



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“ANÁLISIS Y CONTROL DE UN SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO”

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:
**MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA**

PRESENTA:

ING. JOSÉ OMAR HERNÁNDEZ MONTERROSAS

DIRIGIDA POR:

DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA

DR. DAVID TORRES FRANCO



MÉXICO D. F.

ENERO 2016

DEDICATORIAS
Y
AGRADECIMIENTOS

A Dios

*Sobre todas las cosas
y por permitirme llegar hasta aquí.*

A mis padres

Raymundo Hernández y Bertha Monterrosas.

*Por darme la vida, por su amor, apoyo
y enseñanzas.*

A mis queridos Abuelos

*Por su amor incondicional,
el cual me brindaron día a día y por hacerme tan feliz.*

A mis hermanas

Por su cariño y apoyo.

A mis tíos

*Norma y Alfredo por su cariño,
apoyo y por verme como un hijo.*

A los Maestros

Oni y Antonio

*Por su apoyo, cariño y
sus sabios consejos.*

A mis compañeros y amigos

*Guadalupe, Carla, Víctor, Rafael,
Dayvis, Arturo, Omar, Yazmin, Lenon.*

*Gracias por su apoyo y todos
los momentos felices.*

A mis asesores

Dr. Guillermo Urriolagoitia Sosa

Dr. David Torres Franco

*Por las enseñanzas, los consejos,
la confianza y la oportunidad de cumplir
esta meta e impulsarme para continuar en la investigación.*

Al Doctor

Jesús Alberto Meda Campaña

*Por la gran atención brindada,
por los valiosos consejos,
por el conocimiento transmitido
y por su tiempo que invirtió en mi trabajo.*

Al Instituto Politécnico Nacional

*Por permitirme ser parte de su grande institución y
brindarme una educación de calidad.*

Al CONACyT

*Por su valioso apoyo económico
brindado desde el inicio de mis estudios,
permitiendo concluir con esta investigación.*

RESUMEN

En esta tesis se muestra el desarrollo de la metodología empleada para la obtención de un sistema de control, que permita manipular de la posición y la velocidad de un automóvil híbrido, mediante los diferentes tipos de control, las características del vehículo y de los componentes mecánicos y eléctricos que lo constituyen. Así como también la simulación del rendimiento de los sistemas mecánicos y eléctricos del auto, mediante la caracterización de los parámetros del mismo.

A través de los años, con el fin de aumentar la eficiencia de las baterías que alimentan al motor eléctrico del auto. Se han diseñado diversos dispositivos para lograr un mayor rendimiento, el cual es uno de los problemas más importantes de este tipo de vehículos. Una de estas alternativas es el uso de sistemas de frenado regenerativo, los cuales pueden ser mecánicos, hidráulicos y eléctricos entre otros. Éstos transforman la energía cinética del vehículo en energía eléctrica durante el frenado y tienen la finalidad de mejorar la eficiencia del automóvil durante su operación.

La metodología empleada para el desarrollo del sistema de control comprende de tres etapas principales: 1. Caracterización dinámica y modelado matemático, 2. Elaboración y simulación del sistema de control (programa y diagrama de bloques), 3. Análisis y simulación del rendimiento mecánico y eléctrico del vehículo.

De esta forma se obtiene un control, capaz de linealizar el sistema en cualquier punto de operación, así como el rendimiento del vehículo cuando está en operación, permitiendo predecir el comportamiento del mismo. Ayudando de manera tal, elegir parámetros que entreguen mejores resultados en la simulación del auto.

ABSTRACT

This thesis shows the development of the methodology for obtaining a control system that enables manipulation position and velocity of a hybrid car. Using different types of control, vehicle characteristics, mechanical and electrical components that constitute it. As well as simulating the performance of mechanical and electrical systems of the car, through the characterization of the vehicle parameters.

Through the years, in order to increase the efficiency of batteries that power the electric motor of vehicle, many devices have been designed for greater performance. Which is one of the most important problems of this type of vehicle. One such alternative is the use of regenerative braking systems, which may be mechanical, hydraulic and electric. These transform the vehicle's kinetic energy into electrical energy during braking, and are intended to improve the efficiency of the vehicle during operation.

The methodology used to develop the control system contemplates three main stages: 1. Dynamic characterization and mathematical modeling 2. Development and simulation of control system (program and block diagram), 3. Analysis and simulation of the mechanical and electric performance of vehicle.

Thus control is obtained, able to linearize the system in any operating point and the vehicle performance, when it is in operation, allowing to predict the behavior of the car. Helping so, choose settings that deliver better results in the simulation of the vehicle.

Índice General

Resumen	I
Abstract	II
Índice General	III
Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas	XI
Objetivo	XII
Justificación	XII
Introducción	XIV

Capítulo I. Estado del Arte

I.1.- Generalidades	2
I.2.- Antecedentes generales	2
I.3.- Tipos de autos híbridos eléctricos	7
I.4.- Frenado regenerativo	10
I.5.- Baterías	15
I.6.- Motor eléctrico	17
I.7.- Tipos de control	21
I.8.-Planteamiento del problema	27
I.9.- Sumario	28
I.10.- Referencias	28

Capítulo II. Marco Teórico

II.1.- Introducción	32
II.2.- Vehículos híbridos	33
II.3.-Vehículo híbrido en serie	34
II.4.- Ventajas y desventajas del vehículo híbrido en serie	36
II.5.- Sistema de frenado regenerativo	37
II.5.1.- Motor de Combustión Interna	37
II.5.2.- Sistema de freno disipativo	39

II.6.- Sistema mecánico del frenado regenerativo	40
II.7.- Fuerza total de tracción	42
II.8.- Sistema eléctrico del frenado regenerativo	47
II.8.1.- Descripción del motor eléctrico de CD	50
II.8.2.- Características de par - velocidad	51
II.9.- Sistema de control	55
II.9.1.- Control Inteligente	56
II.9.2.- Función de membresía	57
II.9.3.- Control difuso	58
II.9.3.1- Fusificación	60
II.9.3.2- Base de conocimiento	61
II.9.3.3- Lógica de decisiones	61
II.9.3.4- Defusificación	61
II.9.4.- Tipos de control difuso	61
II.9.4.1.- Método difuso de Mamdani	62
II.9.4.2.- Método difuso de Takagi-Sugeno-Kang.	62
II.10.- Sumario	63
II.11.- Referencias	63
Capítulo III. Motor de Corriente Directa	
III.1.- Introducción	67
III.2.- Selección del motor de corriente directa	67
III.3.- Modelado del motor eléctrico	71
III.3.1- Principios de operación del motor de corriente directa	71
III.3.2- Campo magnético	71
III.3.3- Fuerza magnética	72
III.3.4- Ley de Faraday	74
III.4.- Ecuación dinámica del motor de corriente directa	76
III.4.1.- Producción de Torque	76

III.4.2.- Conmutación	80
III.5.- Conversión de energía electromecánica	86
III.6.- Sumario	87
III.7.- Referencias	87
Capítulo IV. Control Lineal	
IV.1.- Introducción	90
IV.2.- Modelo dinámico del sistema	91
IV.3.- Control lineal del modelo matemático del vehículo	96
IV.3.1.- Puntos de equilibrio	99
IV.3.2.- Control lineal del sistema	101
IV.3.2.1.- Linealización del modelo	101
IV.4.- Sumario	108
IV.5. - Referencias	108
Capítulo V. Rendimiento del vehículo híbrido	
V.1.- Introducción	110
V.2.- Rendimiento del vehículo	110
V.2.1.- Rendimiento mecánico y parámetros de aceleración	111
V.3.1.- Rendimiento energético	115
V.3.1.1.- Ciclos de manejo	117
V. 3.1.2.- Rendimiento eléctrico y parámetros de las baterías	118
V. 3.1.3.- Potencia del motor eléctrico	120
V. 3.1.4.- Potencia en la batería	121
V. 3.1.5.- Voltaje de circuito abierto en la batería	121
V. 3.1.6.- Corriente de la batería	122
V. 3.1.7.- Densidad de energía	123
V. 3.1.8.- Energía específica	124
V. 3.1.9.- Potencia específica	124
V.4.- Capacidad de la batería	125

V.4.1.- Capacidad <i>Peukert</i> de la batería	125
V.5.- Energía cinética	127
V.6.- Sumario	129
V.7. - Referencias	129
Conclusiones	132
Trabajos Futuros	135
Anexos	138

Índice de Figuras

Capítulo I

Figura I.1.- Studio per Carro Automotore de Leonardo Da Vinci	2
Figura I.2.- Taxi eléctrico de batería en Nueva York en el año 1901	3
Figura I.3.- De Camille Jenatzy La Jamais Contente	4
Figura I.4.- Parada de mini-tranvia	6
Figura I.5.- Sistema regenerativo de volante de inercia	6
Figura I.6.- Toyota Prius	7
Figura I.7.- Honda Insight híbrido	7
Figura I.8.- Diseño de vehículo híbrido en serie	8
Figura I.9.- Diseño de vehículo híbrido en paralelo	8
Figura I.10.- Honda Civic auto parcialmente híbrido	9
Figura I.11.- Toyota Prius auto completamente híbrido	9
Figura I.12.- Híbrido enchufable Chevrolet Volt	10
Figura I.13.- Sistema de frenado Regenerativo	11
Figura I.14.- Sistema hidráulico	12
Figura I.15.- Sistema de volante de inercia	13
Figura I.16.- Sistema regenerativo eléctrico	13
Figura I.17.- Esquema del sistema de frenos hidroneumáticos	14
Figura I.18.- Componentes del sistema i-ELOOP	14
Figura I.19.- Paquete de baterías de NiMH	16
Figura I.20.- Pilas de Li-Ion	17
Figura I.21.- Motor de inducción	18
Figura I.22.- Motor de imán permanente tipo montaje	19
Figura I.23.- Motor de reluctancia conmutada	20
Figura I.24.- Motor de imán permanente	21
Figura I.25.- Dispensador automático de vino	22
Figura I.26.- Reloj de agua de Ktesibios, reconstruido por H. Diels	22

Figura I.27.- Alarma de Platón	23
Figura I.28.- Lámpara de Philon	24
Figura I.29.- Regulador centrífugo de James Watt	24
Figura I.30.- Línea de ensamblaje Ford Motor Company	25
Capítulo II	
Figura II.1.- Sistema de pila o celdas de combustible	32
Figura II.2.- Auto híbrido de <i>Ferdinand Porsche</i> y <i>Jacob Lachner</i>	33
Figura II.3.- Camión escalera híbrido de 1914	34
Figura II.4.- El <i>Owen Magnetic Modelo 60</i> de 1921	34
Figura II.5.- Transmisión en serie del vehículo híbrido	35
Figura II.6.- Motor diésel-eléctrico	38
Figura II.7.- Sistema <i>ABS</i>	40
Figura II.8.- Disco de freno	41
Figura II.9.- Balata o pastilla de freno	41
Figura II.10.- Cáliper	42
Figura II.11.- Fuerzas que actúan sobre el vehículo al subir una pendiente	43
Figura II.12.- Arreglo simple para conexión de un motor eléctrico a una rueda motriz	45
Figura II.13. Configuración del sistema eléctrico de control	47
Figura II.14.- Batería comercial de <i>NiMH</i> , con ventiladores de refrigeración integrales	48
Figura II.15.- Batería Zebra (Cloruro de Sodio metálico)	49
Figura II.16.- Banco de ultracapacitores	50
Figura II.17.- Motor de corriente continua de cuatro polos	52
Figura II.18.- Gráfica par-velocidad de un motor de corriente continua	55
Figura II.19.- Función triangular de membresía	57
Figura II.20.- Función trapezoidal de membresía	58
Figura II.21.- Función gaussiana de membresía	58
Figura II.22.- Descripción de conjunto difuso	59
Figura II.23.- Esquema general del control difuso	60
Capitulo III	
Figura III.1.- Diseño del chasis y la estructura	69

Figura III.2.- Motor eléctrico de <i>CD</i> con 15 HP	70
Figura III.3.- Campo magnético en el entrehierro	72
Figura III.4.- Ley de fuerza magnética	73
Figura III.5.- La fuerza es perpendicular al componente \vec{B}	74
Figura III.6.- Cambio de flujo magnético	76
Figura III.7.- Motor de corriente directa	77
Figura III.8.- Campo magnético producido en el entrehierro	77
Figura III.9.- Coordenadas cilíndricas del sistema	78
Figura III.10.- Conmutación lineal o ideal	80
Figura III.11a.- Conmutación cuando $\theta_R = 0$ y $\theta_R = \pi$	81
Figura III.11b.- Circuito del rotor justo antes de conmutar donde $0 < \theta_R < \pi$	81
Figura III.11c.- Extremos del circuito del rotor en cortocircuito (cuando $\theta_R = \pi$)	82
Figura III.11d.- Circuito del rotor después de conmutar (cuando $\pi < \theta_R < 2\pi$)	82
Figura III.12.- Esquema del motor de <i>CD</i>	83
Figura III.13.- Circuito eléctrico del motor de <i>CD</i>	83
Figura III.14.- Circuito equivalente de la dinámica eléctrica del inducido	84
Figura III.15.- Diagrama de cuerpo libre de la parte mecánica	85
Capítulo IV	
Figura IV.1.- Programa de control	104
Figura IV.2.- Matrices calculadas en el programa	104
Figura IV.3.- Diagrama de bloques del sistema lineal	105
Figura IV.4.- Diagrama de bloques del sistema de control lineal	105
Figura IV.5.- Simulación a 20 km con amortiguamiento	106
Figura IV.6.- Simulación lineal a 20 km.	106
Figura IV.7.- Simulación a 70 km.	107
Figura IV.8.- Simulación a 45 km.	107
Capítulo V	
Figura V.1.- Gráfica velocidad/tiempo	114
Figura V.2.- Gráfica distancia/tiempo	114
Figura V.3.- Diagrama de flujo de energía en un sistema con freno regenerativo	119

Figura V.4.- Circuito equivalente de una batería	122
Figura V.5.- Descarga de potencia constante de una batería de Plomo-ácido	123
Figura V.6.- Potencia específica / energía específica de baterías Plomo-acido/Níquel-Cadmio	124
Figura V.7.- Comportamiento de descarga en batería Plomo-ácido	126
Figura V.8.- Descarga de corriente constante de una batería de Níquel-Cadmio de 50Ah	127

Índice de Tablas

Capítulo II

Tabla II.1.- Posición de motor por número de cilindros	38
--	----

Capitulo III

Tabla III.1. – Ficha técnica del vehículo híbrido	69
---	----

Tabla III.2.- Características de <i>Eggo Alfa</i>	70
---	----

Tabla III.3.- Características del motor eléctrico seleccionado	71
--	----

Capítulo V

Tabla V.1. – Requisitos técnicos de baterías para vehículos híbridos	116
--	-----

Tabla V.2. – Densidad nominal de fuentes de energía	117
---	-----

Tabla V.3. – Parámetros de eficiencia de motores eléctricos	120
---	-----

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un sistema de control, para un motor eléctrico del sistema de frenado regenerativo de un vehículo híbrido por medio de técnicas de control, que permita la manipulación de la posición y la velocidad del automóvil.

Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general es necesario determinar los objetivos particulares, los cuales se presentan a continuación.

- Conocer los diferentes tipos de autos híbridos y sistemas de control.
- Definir las características y funcionamiento del motor eléctrico.
- Obtener el modelo matemático del sistema de frenado regenerativo.
- Desarrollar el sistema de control con el modelo matemático y su simulación.
- Simular el rendimiento del vehículo híbrido.

JUSTIFICACIÓN

La innovación tecnológica, ha generado sistemas muy complejos que requieren controladores altamente sofisticados para asegurar el alto desempeño de sistemas bajo condiciones desfavorables, debido a la complejidad del sistema y al hecho de que la estructura y los parámetros en muchos sistemas cambian de manera significativa e impredecible con el tiempo. Bajo estas condiciones se utilizan las diferentes técnicas de control, que permiten linealizar un sistema no lineal.

Este trabajo de investigación es parte de un proyecto que se está realizando con colaboración del Instituto Politécnico Nacional y la Universidad Politécnica del Valle de México, con el propósito de poner en circulación vehículos híbridos, como taxis para la Ciudad de México. Con el fin de ser una opción viable para el gran problema de contaminación que existe en el área metropolitana, y a su vez implementando la energía renovable con la recuperación de la energía cinética que se pierde en la frenada del automóvil, transformándola en energía eléctrica para la alimentación de las baterías y el motor eléctrico, buscando la eficiencia y autonomía del automóvil.

INTRODUCCIÓN

En esta investigación se presenta una breve historia del automóvil eléctrico, desde 1830. Después de que *Faraday* descubriera las leyes de inducción electromagnética, dando inicio al desarrollo de motores y generadores eléctricos. Convirtiéndose en la parte esencial para la industria del transporte eléctrico. El primer vehículo eléctrico se construye en Escocia en 1839, cuando se fabricaban los vehículos de vapor en Inglaterra.

Ingenieros reconocieron que las buenas características del motor de gasolina se podrían combinar con las del motor eléctrico para producir un coche superior. El coche eléctrico ofrece tranquilidad, comodidad y facilidad de control. La integración de los dos, da como resultado el automóvil híbrido. La historia de los autos híbridos comienza con diseños de Ferdinand Porsche y Ludwig Lohner y otros personajes, hasta la aparición del famoso Toyota Prius, uno de los vehículos híbridos más vendidos de la era moderna. Se describen también los tipos de híbridos que existen actualmente.

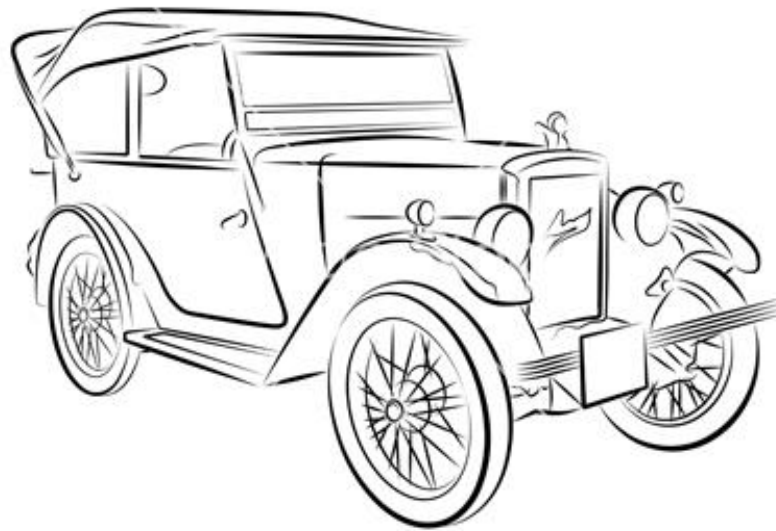
Se mencionan los diferentes tipos de frenado regenerativo y se da una breve descripción de las baterías y los motores eléctricos que se usan en los autos híbridos. De igual manera se menciona la historia del control, desde *Herón de Alejandría* (Siglo I a.C.), quien escribe una enciclopedia técnica en la cual se encuentran dos libros que hacen referencia al control autónomo los cuales son *Pneumática* y *Autómata*. En el primero describe varios sistemas realimentados y en el segundo presenta complicados aparatos que ejecutan un programa fijo., hasta 1994, donde la Mecatrónica se volvió de uso común en los automóviles. Actualmente, conceptos como control estocástico, control inteligente (difuso y neuronal), control por modos deslizantes y control adaptivo son ampliamente usados en el campo de la ingeniería de control.

En el capítulo II, se seleccionará el tipo de vehículo híbrido, el motor eléctrico y el tipo de freno, así como los diferentes sistemas de control, los cuales se tomaran en cuenta para la elección de los sistemas con los que se trabajará para la realización de este proyecto de investigación. Se describirá de manera específica el funcionamiento de cada uno de los sistemas, así como los componentes que los constituyen. Se describen los diagramas de cuerpo libre del sistema, para la obtención del modelo matemático.

Las características del motor eléctrico, se presentan en el capítulo III, lo que permitirá entender de una manera clara el funcionamiento del motor. El capítulo IV presenta un análisis analítico, en donde se obtendrá el modelo matemático del sistema, con el cual se desarrollará el sistema de control del modelo dinámico y la simulación del mismo. El cual permitirá controlar la posición y la velocidad del motor eléctrico y obtener una regeneración en el sistema de frenado más eficiente. En la actualidad los sistemas mecánicos, eléctricos, hidráulicos y mecatrónicos tienen la versatilidad de implementar sistemas de control. Con el objetivo de mejorar el desempeño de las maquinas eléctricas. La implementación de los sistemas de control ha sido un eslabón clave en el avance tecnológico. Abriendo paso a los sistemas de control inteligente, aplicados en la industria robótica, automotriz, aérea entre otros. Así como, la flexibilidad en los programas de control le da una amplia gama de soluciones y aplicaciones a los sistemas de control.

Finalmente el capítulo V, presenta una simulación analítico-numérica del rendimiento del vehículo híbrido. El análisis numérico permitirá predecir el comportamiento del automóvil en términos mecánico y energético, en parámetros como potencia, torque, rpm, rango de operación del vehículo o rendimiento de las baterías. El desarrollo del análisis se basa en la formulación analítica de parámetros tales como fuerzas, velocidades, aceleraciones, ciclos de manejo y tipos de baterías. Es importante predecir el desempeño de un automóvil durante la operación, ya que por medio de los resultados obtenidos, se pueden modificar los parámetros en las pruebas para obtener un mejor rendimiento del automóvil

CAPÍTULO I



ESTADO DEL ARTE

I.1.- Generalidades

En los últimos años, los vehículos híbridos han tenido un enorme avance tecnológico, lo que ha permitido darle otro enfoque a los autos híbridos. Como por ejemplo, una solución a los problemas de contaminación en las ciudades. Así como, se han realizado esfuerzos en la investigación para aumentar la eficiencia de las baterías que alimentan al motor eléctrico del auto. Además se han diseñado diversos dispositivos para lograr un mayor rendimiento eléctrico, el cual es uno de los problemas más importantes de los vehículos eléctricos. Uno de estos dispositivos es el sistema de freno regenerativo. El sistema de frenado regenerativo permite recuperar parte de la energía cinética producida por la disminución de velocidad en los vehículos.

I.2.- Antecedentes generales

Los inicios del automóvil se presentan desde el año de 1478, donde *Leonardo Da Vinci* realiza el *Studio per carro automotore*, el cual muestra el diseño de un vehículo de cuatro ruedas, con dirección, que mediante un sistema de muelles y con la ayuda de dos personas, podía moverse unos cuantos metros. Tal es la perfección de este diseño, que en el año 2004 se pudo reproducir el vehículo siguiendo los planos originales, consiguiéndose la puesta en marcha del mismo (Figura I.1) [Pedretti, 1999].

