores [15].



3.2 Inversor

Los inversores, o convertidores CC-CA, son un circuito utilizado para convertir corriente continua en corriente alterna. Un inversor tiene como función la de cambiar un voltaje CC de entrada en un voltaje CA simétrico a la salida, procurando que este posea la magnitud y frecuencia deseada por el usuario.

En un inversor trifásico el objetivo del empleo de la modulación de ancho de pulso es modelar y controlar la tensión trifásica de salida en magnitud y frecuencia a partir de una tensión de entrada VD constante. Una única onda triangular se compara con tres tensiones de control senoidales desfasadas entre sí 120°, para conseguir a la salida un sistema de tensiones trifásico equilibrado empleando la conmutación PWM. Efecto del tiempo muerto en inversores PWM trifásicos. Para inversores PWM trifásicos, las formas de onda de los valores medios instantáneos de las tensiones compuestas $V_{AB}(t)$, $V_{BC}(t)$ y $V_{CA}(t)$ consisten, en el caso de interruptores ideales, en senoidales puras desfasadas 120°. En cambio, si los interruptores no son ideales, el tiempo muerto provoca que $V_{AB}(t)$, $V_{BC}(t)$ y $V_{CA}(t)$ sufran una distorsión cuando las intensidades $i_{AB}(t)$, $i_{BC}(t)$ e $i_{CA}(t)$ pasen por cero.

De esta forma, aparecen armónicos de baja frecuencia de orden: $6k \pm 1$ ($k=1, 2, 3\dots$) de la frecuencia fundamental, esto es, armónicos impares excepto aquellos múltiplos de tres[20].

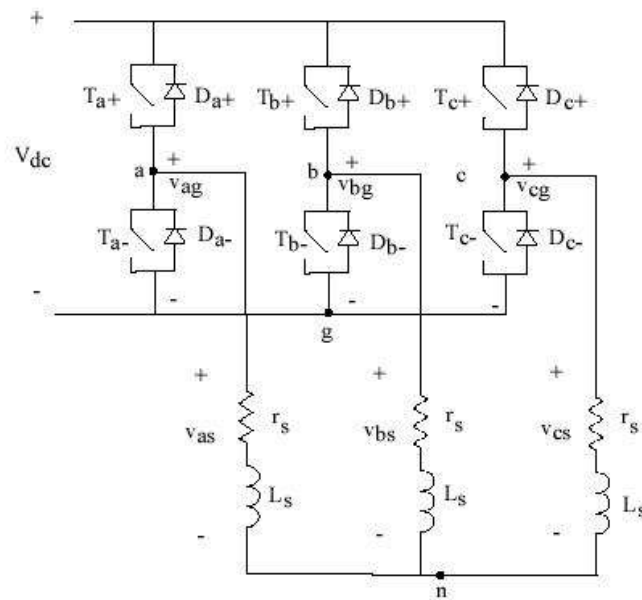


FIGURA 3.2 Inversor [20].

3.3 Sensor de efecto hall

El sensor de efecto Hall o simplemente sensor Hall o sonda Hall (denominado según Edwin Herbert Hall) se sirve del efecto Hall para la medición de campos magnéticos o corrientes o para la determinación de la posición en la que está.

Si fluye corriente por un sensor Hall y se aproxima a un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, entonces el sensor crea un voltaje saliente proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente. Si se conoce el valor de la corriente, entonces se puede calcular la fuerza del campo magnético; si se crea el campo magnético por medio de corriente que circula por una bobina o un conductor, entonces se puede medir el valor de la corriente en el conductor o bobina.

Si tanto la fuerza del campo magnético como la corriente son conocidos, entonces se puede usar el sensor Hall como detector de metales. [16].



FIGURA 3.3 Ejemplo de sensor efecto Hall en motor brushless [16].

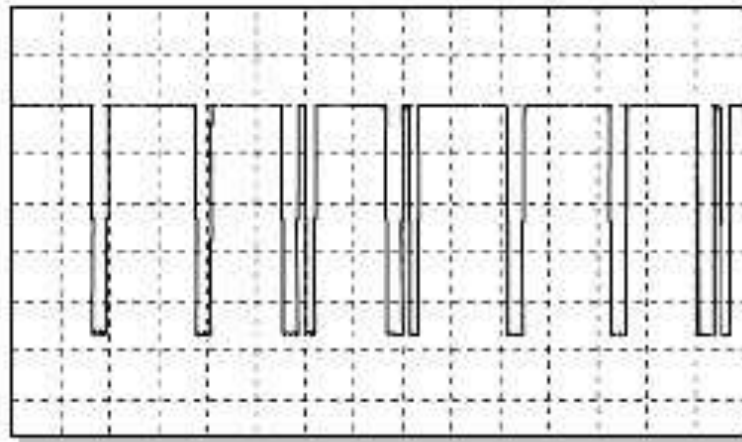
3.4 Señales de un sensor de efecto Hall

La señal de salida del sensor Hall varía según el valor sinusoidal del ángulo entre la superficie del sensor y el vector de intensidad del campo magnético resultante. La señal máxima se alcanza cuando las líneas del campo magnético son perpendiculares a la superficie del sensor y la mínima cuando son paralelas a ella.

La señal de onda cuadrada puede variar en amplitud cuando se observa en un osciloscopio, pero esto no suele considerarse un problema, ya que lo que importa es la frecuencia y no el nivel de voltaje.

Cuando un campo magnético pasa a través de una de las ventanas, detiene el flujo de corriente a través del semiconductor. Cuando la ventana se cierra, el flujo se reanuda. Esta acción produce una onda cuadrada digital que es entendida por el ECM o el amplificador sin necesidad de circuitos adicionales para convertir la señal analógica en digital (los amplificadores de captación magnética permanente utilizan un disparador Schmitt, mientras que otros tipos utilizan un convertidor analógico-digital o A-D).

La onda cuadrada varía en amplitud cuando se observa en un osciloscopio, pero esto no suele considerarse un problema, ya que lo importante es la frecuencia y no el nivel de voltaje. La salida también puede medirse con un multímetro que contiene una función de frecuencia. [21].



Señal de sensor de efecto HALL

FIGURA 3.4 señal del HALL [21].

3.5 Motor Brushless en operación

Para comprender como funciona este motor se explicará con una serie de imágenes

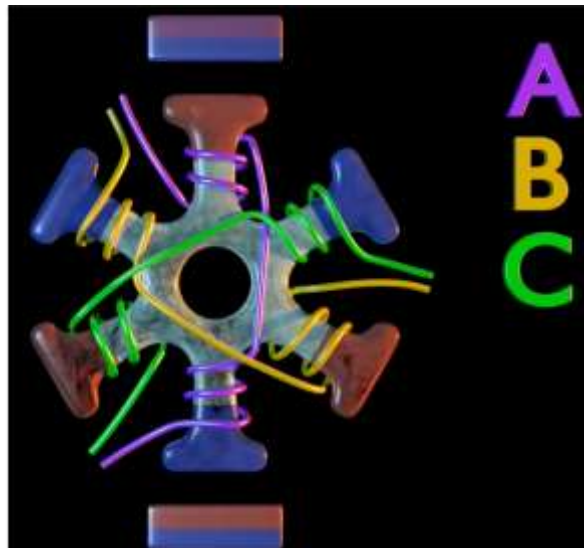


FIGURA 3.5.1 explicación de función [17].



Motor brushless aplicado en vehículos eléctricos

En esta imagen se muestra que se reduce el número de bobinas e imanes, donde hay 2 imanes en la parte inferior y superior, logramos ver que tenemos 6 bobinas para el rotor, aun así, seguiría teniendo 3 electroimanes.

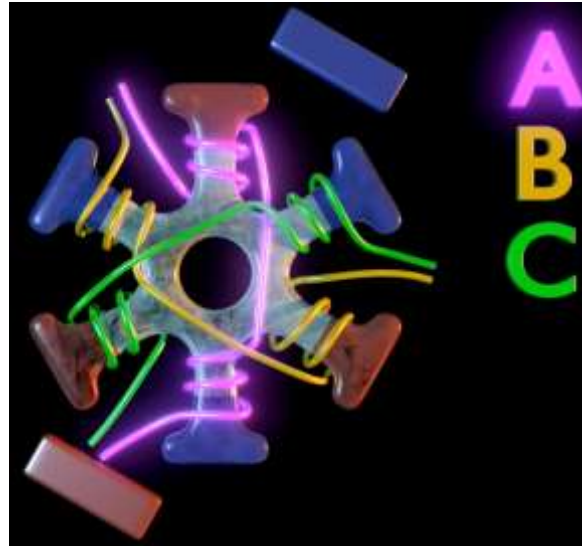


FIGURA 3.5.2 explicación de 6 bobinas con 2 imanes [17].

Cuando esta activado A atrae a los imanes a dicha bobina, después se activa B pero con los polos intercalados para atraer los imanes hacia él, siempre que se activa un electroimán, dejamos el resto apagado, cuando se activa C los imanes son atraídos a dicho electroimán, después se activa A nuevamente pero con la polaridad invertida, se activa B normalmente para atraer dichos imanes y finalmente para completar esta vuelta, se activa C con la polaridad invertida atrayendo los imanes, así como resultado dando una vuelta completa en 6 pasos, esto se repite una y otra vez a velocidades muy altas para que el motor funcione.

Teniendo este concepto claro podemos entrar a explicar a la formación de 12 bobinas en un motor brushless, donde también apreciaremos el embobinado.

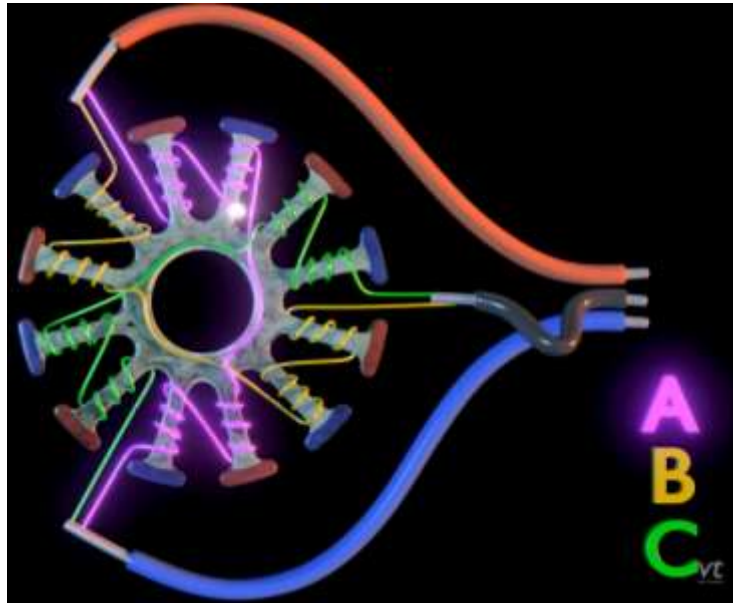


FIGURA 3.5.3 explicación de 12 bobinas en conexión triangulo o delta [17].

En las 3 salidas de dos cables, cada una van conectadas a los 3 cables del motor, gracias a esta forma de conexión al aplicar flujo de corriente eléctrica a dos cables de los 3, podemos activar cualquiera de los 3 electroimanes y así escoger que electroimán activar dependiendo que cables se están usando en ese momento, claro que si también queremos invertir las polaridades, basta con invertir la alimentación de la misma, a esta forma de conexión que se mencionó anterior mente es conocido como triangulo o delta, esta es más usada por este tipo de motores, ya que puede alcanzar velocidades muy altas pero tiene como consecuencia un menor torque.

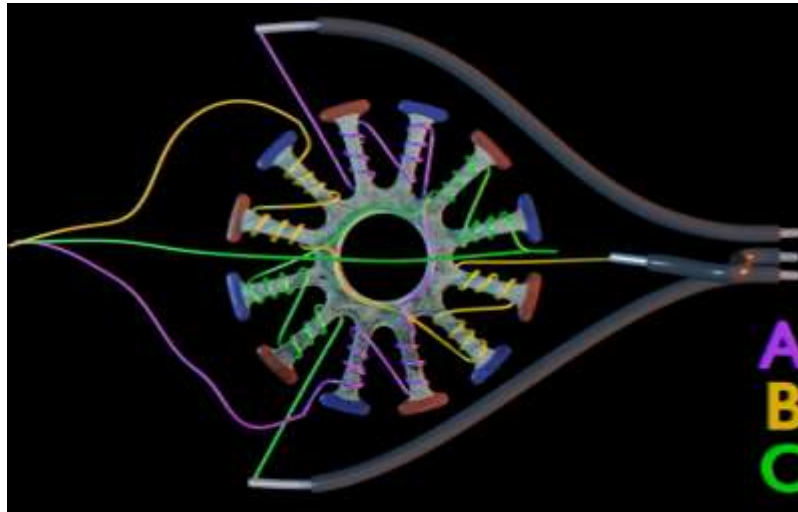


FIGURA 3.5.4 explicación de 12 bobinas en conexión estrella o gama [17].

En esta forma de conexión mejora el torque, pero como resultado negativo es más lenta, si se le aplica flujo de corriente eléctrica, se activan 2 de las 3 bobinas, con esto se aumenta el torque, gracias a esto el voltaje aplicado se reduce y esto hace que la velocidad también se reduzca.

Como lo observamos en las dos formas de conexión tanto triangulo y estrella, podemos concluir que siempre que aplicamos un flujo de corriente eléctrica, un cable de los 3 siempre se queda sin uso, el motor usa ese cable sobrante para el sensor de efecto Hall la cual tiene como función verificar que el ciclo de giro allá sido completado, en otras palabras, que un electroimán allá atraído a cierto imán a su respectiva posición.

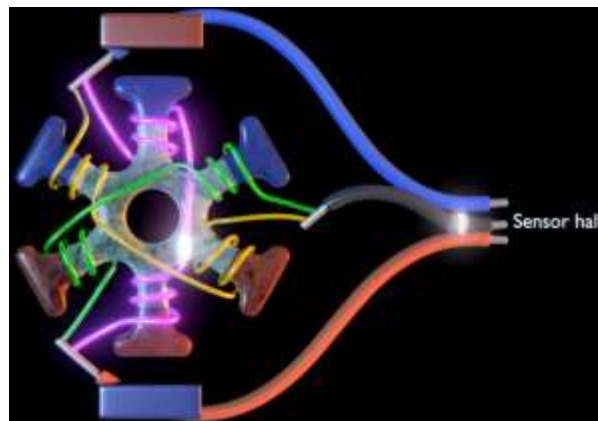


FIGURA 3.5.5 explicación del sensor efecto hall [17].



Motor brushless aplicado en vehículos eléctricos

Logramos apreciar que, al momento de pasar el flujo de corriente por los 2 cables, los imanes se mueven hacia la posición del electroimán activado, donde el sensor de efecto hall detecta cuando el imán ha llegado a la posición del electroimán, finalizando el primer giro el sensor de efecto hall informa que ya se puede dar el siguiente. Con esta información se puede lograr que se active el siguiente imán atrayendo así el imán a la nueva posición del electroimán activado y nuevamente el cable que se queda sin usar es usado por el sensor de efecto hall para corroborar que este movimiento se allá completado, gracias a esto activamos los cables para el siguiente movimiento, donde nuevamente se hace el giro y el sensor de efecto hall informa, para activar los siguientes cables y así sucesivamente.

Existen motores que usan ambas formas tanto estrella como triangulo, esto resuelve el tema de menor torque iniciando con la formación estrella y pasando con la formación triangulo después.

Para poder utilizar un motor brushless necesitamos un controlador variador o ESC, existen de todo tipo, pero básicamente para usar un determinado motor con determinado voltaje y amperaje, necesitamos un ESC que iguale o preferentemente que supere dicho voltaje y amperaje.

El ESC se puede controlar a través de PWM y para eso tiene los 3 cables que se muestran en la siguiente figura.