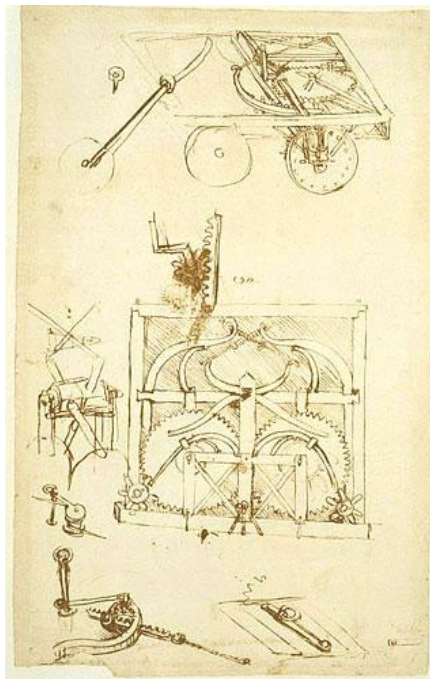


Figura I.1.- *Studio per Carro Automotore* de *Leonardo Da Vinci* [Pedretti, 1999]

La historia de los vehículos eléctricos empieza en 1830. Después de que *Faraday* descubriera las leyes de inducción electromagnética, dando inicio al desarrollo de motores y generadores eléctricos. Convirtiéndose en la parte esencial para la industria del transporte eléctrico. El primer vehículo eléctrico se construye en Escocia en 1839, cuando se fabricaban los vehículos de vapor en Inglaterra [*Larminie, 2003*].

Los vehículos eléctricos han entrado en su tercer siglo como producto disponible en el mercado, sin tener mucha aceptación en comparación con los vehículos de combustión interna (CI), que han disfrutado de un enorme éxito. Hoy en día la contaminación ambiental, en particular las emisiones sonoras y de escape, sumando los nuevos desarrollos de combustible inclinan la balanza a favor de los vehículos eléctricos. Por lo que, es importante que los diseños en los vehículos eléctricos, pongan más interés por las cuestiones tecnológicas y ambientales [*Larminie, 2003*].

Los primeros autos eléctricos usaban baterías no recargables, a finales del Siglo XIX, con el desarrollo de las baterías recargables, los vehículos eléctricos empiezan a ser utilizados como transporte privado y transporte público (taxis). En la Figura I.2 se muestra un taxi eléctrico de Nueva York en el año de 1901 con *Lily Langtree* al lado. De hecho, por su desempeño, se prefirieron los coches eléctricos en comparación con los de combustión interna o de vapor.



Figura I.2.- Taxi eléctrico de batería en Nueva York en el año 1901

La Figura I.3 muestra el primer auto en superar la velocidad de *mil por hora* (60 mph) cuando el corredor de Bélgica *Camille Jenatzy*, conduciendo el vehículo eléctrico conocido como *La Jamais Contente*, estableció un nuevo récord de velocidad en tierra de 106 kph (65.7 mph). Siendo el primer auto en exceder los 100 kph [Larminie, 2003].

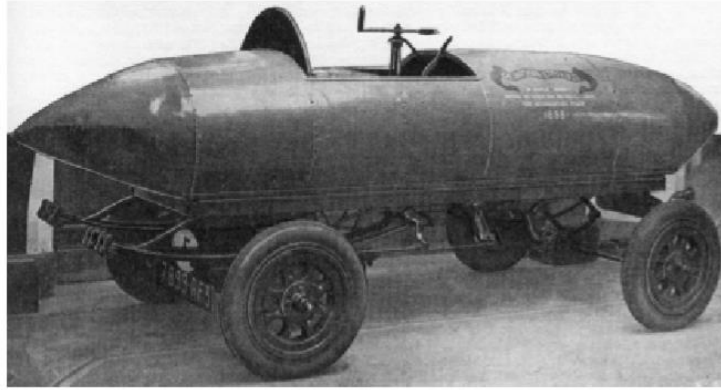


Figura I.3.- De *Camille Jenatzy La Jamais Contente*

En 1881 *Gustave Trouvé* construyó un triciclo eléctrico impulsado por un motor de corriente directa de 0.1 hp, alimentado por baterías de Plomo-ácido. El vehículo y su conductor pesaban aproximadamente 160 kg. Los primeros vehículos híbridos fueron exhibidos en el salón de París en 1899. Estos fueron construidos por *Pieper* de *Liège* en Bélgica y por la compañía *Sacerdotal Vendovelli* de transporte eléctrico en Francia [Ehsani y colaboradores, 2010].

Por la década de 1920, se habían producido varios cientos de vehículos eléctricos para su uso como vehículos, furgonetas, taxis, vehículos de reparto y autobuses. Sin embargo, con la disponibilidad del petróleo barato y el arranque automático para el motor de combustión interna (inventado en 1911), el motor de *CI* fue una opción más atractiva para la propulsión de vehículos. Irónicamente, el principal mercado para las baterías recargables ha sido puesto para el arranque de motores de *CI* [Sperling, 1995].

Las razones del éxito y la preferencia hasta la fecha de los vehículos de motor de *CI* son fáciles de entender cuando se compara la eficiencia de la energía de combustibles derivados del petróleo a la de las baterías. Desde el Siglo XIX se han utilizado nuevas formas para superar el almacenamiento de energía limitada de las baterías. Una de estas es el suministro de la energía

eléctrica a través de guías de alimentación, el mejor ejemplo es el trolebús. Esto ha sido ampliamente utilizado durante el Siglo XX y permite tener autobuses que no contribuyen a la contaminación ambiental, en pueblos y ciudades [*Sperling, 1995*].

El petróleo siendo la única fuente de energía para los vehículos tiene implicaciones económicas y políticas, sumando a ello la crisis de la reserva del petróleo que día con día va disminuyendo. El número de automóviles se duplicó a cerca de mil millones o más en los últimos 10 años, contribuyendo con el crecimiento al problema de la contaminación [*Fuhs, 2009*].

Los fabricantes de vehículos eléctricos (VE) se dieron cuenta de que a pesar de sus muchas ventajas, la serie limitada del auto eléctrico no obtuvo la aceptación que se esperaba. Incluyendo a esto, el inconveniente de los largos tiempos de recarga hacían que los autos no llamaran la atención del público. Ingenieros reconocieron que las buenas características del motor de gasolina se podrían combinar con las del motor eléctrico para producir un coche superior. El coche eléctrico ofrece tranquilidad, comodidad y facilidad de control. La integración de los dos, da como resultado el automóvil híbrido.

Los autos híbridos podrían ser un elemento clave en las estrategias de los Estados Unidos para hacer frente a los problemas ambientales y la creciente inseguridad energética. Entonces los gobiernos ven a los vehículos híbridos (VH) como uno de los medios para avanzar hacia un futuro energético seguro y un ambiente más saludable. Depende de los fabricantes hacer que los híbridos tengan un potencial alto y eficiente [*Friedman, 2003*].

En 1993 en Birmingham fue exhibido en un evento de electricidad un mini-tranvía ligero. El cual fue una de las aplicaciones más imaginativas para los vehículos híbridos. Funciona con pistas que se pueden colocar en cualquier carretera sin ningún problema, tiene un recorrido de 50 km/h. Cada vehículo tiene un peso aproximado de 3 toneladas y puede transportar a 14 pasajeros sentados y 11 de pie (Figura I.4) [*Hodkinson and Fenton, 2001*].



Figura I.4.- Parada de mini-tranvia

Este vehículo híbrido cuenta con un sistema regenerativo compuesto por un volante de inercia. El cual recarga las baterías a través de unos carriles conductores de corriente colocados a intervalos cortos alrededor de la pista. Este transporte es una solución a los problemas de contaminación en las ciudades [Hodkinson y Fenton, 2001].

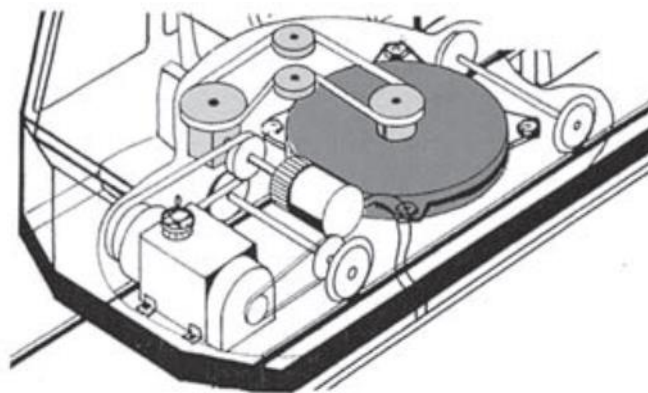


Figura I.5.- Sistema regenerativo de volante de inercia [Hodkinson y Fenton, 2001].

El mundo empezó a seguir un nuevo camino en 1997, cuando el primer auto moderno híbrido eléctrico (*Toyota Prius*), fue vendido en Japón. Dos años más tarde, Estados Unidos realiza la primera venta de un híbrido, el *Honda Insight*. Estos dos vehículos, seguidos por el *Honda Civic Hybrid*, marcaron un cambio radical en el modelo de coche que se ofrece al público, vehículos eléctricos con baterías que tienen los beneficios de los autos y camiones de gasolina convencionales que se han utilizado durante más de 100 años [Friedman, 2003].



Figura I.6.- *Toyota Prius* [Hodkinson y Fenton, 2001]



Figura I.7.- *Honda Insight híbrido* [Hodkinson y Fenton, 2001]

I.3.- Tipos de autos híbridos eléctricos

La evolución de los autos eléctricos ha producido una nueva gama de modelos que están logrando llamar la atención del público usuario. Uno de estos tipos es el vehículo híbrido eléctrico, tiene la ventaja de contar con dos o más fuentes de energía. Los tipos más comunes de vehículos híbridos combinan un motor de combustión interna, un motor eléctrico, baterías y un generador. Existen dos modalidades básicas para los vehículos híbridos, el híbrido en serie (Figura I.8) y el híbrido en paralelo (Figura I.9), que incluyen en su composición los sistemas de frenado regenerativo [Torres y Hernández, 2012].

En el híbrido en serie, el motor de combustión interna acciona un generador que suministra electricidad a un motor eléctrico, mismo que está conectado a las ruedas. Es decir, el vehículo se mueve finalmente con la potencia que suministra el motor eléctrico. En el caso de los híbridos en paralelo, tanto el motor de combustión interna como el motor eléctrico pueden impulsar al vehículo [Torres y Hernández, 2012].

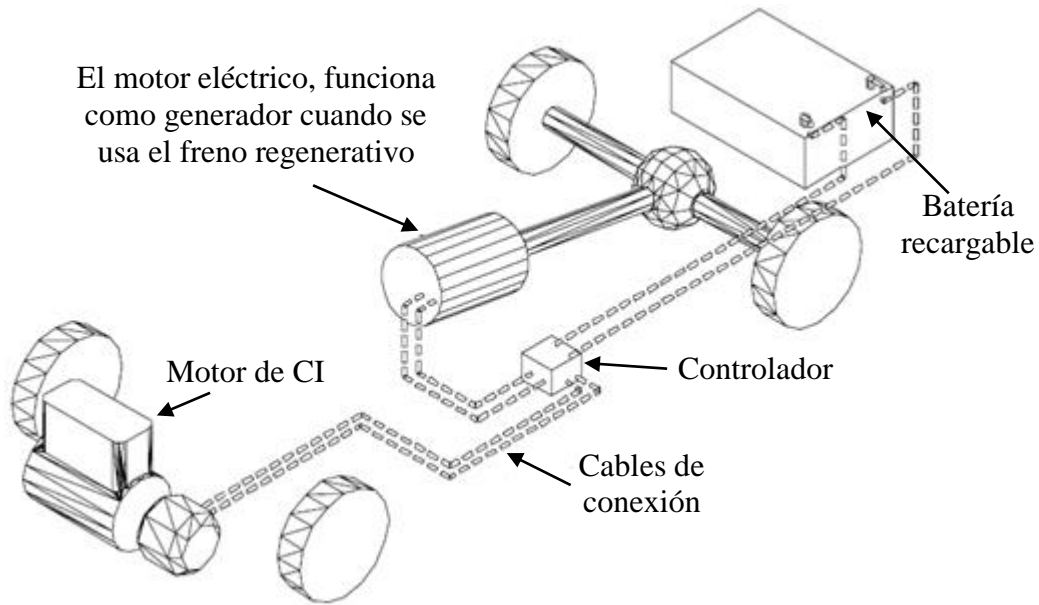


Figura I.8.- Diseño de vehículo híbrido en serie

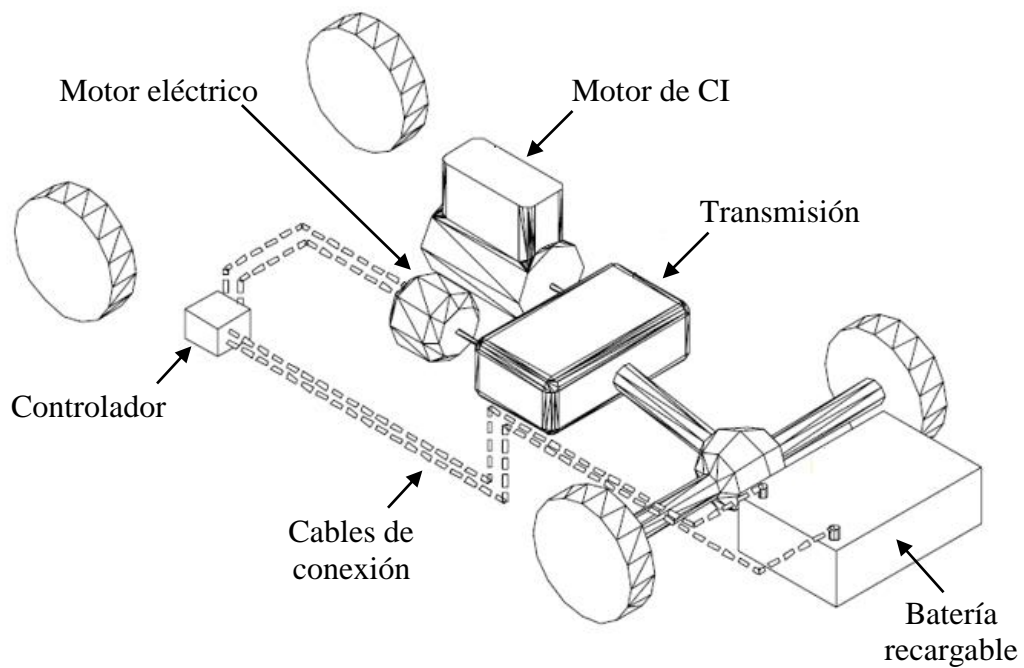


Figura I.9.- Diseño de vehículo híbrido en paralelo [Larminie, 2003]

Los autos híbridos generalmente se clasifican de acuerdo a la cantidad de energía suministrada por cada uno de los sistemas o fuentes de energía, que se combinan para el movimiento del vehículo. Con base en lo anterior los autos híbridos se clasifican en [Friedman, 2003]:

- **Híbrido robusto.-** Un vehículo de este tipo utiliza la tecnología híbrida para aumentar la potencia en lugar de aumentar significativamente la economía del combustible.
- **Parcialmente híbrido.-** Este tipo de vehículo utiliza un tren motriz en paralelo. Ambos sistemas tanto el de combustión interna como el eléctrico impulsan el automóvil. El tamaño del motor de combustión interna es más pequeño que el convencional y está incluido el sistema de frenado regenerativo para la recarga de las baterías.



Figura I.10.- *Honda Civic* auto parcialmente híbrido

- **Completamente híbrido.-** Este vehículo a diferencia del parcialmente híbrido, es impulsado sólo por la energía eléctrica. Este puede disponer de un tren motriz en paralelo o en serie, al igual que el caso anterior este emplea un sistema de frenado regenerativo, sólo que esta vez el motor de combustión interna funciona como generador de electricidad.

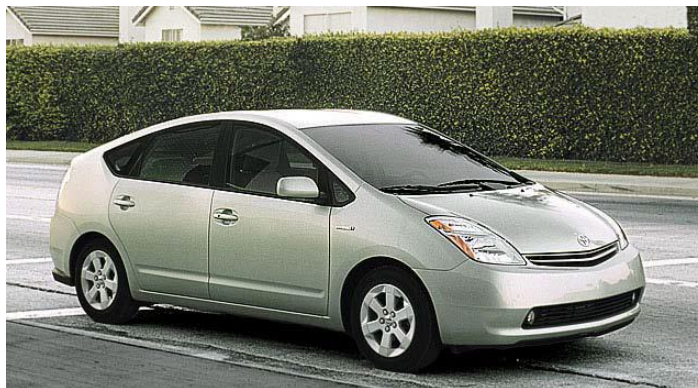


Figura I.11.- *Toyota Prius* auto completamente híbrido

- **Híbrido enchufable.-** Este coche tiene la capacidad de recargar las baterías a través de un enchufe. Esto permite que el híbrido pueda funcionar únicamente con las baterías. Al igual que en caso anterior este es impulsado solo por el motor eléctrico. Un auto de este tipo puede funcionar como un completamente híbrido, ya que si no se recargan las pilas a través del enchufe, el motor de combustión interna funciona como generador de electricidad. Pero esta función depende en gran medida de cuan a menudo el consumidor se conecta al enchufe [Departamento de Energía, 2007].

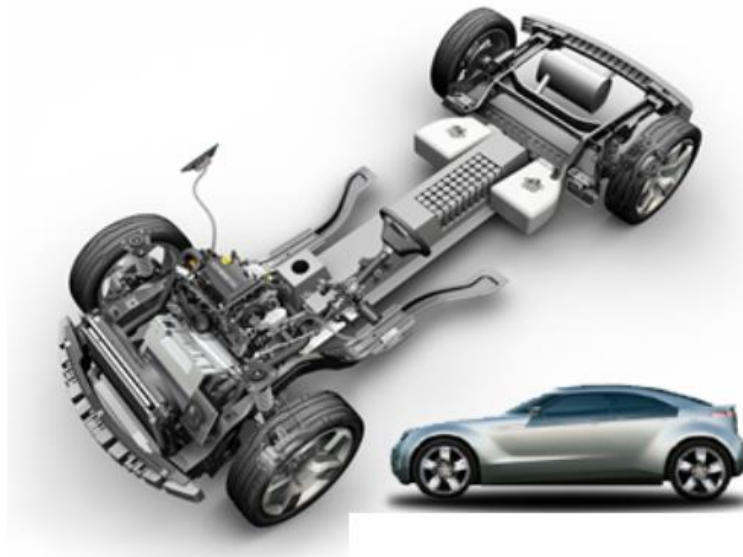


Figura I.12. - Híbrido enchufable *Chevrolet Volt* [Departamento de Energía, 2007]

I.4.- Frenado regenerativo

El avance tecnológico en la industria automotriz y en el área de la electrónica, ha contribuido al desarrollo de nuevos sistemas que mejoran en gran medida a los vehículos, dándoles más seguridad, eficiencia, confort y facilidad al conducir. Dentro de estos avances se encuentran los sistemas de frenos antibloqueo, frenos automáticos, frenos regenerativos, control de estabilidad, sistemas de tracción, entre otros. Estos sistemas incluyen en su composición sensores, los cuales están instalados en el vehículo, intercambiando señales entre varios sistemas para realizar las funciones que el auto demanda [Castillo y Cabrera, 2012]. El sistema de frenado regenerativo permite recuperar parte de la energía cinética producida por la disminución de velocidad en los

vehículos. Ocasionada por diferentes factores como fricción del disco con la balata, disipada en forma de calor y ruido al medio ambiente, cambio de voltaje y frecuencia en motores eléctricos funcionando como generadores, transformando la energía cinética en energía eléctrica. La cual se usa para alimentar al motor y cargar las baterías de forma eficiente eliminando el uso de productos contaminantes como la gasolina y el diésel, teniendo como objetivo disminuir el consumo de combustible y prolongar la autonomía del auto [Torres y Hernández, 2012].

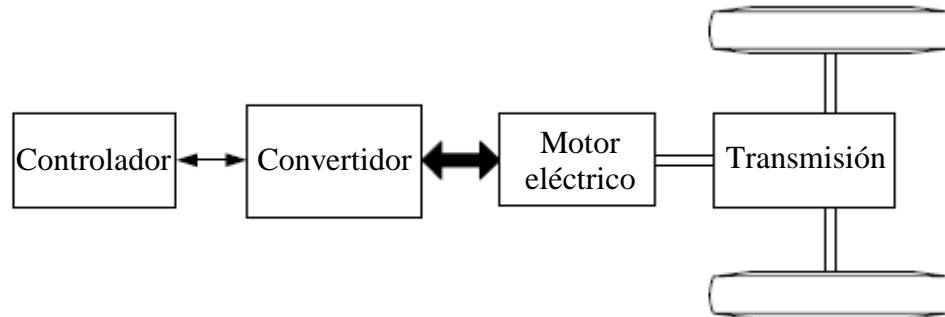


Figura I.13.- Sistema de frenado Regenerativo

Su almacenamiento puede ser en diferentes métodos, usando dispositivos como volantes de inercia, baterías electroquímicas, ultracapacitores, celdas de combustible regenerativas entre otros. El avance tecnológico por mejorar los automóviles y el desarrollo de motores con más potencia y por consecuencia, más velocidad, ha dado paso a nuevos sistemas de almacenamiento de energía [Hoogma y colaboradores, 2002].

Se tiene conocimiento de distintos sistemas de frenado, en la actualidad el más utilizado es el sistema hidráulico, el cual utiliza en la parte frontal discos y tambores en la parte trasera. Uno de los sistemas que se utilizaba antes, era el freno mecánico, sistema que hoy en día es obsoleto. Su funcionamiento consistía en presionar el pedal con tu pie, con esto se transmitía la fuerza a través de un cable para tratar de frenar el vehículo. El sistema de frenos mecánico dejó de ser funcional, dando paso a nuevos sistemas de frenado [Gama y Tovar, 2009].

A continuación se describen algunos sistemas de frenado regenerativo, comúnmente usados:

- **Sistema Hidráulico (tradicional).**- El sistema de frenos hidráulicos a diferencia de los otros, disipa la energía mecánica en forma de calor y ruido. Está formado por una

bomba de freno o cilindro principal, que se encarga de generar la presión cuando se pisa el pedal de freno del vehículo. Cuenta con servofreno el cual es un sistema que multiplica los esfuerzos. La presión hidráulica generada al pisar el pedal de freno provoca fricción, generando energía cinética la cual se libera a la atmósfera en forma de calor y ruido (Figura I.14) [SRAM, 2013].