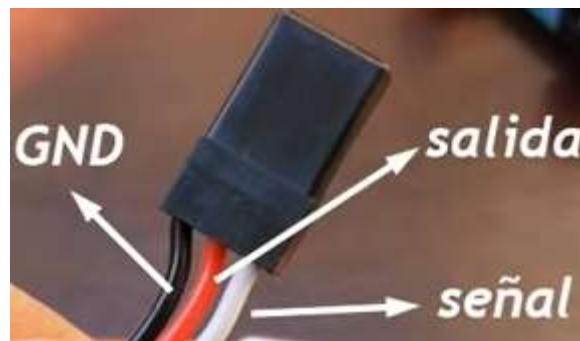


FIGURA 3.5.6 Explicación del ESC [18].



Motor brushless aplicado en vehículos eléctricos

El cable negro es GND que es tierra (por sus siglas en ingles), el cable blanco es la señal donde se conecta con él PWM del microcontrolador a utilizar y el rojo es la salida la cual puede servir para alimentar otros componentes.

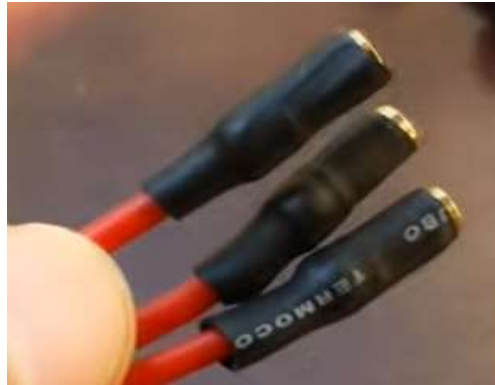


FIGURA 3.5.7 Cables que van conectados al motor brushless [18].

Por el otro lado de ESC encontramos 3 cables como se muestran en la figura 3.8, donde los cables que están en medio tanto del ESC como el del motor brushless siempre van conectados y los 2 cables que restan que están a los costados pueden intercarse, la posición que estén conectados estos cables controla la dirección en la que girara el motor.



CAPÍTULO IV

SIMULACIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO BASADO EN UN MOTOR BRUSHLESS

4.1 Modelo dinámico aplicado en un vehículo Nissan Sentra

En esta parte utilizamos las especificaciones de un Nissan Sentra Sedán 1.6L, para poder ver el comportamiento de nuestro motor brushless aplicado a este vehículo.

ESPECIFICACIONES		
MODELO	Nissan Sentra Sedán 1.6L (1600cc.) GXE	
DIMENSIONES Y PESOS	Largo Total	mm (pulg.) 4320 (170)
	Ancho Total	mm (pulg.) 1692 (66.6)
	Altura Total	mm (pulg.) 1385 (54,5)
	Distancia entre ejes	mm (pulg.) 2535 (99,8)
	Altura mínima al piso	mm (pulg.) 147 (5,8)
	Peso del vehículo	Kg. (Lb) 1200 (2640)
	Capacidad de pasajeros	personas 5
	Neumáticos	175/70R13
	Ruedas 5J X 13	Aluminio
	Tipo de Caja de Cambios	Manual/5Vel.
MOTOR	Tipo	4Cil. en línea.
	Diámetro X Carrera	mm (pulg.) 76X88(2.99X3.46)
	Cilindrada	cc.(pulg. cu) 1597 (97,4)
	Potencia máxima	HP/rpm 110/6000
	Par motor máximo	Kg.m/rpm 15/2400
	Relación de compresion	9,5 a 1
CAJA DE CAMBIOS	1ª	3,333
	2ª	1,955
	3ª	1,286
	4ª	0,926
	5ª	0,733
	Retro	3,417
GRUPO CONICO	4,167	

FIGURA 4.1.1 especificaciones [1].

En la figura 4.1.1 podemos apreciar una gran cantidad de datos del vehículo ya mencionado, la cual nos ayudara a poner los siguientes parámetros para comenzar con la programación de la dinámica del vehículo.

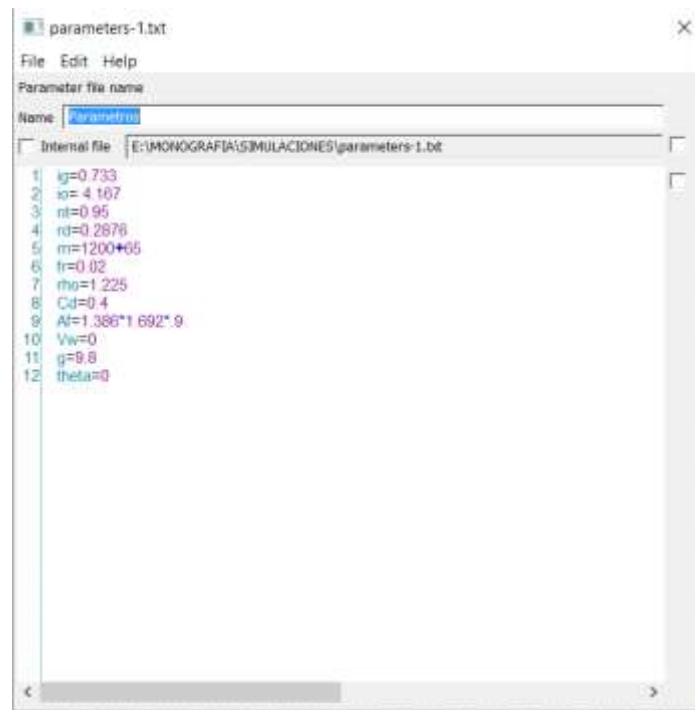


FIGURA 4.1.2 parámetros (fuente propia).

En el software de PSIM utilizamos un apartado que se llama parameters file, donde se colocó estos datos. Donde i_g es la razón de engranes de la transmisión, i_o es la razón de engranes del impulsor, n_t es la eficiencia del motor hasta el eje impulsor, f_r es el coeficiente de resistencia a la rodadura, ρ es la densidad del aire, C_d es el coeficiente de resistencia aerodinámica, A_f es el área frontal del vehículo, V_w es la velocidad del viento, g es la gravedad y θ es el ángulo de inclinación del camino en la cual se desplaza el vehículo.

Ya que tenemos los parámetros, se creó una programación de la dinámica del vehículo, que se explicara paso a paso.

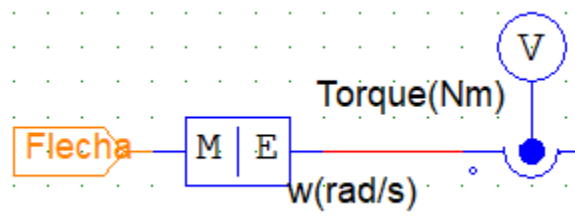




FIGURA 4.2 bloques (fuente propia).

En estos bloques podemos apreciar a la derecha una nota que dice “Flecha”, ahí va colocado lo que es el eje del motor busheles que seguidamente tenemos un bloque, la cual es una interfaz entre mecánico y eléctrico, este bloque nos da como resultado en rad/s, esto se puede considerar como voltaje ya que a su salida se comporta como una variable eléctrica donde a la salida se le coloca un medidor de corriente, que en este caso sería el par.

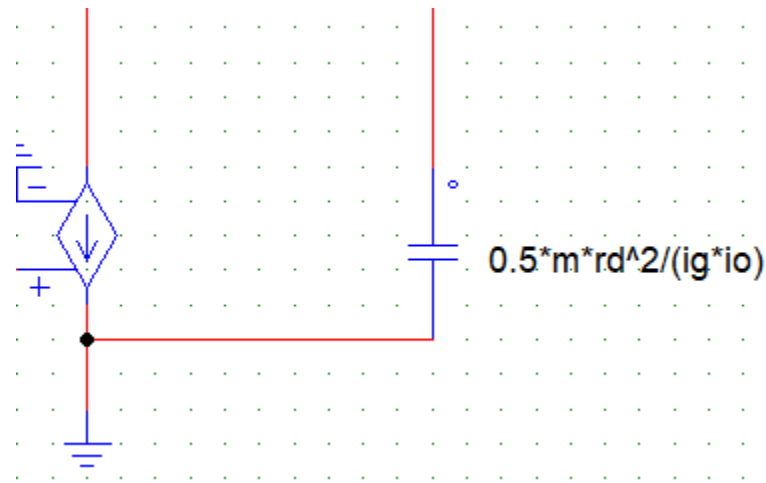


FIGURA 4.1.3 capacitor (fuente propia).