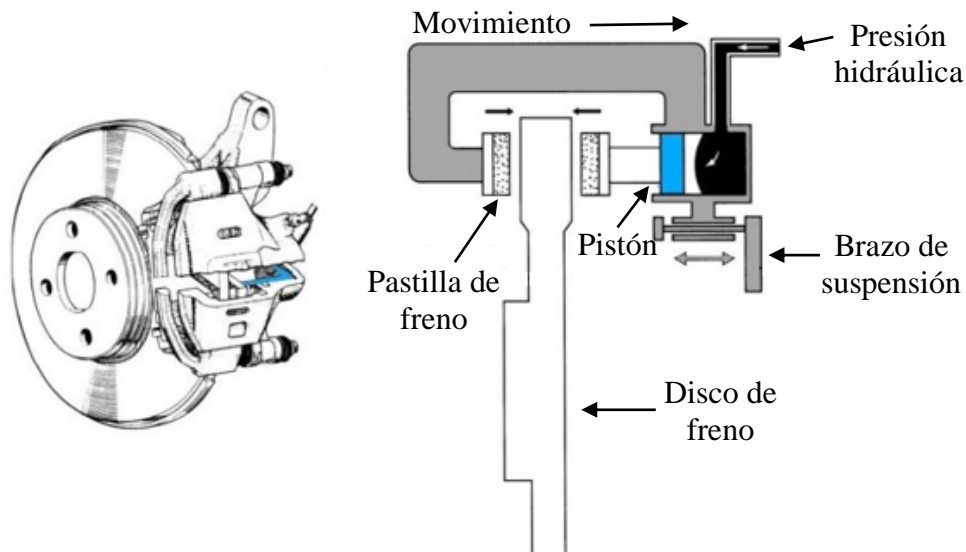


Figura I.14.- Sistema hidráulico

- **Sistemas con volantes de inercia.-** El uso de este sistema permite almacenar energía en forma cinética en intervalos cortos de frenado y aceleración, posee mayor densidad de energía comparado con los supercondensadores. Este puede ser conectado o desconectado del tren motriz del vehículo por medio de un embrague, el volante de inercia se conecta a la transmisión recibiendo energía cinética durante la desaceleración, cuando el freno se desactiva el sistema se desconecta y la inercia del movimiento mantiene al volante girando, la energía generada se emplea para los dispositivos eléctricos y para la alimentación del motor (Figura I.15) [Ripoll, 2005].
- **Sistemas Regenerativos Eléctricos.-** Los vehículos eléctricos e híbridos utilizan este sistema de frenado. Básicamente funciona con un generador eléctrico. El cual transforma la energía cinética en eléctrica para alimentar al motor eléctrico y recargar las baterías durante el periodo de frenado. En otros casos se usa al motor eléctrico como generador y al mismo tiempo produce un par en el tren motriz, que en

combinación con un sistema hidráulico ayuda a disminuir la velocidad del automóvil. Este sistema cuenta con dos o más motores de tracción, lo que permite que puedan ser conectados en dos combinaciones, en serie y en paralelo (Figura I.16) [Husain, 2005].

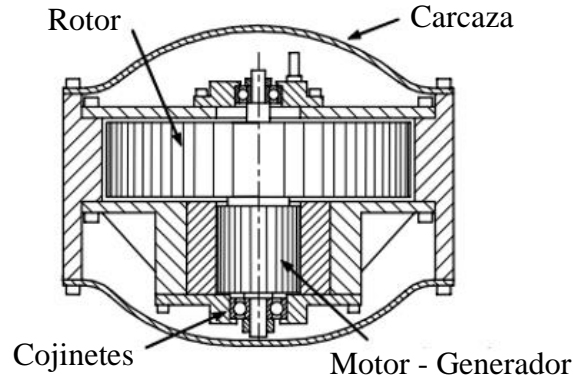


Figura I.15.- Sistema de volante de inercia [Ripoll, 2005]

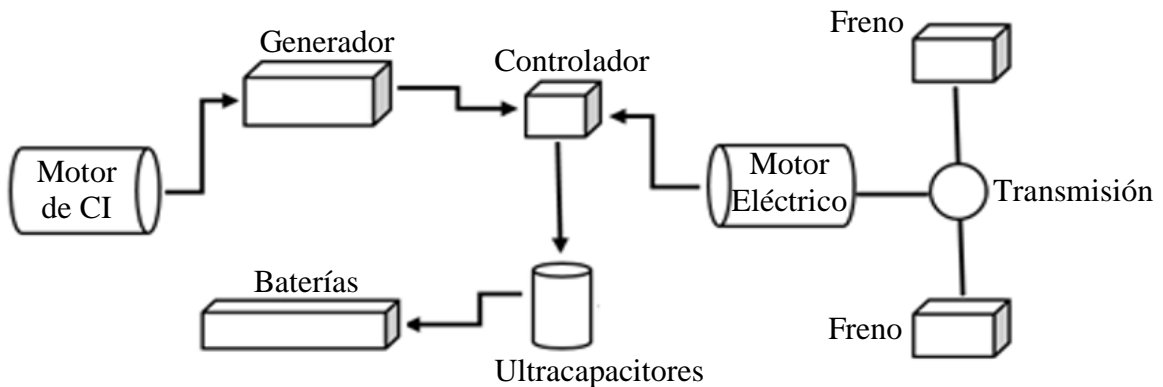


Figura I.16.- Sistema regenerativo eléctrico

- **Sistemas Hidroneumáticos.-** Este tipo de sistemas se componen de una bomba-motor hidráulica que conectada al tren motriz del vehículo y a un tanque hidroneumático. Aumenta la compresión de fluido en el tanque, almacenando la energía cinética producida en el periodo de frenado. La cual es liberada después, permitiendo la conducción del fluido y usando la bomba como motor. El sistema tiene la ventaja de almacenar y liberar energía en trayectorias muy cortas. La Figura I.17 muestra el esquema del sistema hidromecánico, donde se representa el convertidor oleoneumático

con una bomba de frenos de doble circuito y un pulmón neumático alimentado desde el circuito de aire a presión [Baquero y Hernández, 2003].

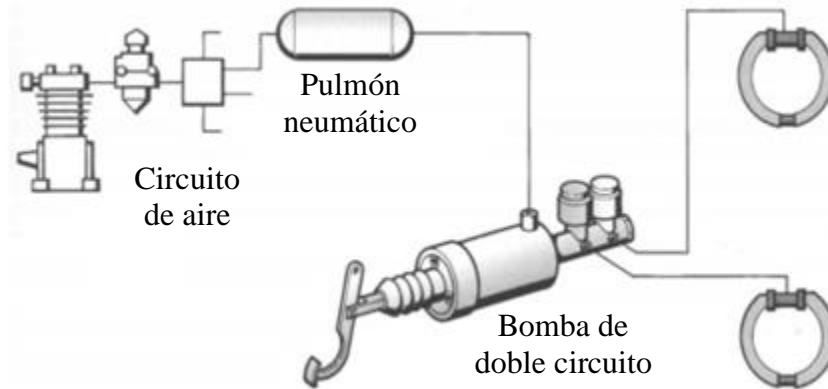


Figura I.17.- Esquema del sistema de frenos hidroneumáticos [Baquero y Hernández, 2003]

- **Sistemas *i-ELOOP Intelligent Energy Loop (regeneración de energía inteligente).***-

La compañía automotriz *Mazda*, ha desarrollado un sistema de frenado regenerativo que emplea un condensador acumulador. Este revolucionario sistema, se incorpora a los vehículos de *Mazda* a partir de 2012. El componente eléctrico que hace único al sistema es un condensador acumulador, capaz de almacenar temporalmente grandes cantidades de electricidad. Los condensadores se cargan y descargan más rápidamente que las baterías, siendo estos más resistentes ante un uso prolongado. Cuando el vehículo decelera, el *i-ELOOP* convierte su energía cinética en electricidad de forma muy eficiente. Esa electricidad se aprovecha de inmediato para alimentar el climatizador, el equipo de sonido y muchos otros dispositivos eléctricos [MAZDA, 2015].

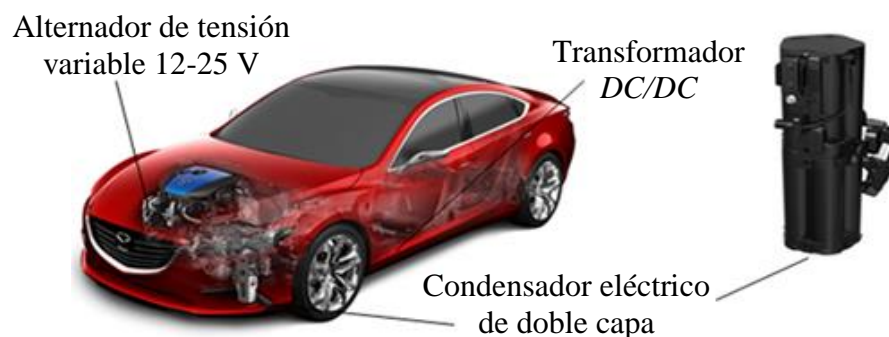


Figura I.18.- Componentes del sistema *i-ELOOP*

En condiciones de conducción reales, con frenadas y aceleraciones frecuentes, *i-ELOOP* mejora el consumo de combustible en alrededor de un 10%. A diferencia de los automóviles híbridos, este sistema no requiere de un motor eléctrico y una batería específicos. *i-ELOOP* se compone de un nuevo alternador de tensión variable de 12-25 V, un condensador acumulador de doble capa eléctrica de baja resistencia y un transformador *DC/DC* (Figura I.18). Las condiciones principales que deben cumplir los sistemas de frenado para los vehículos en condiciones de operación en alta o baja velocidad son las siguientes [Bocîi, 2001]:

- Seguridad en el funcionamiento del sistema de frenado.
- Asegurar el frenado en los límites de las deceleraciones.
- Asegurar el frenado en espacios de operación muy cortos.
- Asegurar el frenado con fuerzas de accionamiento reducidas.
- Omitir la aparición del fenómeno de auto frenado.
- Facilidad de manufactura y de bajo costo.

La eficacia del frenado no depende solo del sistema de frenos, influye también la presión de los neumáticos en el momento de la desaceleración [Senabre y colaboradores, 2010].

I.5.- Baterías

La evolución tecnológica en las baterías con el paso de los años ha desarrollado mejores características en la respuesta rápida a los cambios de energía, alto rendimiento energético y pérdida de energía baja en operación. Algunas de las baterías recargables que se consideran dentro del uso más común en los vehículos eléctricos e híbridos son [Broussely y Pistoia, 2007]:

- *Plomo-ácido (Pb-ácido)*.
- *Níquel-Cadmio (NiCd)*.
- *Níquel-Metal Hidruro (NiMH)*.
- *Ion de Litio (Li-ion)*.
- *Polimero de Litio (Li-poli)*.
- *Sodio-Asufre (NaS)*.
- *Zinc-aire (Zn-aire)*.

El avance tecnológico en las baterías para vehículos híbridos presenta dos principales desafíos, obtener porcentajes más altos de energía y reducir costos en relación con la tecnología de hoy. La batería de hidruro metálico de Níquel (NiMH) es la que usan en la producción de los híbridos, dimensionada para la demanda de energía del vehículo. Es decir, para iniciar o detener la funcionalidad, la asistencia de potencia durante la aceleración y la recuperación de energía de frenado regenerativo [Dhameja, 2002].

La vida de las baterías de *NiMH* es aproximada a 8 años o 80 000 millas adecuada para una garantía sustancial debido a que el sistema de control se asegura de que la batería tenga carga todo el tiempo. Hoy en día los autos híbridos mantienen un estado de carga dentro de un rango estrecho (aproximadamente 60% SOC, + 5%) [Department of Energy, 2007].



Figura I.19.- Paquete de baterías de *NiMH* (Foto Toyota) [Departamento de Energía, 2007]

Las baterías de *Ion-Litio* presentan un nivel de energía y potencia específica más altos en comparación con una *NiMH*. El volumen de producción es grande para el área de la electrónica, pero la fabricación para aplicaciones de vehículos en Japón es limitada (*Hitachi* produce 50 paquetes por mes para el camión híbrido *Mitsubishi Canter Eco*) [Departamento de Energía, 2007].

El *Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE)* ha desarrollado la tecnología de baterías de iones de Litio durante años en asociación con la industria automotriz, representada por

el *USABC*. Este desarrollo tecnológico incluye pruebas de referencia, evaluación de la tecnología, evaluación de las baterías de Li-Ion, paquetes y sistemas completos para los híbridos. Cinco laboratorios nacionales (*Argonne, en Berkeley, Brookhaven, Idaho y Sandia*) participan en la investigación, cada uno con sus propias áreas de experiencia para abordar la vida, el rendimiento a baja temperatura, y el costo de las baterías [Dhameja, 2002].



Figura I.20. - Pilas de Li-Ion [Departamento de Energía, 2007].

I.6.- Motor eléctrico

Los motores eléctricos de inducción son un componente clave de los vehículos eléctricos e híbridos. La máquina eléctrica ofrece una potencia o par al eje transversal para propulsar el vehículo. También procesa el flujo de potencia en dirección inversa durante la regeneración, cuando el vehículo está frenando, la conversión de energía mecánica que se produce en las ruedas en energía eléctrica. El motor eléctrico funciona en tres formas diferentes como motor, como generador y como freno. Se utiliza el término motor cuando la energía se convierte de eléctrica a mecánica, y el término generador cuando el flujo de potencia es en la dirección opuesta. Convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica. El modo de frenado en máquinas eléctricas se conoce como el frenado regenerativo [Husain, 2003].

El motor eléctrico es la única unidad de propulsión en los vehículos eléctricos. Mientras que en el híbrido eléctrico, la unión del motor eléctrico y el motor de combustión interna en una combinación en serie o en paralelo proporcionan la potencia de propulsión. Tanto en un auto eléctrico como en un auto híbrido, el motor de tracción eléctrica convierte la energía eléctrica de

la unidad de almacenamiento de energía en energía mecánica que impulsa las ruedas del vehículo [Husain, 2003].

Las ventajas de un motor eléctrico comparado con un motor de *CI*, son que el motor eléctrico ofrece un par de inercia máximo a bajas velocidades y la potencia instantánea puede ser dos o tres veces la potencia nominal del motor. Estas características dan al vehículo una aceleración excelente. Los motores eléctricos pueden ser de tipo *DC* o de tipo *AC*. Los motores de *DC* se utilizaron en los prototipos de vehículos eléctricos décadas de 1980 debido a su estado desarrollado y facilidad de control. Sin embargo, los requisitos de tamaño y mantenimiento de motores de corriente continua están haciendo de su uso obsoleto en la industria automotriz [Ehsani, 2004].

El motor sin escobilla, incluye entre sus tipos motores de inducción, motores de imanes permanentes y motores de reluctancia conmutada. En los últimos 50 años la tecnología, la investigación y las actividades de desarrollo en el motor de inducción *AC* ha tenido grandes avances. El control de motores de inducción es más complejo que los motores de *DC*. Pero con el uso de los procesadores digitales, la complejidad computacional se puede manejar fácilmente. Técnicas de control vectorial desarrolladas para motores de *AC*, permiten que el control de motores de corriente alterna sea similar a la de motores de corriente continua a través del marco de referencia y técnicas de transformación [Ehsani, 2004].

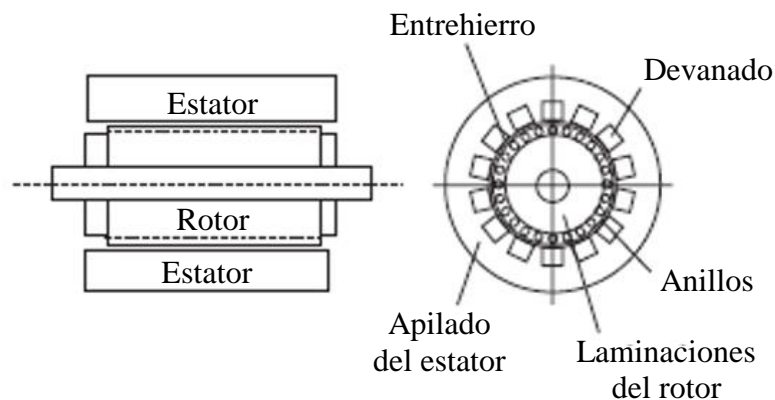


Figura I.21.- Motor de inducción [Hodkinson y Fenton, 2001]

La complejidad computacional surge de las transformaciones del marco de referencia, pero los procesadores digitales de hoy en día son capaces de completar algoritmos complejos en un tiempo relativamente corto [Larminie, 2003]. Otro tipo de motor usado en los *VH* es el motor de imán permanente. Los motores de corriente alterna de imán permanente tienen imanes en el rotor, la construcción del estator es la misma que el del motor de inducción. Estos motores pueden ser de tipo de montaje en superficie, o los imanes pueden estar empotrados en el rotor en el interior del motor, se clasifica como de tipo sinusoidal o tipo trapezoidal en función de la distribución de flujo en el entrehierro.

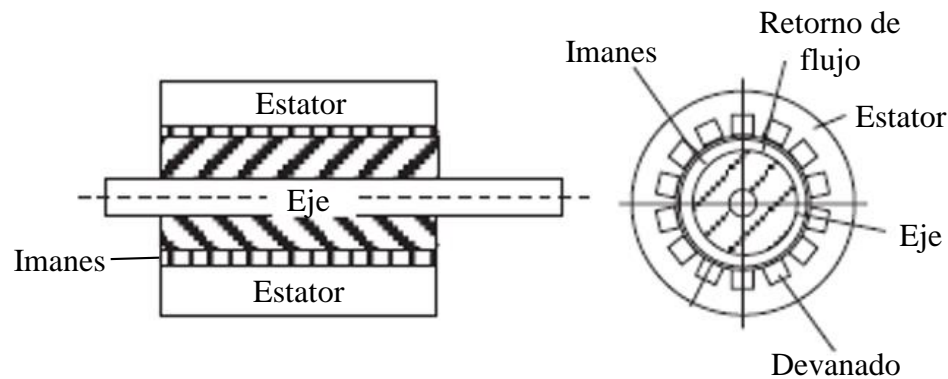


Figura I.22.- Motor de imán permanente tipo montaje [Hodkinson y Fenton, 2001]

Los motores trapezoidales tienen devanados trifásicos y son conocidos como motores de corriente continua sin escobillas. Estos motores son impulsados por un inversor de seis interruptores al igual que un motor de inducción, pero el control es relativamente más simple que el del motor de inducción. Los motores sin escobillas proporcionan una alta densidad de potencia, pero el costo es elevado [Husain, 2003]. Los vehículos híbridos generalmente usan motores más pequeños que los *VE*. El rendimiento y la eficiencia que brindan los motores imán permanente compensa el problema del costo elevado, ya que presentan excelentes características de rendimiento, superior a la de montaje en superficie, pero la complejidad de fabricación es uno de los inconvenientes de estos motores.

Otro candidato para motores de tracción es el motor de reluctancia conmutada (*RC*). Estos motores tienen excelentes características de tolerancia a fallas, y su construcción es bastante simple. Los motores *RC* no tienen bobinados, imanes, o jaulas en el rotor, lo que ayuda a

aumentar el torque y la inercia de éstos motores. Las características de par-velocidad y el rendimiento de los motores de *RC* son excelentes para su uso en vehículos híbridos [Hodkinson y Fenton, 2001].

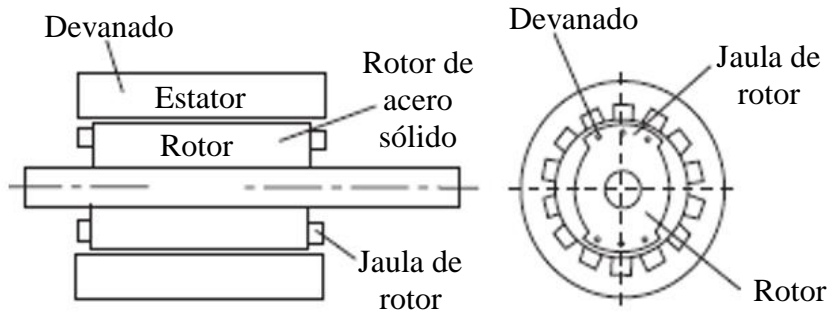


Figura I.23.- Motor de reluctancia conmutada [Hodkinson y Fenton, 2001]

Las características importantes de un motor para un *EV* o *HEV* incluyen el control de accionamiento flexible, tolerancia de falla, alta eficiencia y bajo ruido acústico. El accionamiento del motor debe ser capaz de manipular las fluctuaciones de corriente. Otro requisito importante del motor eléctrico es reducir los costos de producción. Los requisitos de un *EV* o motor *HEV*, no necesariamente en orden de importancia, son los siguientes [Husain, 2003]:

- Robustez.
- Un alto par de inercia, buena capacidad de aceleración.
- Operación a altas velocidades, fácil de controlar.
- Bajo ruido acústico, baja interferencia electromagnética, bajo costo y bajo mantenimiento.
- Extensión del rango de operación.
- Alta relación potencia-peso.
- Potencia constante en rangos largos de operación.

Los vehículos eléctricos utilizan una variedad de diferentes tipos de motores eléctricos. El motor de corriente continua se utiliza en aplicaciones tales como herramientas portátiles, juguetes,

elevadores eléctricos en automóviles, y pequeños electrodomésticos como la secadora de cabello. Sin embargo, también están siendo utilizados como motores de tracción.

El motor eléctrico clásico *CD* se muestra en la Figura I.24. Se trata de un motor de corriente continua, equipado con imanes permanentes y cepillos. Este motor tiene una bobina, y la corriente pasa a través del alambre cerca del imán produciendo una fuerza que se genera en la bobina [Larminie, 2003].

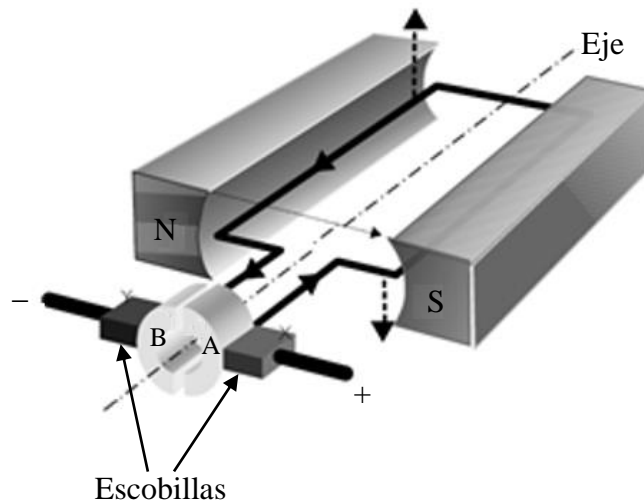


Figura I.24. - Motor de imán permanente

I.7.- Tipos de control

En la antigua Grecia, *Herón de Alejandría* (Siglo I a.C.) escribe una enciclopedia técnica en la cual se encuentran dos libros que hacen referencia al control autónomo los cuales son *Pneumática* y *Autómata*. En el primero describe varios sistemas realimentados y en el segundo presenta complicados aparatos que ejecutan un programa fijo [Strandh, 1989].