Podemos observar que hay un capacitor a lado derecho de la figura 4.1.3, la cual tiene la función de derivar el voltaje a demás es multiplicado por C donde esta parte tenemos como resultado el par de inercia y del lado derecho tiene como función se agregan las demás fuerzas o pares, ya que su comportamiento es una fuente de corriente controlada por voltaje y su representación es el par que requiere de la resistencia de rodadura, resistencia a la pendiente y resistencia al viento, esto quiere decir que es el par que está demandando al motor eléctrico.

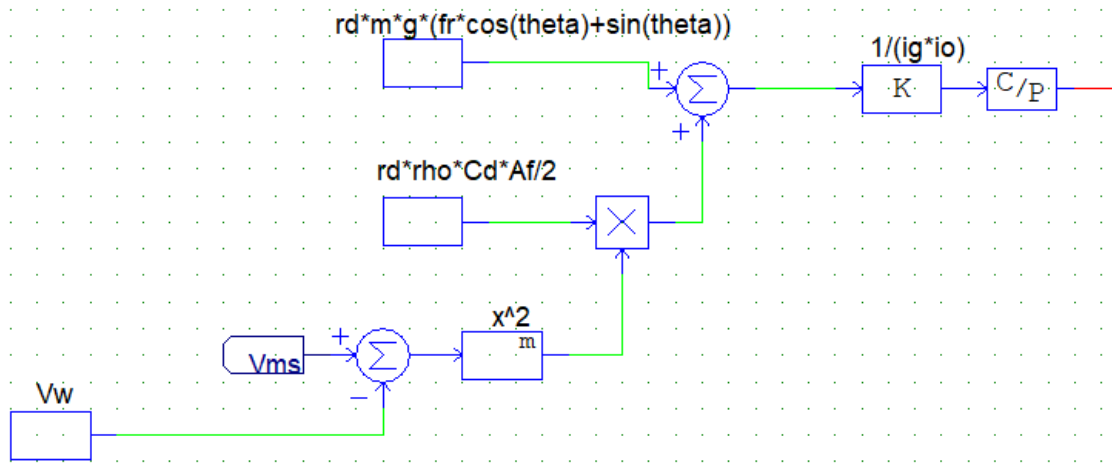


FIGURA 4.1.4 bloques de control (fuente propia).

En la parte izquierda superior tenemos a la fuerza de resistencia de rodadura y de pendiente, debajo de esa fórmula esta la resistencia al viento, donde podemos observar que las dos ecuaciones ya están multiplicadas por rd para que se conviertan en par. Estas dos son sumadas por el bloque en forma circular con signos positivos alrededor de esa circunferencia, ya que tenemos esa suma se coloca un bloque de proporción, esto tiene como función de lo que entra es multiplicado por lo de adentro, como resultado será el par de carga para el motor y esta está conectada al módulo que está en la parte derecha de la imagen representado como C/P, este tiene como función de convertir las señales de control a potencia eléctrica, la parte inferior izquierda tenemos la velocidad del viento (V_w) su salida va conectada a un sumador para hacer la función de contraria que es la resta que es utilizado con la velocidad del vehículo para una demostración más estética se utiliza una etiqueta llamada Place Label la cual en este caso tiene el nombre V_{ms} , esto nos ayuda a utilizar otra etiqueta con el mismo nombre el simulador los conecta entre esos dos puntos sin conectar un cable de manera desordenada, usa resta tiene que estar elevada a una potencia cuadrada donde se utiliza un bloque llamado math función y dentro de ella colocamos la expresión de potencia y finalmente colocamos un multiplicador, la cual es el bloque cuadrado con una X en su interior lo cual toda esa parte está implementando la ecuación de la resistencia aerodinámica donde todo eso es sumado a la resistencia de camino y de la pendiente, como resultado tenemos las fuerzas que se oponen al vehículo.

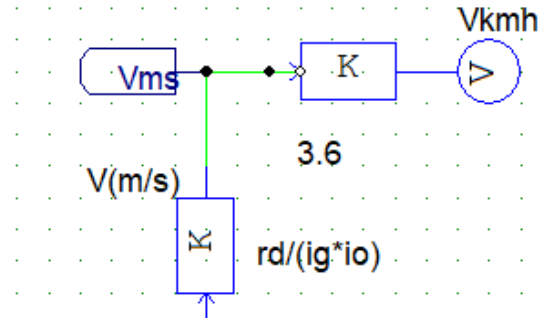


FIGURA 4.1.5 medidor de velocidad (fuente propia).

En estos bloques nos ayuda a convertir de rad/s a m/s, donde el primer bloque de la parte inferior tenemos un bloque proporcional con la función que se está observando, del lado izquierdo apreciamos la etiqueta que fue mencionada anteriormente, el otro bloque de proporción logra convertir de m/s a km/h y finalmente se le coloca un medidor de voltaje para lograr apreciar el comportamiento de la velocidad al momento de ver las gráficas de la simulación.

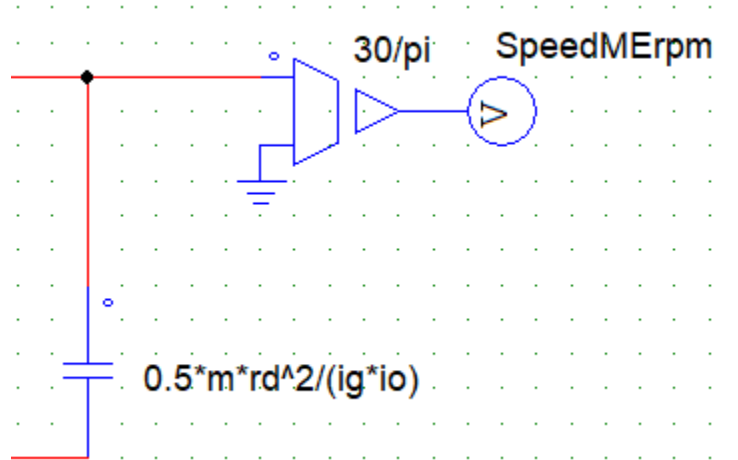


FIGURA 4.1.6 inercia del vehículo (fuente propia)

Hay que recordar, que al momento de hablar del modelo dinámico del vehículo hay un fenómeno importante que es conocido como la inercia que esta es igual a $m \cdot a$ en movimiento lineal, donde nosotros estamos tomando como referencia a la flecha del motor, que estos bloques le restan par al motor que esta corresponde a la inercia del vehículo y es donde entra



Motor brushless aplicado en vehículos eléctricos

la función del capacitor mostrada en la figura 4.1.6, donde este capacitor va a extraer corriente, donde sigue la ecuación mostrada. Esta toma la velocidad, la deriva como resultado es la aceleración y el valor de C tiene que ser igual al valor de la inercia del vehículo, pero reflejada en la flecha del motor.

El capacitor va a representar el par que consume el vehículo debido a la inercia del vehículo, ese par va a estar presente cuando el vehículo acelere o frene.

Y para terminar del lado derecho está colocado un sensor de voltaje para poder medirlo en rpm, pero para esto tiene que ser multiplicado por $30/\pi$ ya que en la entrada tenemos rad/s y queremos los rpm.