En el libro de *Pneumática* se encuentran los dispensadores de vino, uno de los primeros sistemas realimentados de la historia. En la Figura I.25 se muestra el diseño del dispensador. El cual mantenía el volumen de vino constante por medio del principio de los vasos comunicantes. El vino era servido desde un recipiente *a* que se conectaba con otro recipiente *c* por medio de un vaso comunicante. Cuando se servía vino de *a* el nivel de *c* bajaba y el flotador *d* abría la válvula.

El vino caía dentro de *c* procedente del depósito *e* hasta que el nivel del líquido en *a* y *c* ocasionaba que el flotador (sensor) volviera a tapar la válvula.

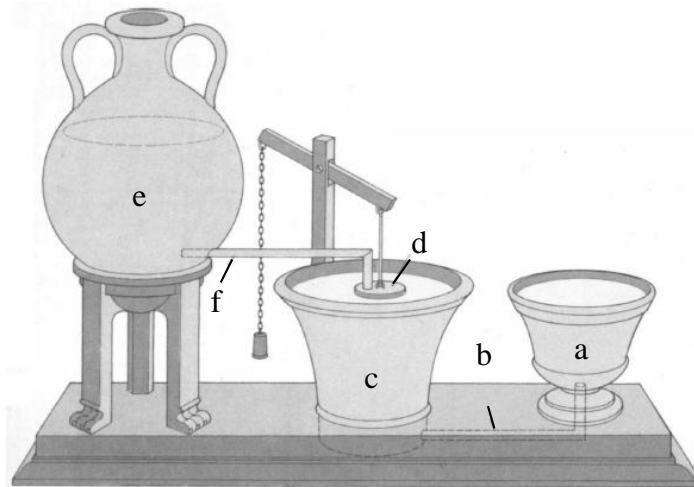


Figura I.25.- Dispensador automático de vino

En el Siglo III antes de *Cristo* en la antigua Grecia, *Ktesibios* diseña una *Clepsydra*, también conocido como reloj de agua. El objetivo de las *Clepsydras* consistía en subir el nivel del agua a una velocidad constante, por medio de un flotador que regulaba el caudal de agua a un depósito auxiliar que mantenía un nivel constante para la salida del caudal al depósito principal [Otto, 1970].

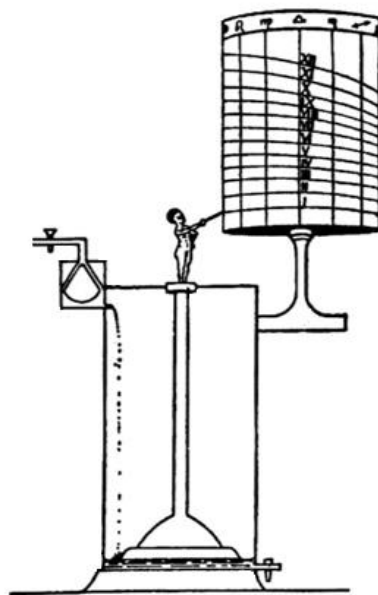


Figura I.26.- Reloj de agua de *Ktesibios*, reconstruido por *H. Diels* [Otto, 1970]

Platón fue uno de los primeros en realizar una función automática en un reloj de agua, con el propósito de despertar a sus alumnos de la academia fundada por él, en 378 a.C., ya que tenían ciertas dificultades para levantarse por la mañana. Diseña un sistema de alarma asistido por una *Clepsydra*, En el vaso de la *Clepsydra* se ubicó un flotador encima del cual se depositan unas bolas. Durante la noche se llenaba el vaso y al amanecer alcanzaba su máximo nivel. Las bolas caían sobre un plato de cobre. Es de suponer que ante el ruido de las bolas los alumnos terminarían por levantarse [*Strandh, 1989*].

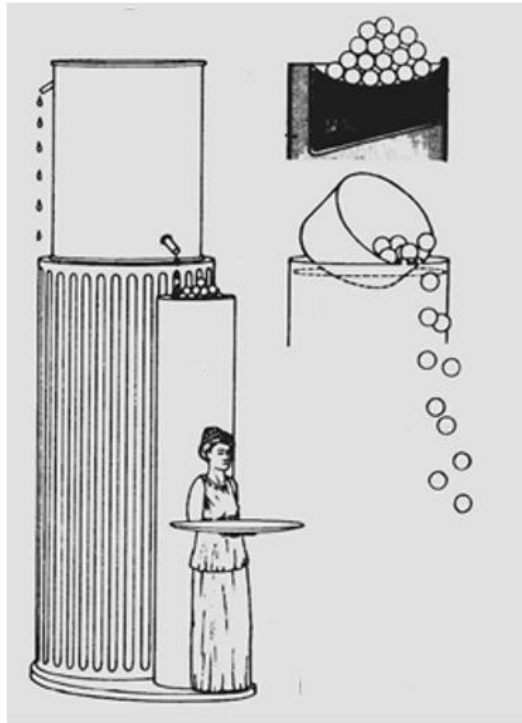


Figura I.27.- Alarma de *Platón* (*Clepsydra*)

Philon de Bizancio, desarrollo para una lámpara de aceite un sistema de regulación (Figura I.28), su funcionamiento consistía en recargar el depósito de aceite de forma autónoma, al consumirse el aceite del depósito de la base de la lámpara, entra aire a través de *b* el cual conduce el aceite a través de *d*. En cuanto el depósito se llene dejará de entrar aire en *a* y dejará de salir aceite por *d*. El control automático ha sido un eslabón de gran importancia en el desarrollo tecnológico de la Ingeniería, ya que es parte fundamental de los procesos industriales de producción y manufactura. El control es un campo amplio para la innovación de sistemas que cubran las necesidades de las industrias obteniendo un funcionamiento óptimo y seguridad en los sistemas dinámicos.

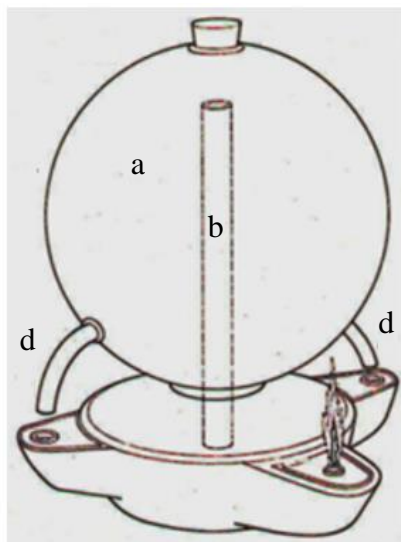


Figura I.28.- Lámpara de *Philon*

En 1770 *James Watt* desarrolla un regulador centrífugo con realimentación automática usado en un proceso industrial para controlar la velocidad de una máquina de vapor, el primer sistema de control automático [UCLM 2009].

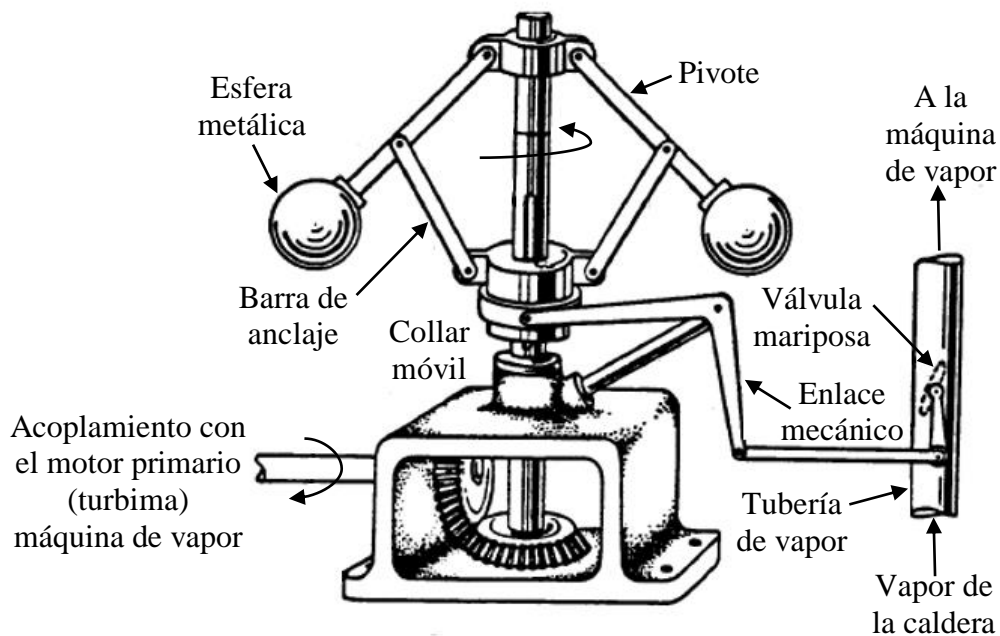


Figura I.29.- Regulador centrífugo de *James Watt*

En la industria textil del Siglo XVIII, cuando *Joseph Jacquard* inventa en 1801 una máquina textil programable mediante tarjetas perforadas. La revolución industrial impulsó el desarrollo de los sistemas de control al introducir agentes mecánicos, entre los cuales se destacaron el torno mecánico motorizado de *Babbitt* (1892) y el mecanismo programable para pintar con *spray* de *Pollard y Roselund* (1939). Además durante los Siglos XVII y XVIII fueron construidos en Europa ingeniosos muñecos mecánicos que tenían algunas características de robots [López, 2009].

El 16 de junio de 1903, *Ford Motor Company* inicia su trayectoria en una pequeña fábrica de vagones en Detroit, con *John S. Gray* como presidente y *Henry Ford* como vicepresidente. El primer coche lo venden en julio de 1903, el *modelo A* de dos litros, ensamblado en la planta de *Mack Avenue* en Detroit. En 1913, *Henry Ford* automatiza la línea de ensamblaje de su compañía de automóviles teniendo trenes de producción establecidos, el sistema implantado redujo el tiempo de producción de un automóvil, su costo y la cantidad de personal para producirlo [Ford, 1992].



Figura I.30.- Línea de ensamblaje *Ford Motor Company*

En 1927, *H. W. Bode* analizó los primeros amplificadores retroalimentados y en 1932 *H. Nyquist* desarrollo un método para el análisis de la estabilidad de los sistemas. El desarrollo de controladores numéricos para el control de los ejes de máquinas, se realizó en el *MTI*

(Massachusetts Institute of Technology) en 1952. En el desarrollo de la teoría de control surgen a finales de la década de los cuarenta el método del modelo de *Truxal* y el método del lugar de las raíces de *Evans*. El método del modelo no utiliza la técnica de prueba y error, consistía en obtener la función de transferencia con las especificaciones deseadas por medio de operaciones algebraicas. Pero tenía algunas dificultades como la complejidad de los correctores que se obtenían dejaban de tener la estructura clásica *PID* [*Truxal, 1954*].

El método de las raíces de *Evans* permite estimar las variaciones en los parámetros de estabilidad y el comportamiento dinámico del sistema. Los trabajos realizados por *Evans* realizan una contribución importante en la teoría de control [*Thaler, 1974*]. Los cuales son:

- *Graphical Analysis of Control Systems* [*Evans, 1948*].
- *Control System Synthesis por Root Locus Method* [*Evans, 1950*].

El lugar de las raíces determina todas las raíces de la ecuación diferencial de un sistema de control por medio de una representación gráfica, la cual permite una síntesis rápida de la respuesta transitoria o frecuencial deseada.

En la década de los 70s los sistemas de control empiezan a utilizar las variables de estado, siendo un paso claro para el desarrollo de la ingeniería de control. Las aplicaciones en la industria automotriz, la industria química, la electricidad, procesos biológicos e incluso para la economía, para la educación y las ciencias sociales eran de uso común [*López, 2009*].

En 1994, la Mecatrónica se volvió de uso común en los automóviles. Actualmente, conceptos como control estocástico, control inteligente (difuso y neuronal), control por modos deslizantes y control adaptivo son ampliamente usados en el campo de la ingeniería de control. El aspecto más importante de un sistema es el conocimiento de su dinámica. Es decir, cómo se comporta la señal de salida frente a una variación de la señal de entrada. Un conocimiento preciso de la relación entrada/salida permite predecir la respuesta del sistema y seleccionar la acción de control adecuada para mejorarla. De esta manera, el diseñador, conociendo cuál es la dinámica deseada, ajustará la acción de control para conseguir el objetivo final frente a perturbaciones externas del

sistema [López, 2009]. La automatización de un sistema se obtiene por medio del control retroalimentado. Este tipo de control al cual se le denomina ingeniería de control, no solamente realiza acciones en lugar del ser humano, sino que también a partir de parámetros establecidos, vigila que se ejecuten de cierta forma y bajo ciertas condiciones [Ogata, 2003]. El control clásico tiene varios tres tipos de control:

- Control proporcional.
- Control difuso.
- Control integral.

Estos controles pueden unirse para crear un sistema apto y preciso de acuerdo a las necesidades del problema. El control proporcional se basa en establecer una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control. El control proporcional integral *PI*, disminuye el tiempo de subida, incrementando el sobre-impulso y el tiempo de estabilización. Tiene el efecto de eliminar el error de estado estable pero empeorará la respuesta de salida. El control proporcional derivativo *PD*, reduce el sobre impulso y el tiempo de estabilización. Por lo cual, tendrá el efecto de incrementar la estabilidad del sistema mejorando la respuesta del sistema. El controlador proporcional integral derivativo *PID*, utiliza una realimentación de bucle cerrado, tiene una acción proporcional al error entre la salida y el valor deseado, corrige el error permanente y mejora la respuesta de salida. Los controles de lógica difusa, a la vez que permiten la sintonización numérica y automática de controladores difusos a partir de datos de entrada y salida del sistema a controlar. También permiten traducir a lenguaje matemático el conocimiento de tipo lingüístico de un experto humano [Ogata, 2003].

I.8.-Planteamiento del problema

De lo establecido en el estado del arte, se puede apreciar la necesidad de desarrollar el análisis de un sistema de freno regenerativo mediante sistemas de control moderno capaces de dar el balance correcto entre autonomía y estabilidad con la finalidad de obtener un funcionamiento óptimo en el control del sistema de frenado. El problema es encontrar la estrategia correcta para cumplir con los objetivos del control, ya que depende de los factores de linealidad, estabilidad, observabilidad, entre otros, que se presentan en el sistema (planta) a controlar. El control

inteligente ha venido ganando campo entre los controles Proporcional, Integral, derivativo o la combinación de estos (*Control Clásico*). Los cuales se utilizan para resolver problemas de sistemas lineales. Y entre el control de variables de estado para los sistemas no lineales que presentan varias entradas y salidas en la planta. En este trabajo se presenta la combinación de las técnicas de control moderno, que permitirá realizar el análisis y encontrar las estrategias para la elaboración del sistema de control del freno regenerativo permitiendo mantener la velocidad, el frenado y la generación de energía eléctrica estable. El análisis y la simulación del sistema de control se realizará mediante *Matlab/Simulink*[®].

I.9.- Sumario

En los últimos años se han realizado esfuerzos en la investigación de vehículos híbridos eléctricos, para aumentar la eficiencia de las baterías que alimentan al motor eléctrico del auto. Se han diseñado diversos dispositivos para lograr un mayor rendimiento eléctrico, el cual es uno de los problemas más importantes de los vehículos eléctricos. Uno de estos dispositivos es el uso de sistemas de frenado regenerativo, los cuales pueden ser mecánicos, hidráulicos y eléctricos. Éstos transforman la energía cinética del vehículo en energía eléctrica durante el frenado con el fin de mejorar la eficiencia eléctrica del coche durante su operación. La aceptación y el éxito de un vehículo híbrido depende en gran parte de la eficiencia, autonomía y funcionalidad del auto, una parte importante es la delicadeza de los cambios de transición en el modo de operación, es decir cuando el auto debe de operar sin problemas y las funciones deben acoplarse y desacoplarse sin sacudidas, temblores o espasmos lo cual depende del sistema de control. Esto le da al conductor una experiencia de operación agradable. El control ha evolucionado desde la *Segunda Guerra Mundial*, la cual abrió nuevos horizontes para la teoría y la práctica del control teniendo un enorme apoyo y avance por el desarrollo de las computadoras. La investigación de nuevos sistemas abre diferentes caminos para el control de sistemas híbridos.

I.10.- Referencias

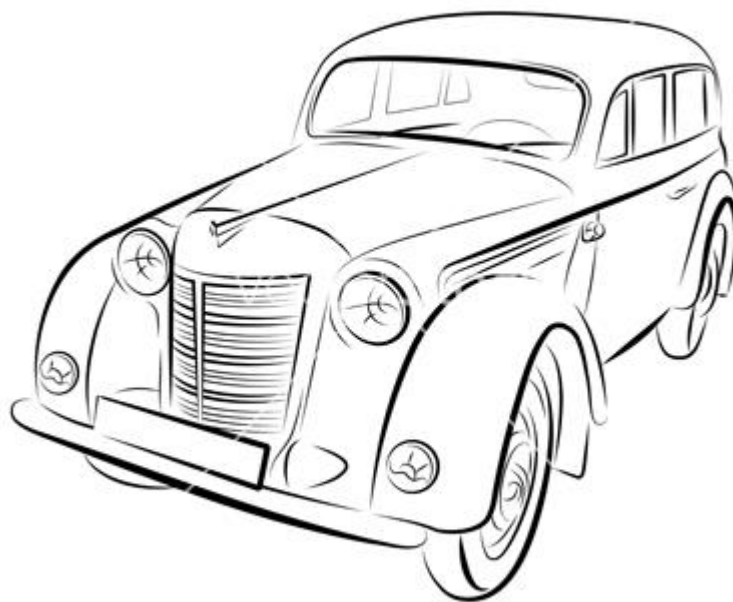
Bocîi, L., *Parámetros de Análisis de los Sistemas de Frenada*, pp 1, 2001.

Bonilla-Mota, G., *Historia de la Ingeniería de Control*, Ed. Universidad Anáhuac México Sur, 2010.

- Broussely, M. y Pistoia, G., *Industrial Applications of Batteries*, 1ra Edición, Ed. Elsevier, pp 1-117, 2007.
- Castillo J. y Cabrera, *Estimación de Parámetros en Sistema de Frenado*, pp 1-2, 2012.
- Castro, J., Baquero-Lema, V. F. y Hernández-Solís, C. F., *Diseño y Construcción de un Sistema de Frenos Hidroneumático (Air-Pack)*, Ed. Latacunga, 2003.
- Dávalos-Romero, D. A. y Romero-Rengifo, M. J., *Diseño e Implementación del Freno Regenerativo para un Vehículo Eléctrico*, Tesis Licenciatura, Escuela Politécnica Nacional, pp 1-3, 2013.
- Dhameja, S., *Electric Vehicle Battery System*, Ed. Butterworth–Heinemann, pp 4-18, 2002.
- Ehsani, M., Gao, Y. y Emadi, A., *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*, 2^{da} Edición, Ed. CRC Press Taylor & Francis Group, Second edition, pp 106, 2010.
- Evans, W., Control system synthesis by root locus method, *Trans AIEE*, Vol. 69, pp.1-4, 1950.
- Evans, W., Graphical analysis of control systems, *Trans AIEE*, Vol. 67, pp 547-551, 1948.
- Ford, H. y Crowther, S., *My Life and Work*, Ed. Doubleday, Page & Co, pp 25, 1992.
- Friedman, D., *A New Road; The Technology and Potential of Hybrid Vehicles*, Ed. Union of Concerned Scientists, pp 5 y 19, 2003.
- Fuhs, A., *Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation*, Ed. CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 19-20, 2009.
- Gama, A. y Tovar, R., *Análisis del Sistema de Frenado para un Vehículo Arenero*, pp 10-11, 2009.
- González-Calderón, A., *Prueba y Evaluación de un Sistema de Frenos Regenerativo Hidroneumático*, Tesis de Maestría, UNAM, pp 6-10, 2006.
- Guevara, R., *Freno Regenerativo en Automóviles para Uso Híbrido*, Tesis, México D.F., pp 23, 2014.
- Hodkinson, R. y Fenton, J., *Lightweight Electric/Hybrid Vehicle Design*, Ed. Butterworth-Heinemann, pp 17-18, 156 y 162, 2001.
- Hoogma, R., Kemp, R., Schot, J. y Truffer, B., *Experimenting for Sustainable Transport*, pp 41-42, 2002.
- Husain, I., *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*, Ed. CRC Press LLC, pp 1-8, 116-121, 243-246, 2005.
- Hybrid Center, 2007.

- Larminie J. *Electric Vehicle Technology Explained*, Ed. Oxford Brookes University, pp 1-31, 2003.
- López, L., *Modelación y Simulación Dinámica de un Brazo Robótico de 4 Grados de Libertad para Tareas sobre un Plano Horizontal*, Tesis, pp 1-7, 2009.
- MAZDA, <http://www.mazda.es/noticias/tecnologia/sistema-de-frenada-regenerativa/>, 2015.
- Ogata, K., *Ingeniería de Control Moderna*, 2003.
- Otto, M., *The Origins of Feedback Control*, Ed. M. I. T. Press, 1970.
- Pedretti, C., *Leonardo; Le Macchine*, Ed. Giunti, pp 81, 1999.
- Ripoll, L., *Análisis y Diseño de Volantes de Inercia de Materiales Compuestos*, Tesis, pp 1-3, 2005.
- Senabre, C., Velasco, E. y Valero, S., Análisis de datos de frenada de un vehículo sobre banco de rodillos de ITV y suelo plano variando el peso en el eje delantero y la presión de los neumáticos, *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, pp 13, 2010.
- Sperling, D., *Electric Vehicles and Sustainable Transportation*, Ed. Island Press, pp 36-39, 1995.
- SRAM, *Descripción de los Frenos de Disco Hidráulicos*, pp 3-5, 2013.
- Strandh, S., *The History of the Machine*, Ed. Bracken Books, 1989.
- Thaler, G., *Automatic Control; Classical Linear Theory*, Ed. Stroudsburg, 1974.
- Torres, D. y Hernández, J., *Diseño y Análisis Estructural de un Automóvil Híbrido Eléctrico mediante MEF*, 2012.
- Truxal, J., *Feedback Theory and Control System Synthesis*, Ed. McGraw Hill, 1954.
- U.S. Departamento de Energia. *Energy Efficiency and Renewable Energy*, Plug Hybrid Electric Vehicle, Washington, DC pp 5. 2007.
- Wakefield, E. H., *History of the Electric Automobile Battery-Only Powered Cars*, Transportation Research Board of the National Academies, 1993.

CAPÍTULO II



MARCO TEÓRICO

II.1.- Introducción

En este capítulo se seleccionará el tipo de vehículo híbrido, el sistema de frenado y el sistema de control con los cuales se trabajará para la realización de este proyecto de investigación. Se describirá de manera específica el funcionamiento de cada uno de los sistemas. Así como, los componentes que los constituyen.

Es necesario recordar cuando se considera el impacto energético de los vehículos eléctricos, que con los vehículos convencionales de motor de combustión interna (*CI*), también se puede utilizar la energía sustentable. Un ejemplo de esto se da en Brasil, donde se sustituye la gasolina por etanol (la cual está hecha de caña de azúcar). Cerca de 14 mil millones de litros de etanol anualmente se producen para este propósito. Los vehículos con motores de combustión interna modificados también podrían funcionar de hidrógeno, aunque el proceso de combustión todavía causa algunos contaminantes. Como la eficiencia de pilas o celdas de combustible es mayor que la de los motores de *CI*, es probable que las células de combustible eventualmente se convertirán en la opción perfecta [Larminie, 2003].

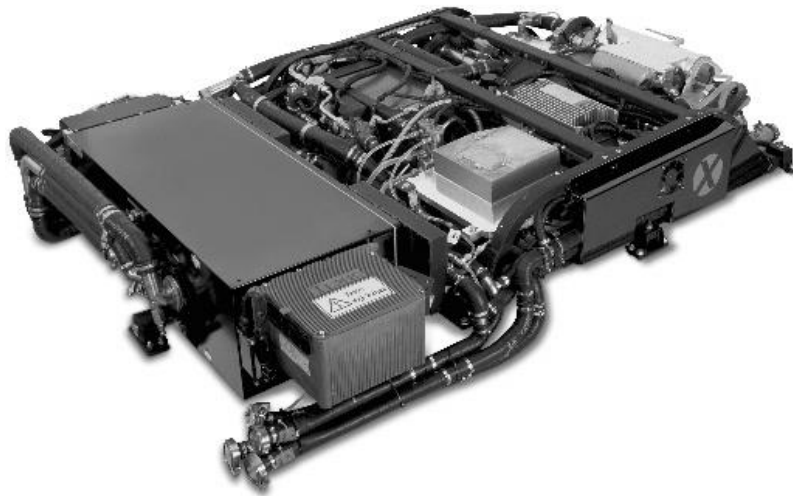


Figura II.1.- Sistema de pila o celdas de combustible

Bio-diesel es otra fuente de combustible sustentable para motores de combustión interna. Se genera a partir de los ésteres de aceites vegetales, tales como aceite de palma o aceite de oliva. La eficiencia de los vehículos de motor de *CI*, junto con la tranquilidad y la limpieza de sus tubos de escape, mejoran todo el tiempo, pero es un factor de algunas de las críticas para los vehículos convencionales. Esto debe tenerse en cuenta cuando se comparan con los vehículos eléctricos

[Larminie, 2003]. Este trabajo de investigación se realizará tomando en cuenta las características del vehículo híbrido en serie y de un sistema de frenos disipativo por la sencillez y la eficiencia que presentan al modificar los sistemas, haciéndolos favorables para el desarrollo de la investigación.

II.2.- Vehículos híbridos

Ferdinand Porsche y *Ludwig Lohner* son considerados como los pioneros de los autos híbridos, en el año de 1899 fabrican los primeros vehículos híbridos eléctricos (Figura II.2). [Anderson y Anderson, 2004]. En el año de 1897 *Justus B. Entz* puso interés en los autos híbridos construyendo un auto petro-eléctrico, cuando era jefe de Ingeniería de la *Electric Storage Battery Company* de Filadelfia [Wakefield, 1998].



Figura II.2.- Auto híbrido de *Ferdinand Porsche* y *Jacob Lachner*

La tecnología híbrida se utiliza después en el desarrollo de los submarinos diésel-eléctricos. Siendo el objetivo principal de los submarinos, la conservación del oxígeno sin importar el gasto del combustible. Los cuales funcionan de forma similar que un automóvil híbrido. Con el paso del tiempo, los submarinos han evolucionado sustituyendo la gasolina por la energía [Herrera-Cuntti, 2006]. En el año de 1905, *Piper* es uno de los primeros en patentar un auto híbrido [Wakefield, 1998].

En la Figura II.3 se muestra un camión híbrido llamado camión escalera, el cual entra en circulación en el año de 1914 [Ehsani y asociados, 2010]. Otro ejemplo de vehículo híbrido es el

Owen Magnetic Modelo 60 Touring (Figura II.4), se presenta en el año de 1921. Este auto está constituido por dos motores eléctricos montados en cada una de las ruedas y un motor de gasolina que funciona como generador suministrando energía eléctrica a los motores eléctricos [Hall, 2005].



Figura II.3.- Camión escalera híbrido de 1914



Figura II.4.- El *Owen Magnetic Modelo 60* de 1921

II.3.- Vehículo híbrido en serie

En este tipo de vehículos, el motor de combustión interna se encarga de accionar un generador (motor generador), el cual alimenta de energía eléctrica a un motor eléctrico. El motor eléctrico proporciona la potencia para la propulsión del vehículo, ya que está conectado a las ruedas. Las baterías al igual que el generador suministran electricidad al motor eléctrico y son recargadas

tanto por el motor generador como por la recuperación de energía por medio del sistema de frenado regenerativo. Otro elemento del sistema es el controlador y determina la distribución establecida de energía entre las baterías y el motor generador [Friedman, 2003].

El arreglo de las transmisiones en serie (Figura II.5) en los vehículos híbridos eléctricos, son las más simples en este tipo de autos, porque el motor de combustión interna no está acoplado a las ruedas, siendo el motor eléctrico el único elemento que impulsa las ruedas por lo que puede operar con una excelente eficiencia, sin el requerimiento de un embrague o una transmisión de múltiples velocidades, lo que permite utilizar motores de combustión interna más pequeños [Miller, 2004].

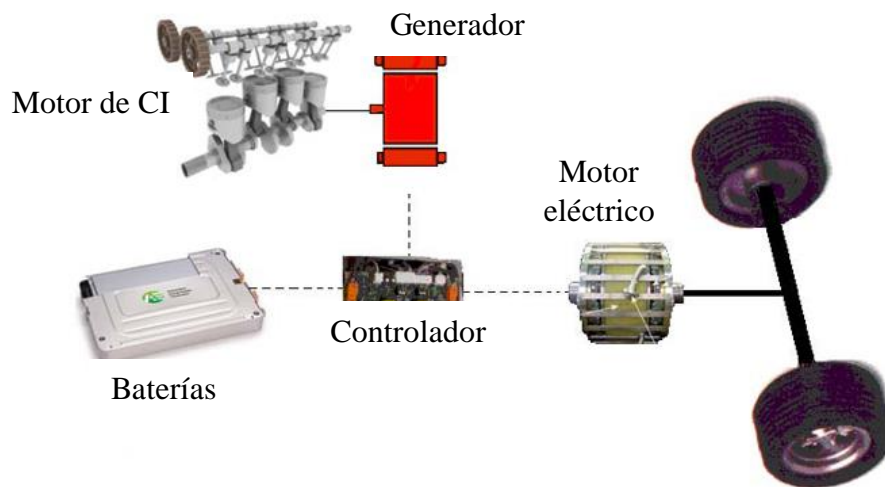


Figura II.5.- Transmisión en serie del vehículo híbrido

El hecho de usar motores de *CI* más pequeños, trae como consecuencia utilizar grandes paquetes de baterías, en comparación con los motores a gasolina las baterías y motores eléctricos tienen un costo mayor y producen la misma cantidad de energía, esto ocasiona que los autos híbridos en serie sean más caros que los autos híbridos en paralelo [Friedman, 2003].

El tren motriz en serie presenta ineficiencias en condiciones de alta velocidad, debido a la conversión de la energía mecánica del motor de combustión interna en electricidad, el almacenamiento de esta y la transformación de energía eléctrica en energía mecánica por parte del motor eléctrico. Los híbridos en serie emplean motores eléctricos de corriente directa, estos

motores son potentes, pero, son robustos y pesados, razón por la cual, la mayoría de los autos híbridos en serie, se utilizan más en autobuses u otros vehículos de carga. Actualmente algunas ciudades del mundo los vehículos híbridos han probado ser amigables con el medio ambiente y tener un alto rendimiento de combustible, los híbridos presentan características importantes que han llamado mucho la atención de los consumidores [Husain, 2005]:

- Mejor rendimiento.
- Capacidad eléctrica adicional.
- Excelente torque a baja velocidad.
- Reducción de ruido y vibraciones.
- Capacidad eléctrica hasta 220 volts.
- Reducción del mantenimiento básico en los componentes mecánicos del vehículo.
- Ahorro de combustible.

Estos autos son silenciosos cuando no están en movimiento y muchas de sus ventajas están en la recuperación de energía en las desaceleraciones. Algunas desventajas de estos vehículos es que tienen mayor peso que un coche convencional porque hay que sumar el peso del motor eléctrico y de las baterías, además son más complejos y más caros que los convencionales.

II.4.- Ventajas y desventajas del vehículo híbrido en serie

A continuación se mencionan algunas de las ventajas y desventajas del vehículo híbrido. Las ventajas de la configuración en serie de un vehículo híbrido son las siguientes [Husain, 2005]:

- Montaje sencillo del motor de combustión interna y el generador.
- Fácil configuración del tren motriz.
- Gran eficiencia en trayectorias cortas.

Las desventajas de un vehículo híbrido con tren motriz en serie son [Husain, 2005]:

- Pérdida de potencia en el motor eléctrico en condiciones forzadas como subidas pronunciadas.

- Descarga rápida de baterías, lo que provoca que el motor de combustión interna se encargue de suministrar toda la energía a través del generador, impidiendo los viajes largos y también sin sostener el vehículo a altas velocidades.
- El peso del auto es mayor a consecuencia del gran tamaño del motor eléctrico y los paquetes de baterías.

II.5.- Sistema de frenado regenerativo

El frenado regenerativo permite recuperar la energía cinética de un vehículo transformándola en energía eléctrica durante la desaceleración, lo que permite reducir el desgaste en las partes mecánicas del sistema de frenos, cargando las baterías por tiempo prolongado y aumentar la autonomía del vehículo. En esta etapa se describe el sistema de frenado regenerativo con los sistemas que lo integran en base a la energía cinética acumulada en el frenado, comparando la masa del vehículo con el sistema de frenado. Donde el sistema de frenado a utilizar será el de un freno disipativo [*Friedman, 2003*].

El sistema de frenado debe ser eficiente y detener el vehículo en un tiempo y distancia mínimos, ofrecer estabilidad en el automóvil al frenar y ser proporcional a la presión que ejerce el conductor al accionar el sistema.

II.5.1.- Motor de combustión interna

El motor de combustión interna es un motor térmico que utiliza combustible, como líquido para generar trabajo. Los motores térmicos son dispositivos que convierten el calor en trabajo en base a ciclos. Cada ciclo en el motor térmico convierte la energía térmica en trabajo útil por medio de una serie de procesos. Para el diseño de un motor térmico están involucrados diferentes tipos de ciclos (el ciclo *Otto* y el *Atkinson*). El motor de combustión interna usa ciclos de calor que le ayudan a ganar energía durante la combustión del líquido dentro del motor [*Husain, 2005*].

En los vehículos híbridos se emplean dos tipos de motores de combustión interna, el motor de ignición por chispa y el motor de ignición por compresión. Los dos motores son comúnmente conocidos como motor a gasolina y motor a diésel, esto de acuerdo al tipo de combustible utilizado para la combustión. La diferencia entre estos motores es el método de cómo inicia la combustión [*Hereward-Westbrook, 2001*].



Figura II.6.- Motor diésel-eléctrico

En el motor de combustión interna la ignición se da por la chispa, se produce una mezcla de aire y combustible y una bujía se encarga de iniciar el ciclo térmico con pequeña chispa. En el motor a diésel la ignición se da a través de la compresión, el aire se comprime a altas presiones, lo que genera el calentamiento del mismo, y así la combustión comienza espontáneamente cuando más tarde el combustible es inyectado [Ehsani y asociados, 2010]. La siguiente Tabla, muestra el arreglo de los cilindros en un motor de combustión interna, en los vehículos, misma que se emplean en los vehículos híbridos.

Tabla II.1.- Posición de motor por número de cilindros

Número de cilindros	Arreglo de los cilindros
3	En línea
4	En línea
5	En línea
6	En línea y en V (60° y 90°)
8	En V (90°)
10	En V (90°)
12	En V y W (para autos exóticos)

II.5.2.- Sistema de freno disipativo

Este tipo de sistema de frenos no permite recuperar la energía cinética generada durante el frenado, sino que como su nombre lo indica, disipa la energía en forma de calor y ruido. En el presente trabajo se usará en combinación con el sistema de frenos regenerativos, el cual está integrado por un sistema mecánico y un sistema eléctrico [Friedman, 2003]. La eficiencia del sistema de frenado en un vehículo depende de diversos factores como:

- Las condiciones de la carretera (textura, temperatura, presencia de agua, grava. etc.).
- La velocidad.
- La capacidad de adherencia del neumático (para adherirse a la carretera).
- El peso del auto.

Durante el frenado, al accionar el pedal de freno la rotación de las ruedas se ve afectada por las siguientes consecuencias [Abuin-Parga y colaboradores, 2000]:

- Frenadas violentas.
- Bloque de las ruedas delanteras.
- Dificultad para mantener el control sobre la dirección del vehículo.
- Pérdida de estabilidad en el auto.
- Desgaste irregular de los neumáticos.

El sistema antibloqueo de frenos (*ABS*) es la solución para impedir el bloqueo de las ruedas durante el frenado, permitiendo tener control y estabilidad en el vehículo. El *ABS* está compuesto por cuatro elementos [Abuin-Parga y colaboradores, 2000]:

- Bomba.- Tiene la función de recuperar la presión en los frenos, cuando se libera mediante las válvulas.
- Sensor de velocidad.- Colocado en las ruedas del auto o en el diferencial, determina cuando la rueda está a punto de bloquearse.
- Válvulas.- Cada línea de líquido de frenos tiene una válvula, su función es presurizar o liberar presión en cada una de las ruedas.

- Controlador.- Es una computadora que recibe señales de los sensores de velocidad de las ruedas, las cuales hacen funcionar a las válvulas.

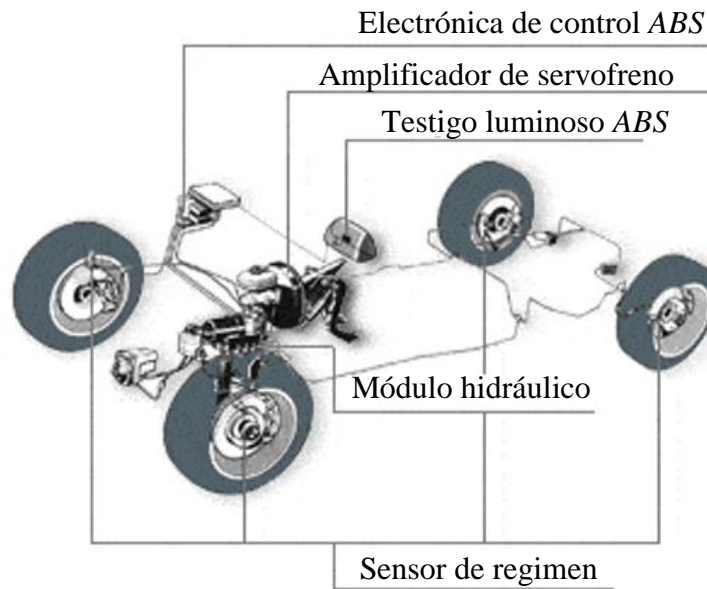


Figura II.7.- Sistema ABS

El sistema antibloqueo actúa sobre la fuerza que ejerce el frenado en los tambores de freno, reduce la fuerza aplicada y minimiza su deslizamiento, adhiriendo las ruedas al pavimento durante el frenado deteniendo al vehículo con estabilidad en una menor distancia. Esto ocurre en el momento en el que el sistema detecta una diferencia extraordinaria de velocidad en alguna de las ruedas [Abuin-Parga y colaboradores, 2000].

II.6.- Sistema mecánico del frenado regenerativo

El funcionamiento del sistema mecánico inicia cuando se presiona el pedal de freno, dando paso a el sistema hidráulico para inyectar fluido por medio de una tubería en el cáliper, la presión que genera sobre los pistones que se encuentran en el interior del cáliper empujan a las balatas, que harán contacto con los discos provocando fricción entre ellos, esto generará la energía cinética que el sistema necesita para transformarla en energía eléctrica. La cual realimentará al motor eléctrico y cargará las baterías para un funcionamiento eficaz y controlado [Friedman, 2003].



Figura II.8.- Disco de freno

La presión equilibrada en ambas caras del disco no permite que se genere reacción sobre el eje (delantero o trasero) del vehículo, las presiones son axiales y no producen deformaciones de la superficie de frenado. Por causa de las altas temperaturas producidas por el frenado y el rodamiento, se presenta un fenómeno llamado desvanecimiento, en donde el coeficiente de rozamiento disminuye la eficiencia del freno por los lapsos prolongados y continuos en el frenado, generando fallas en el sistema de frenado [Abuin-Parga y colaboradores, 2000].

En el funcionamiento de las pastillas o balatas de freno existen dos tipos de fricción; fricción adhesiva y fricción abrasiva. La fricción adhesiva deposita una fina capa de material de la pastilla al rotor, al aplicar los frenos se crean enlaces moleculares, generando la fricción. Si se genera uniformidad en la capa de material de las pastillas, provocará exceso de ruido y el comportamiento de frenado será irregular [Gama, 2009].

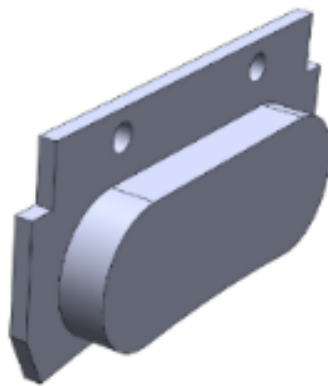


Figura II.9.- Balata o pastilla de freno

La fricción adhesiva depende del tipo de material con que está fabricada la balata. La fricción abrasiva se da por la ruptura de la superficie de las balatas, y del rotor. El material de las pastillas es diseñado para crear una interfaz con el material del rotor, La contribución de este factor a la fricción total es secundaria, pero es la que más influye en el desgaste del rotor. El cáliper o pinza de freno se encarga de controlar y soportar las pastillas generando la fricción contra el disco cuando se aplica la presión del fluido al sistema. La pinza es uno de los elementos primordiales del sistema de freno, permite que la balata, entre en contacto con el disco, de forma inmediata mediante los retenes del pistón del cáliper y el sistema hidráulico, produciendo un frenado continuo y eficaz. En la Figura II.10 se muestran los elementos que integran el sistema mecánico del freno regenerativo [Gama, 2009].

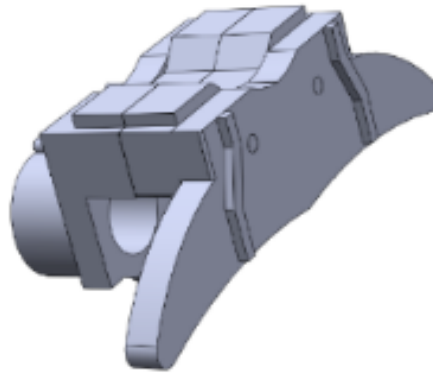


Figura II.10.- Cáliper

II.7.- Fuerza total de tracción

Para realizar el modelo matemático del sistema es necesario saber características esenciales del sistema como la fuerza total de tracción, velocidad angular, momento de inercia de los componentes rotativos entre otros. El primer paso en el análisis dinámico del vehículo es encontrar la fuerza total de tracción. Esta es la fuerza que impulsa el vehículo hacia adelante, la cual es transmitida al suelo a través las ruedas de tracción, lo que determinara el valor de la energía cinética que se acumula en el sistema. [Larminie, 2003].

La fuerza total de tracción, se obtiene encontrando el valor de las siguientes fuerzas que están involucradas en el movimiento del auto.

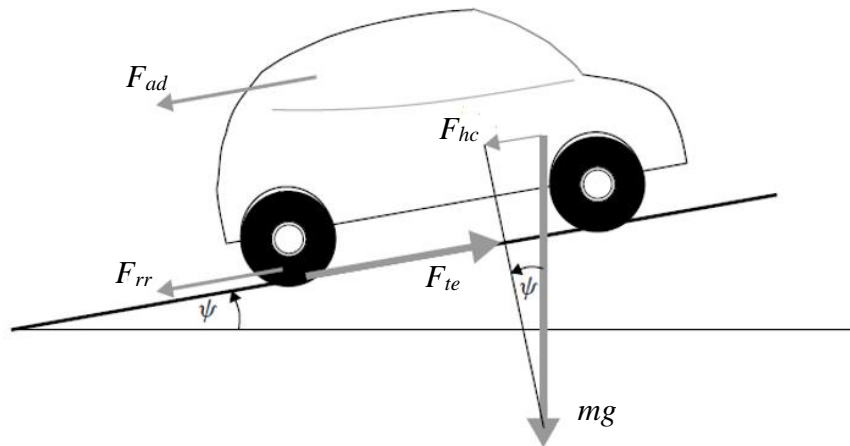


Figura II.11.- Fuerzas que actúan sobre el vehículo al subir una pendiente [Larminie, 2003]

Donde:

F_{rr} es la fuerza de resistencia a la tracción,

F_{ad} es la fuerza de resistencia al viento,

F_{hc} es la fuerza necesaria para subir la pendiente,

F_{la} es la fuerza requerida para dar una aceleración lineal,

$F_{\omega a}$ es la fuerza requerida para dar la aceleración angular de la rotación del motor y

ψ es el ángulo de pendiente.

La resistencia a la tracción, se debe principalmente a la fricción del neumático del vehículo en la carretera. La fricción en los cojinetes durante el frenado y el sistema de cambios en la transmisión, también juegan una parte importante en la resistencia. La resistencia a la tracción es aproximadamente constante, y apenas depende de la velocidad del vehículo [Larminie, 2003]. Es proporcional al peso del vehículo, la fuerza F_{rr} , está dada por la ecuación:

$$F_{rr} = \mu_{rr}mg \quad \text{II.1}$$

Donde m es la masa del auto, g la fuerza de gravedad y μ_{rr} es el coeficiente de tracción, los principales factores que controlan a μ_{rr} , son el tipo de los neumáticos y la presión de los neumáticos. Los valores típicos de μ_{rr} son 0.015 para un neumático de estructura radial, hasta 0.005 para los neumáticos desarrollados especialmente para vehículos eléctricos.