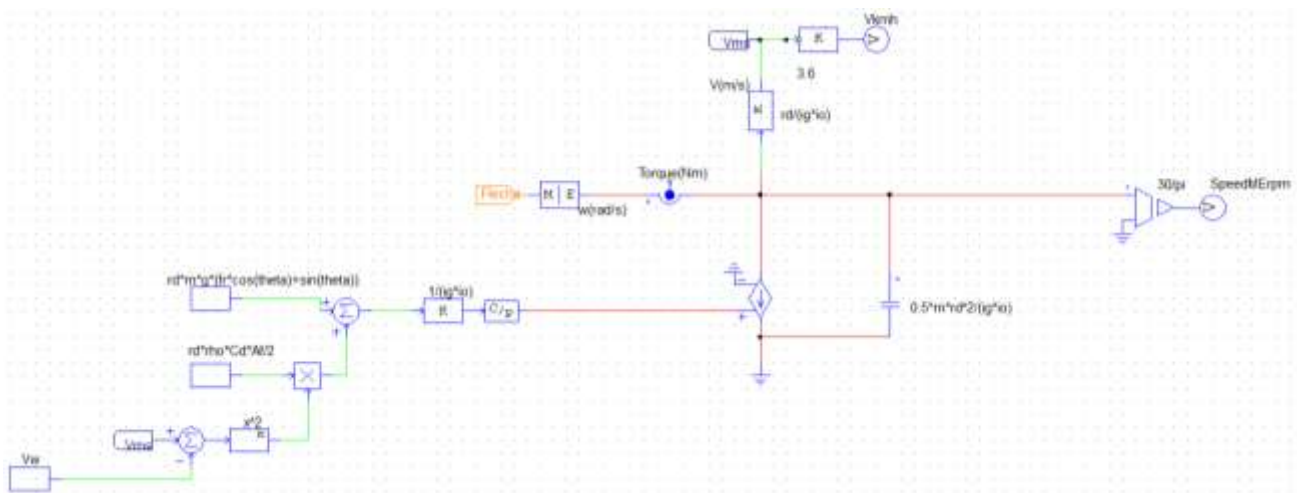
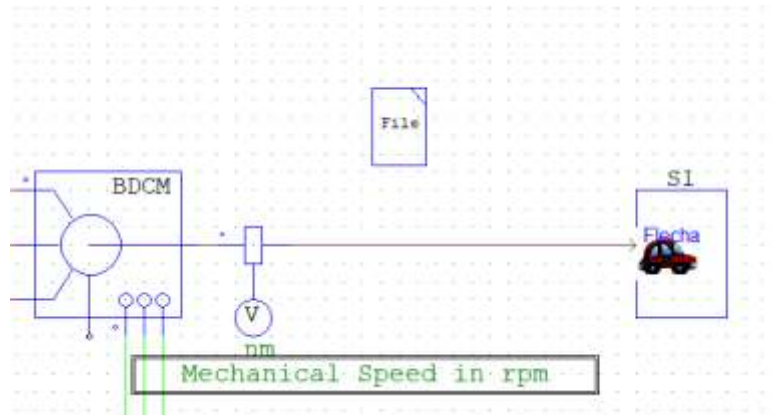


FIGURA 4.1.7 modelo dinámico del vehículo (Fuente propia).

Ya que tenemos el modelo dinámico del vehículo completo, para el acoplamiento con el motor brushless necesitamos colocar nuestro modelo dinámico en un bloque, esto con el fin de obtener una visualización más simple del diagrama que vemos en nuestra simulación.



FIGUGRA 4.1.8

En la figura 4.1.8 se puede apreciar que el bloque con el nombre S1 este acoplado al eje del motor brushless esto simulando una unión física del eje del motor al automóvil.

4.2 Motor brushless aplicado en un vehículo Nissan Sentra

Primero que nada, tenemos que explicar los componentes que se muestran en la siguiente figura.

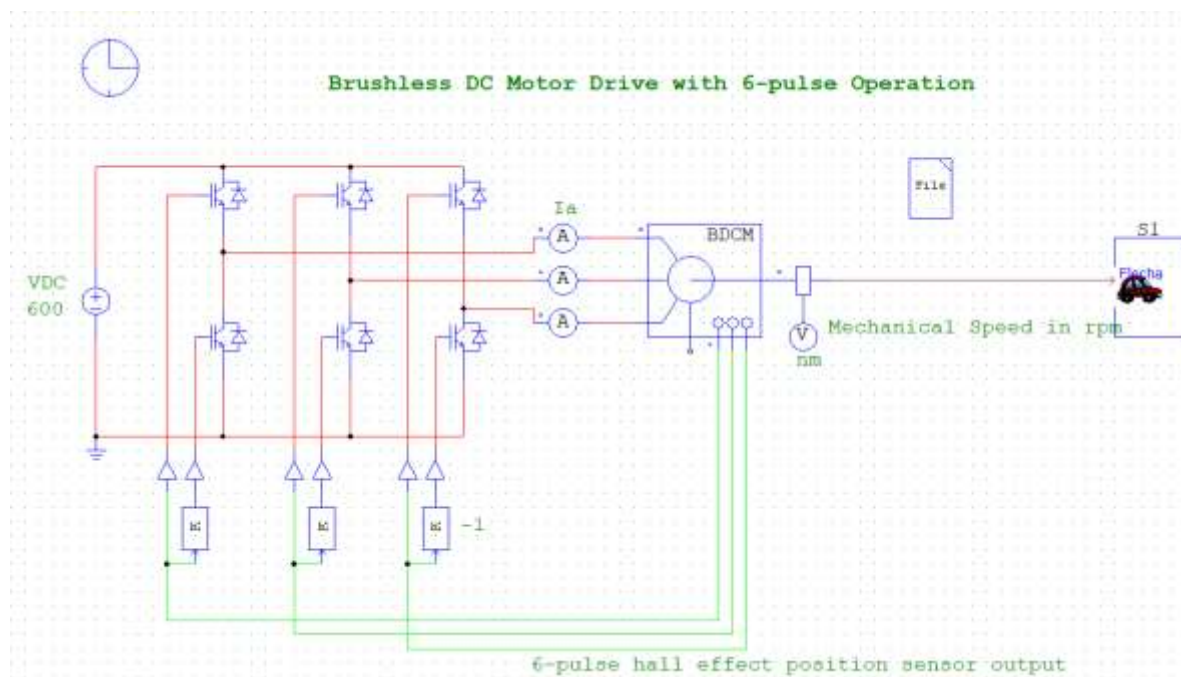


FIGURA 4.2.1 Motor brushless (fuente propia).



Empezamos del lado derecho, explicando como lo vimos en el apartado anterior tenemos nuestro bloque con la figura de un vehículo, donde se encuentra nuestra dinámica del vehículo donde el eje del motor brushless esta acoplado a él y entre ellos podemos observar un medidor de voltaje, que al momento de la simulación lograremos apreciar más adelante la velocidad mecánica en rpm, más a la izquierda vemos 3 amperímetros donde podremos observar el comportamiento de la corriente cuando el motor brushless está en operación que esto va de la mano a los 6 transistores que se encuentra más a la izquierda, estos físicamente remplazan lo que es el conmutador y carbones los cuales estos son utilizados por los motores con escobillas; las conexiones en verde representa el sensor de efecto hall de 6 pulsos y finalmente esta la fuente de alimentación de 600 V.

4.3 Resultados de la simulación

Para la simulación se hicieron unas modificaciones para poder obtener los resultados esperados.

Empezando con el modelo dinámico del vehículo donde queremos comprobar cómo va cambiando la velocidad y el par mediante el cambio del valor theta.

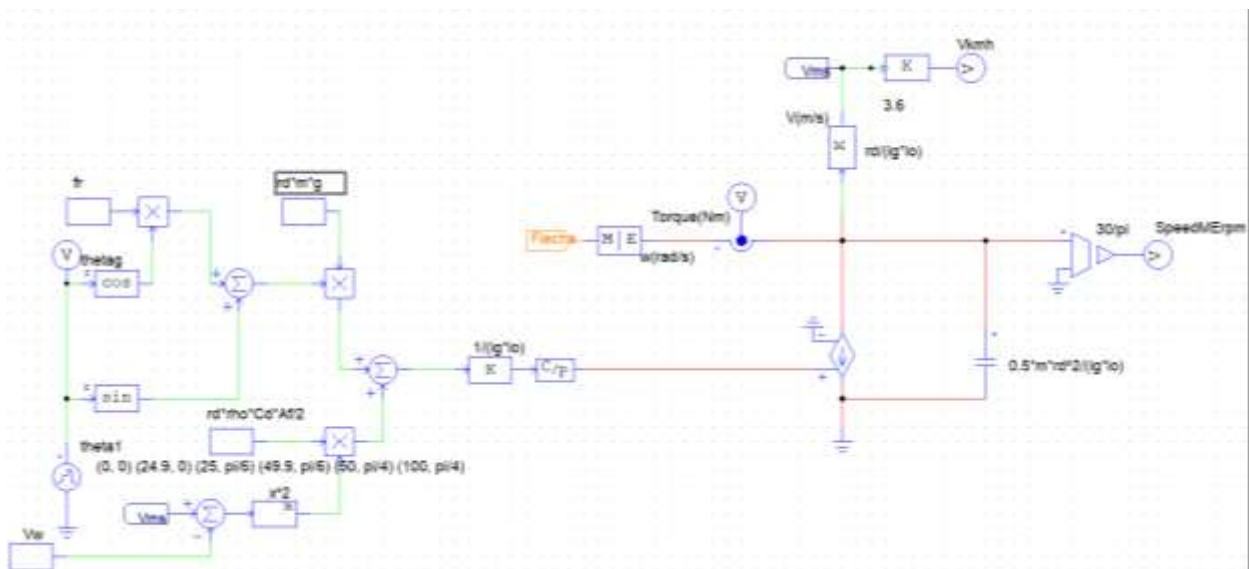


FIGURA. 4.3.1 Modificación de la dinámica del vehículo (Fuente propia).