La fuerza de resistencia al viento, se debe a la fricción de la carrocería del vehículo en movimiento a través del aire. Es una función del área frontal, la forma de la carrocería, los accesorios como espejos laterales, alerones, conductos de aire y muchos otros factores. La fórmula de este componente es [Larminie, 2003]:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad \text{II.2}$$

Donde ρ es la densidad del aire (1.25 kg m^3), A es el área frontal, y v es la velocidad. C_d es una constante llamada coeficiente de arrastre. El cual se puede reducir mediante un buen diseño del vehículo. El valor típico para un auto es de 0.3, pero algunos diseños de vehículos eléctricos han alcanzado valores tan bajos como 0.19.

La fuerza necesaria para conducir el vehículo por una pendiente es la más fácil de encontrar, es simplemente el componente del peso del vehículo que actúa a lo largo de la pendiente. Por simple resolución de las fuerzas tenemos que [Larminie, 2003]:

$$F_{hc} = mg \sin\psi \quad \text{II.3}$$

Si la velocidad del vehículo cambia, tendrá claramente una fuerza que debe aplicarse además de las fuerzas que se muestran en la Figura II. Esta fuerza proporcionará la aceleración lineal del vehículo, y está dada por la ecuación conocida por la segunda ley de Newton [Wilson y colaboradores, 2007].

$$F_{al} = ma \quad \text{II.4}$$

Sin embargo, para tener un resultado más preciso de la fuerza necesaria para acelerar el vehículo también se debe tener en cuenta la aceleración de rotación, así como la aceleración lineal. Debido al torque y velocidades angulares del motor eléctrico [Larminie, 2003].

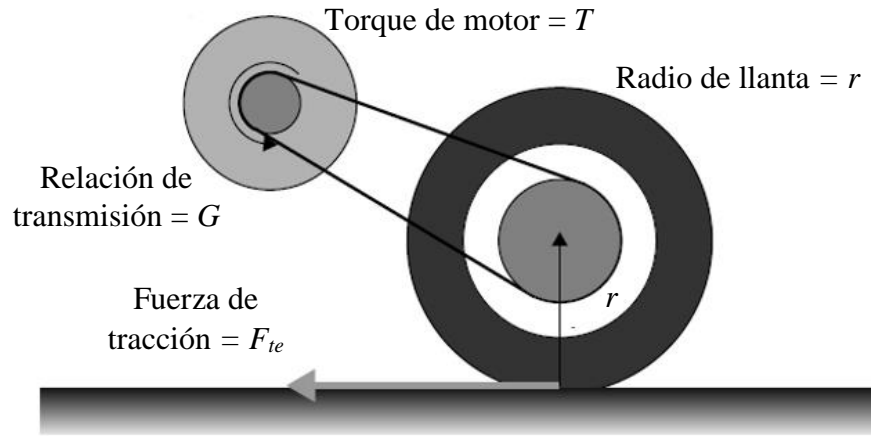


Figura II.12.- Arreglo simple para conexión de un motor eléctrico a una rueda motriz

La fuerza en las ruedas es necesaria para proporcionar la aceleración angular $F_{\omega a}$, esta se encuentra con la siguiente ecuación [Larminie, 2003]:

$$F_{\omega a} = I \frac{G^2}{r^2} a \quad \text{II.5}$$

Haciendo referencia a la Figura II.12, se puede observar que el torque del eje es igual a F_{te} por r , donde r es el radio del neumático y F_{te} es la fuerza de tracción que provoca el sistema de propulsión. Si G es el radio del sistema conectado al eje del motor y T es el torque del motor, entonces se puede decir que [Larminie, 2003]:

$$T = \frac{F_{te} r}{G} \quad \text{II.6}$$

Tomando en cuenta que la velocidad angular del eje es [Larminie, 2003]:

$$\omega = \frac{v}{r} \text{ rad/s} \quad \text{II.7}$$

Así se tiene que, la velocidad angular del motor es:

$$\omega = G \frac{v}{r} \text{ rad/s} \quad \text{II.8}$$

Entonces, la aceleración angular del motor es la derivada de la velocidad angular [Larminie, 2003]:

$$\dot{\omega} = G \frac{a}{r} \text{ rad/s}^2 \quad \text{II.9}$$

y el torque para esta aceleración es [Larminie, 2003]:

$$T = IG \frac{a}{r} \quad \text{II.10}$$

Donde I es el momento de inercia del rotor del motor. Así la fuerza en las ruedas necesaria para proporcionar la aceleración angular $F_{\omega a}$ se encuentra mediante la combinación de esta ecuación con la Ecuación II.7, lo que nos da como resultado [Larminie, 2003]:

$$F_{\omega a} = \frac{G}{r} IG \frac{a}{r} \quad ; \quad F_{\omega a} = I \frac{G^2}{r^2} a \quad \text{II.11}$$

De esta manera tenemos que la fuerza total de tracción es la suma de todas estas fuerzas:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{\omega a} \quad \text{II.12}$$

A parte de la importancia de minimizar el peso del vehículo, también es importante tratar de minimizar el momento de inercia de los componentes rotativos, ya que estos almacenan energía cinética de rotación. Para conocer la energía cinética E_c almacenada en la parte mecánica a una cierta velocidad angular ω tenemos que [Larminie, 2003]:

$$E_c = \frac{1}{2} I \omega^2 \text{ Joules} \quad \text{II.13}$$

Donde el momento de inercia I , está dado por la ecuación [Larminie, 2003]:

$$I = mr^2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \text{II.14}$$

El momento de inercia es la suma de todas las masas de un componente que se encuentran a una distancia r desde el centro de rotación. En la práctica la mayoría de los componentes giratorios tales como las ruedas se compran como artículos patentados, pero la energía que se pierde en energía rotatoria debe tenerse en cuenta, en particular para las condiciones de conducción urbana [Larminie, 2003].

II.8.- Sistema eléctrico del frenado regenerativo

El funcionamiento del freno regenerativo se basa en un motor eléctrico, el cual puede ser utilizado como generador durante el frenado, y las terminales de alimentación se convierten en suministradoras de energía, cargando las baterías, que es la que provee el efecto de frenado. El sistema se compone de un motor eléctrico, baterías, de un controlador, un generador y ultracapacitores (Figura II.13). El objetivo principal es controlar al motor eléctrico, el controlador se encargará de tener control de la potencia suministrada al motor, y por lo tanto la velocidad del vehículo, en avance y retroceso. Los ultracapacitores, permiten la recuperación de la energía cinética cuando el vehículo desacelera, y aumentan la potencia máxima disponible durante los tiempos de aceleración rápida recargando las baterías de manera constante. El generador alimentará el sistema en los lapsos en que el motor de *CI* asista al motor eléctrico [Husain, 2003].

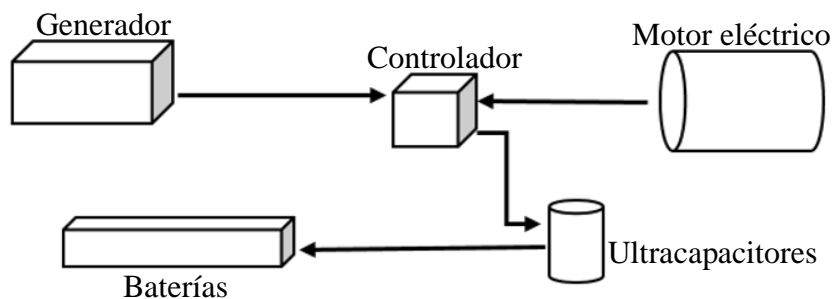


Figura II.13. Configuración del sistema eléctrico de control

El motor eléctrico se encarga de transformar la energía eléctrica en energía mecánica, y al funcionar como generador el motor convierte la energía mecánica en energía eléctrica ya que la corriente fluye en dirección contraria. Existen motores eléctricos de corriente directa (*CD*) y de corriente alterna (*CA*), el uso de los motores de *CA* está teniendo una gran aceptación para los automóviles eléctricos e híbridos, al igual que los motores de escobillas y los motores de

inducción, los cuales permiten ser utilizados como generadores, siendo una opción que favorece al sistema eléctrico [Husain, 2003].

Una parte importante es la fuente portátil de energía eléctrica, en donde las baterías juegan un papel esencial en los vehículos híbridos, almacenando y alimentando al motor eléctrico. Existen dos tipos de baterías, las primarias y las secundarias. Las baterías primarias no se pueden recargar, están diseñadas para una sola descarga, mientras que las baterías secundarias permiten ser recargadas durante el ciclo de regeneración, por el flujo de corriente en dirección opuesta durante la descarga. La investigación y el desarrollo de las baterías durante los últimos 30 años, no tenido grandes avances, actualmente no existe una batería que puede ofrecer una combinación aceptable de potencia, energía, y ciclo de vida altos para los vehículos híbridos. Las baterías de plomo se utilizan en los vehículos de corto alcance, por ser en cierta forma baratas por unidad de energía almacenada, siendo este tipo de batería comúnmente usado en los vehículos eléctricos [Dhameja, 2002].

Algunas de las baterías nuevas, como las de hidruro metálico de níquel, litio y cloruro de níquel sodio, cuentan con suficiente densidad de energía que utilizan los vehículos de gama media, las baterías de níquel metal hidruro ofrecen una carga rápida, haciéndolas una excelente opción para su uso en vehículos híbridos, con largo alcance, y para vehículos como autobuses o tranvías que se pueden recargar durante las frecuentes paradas [Broussely y Pistoia, 2007].



Figura II.14.- Batería comercial de *NiMH*, con ventiladores de refrigeración integrales

Existen cuatro características que determinaran el tamaño y el peso de la batería que usará el auto, las cuales son [Larminie, 2003]:

- Alta densidad energética ([kWh] / L).
- Alta densidad de potencia (kW / L).
- Alta energía específica ([kWh] / kg).
- Alto poder específico (kW / kg).



Figura II.15.- Batería Zebra (Cloruro de Sodio metálico)

Una batería compacta afecta los valores de densidad y debe tener la capacidad de aumentar significativamente la potencia del vehículo, el híbrido normalmente necesita 10 seg. o menos de potencia al acelerar [Larminie, 2003].

Los ultracapacitores, son dispositivos de alta potencia y bajo consumo de energía almacenada, con ciclos de carga y descarga rápidos sin afectar su rendimiento, lo que prolonga su tiempo de vida. Los condensadores son adecuados para aplicaciones que implican picos de potencia, por lo que en las pendientes son los que suministran la energía al automóvil en el frenado al absorber los picos energía cinética [Miller, 2004]

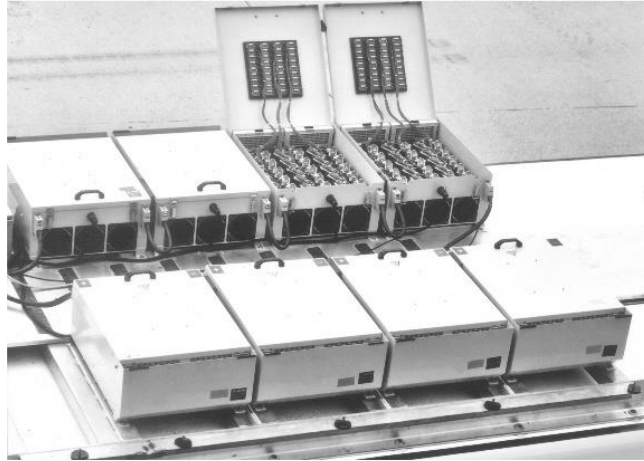


Figura II.16.- Banco de ultracapacitores

II.8.1.- Funcionamiento del motor eléctrico de CD

Los vehículos eléctricos utilizan diferentes tipos de motores eléctricos. Sin embargo, uno de los más usados en este tipo de autos es el motor brushed de corriente continua. Este tipo de motor es ampliamente utilizado en aplicaciones, como herramientas portátiles, juguetes, ventanas eléctricas en autos y en electrodomésticos. Sin embargo, también están siendo utilizados como motores de tracción [Larminie, 2003].

El funcionamiento de los motores eléctricos de corriente directa o continua se basa en la repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán permanente, cuando interactúan con los polos magnéticos de un electroimán que se encuentra montado en un eje (la ley de *Lorentz*). Este electroimán se denomina *rotor* y su eje le permite girar libremente entre los polos magnéticos norte y sur del imán permanente, el cual se encuentra dentro de la carcasa o cuerpo del motor. Al circular la corriente eléctrica por la bobina del rotor, el campo electromagnético que se genera interactúa con el campo magnético del imán permanente. Si los polos del imán permanente y del rotor coinciden, se produce un rechazo y un torque magnético o par de fuerza, el cual provoca que el rotor rompa la inercia y comience a girar sobre su eje en el mismo sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario, Esto depende de la forma que se encuentre conectada la batería al circuito [Sen, 1997].

Dentro de los arreglos estructurales del motor de corriente continua los básicos son [*Chapman, 2000*]:

- La bobina, a menudo llamada armadura, se enrolla alrededor de una pieza de Hierro, por lo que el campo magnético de los imanes no tiene que cruzar un espacio de separación grande, lo cual debilitaría el campo magnético.
- Más de una bobina se utilizará, de manera que un alambre portador de corriente está cerca de los imanes para una mayor proporción del tiempo. Esto significa que el conmutador no consiste de dos medios anillos, tiene varios segmentos, dos segmentos por cada bobina.
- Cada bobina constará de varias vueltas de alambre, de modo que entre más alambre el par se incrementa (más fuerza).
- Más de un par de imanes se puede utilizar, para incrementar aún más la fuerza de giro.

Los motores de corriente continua están compuestos por los siguientes elementos [*Siemens, 2000*]:

- Estator (devanados de campo principales).
- Rotor o Armadura (Devanados de rotación).
- Marco.
- Eje.
- Rodamientos.
- Conmutador.
- Escobilla.

Las partes más importante de estos componentes son el estator y el rotor.

II.8.2.- Características de par-velocidad

Si un cable en un motor eléctrico tiene una longitud L metros, lleva una corriente I amperios, y está en un campo magnético de fuerza B Wb/m², entonces la fuerza en el cable es [*Larminie, 2003*]:

$$F = BLI$$

II.15

En la Figura II.17a describe la sección transversal del motor de corriente continua, el flujo magnético está representado por las líneas punteadas. El par motor es en sentido horario. La Figura II.17b muestra la convención utilizada para indicar la dirección de flujo de corriente en los cables, dibujado en la sección transversal [Larminie, 2003].

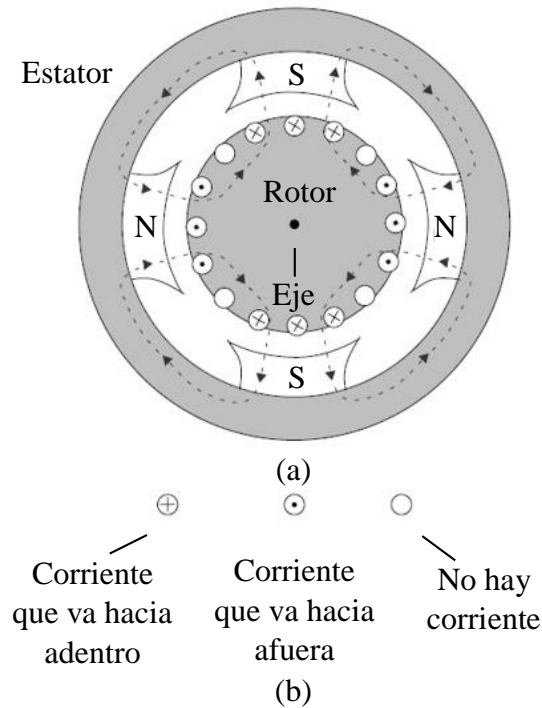


Figura II.17.- Motor de corriente continua de cuatro polos

Si el radio de la bobina es r , y la armadura se compone de n vueltas, entonces el par del motor T está dada por la ecuación [Larminie, 2003]:

$$T = 2nrBIl$$

II.16

El término $2Blr = B \times \text{área}$, puede ser reemplazado por ϕ , Es el flujo total que pasa a través de la bobina. Esto da:

$$T = n\phi I \quad \text{II.17}$$

Este es el par máximo, cuando la bobina está totalmente en el flujo, que es perfectamente radial. En la práctica esto no siempre será así. También se tiene que tomar en cuenta el número de polos magnéticos en el motor. Utilizando una constante K_m , conocida como la constante del motor, para conectar el par medio con el actual y el flujo magnético. El valor de K_m depende claramente del número de vueltas en cada bobina, el número de pares de polos y otros aspectos del diseño del motor. Así se tiene [Larminie, 2003]:

$$T = Km\phi I \quad \text{II.18}$$

Entonces el par del motor es directamente proporcional a la corriente del rotor I (también llamado inducido). El control de esta corriente depende del voltaje del motor E_S y de la resistencia eléctrica de la armadura R_a . A medida que el motor gira el inducido se mueve en un campo magnético. Este significa que va a trabajar como un generador o dinamo, la corriente generada se expresa por la ecuación básica [Larminie, 2003]:

$$E_b = Blv \quad \text{II.19}$$

El voltaje generado es por la *FEM* y depende de la velocidad v del movimiento del alambre a través del campo magnético. La velocidad del alambre en movimiento en el campo magnético depende de la velocidad angular ω y el radio r de acuerdo a la ecuación de velocidad [Larminie, 2003]:

$$v = r\omega \quad \text{II.20}$$

La armadura tiene dos lados, por lo que la ecuación se convierte en [Chapman, 2000]:

$$E_b = 2Blr\omega \quad \text{II.21}$$

Y dependiendo del número de vueltas en la bobina se tiene que [Chapman, 2000]:

$$E_b = 2nrBl\omega \quad \text{II.22}$$

Esta ecuación se compara con Ecuación II.16. Por un razonamiento similar simplificamos, puesto que es el mismo motor, la constante K_m se puede utilizar de nuevo, y obviamente, tiene el mismo valor. La ecuación da el voltaje generado por el efecto dínamo del motor [Larminie, 2003].

$$E_b = Km\phi\omega \quad \text{II.23}$$

Esta tensión se opone a la tensión de alimentación E_s y actúa para reducir la corriente en el motor. La corriente de armadura es por lo tanto [Larminie, 2003]:

$$I = \frac{V}{R_\alpha} = \frac{E_s - E_b}{R_\alpha} = \frac{E_s}{R_\alpha} - \frac{Km\phi}{R_\alpha} \omega \quad \text{II.24}$$

Esta ecuación muestra que la corriente cae al aumentar la velocidad angular, Se sustituyéndola en la Ecuación II.18 para obtener la ecuación que hará la conexión entre el par de torsión y la velocidad de rotación [Larminie, 2003].

$$T = \frac{Km\phi E_s}{R_\alpha} - \frac{(Km\phi)^2}{R_\alpha} \omega \quad \text{II.25}$$

Esta ecuación muestra que el par de torsión de este tipo de motor tiene un máximo valor a velocidad cero, cuando se detiene y cae de manera constante a medida que aumenta la velocidad. El torque generalmente que es constante, su comportamiento se muestra en la Figura II.18. La simple relación lineal entre la velocidad y el par, implicada por la Ecuación II.25, es replicada en la práctica para este tipo de motor de corriente continua de flujo magnético constante. Sin embargo, excepto en el caso de motores muy pequeños, el par de baja velocidad se reduce, ya sea por el controlador electrónico, o por la resistencia interna de la batería que suministra el motor. De lo contrario las corrientes serían extremadamente altas, y se dañará el motor [Larminie, 2003].

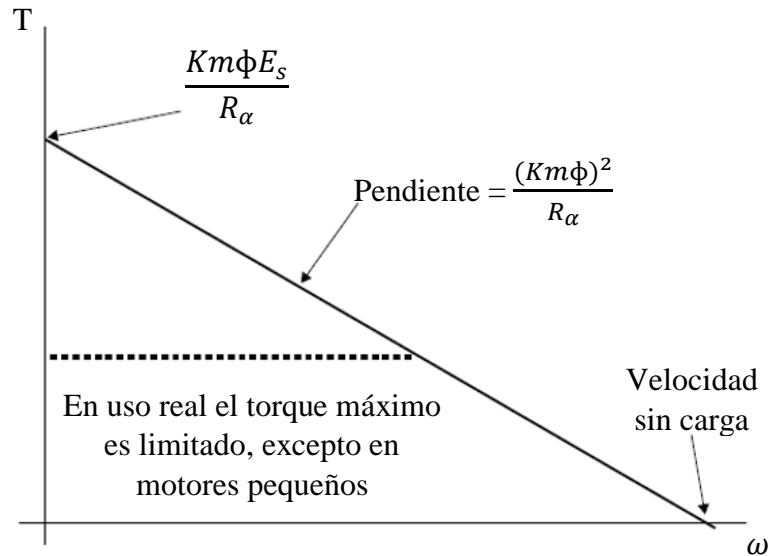


Figura II.18.- Gráfica par-velocidad de un motor de corriente continua

II.9.- Sistema de control

Los sistemas de control han evolucionado de forma acelerada en los últimos años, las técnicas de control se han mejorado a través de los años, facilitando el trabajo para el control de uno o varios sistemas. El control automático se ha vuelto una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, ya que el control automático es parte esencial de los procesos modernos industriales y de manufactura. Las definiciones básicas de los sistemas de control son el punto de partida para comprender el estudio, las cuales se presentan a continuación [Ogata, 1998].

El objetivo del control es medir el error de la variable controlada del sistema para aplicar correcciones a través de la variable manipulada, lo que nos permitirá obtener un valor deseado.

El sistema de control se compone de [Ogata, 1998]:

- **Sistema.-** Un sistema es un conjunto de elementos que se interrelacionan y trabajan juntos para realizar un objetivo determinado.
- **Variable controlada.-** La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla.

- **Variable manipulada.-** Es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.
- **Planta.-** Es sistema físico que se desea controlar, se compone de partes que trabajan juntas con el objetivo de realizar una operación en particular.
- **Proceso.-** Es el conjunto de operaciones que van a ser controladas.
- **Perturbación.-** Es una señal que afecta a la variable controlada del sistema. Las perturbaciones pueden ser internas cuando surgen dentro del sistema, o externas porque se produce fuera del sistema y actúan como otra entrada.
- **Control realimentado.-** Es el resultado de la comparación entre las variables de entrada y las variables de salida de; sistema.
- **Sistema de control en lazo cerrado.-** Los sistemas de control en lazo cerrado tienen el objetivo de reducir el error y dar a la señal de salida un valor deseado. Este sistema envía la señal de error al controlador haciendo la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación, El término control de lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema; es por eso que el termino control de lazo realimentado y de lazo cerrado se usan indistintamente.
- **Sistemas de control en lazo abierto.-** En este sistema a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija, esto obliga a que la precisión del sistema sea dependiente de la calibración del mismo. En estos sistemas la salida no afecta la acción de control. Es decir que en este tipo de control no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.