En la parte del motor brushless cambiamos la resistencia del estator, la cual esta depende del grosor del alambre, al tener un alambre delgado intuimos que pasara mucha corriente sobre



Motor brushless aplicado en vehículos eléctricos

ellos y en los motores eléctricos el par generado es proporcional a la corriente eléctrica, como disminuimos la resistencia esto deja pasar más corriente eléctrica al motor y como resultado tenemos más par de lo normal; colocamos una fuente de 600 V ya que la mayoría de los vehículos eléctricos se encuentran en ese rango de voltaje, entonces multiplicamos por 2 a los valores $V_{pk}/krpm$ y $V_{rms}/krpm$ debido que estos generan una fuerza contra electromotriz, esto dicen que tan fuerte son los imanes que se utilizado, debido a que el motor este alcanzado su velocidad nominal, este voltaje se reste de la fuente, al restarse ya no genera más par el motor.

Brushless dc machine (trapezoidal)		Display
Name	BDCM1	<input type="checkbox"/> ▼
R (stator resistance)	11.9*0.05	<input type="checkbox"/> ▼
L (stator self ind.)	0.00207	<input type="checkbox"/> ▼
M (stator mutual ind.)	-0.00069	<input type="checkbox"/> ▼
Vpk / krpm	32.3*2	<input type="checkbox"/> ▼
Vrms / krpm	22.9*2	<input type="checkbox"/> ▼
No. of Poles P	4	<input type="checkbox"/> ▼
Moment of Inertia	7E-006	<input type="checkbox"/> ▼
Shaft Time Constant	0.006	<input type="checkbox"/> ▼
theta_0 (deg.)	0	▼
theta_advance (deg.)	0	▼
Conduction Pulse Width	120	▼
Torque Flag	1	▼
Master/Slave Flag	1	▼

FIGURA 4.3.2 Especificaciones del motor brushless (Fuente propia).



Motor brushless aplicado en vehículos eléctricos

En la parte de los parámetros tomamos como referencia que el vehículo está avanzando en el segundo cambio de velocidad (ig), además que disminuimos el peso debido a que un vehículo eléctrico se retira lo que es el motor de combustión y la transmisión, el motor de combustión de un vehículo como el Nissan Sentra esta en un promedio de 90 a 160 kg y de parte de la transmisión es de 36.5 kg restamos esos datos y tenemos un peso nominal de 1073.5 kg.

A continuación, demostraremos el comportamiento de la corriente en un transcurso de 1 segundo.

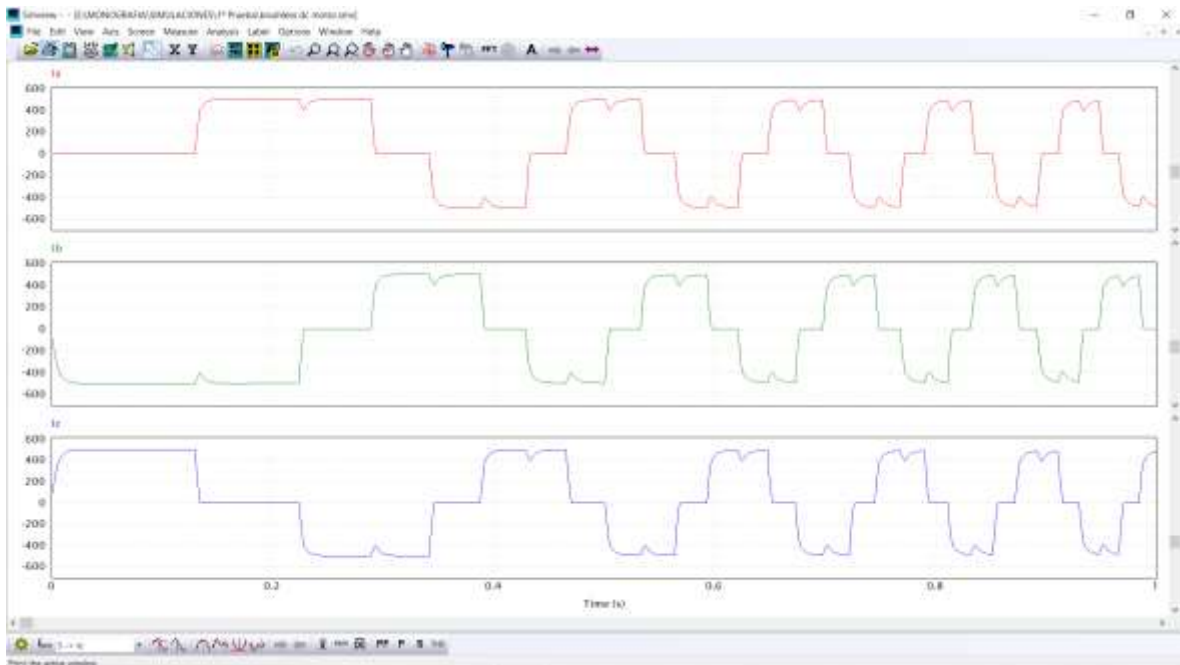


FIGURA 4.3.3 Simulación de la corriente (Fuente propia).

Se puede apreciar que las 3 corrientes se alejan de ser una señal sinusoidal, esto podemos comprobar que se genera la conmutación de 6 pasos en el inversor donde estos depende de la ubicación de los imanes permanentes que se encuentran en el rotor.

Para tener más claridad la secuencia de los transistores en esta conmutación se explicará a continuación en la siguiente tabla.



I	STEP 1	STEP 2	STEP 3	STEP 4	STEP 5	STEP 6
Ia	1	1	0	X	X	0
Ib	X	0	1	1	0	X
Ic	0	X	X	0	1	1

FIGURA 4.3.4 Tabla de secuencias (Fuente propia).

Gracias a esta tabla de secuencias se pueden cargar esta información en algún microcontrolador en la cual podemos sacar esta secuencia de conmutación y tendremos como resultado las formas de onda mostradas en la figura 4.3.3.

Para decidir que paso enviar al inversor para que el motor empiece a girar, entra lo que es nuestro sensor de efecto Hall, debemos tomar en cuenta la ubicación del imán permanente y nuestro sensor detecta la presencia del campo magnético.