II.9.1.- Control inteligente

La innovación tecnológica, ha generado sistemas muy complejos que requieren controladores altamente sofisticados para asegurar el alto desempeño de sistemas bajo condiciones desfavorables, las cuales no se pueden cumplir con controladores convencionales, debido a la complejidad del sistema y al hecho de que la estructura y los parámetros en muchos sistemas cambian de manera significativa e impredecible con el tiempo. Bajo estas condiciones se utilizan las técnicas del control inteligente. El control inteligente es la disciplina donde los métodos de control se desarrollan para igualar algunas características importantes del ser humano. Estas

características incluyen la autonomía del control, basándose en la adaptación y aprendizaje, planeación y la realización del trabajo con gran cantidad de datos [Antsaklis, 1997].

El control inteligente está siendo aplicado en diferentes áreas científicas y tecnológicas como la robótica, las comunicaciones, la manufactura, entre otras. Las áreas donde se está realizando implementando y estudiando la mejora del control inteligente son: redes neuronales, control difuso, algoritmos genéticos, sistemas de planeación, sistemas expertos y sistemas híbridos. Para el diseño de los sistemas de control convencionales se usan modelos matemáticos de sistemas físico, en el cual se muestra el comportamiento dinámico del sistema, aplicando técnicas de diseño, Entre más simple sea el modelo matemático el análisis del mismo será más exacto aplicando las técnicas matemáticas disponible, teniendo como resultado aspectos importantes y relevantes del comportamiento del sistema [Antsaklis, 1997].

II.9.2.- Función de membresía

La función membresía es una curva que define el grado de pertenencia entre 0 y 1, que le corresponde a cada punto del espacio de entrada. Las funciones de membresía se pueden clasificar según su forma, las formas de funciones más comunes y usadas para representar funciones de membresía, son las formas: trapezoidal, triangular, campana de gauss, gamma, pi, entre otras, la diferencia entre estas es la transición en el grado de pertenencia [Hopgood, 2001, Driankon y asociados, 1996].

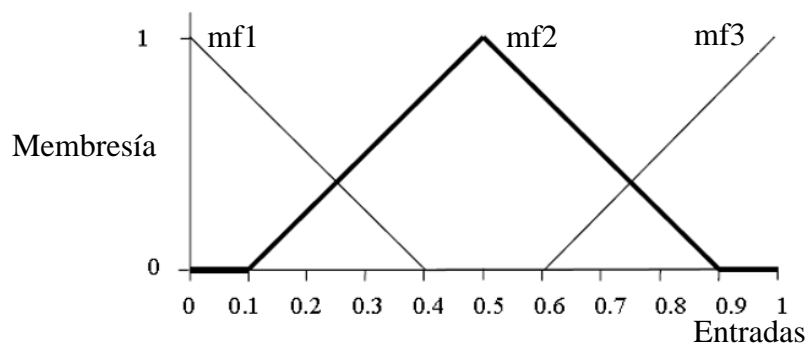


Figura II.19.- Función triangular de membresía

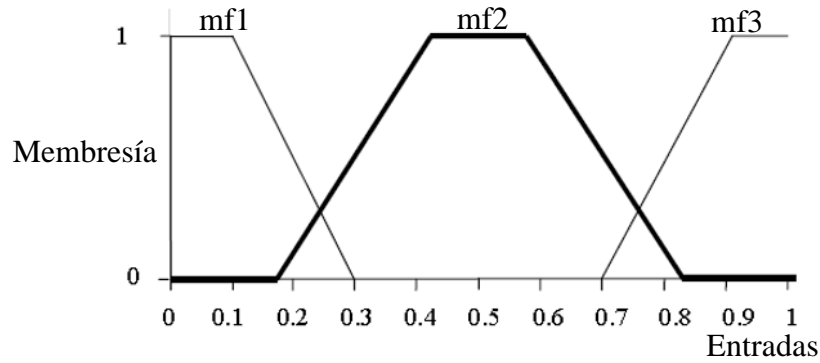


Figura II.20.- Función trapezoidal de membresía

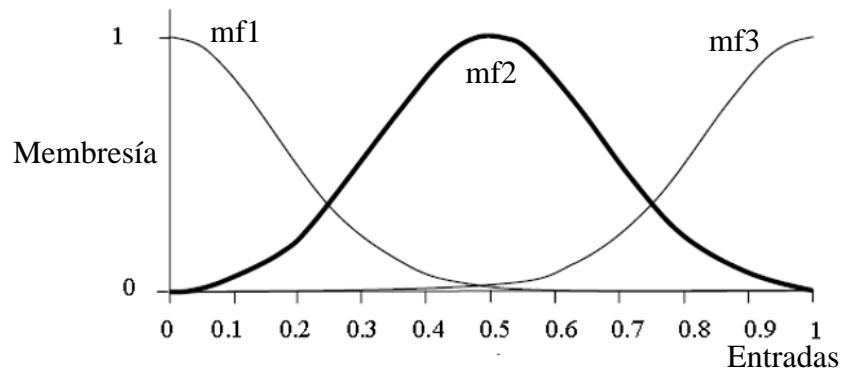


Figura II.21.- Función gaussiana de membresía

II.9.3.- Control difuso

Los sistemas de control difuso trabajan con conjuntos los cuales son llamados conjuntos difusos, los cuales utilizan las expresiones difusas para formular las reglas que controlarán dichos sistemas. La lógica difusa permite a un controlador difuso tomar diferentes grados de acción en un sistema, tomando un cierto grado de pertenencia para los datos que se presentan dentro de los conjuntos difusos. Un conjunto difuso A del universo μ puede representarse como un conjunto de pares x ordenados en el que cada par consiste en un elemento genérico x y su grado de pertenencia A . La función que asocia un número con cada elemento de x dentro del universo de discurso es llamada función de membresía [Hopgood, 2001, Zimmermann, 1996].

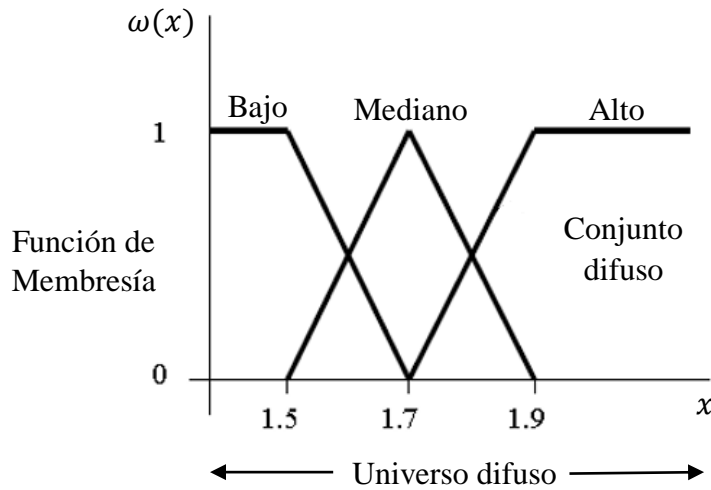


Figura II.22.- Descripción de conjunto difuso

En 1974 *E. H. Mamdani* propone los sistemas de control difuso, el cual proporciona una metodología para representar un conocimiento práctico del ser humano para controlar un sistema. Diferentes estudios aplicados a la teoría de control difuso han mostrado que el sistema difuso es una de las áreas de investigación más activa en los últimos años dentro del campo de la lógica difusa. Obteniendo aplicaciones a procesos industriales, con mejores resultados a obtenidos por el control clásico [*Raju y Zhou, 1993*].

La finalidad del control difuso es modificar el comportamiento de la planta del sistema por medio de una entrada o varias entradas del sistema, de acuerdo a un conjunto de reglas y un proceso de inferencia que permita conducir las salidas deseadas. Los sistemas de control difuso sustituyen las habilidades de un operador humano por un sistema basado en reglas difusas. Este tipo de sistema reemplaza las ecuaciones diferenciales del modelo matemático, por un modelo construido en base de un número de reglas. Para elaborar un controlador difuso no existe regla o metodología única, sin embargo los sistemas de control se realizan basándose en el método propuesto por *C.C. Lee*, el cual está compuesto por las siguientes partes [*Lee, 1990*]:

- Fusificación.
- Base de conocimiento.

- Lógica de decisiones.
- Defusificación.

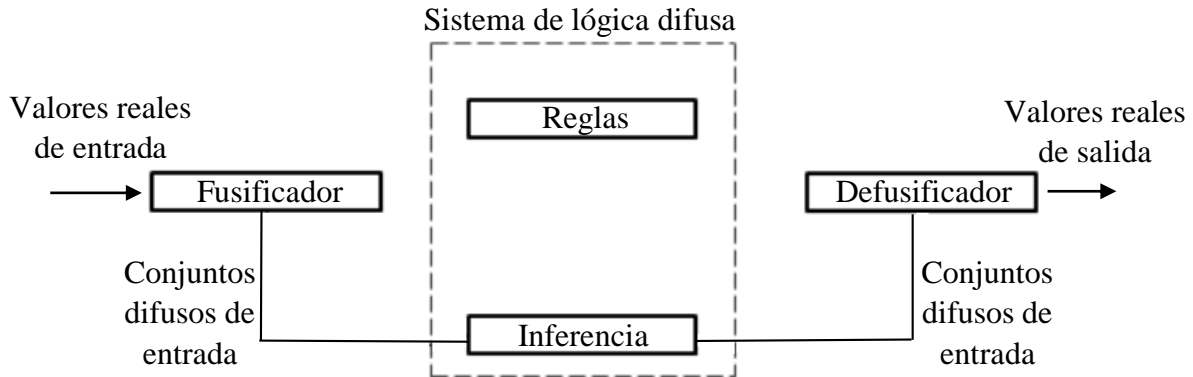


Figura II.23.- Esquema general del control difuso

II.9.3.1.- Fusificación

Es el proceso en el que asignan valores de membresía o pertenencia a un valor numérico de entrada para transformarlo en un conjunto difuso. El primer paso en la fusificación es dividir el universo de discurso, asignando etiquetas en cada variable del controlador difuso. Los valores difusos son los niveles de pertenencia de los valores de entrada a los diferentes conjuntos difusos, en los cuales se han dividido el universo de discurso de las diferentes variables de entrada al sistema. En el proceso de fusificación, las funciones de membresía definidas con respecto a las variables de entrada mapean a los datos presentes para determinar el grado de verdad en la premisa de cada regla, por lo que es necesario elaborar primeramente las funciones de membresía correspondientes a cada entrada [Lee, 1990]. Para realizar la fusificación se siguen los siguientes pasos:

- Medir las magnitudes de las variables físicas de entrada.
- Realizar un mapeo escalado, que transfiere el rango de valores de entrada a su correspondiente universo de razonamiento.
- Convertir los valores de entrada en valores lingüísticos, los cuales son vistos como etiquetas pertenecientes a conjuntos difusos.

II.9.3.2.- Base de conocimiento

La base de conocimiento está compuesta de dos partes, una base de datos y una base de reglas de control difuso (utiliza variables lingüística), Dependiendo del sistema a controlar y los requerimientos del diseño, se desarrolla la experiencia y los conocimientos de un operador sobre Ingeniería de control [Jerry, 1994].

II.9.3.3- Lógica de decisiones

Un sistema de control lógico difuso puede sustituir a un hábil experto operador humano, por medio de funciones de implicación difusa, y por mecanismos de inferencia principalmente [Jerry, 1994].

II.9.3.4.- Defusificación

Es la conversión de la salida difusa del mecanismo de inferencia, para lograr que la salida del sistema difuso pueda ser interpretada por elementos que sólo procesen información numérica, La salida del mecanismo de inferencia es una salida difusa, la cual no puede ser interpretada por un controlador, ya que sólo manipula información numérica [Gómez, 2005].

II.9.4.- Tipos de control difuso

Dentro de los sistemas difusos, existen tres tipos que se utilizan con más frecuencia en los sistemas a controlar [García, 2010]:

- **Sistemas difusos puros.**- En este sistema sus entradas y salidas son conjuntos difusos, a comparación de los sistemas de ingeniería, donde las entradas y salidas son variables valuadas en la realidad, los sistemas difusos puros utilizan palabras en lenguajes naturales.
- **Sistemas difusos con inferencia de entrada y una inferencia de salida.** – Dentro de este tipo de sistemas encontramos el método de *Mamdani* y el método *Takagi-Sugeno-Kang*.

II.9.4.1.- Método difuso de *Mamdani*

En el método de *Mamdani* las reglas hacen referencia a cambios en la acción del sistema de control, estos cambios se expresan mediante términos lingüísticos o términos numéricos fijos, regularmente está diseñado para manipular dos variables de entrada. La primera es la variable de error, es la diferencia entre la señal proveniente de los sensores y la salida deseada. La segunda variable es la derivada del error anterior respecto del tiempo [Rodríguez, 2005]. Su funcionamiento es equivalente a un controlador *PD* clásico pero con la diferencia de que en este método la ganancia no es constante. El método de *Mamdani* tiene la facilidad para la derivación y la interpretación de reglas difusas, pero no garantiza la continuidad de la superficie de salida.

II.9.4.2.- Método difuso de *Takagi-Sugeno-Kang*

El método está basado en reglas de la forma SI (antecedente) ENTONCES (consecuente), donde la consecuente de cada regla es un sistema lineal. El método fue propuesto por *Takagi, Sugeno* y *Kang*, cuando trabajaban en un método sistemático para generar reglas difusas a partir de un conjunto de datos de entradas y salidas. El método también es conocido como *TSK* [Jang y Gulley, 1994]. La regla del método es:

$$SI \ x \ es \ A ; \ y \ es \ B \ ENTONCES \ z = f(x, y) \quad II.26$$

Donde *A* y *B* son conjuntos difusos en el antecedente, mientras $z = f(x, y)$ es una función clásica en la consecuencia. Regularmente $f(x, y)$ es un polinomio en las variables de entrada *x* y *y*, pero también puede ser cualquier función si puede describir apropiadamente la salida del modelo dentro de la región difusa especificada por la regla de antecedentes [Jang y Gulley, 1994]. Si $f(x, y)$ es un polinomio de primer orden, el sistema resultante de inferencia difusa es llamado modelo difuso de *Sugeno* de primer orden. Cuando es una constante, entonces tenemos un modelo difuso de *Sugeno* de orden cero, el cual puede ser visto como un lado especial de la regla de inferencia difusa de *Mamdani*, en la cual cada regla es específicamente por un singlenton (o una consecuencia pre-defuzificadora), o un caso especial del modelo *Tsukamoto* [Zimmermann, 1996]. Un modelo de *Sugeno* de orden cero es equivalente a una red de funciones básicas radiales. Un caso especial del modelo difuso lingüístico se obtiene cuando la consecuencia, el conjunto *B*, es formado por conjuntos difusos de singlentes.

II.10.- Sumario

En el presente capítulo se muestran las definiciones del vehículo híbrido en serie y del sistema de frenado regenerativo, así como los componentes y subsistemas que los integran, con el fin de conocer con más detalle el tema estudiado. Inicialmente se presentan conceptos sobre los autos híbridos en serie, después se describe el sistema de frenado regenerativo partiendo por cada uno de los subsistemas que lo constituyen como son el sistema mecánico y el sistema eléctrico, en donde se mencionan las leyes y fórmulas que servirán para su análisis y modelado. Posteriormente se procede a definir lo que es el control inteligente mencionando algunas de las aplicaciones en las cuales puede ser utilizado. Por último se menciona una amplia descripción de lo que es el controlador difuso y sus diferentes tipos de métodos utilizados en los sistemas de control, este punto es muy importante ya que en base a estos conceptos, se definirá el diseño del controlador del sistema de frenado. Mediante este capítulo y el anterior, el lector tendrá un amplio conocimiento sobre este proyecto de tesis, y le será más fácil poder entender los siguientes capítulos. En el capítulo siguiente se enfoca a la obtención del modelo matemático y la linealización de éste para poder desarrollar el sistema de control, así como la simulación y características del sistema de control.

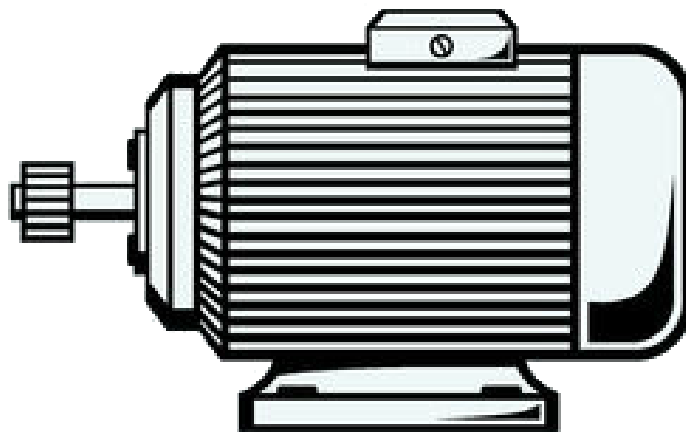
II.11. - Referencias

- Abuin-Parga, P., Cid-Fortes, M., Coppa-Pérez, M., Domínguez-González, L. y Gutiérrez-Santaló, I., *Sistemas A.B.S.*, Manual, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Navarra, San Sebastián, pp 1-23, 2000.
- Anderson, C. D. y Anderson, J., *Electric and Hybrid Cars; A History*, Ed. McFarland & Company, pp 21, 2004.
- Antsaklis, P., *Intelligent Control*, Ed. John Wiley & Sons, pp 1-19, 1997.
- Broussely, M. y Pistoia, G., *Industrial Applications of Batteries*, 1a Edición, Ed. Elsevier, pp 1-117, 2007.
- Chapman, S., *Máquinas Eléctricas*, Tercera Edición, Ed. McGraw-Hill, pp 483-529, 2000.
- Dhameja, S., *Electric Vehicle Battery System*, Ed. Butterworth-Heinemann, pp 4-18, 2002.
- Driankon, H., Ellenwood, M. y Rein, F., *An Introduction to Fuzzy Control*, Segunda Edición. Ed. Springer, pp 1-126, 1996.
- Ehsani, M., Gao, Y. y Emadi, A., *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*, Segunda Edición, Ed. CRC Press Taylor & Francis Group, pp 15-17,106, 2010.

- Friedman, D., *A New Road; The Technology and Potential of Hybrid Vehicles*, Ed. Union of Concerned Scientists, pp 1-15, 2003.
- Gama A. y Tovar R., *Análisis del Sistema de Frenado para un Vehículo Arenero*, Tesis de licenciatura, pp 10-29, 2009.
- García, J., Medel, J. y Palma, R., *Sistemas con Lógica Difusa*, McGraw-Hill, pp 65-70, 2010.
- Gómez, F., *Sistemas Difusos Jerárquicos para Modelado y Control*, Tesis de Maestría en Ciencias, Departamento de Control Automático, CINVESTAV, pp 7-10, 2005.
- Hall, E. L., *Back to the past; The history of hybrids*, Ed. AutoNews & Advice, Green Centre, pp 25, 2005.
- Hereward-Westbrook, M., *The Electric Car; Development and Future of Battery, Hybrid and Fuel-cell Cars*, Ed. IET, pp 1-46, 2005.
- Herrera-Cuntti, A., *Divagaciones Históricas en la Web; Libro 2*, Ed. AHC Ediciones, pp 184-186, 2006.
- Hopgood. A., *Intelligent Systems for Engineers and Scientists*, Segunda Edición, Ed. CRC Press, pp 86-100, 2001.
- Husain, I., *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*, Ed. CRC Press LLC, pp 1-8, 116-121, 243-246, 2005.
- Jang, J. R. y Gulley, N., Gain scheduling based fuzzy controller design, *Proceedings of the International Joint Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society Biannual Conference, the Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems Conference and the NASA Joint Technology Workshop on Neural Networks and Fuzzy Logic*, 101-105, 1994.
- Jerry, M., *Fuzzy Logic Systems for Engineering; A Tutorial* Jerry M. Mendel, Ed. University of Southern California, pp 345-375, 1994.
- Larminie, J. *Electric Vehicle Technology Explained*, Ed. Oxford Brookes University, pp 1-31, 2003.
- Lee, C., Fuzzy logic in control systems fuzzy logic in controller; Part 1, *Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 20, No. 1, pp 404-418, 1990.
- Miller, M., *Propulsion Systems for Hybrid Vehicles*, Ed. IET, pp 53-88, 109-167, 191-225, 359-410, 2004.
- Ogata, K., *Ingeniería de Control Moderna*, Ed. Prentice-Hall Hispanoamericana, pp 55, 1998.
- Raju, G. V. S. y Zhou, J., Adaptive fuzzy control, *IEEE Transaction on Systems*, Vol. 23, pp 973-980, 1993.

-
- Rodríguez, M., *Sistemas de Inferencia Difusa de Mamdani*, Ed. Fundación Universitaria Konrad Lorenz, pp 6-7, 2005.
- Sen, P. C., *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, Segunda Edición, Ed. John Wiley & Sons, pp 128-143, 1997.
- Siemens, *Basics of DC drives and related products*, Ed. Siemens, Training Education Program, STEP 2000 Series, pp. 1-14 2000.
- Wakefield, E., *History of the Electric Automobile*, Ed. The Society of Automobile Engineers, pp 19-20, 1998.
- Wilson, J., Buffa, A. y Bo L. *Física*, Sexta Edición, Ed. Pearson, pp. 104-129, 2007.
- Zimmermann, H. J., *Fuzzy Sets Theory and its Applications*, Tercera Edición, Ed. Kluwer Academic Publishers Group, pp 203-240, 1996.

CAPÍTULO III



MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA

III.1.- Introducción

En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales del motor de corriente directa y se realizará un análisis numérico, el cual permitirá obtener las ecuaciones dinámicas del motor eléctrico. La metodología propuesta para el desarrollo del análisis numérico, está basada en la formulación analítica de parámetros tales como; campo magnético, fuerza electromotriz inducida, corriente, voltaje, velocidades, aceleraciones, y fuerzas.

El motor eléctrico se integra de dos subsistemas, el sistema eléctrico y el sistema mecánico de los cuales se desarrollará el análisis matemático de cada uno de ellos, con el fin de encontrar las ecuaciones dinámicas que los representa. Con la integración de estas ecuaciones se tendrá como resultado la ecuación dinámica que representa el sistema electromecánico del motor.

El motor eléctrico, es uno de los dispositivos de gran importancia en el frenado regenerativo, ya que es lo que distingue a los automóviles eléctricos e híbridos, para realizar el análisis del sistema se tiene como propuesta seleccionar un motor de corriente directa. Por presentar entre sus características diversas combinaciones de devanados (en derivación, en serie y excitación separada), tienen la versatilidad de presentar una amplia variedad de curvas características velocidad-torque y volt-ampere en su funcionamiento dinámico como en estado estacionario.