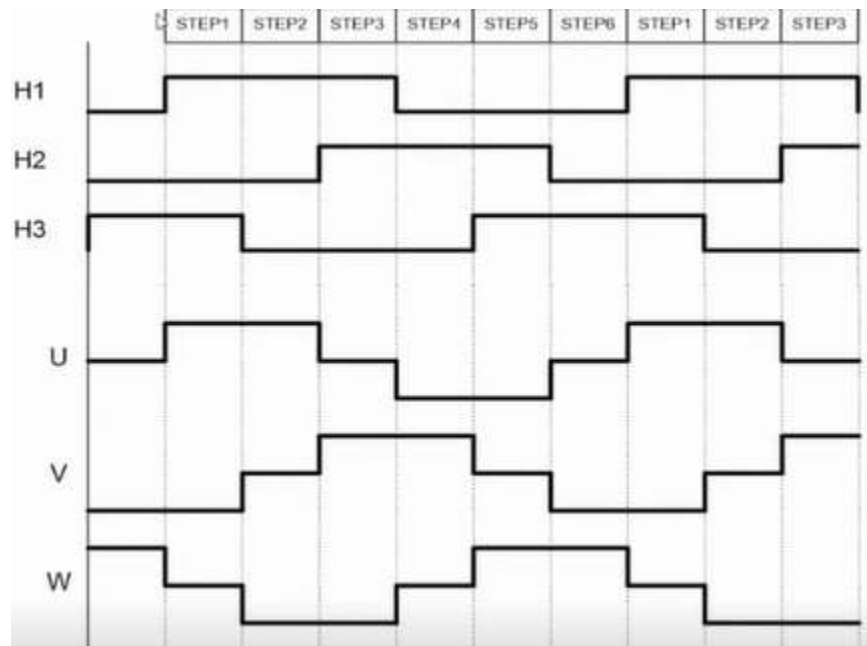


FIGURA 4.3.5 Ejemplo de la conmutación [1].

De esta manera podemos ejemplificar la conmutación, ya que las combinaciones de los 3 sensores producen 6 combinaciones lógicas o pasos, donde arriba (H1, H2 y H3), tenemos el



código del sensor y abajo (en este ejemplo U, V y W) la secuencia de conmutación que envía el inversor, para que el motor empiece a girar.

Y para la variación de velocidad tenemos que utilizar lo antes mencionado que son las señales PWM.

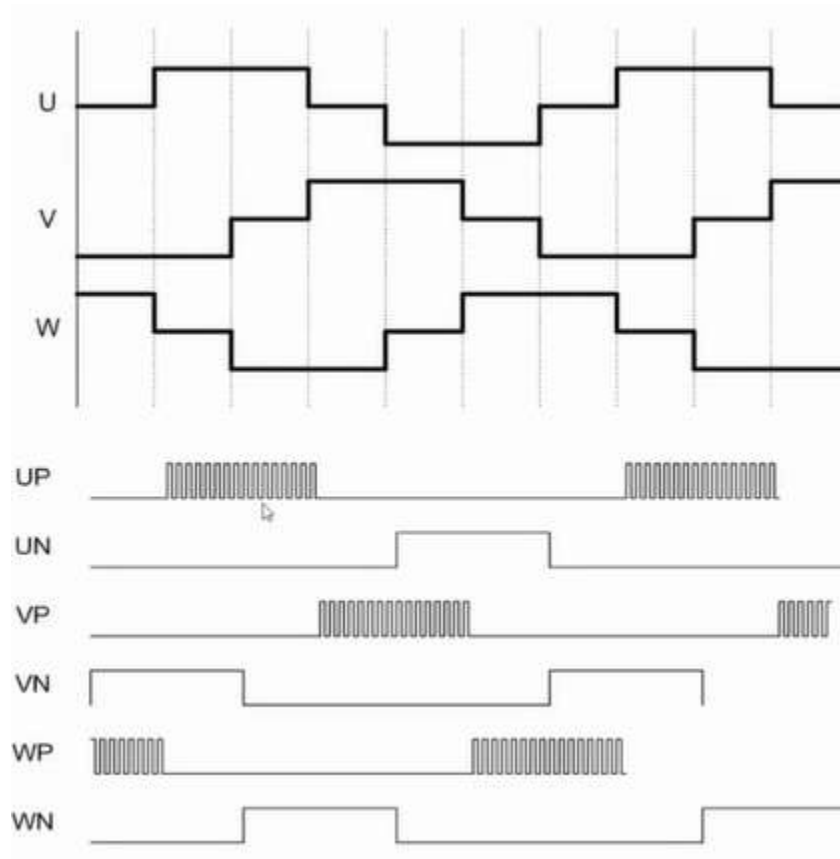


FIGURA 4.3.6 Ejemplo de señales PWM [1].

Si requerimos una velocidad menor, se debe usar PWM en el voltaje enviado a una de las fases del motor, no se necesita mandar las dos solo con una basta, ya que tomamos en cuenta que los transistores van conectados en serie y simplemente basta con una señal.

A continuación, analizamos la forma de onda de la corriente y la fuerza torsional que puede desarrollar el motor (Par) calculados en un tiempo de 1 segundo.

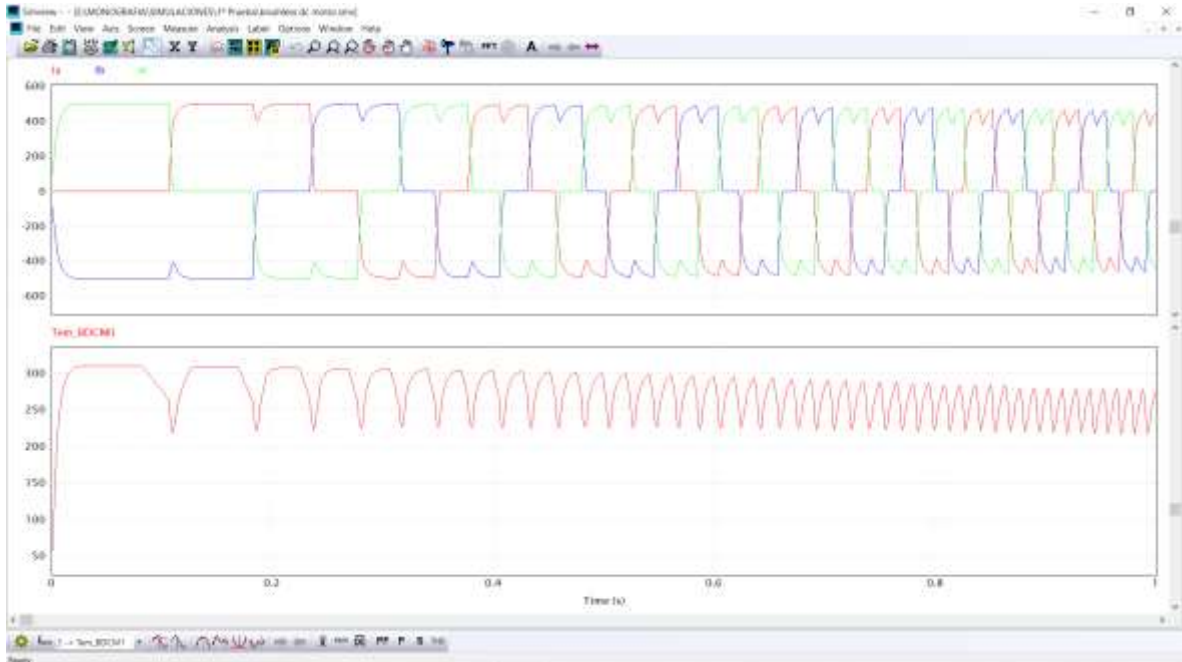


FIGURA 4.3.7 Resultados de corriente y Par (Fuente propia).

Lo que vemos en los resultados de corriente, se observa una gran cantidad de armónicos, tomando en cuenta que lo que define el par del motor es la corriente. Si lo vemos con más a detalle la parte superior de las señales de corriente a pesar que se estén intercalado los resultados, podemos considerar una especie de constante, se observan algunas variaciones la cual se pueden traducir como rizos de par, se ven más a detalle los rizos en la parte inferior de la figura 4.3.7, esta gran cantidad de rizos puede provocar una desventaja al momento de utilizar los motores brushless debido que modifica el desempeño del sistema de accionamiento, a largo plazo puede provocar fallas al motor y podemos concluir que los culpables o responsables son los armónicos que aparecen en las ondas de corriente.

En la siguiente figura se mostrará el ángulo de inclinación de la pendiente, el Par (en Nm) y la velocidad del vehículo (km/h).

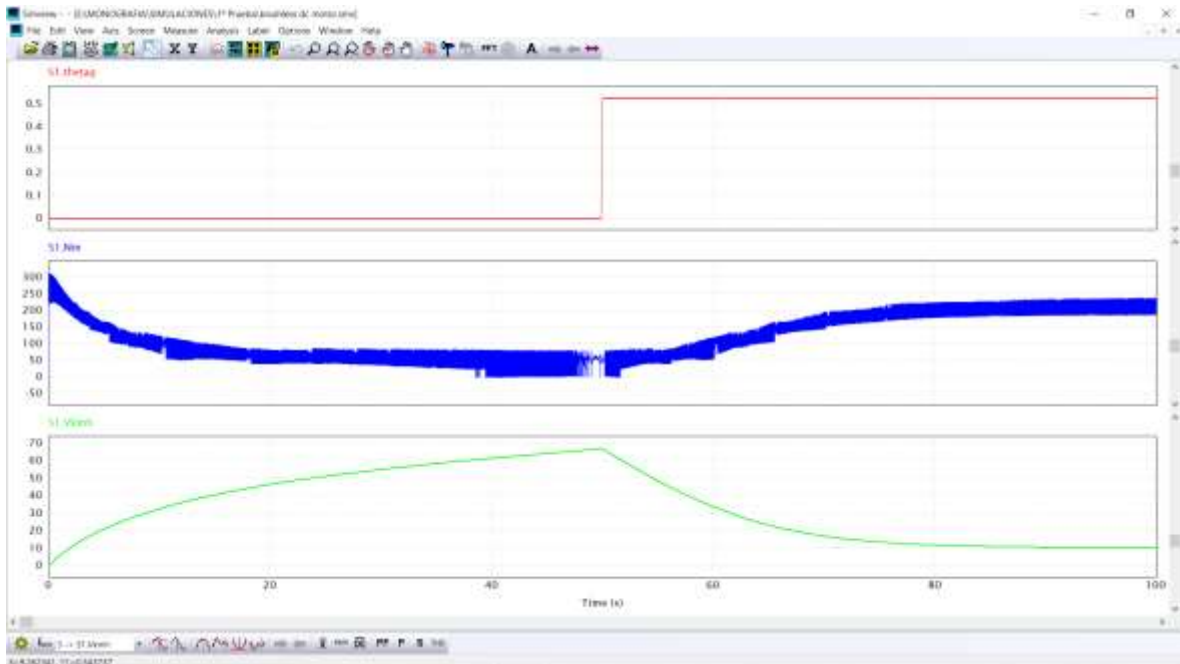


FIGURA 4.3.8 Resultados de theta, Par, velocidad (Fuente propia).

La primera grafica de color rojo podemos observar el valor de theta donde en el tiempo 0 a 50 segundos tenemos un valor de 0 y de 50 a 100 cambiamos el valor de $\pi/6$ (0.523) esto en radianes y traducido en ángulo tiene como valor de 30° .

La segunda grafica de color azul representa el Par del vehículo donde se puede observar de inicio que tiene un par aproximado de 300 Nm, baja conforme a la velocidad va aumentando hasta llegar a un punto estable, al momento que el vehículo se encuentra en la pendiente de 30° el Par tiene un cambio y aumenta el Par por el esfuerzo que necesita para superar esa pendiente llegando a un valor de 210 Nm al final del tiempo asignado.

Y La tercera grafica de color verde se representa la velocidad del vehículo, hay que recordar que estamos en la segunda relación de transmisión tomándose como referencia, donde la velocidad máxima alcanzada fue de 67 km/h, al momento que el vehículo se enfrenta a la pendiente su velocidad va bajando manteniéndose en un valor de 10 km/h.



CONCLUSIONES

Conclusión general

Se logro de mostrar la viabilidad de uso de un motor brushless como elemento de tracción para un vehículo Nissan Sentra, el accionamiento del motor brushless se implementó con una conmutación de 6 pasos del inversor; estos 6 pasos fueron generados por un microcontrolador que respondían a señales retroalimentadas de los sensores de efecto Hall.

La evaluación del motor se realizó con pruebas dinámicas del vehículo desplazándose por una pendiente diferente de cero.

A lo largo de esta investigación, despertó esa curiosidad y emoción en mí, de que en un futuro lograr ver este tipo de motores funcionando en cualquier vehículo eléctrico e incluso en vehículos de combustión convertidos a eléctricos, ya que la información que recabe se me hizo interesante, además que puede explotarse al máximo para generar nuevos avances tecnológicos en la industria automotriz.

Conclusiones específicas

- ✓ Se demostró el modelo dinámico del vehículo de manera teórica y simulada.
- ✓ Se demostró el efecto de la transmisión sobre el desempeño del motor brushless.
- ✓ Se logro el entendimiento teórico, físico de un inversor y la importancia de este en los motores brushless.
- ✓ Se logro simular la dinámica de un vehículo Nissan Sentra.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dr. Edgar Peralta Sánchez, “Diplomado de vehículo eléctrico”, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Puebla, México, 2021.
- [2] “La energía”. Fundación Endesa. <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/que-es-la-energia> (acceso: 17 enero 2022).
- [3] Julián Pérez Porto y María Merino. “Potencia”. Definición.de. <https://definicion.de/potencia/> (acceso: 17 enero 2022).
- [4] “Par”. Helloauto. <https://helloauto.com/glosario/par-motor> (acceso: 18 enero 2022).
- [5] “Sistema de transmisión de un auto. Dercocenter. <https://www.dercocenter.cl/noticias/que-es-sistema-transmision> (acceso: 19 enero 2022).
- [6] “Sistema de transmisión en un auto”. Actualidad Motor. <https://www.actualidadmotor.com/partes-constitutivas-de-los-sistemas-de-transmision/> (acceso: 19 enero 2022).
- [7] “Histéresis”. Real Academia Española. <https://dle.rae.es/hist%C3%A9resis> (acceso: 20 enero 2022).



- [8] Ing. Juan Carlos Miranda. “Fricción Por Rodadura”. Apuntes de ingeniería mecánica. <https://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2015/05/titulo-friccion-subtitulo-friccion-por.html> (acceso: 20 enero 2022).
- [9] “Inercia”. Concepto. <https://concepto.de/inercia/> (acceso 24 enero 2022).
- [10] Diego Bueno, “Motor eléctrico Brushless: Funcionamiento y características”. 2013. [En línea]. Disponible en: <https://1mecanizadoelarenal.files.wordpress.com/2013/11/motores-brushless.pdf> (acceso: 25 enero 2022).
- [11] “Motores brushless”. Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_el%C3%A9ctrico_sin_escobillas#Funcionamiento (acceso: 26 enero 2022).
- [12] “Pedales” Automotor.wiki. <https://autofit-spain.es/orden-y-uso-correcto-de-los-pedales-del-coche/> (acceso: 26 enero 2022).
- [13] “PWM”. Solectro. <https://solectroshop.com/es/blog/que-es-pwm-y-como-usarlo--n38> (acceso: 26 enero 2022).
- [14] “Circuito integrado”. Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_integrado (acceso: 26 enero 2022).
- [15] “Transistores”. Wikipedia. <https://es.wikipedia.org/wiki/Transistor> (acceso: 26 enero 2022).
- [16] “Sensor de efecto Hall”. Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_de_efecto_Hall (acceso: 26 enero 2022).



- [17] vt en línea. *Cómo funciona un motor brushless o sin escobillas*. (3 de abril del 2019). Acceso: 26 de enero del 2022. [Video en línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=NnUiAgUundw&t=533s>
- [18] vt en línea. *Cómo usar un motor brushlees con arduino*. (2 de mayo del 2019). Acceso: 26 de enero del 2022. [Video en línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=6WsvDX3MKwg>
- [19] “Acoplamiento de un motor eléctrico”. Electruncars. <http://elektrun.com/acoplamiento-a-la-tercera-va-la-vencida/> (acceso: 09 de febrero 2022).
- [20] “Inversor”. Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Inversor_trif%C3%A1sico#Inversor_trif%C3%A1sico_PWM (acceso: 23 de febrero 2022).
- [21] “Señal del Sensor de efecto Hall”. Sensor de presión. <https://www.sensoresdepresion.top/2020/02/un-sensor-de-efecto-hall-que-tipo-de-senal-genera.html> (acceso: 23 de febrero 2022).