En comparación con los motores de corriente alterna, las máquinas de corriente directa no presentan complejidad para ser controlados, lo que les permite ser una excelente opción para ser usados en aplicaciones que requieren un rango amplio de cambio y control en la velocidad y la potencia del motor [Chapman, 2000].

Los motores de corriente directa se han utilizado en la industria por muchos años, permitiendo desarrollar sistemas de control sencillo, eficiente y con gran precisión, Además de ofrecer un par mecánico alto para el arranque.

III.2.- Selección del motor de corriente directa

Existe una variedad de motores eléctricos que son utilizados en los vehículos eléctricos e híbridos eléctricos, estas máquinas eléctricas deben contar con ciertas características que son esenciales

para su buen funcionamiento en el automóvil. Claramente, los motores eléctricos son un componente clave en este tipo de vehículos. Hay cuestiones que se aplican a todos los motores, cuando se trata de su selección y uso, aspectos como la refrigeración, la eficiencia, el tamaño, la masa, tolerancia a fallas, unidad de control flexible y bajo ruido acústico [Larminie, 2003].

El motor debe ser capaz de manejar las fluctuaciones de voltaje de la fuente. Los requerimientos necesarios que deberá cumplir un motor son los siguientes [Husain, 2003]:

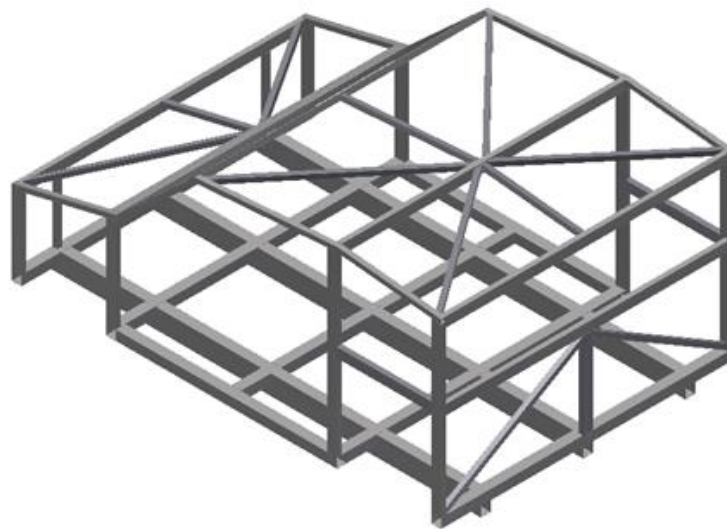
- Robustez.
- Alto torque a la inercia (T/J), los valores altos de esta relación arrojan buenos resultados en aceleración.
- Capacidad de torque máximo de aproximadamente 200 a 300% del rango de torque constante.
- Alta velocidad de operación y facilidad de control.
- Bajo ruido acústico, baja interferencia electromagnética, bajo mantenimiento y bajo costo.
- Capacidad para extender el rango de potencia constante de operación.

Cabe mencionar que este trabajo de investigación es parte de un proyecto que se está realizando con colaboración del Instituto Politécnico Nacional y la Universidad Politécnica del Valle de México, con el propósito de poner en circulación vehículos híbridos, como taxis para la Ciudad de México. Con el fin de ser una opción viable para el gran problema de contaminación que existe en el área metropolitana, y a su vez implementando la energía renovable con la recuperación de la energía cinética que se pierde en la frenada del automóvil, transformándola en energía eléctrica para la alimentación de las baterías y el motor eléctrico, buscando la eficiencia y autonomía del automóvil.

Las características del vehículo propuesto se presentan en la Tabla III.1. Así como la estructura y el chasis del mismo (Figura III.1).

Tabla III.1. – Ficha técnica del vehículo híbrido

Marca	Vehículo adaptado
Carrocería	PTR
Motor eléctrico de CD	14 HP
Fuente de energía	Gasolina-Electricidad
Baterías	8 a 12 volts c/una
Tipo de vehículo	Eléctrico-híbrido
Velocidad máxima	80 km/hr
Tren motriz	en Serie
Número de pasajeros	5
Ruedas	4
Peso vehicular	337.5503 kg
Peso total del vehículo	737.5503 kg

**Figura III.1.-** Diseño del chasis y la estructura

La siguiente Tabla describe las características del vehículo *Eggo Alfa* (taxi), las cuales se tomarán como referencia, para la selección del motor eléctrico. El *Eggo Alfa* es un automóvil parcialmente híbrido (gasolina-eléctrico) con transmisión en paralelo, este auto es fabricado en México por la empresa mexicana *Vehizero* [*Vehizero, 1999*].

Tabla III.2.- Características de *Eggo Alfa*

Ficha técnica	
Marca	Vehizero
Modelo	EggoAlfa, 2008
Carrocería	Sedan
Fuente de energía	Gasolina-Electricidad
Motor de Combustión Interna	4 HP, 1 cilindro con 0.15 Lts.
Motor eléctrico	17 HP nominales y 37 HP máximos
Velocidad máxima	100 km/hr
Tren motriz	Paralelo
Número de pasajeros	5
Ruedas	4
Baterías	16 de 6 voltios
Tipo de híbrido	Parcialmente híbrido
Peso vehicular	850 kg
Peso máximo	1350 kg

Con la información anterior, para dimensionar el motor, se propone un motor de 15 HP de corriente directa a 4950 rpm (Figura III.2). Las características del motor eléctrico seleccionado se muestran en la Tabla III.2 [*Advanced DC Motors, 2012*].

**Figura III.2.-** Motor eléctrico de *CD* con 15 HP

Tabla III.3.- Características del motor eléctrico seleccionado

Ficha técnica del motor eléctrico	
Característica	Valor/Unidad
Potencia	15 HP (11.4 kW) nominal y 62 HP pico
Velocidad	4950 rpm
Tensión	72-120 V
Peso	38 kg
Tipo	Corriente Directa
Corriente	500 A

III.3.- Modelado del motor eléctrico

A continuación se presentan los conceptos fundamentales del motor de corriente directa, se realizará el modelo matemático del sistema eléctrico. Lo que permitirá obtener la ecuación que representa al sistema, conociendo también la transferencia de energía de su forma eléctrica a su forma mecánica. El modelado matemático del motor de corriente continua permitirá obtener dos ecuaciones, una ecuación eléctrica y otra ecuación mecánica. Estas ecuaciones están acopladas y se basan en las leyes de *Kirchhoff*, de *Faraday* y de dinámica, respectivamente. Por una parte, la ecuación mecánica modela principalmente el movimiento del rotor y por otra parte la ecuación eléctrica modela lo que ocurre en el circuito eléctrico del inducido.

III.3.1.- Principios de operación del motor de corriente directa

Los principios de operación de un motor de corriente directa (*CD*), se basan en conceptos fundamentales de electricidad y magnetismo, como son campo magnético, fuerza magnética, la ley de *Faraday* y fuerza electromotriz inducida [*Halliday y Resnick, 1962*].

III.3.2.- Campo magnético

El componente principal para convertir la energía de corriente alterna (*CA*) en energía de corriente directa (*CD*), o viceversa, en motores, generadores y transformadores es el campo magnético. Existen cuatro principios básicos que describen como se utilizan los campos magnéticos en estas máquinas [*Chapman, 2000*].

1. Un conductor que porta corriente produce un campo magnético a su alrededor.

2. Un campo magnético variable con el tiempo induce un voltaje en una bobina de alambre si pasa a través de ésta, este principio es la base del funcionamiento del transformador.
3. Un conductor que porta corriente e presencia de un campo magnético experimenta una fuerza inducida sobre él, este principio es la base del funcionamiento del motor.
4. Un conductor eléctrico que se mueva en presencia de un campo magnético tendrá un voltaje inducido en él, este principio es la base del funcionamiento del generador.

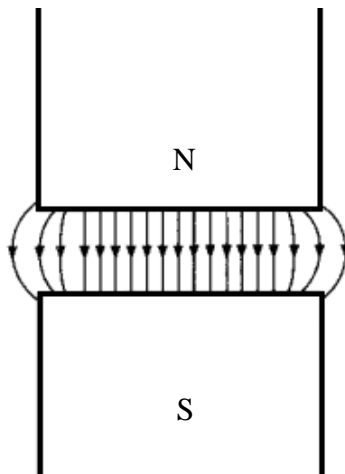


Figura III.3.- Campo magnético en el entrehierro

III.3.3.- Fuerza magnética

Los motores eléctricos trabajan bajo el principio básico en el que el campo magnético, produce fuerzas en los cables que conducen corriente. La fuerza magnética produce un par, el cual provoca el giro del motor. Con este fenómeno experimental se define el campo magnético [Wilson y colaboradores, 2007]. Si se coloca un alambre conductor de corriente entre los polos de un imán, una fuerza es ejercida sobre el alambre, la cual es proporcional a la corriente que circula por el cable. La dirección del campo magnético \vec{B} en cualquier punto define la dirección, la posición de la mano indica el punto donde se localiza. La Figura III.4 muestra la dirección del campo, la cual está indicada por las flechas entre los polos norte y sur [Chiasson, 2005].

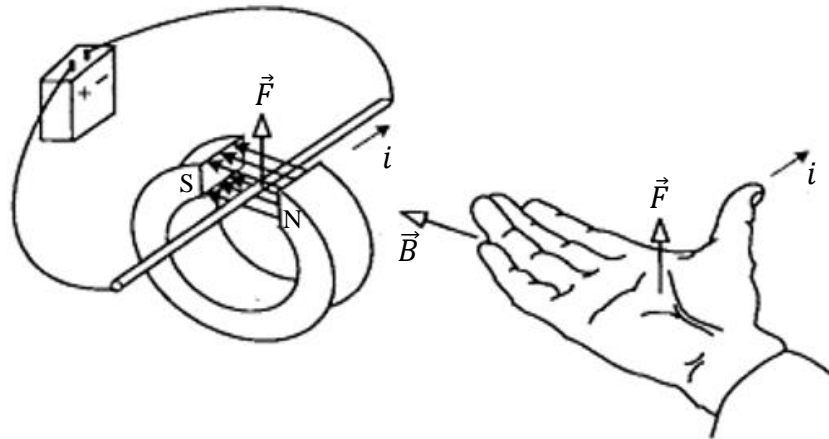


Figura III.4.- Ley de fuerza magnética [Haber-Schaim y colaboradores, 1991].

La dirección de \vec{B} es perpendicular al alambre, la fuerza del campo de inducción magnético se define como [Chiasson, 2005]:

$$B = |\vec{B}| \triangleq \frac{F_{\text{magnética}}}{\ell i} \quad \text{III.1}$$

Donde $F_{\text{magnética}}$ es la fuerza magnética, i es la corriente, ℓ es la longitud del alambre que esta perpendicular al campo magnético y B es la constante de proporcionalidad (vector de densidad de flujo magnético). Entonces tenemos que la fuerza magnética es [Chapman, 2000]:

$$F_{\text{magnética}} = B \cdot \ell i \quad \text{III.2}$$

Como muestra la Figura III.3, la dirección de la fuerza magnética puede determinarse con la regla de la mano derecha, en la cual los dedos de la mano derecha apuntan en dirección del campo magnético y el dedo pulgar apunta en dirección a la corriente, entonces la dirección de la fuerza magnética es perpendicular a la palma de la mano. Si el alambre toma la posición de algún ángulo θ con respecto a \vec{B} , la fuerza será proporcional al componente de \vec{B} , que es perpendicular al alambre y se denota como [Chapman, 2000]:

$$B_{\perp} = B \text{sen}(\theta) \quad \text{III.3}$$

Sea $\vec{\ell}$ un vector cuya magnitud es la longitud ℓ del alambre en el campo magnético, cuya dirección se define como la dirección positiva de la corriente en la barra (Figura III.5 (a)), tenemos que la fuerza magnética sobre la barra de longitud ℓ que lleva la corriente i está dada por [Chiasson, 2005]:

$$F_{magnética} = \vec{\ell}i \cdot \vec{B} \quad \text{III.4}$$

O en términos escalares [Chiasson, 2005]:

$$F_{magnética} = i\ell B \sin(\theta) = i\ell B_{\perp} \quad \text{III.5}$$

Donde θ es el ángulo comprendido entre el alambre y la constante de proporcionalidad (vector de densidad de flujo) (Figura III.5b).

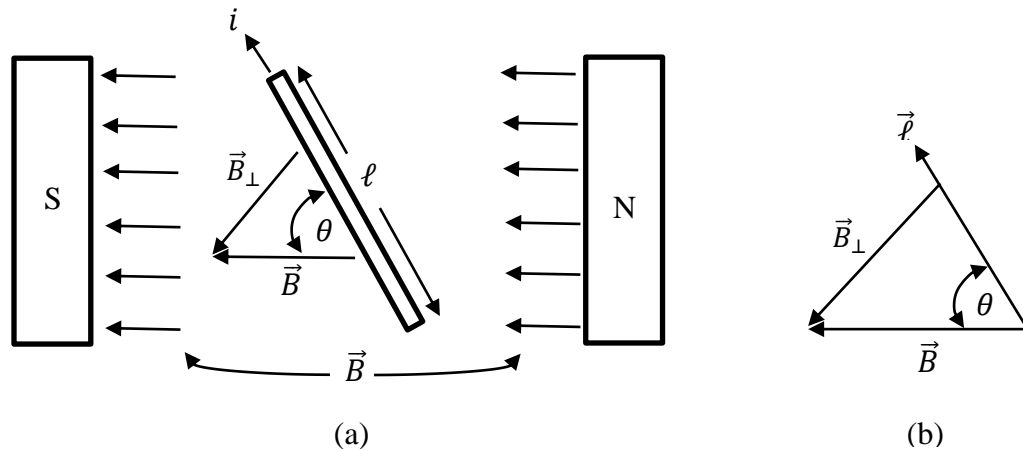


Figura III.5.- La fuerza es perpendicular al componente \vec{B} [Chiasson, 2005].

III.3.4- Ley de Faraday

La ley de Faraday establece que si una espira o bobina de alambre conduce energía eléctrica, se inducirá en esta un voltaje directamente proporcional al flujo con respecto al tiempo y se expresa con la siguiente formula [Chapman, 2000, Wilson y colaboradores, 2007]:

$$e_{ind} = -\frac{d\phi}{dt} \quad \text{III.6}$$

Donde e_{ind} es el voltaje inducido en la espira y ϕ es el flujo que atraviesa la espira, el cual se expresa como [Chiasson, 2005]:

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \text{III.7}$$

Donde $d\vec{S}$ es la diferencial del área, si el vector de densidad de flujo es perpendicular a un plano del área S y la densidad de flujo es constante en toda el área, la ecuación se reduce a [Chapman, 2000]:

$$\phi = BS \quad \text{III.8}$$

S es el área de la sección transversal del núcleo. Cuando una bobina tiene N espiras (vueltas del alambre) y el flujo es el mismo que circula en todas, el voltaje inducido está dado por [Chapman, 2000]:

$$e_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{III.9}$$

Donde N es el número de vueltas de alambre en la bobina. El signo menos en la ecuación caracteriza a una expresión de la ley de *Lenz*, Esta ley establece que la dirección del voltaje inducido en la bobina se opone al cambio que lo causa. Es decir, se producirá en ella una corriente que generara un flujo opuesto al cambio del flujo inicial. El signo positivo o negativo de la fuerza electromotriz inducida *fem*, conocida también como voltaje de describe de la siguiente forma [Halliday y Resnick, 1962, Wilson y colaboradores, 2007]:

Si $e_{ind} > 0$, la fuerza electromotriz inducida obligara a la corriente ir en dirección positiva alrededor de la superficie.

Si $e_{ind} < 0$, la fem inducida cambiara el flujo de la corriente en dirección negativa.

En la Figura III.6 se muestra un imán moviéndose hacia arriba en un circuito de alambre, produciendo un cambio de flujo magnético en el circuito.

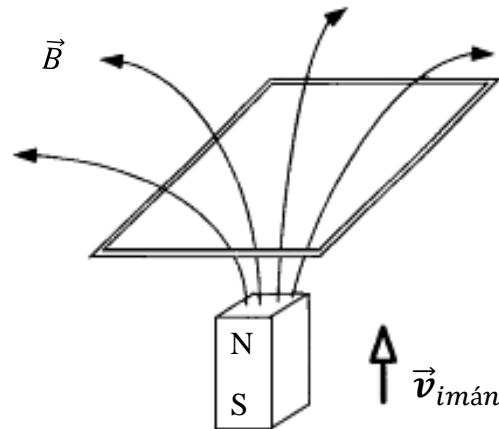


Figura III.6.- Cambio de flujo magnético [Chiasson, 2005].

III.4.- Ecuación dinámica del motor de corriente directa

El motor de corriente directa es el componente principal del sistema eléctrico, el cual se analizará para obtener el modelado del sistema, Este tipo de máquinas tienen la ventaja de realizar su análisis de forma lineal, ya que sus elementos se consideran constantes y sus parámetros son invariantes en el tiempo, lo que permite aplicar una transformación lineal al modelado, esto quiere decir que el sistema ya transformado tiene una transformada inversa que nos devuelve el sistema original. Se analizará el motor mediante el uso de leyes físicas, como el caso de la suma de tensiones eléctricas en una malla, o la suma de fuerzas que se igualan a una fuerza de excitación [Wilson y colaboradores, 2007]. El enfoque físico nos da el conocimiento sobre los parámetros y las unidades físicas del motor de *CD* y nos permite identificar constantes de tiempo en sistemas eléctricos y mecánicos. Para el modelado se considera un motor lineal de corriente directa. El primer paso para modelar un motor de *CD*, es encontrar el torque que es producido, la corriente puede ser reversible (conmutación) a cada mitad de vuelta, lo que permite obtener un torque constante [Matsch y Derald-Morgan, 1987, White y Woodson, 1959].

III.4.1.- Producción de torque

En la Figura III.7 se muestra el esquema de un motor de corriente directa, el cual está constituido por dos núcleos de hierro, generalmente laminado, uno fijo conocido también como carcasa y otro que gira llamado inducido o armadura. Cada uno de ellos cuenta con bobinas de diferentes configuraciones que crean campos electromagnéticos que interactúan entre sí, produciendo una

corriente o un torque motriz en el eje, dependiendo del modo de operación de la máquina eléctrica, modo generador o modo motor [Matsch y Derald-Morgan, 1987].

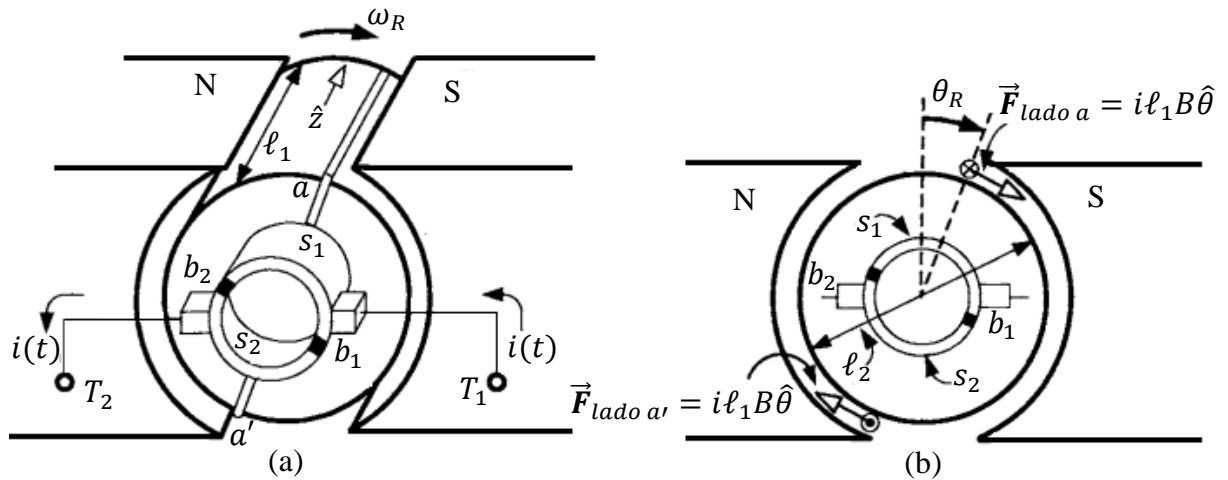


Figura III.7.- Motor de corriente directa [Matsch y Derald-Morgan, 1987]

Donde ℓ_1 es la longitud del rotor, ℓ_2 es el diámetro del rotor, $\vec{F}_{lado a}$ es la fuerza magnética en el lado a , $\vec{F}_{lado a'}$ es la fuerza magnética en el lado a' , ω_R es la velocidad angular del rotor, b_1 y b_2 son las escobillas, s_1 y s_2 son los anillos (colector) y T_1 y T_2 son terminales. En las bobinas del rotor, que en este caso para la máquina de corriente directa se llama inducido o armadura, se induce un voltaje, y en las bobinas inductoras ubicadas en el estator (carcasa), se produce el flujo magnético principal en la máquina (Figura III.8).

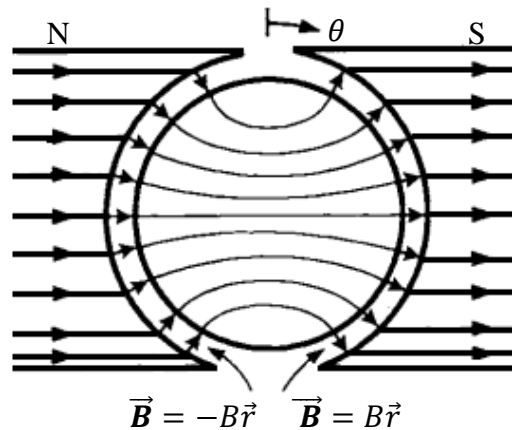


Figura III.8.- Campo magnético producido en el entrehierro [Chiasson, 2005].

La descripción matemática del campo magnético en el entrehierro debido al imán permanente es [Chiasson, 2005]:

$$\vec{B} = \begin{cases} +B\vec{r} & \text{for } 0 < \theta < \pi \\ -B\vec{r} & \text{for } \pi < \theta < 2\pi \end{cases} \quad \text{III.10}$$

Donde $B > 0$ es la magnitud del campo magnético y θ es un lugar arbitrario en el entrehierro.

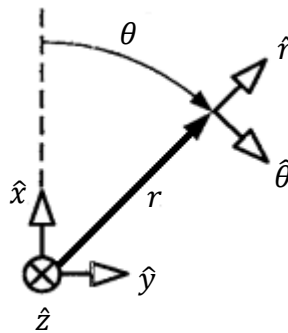


Figura III.9.- Coordenadas cilíndricas del sistema [Chiasson, 2005].

El torque en el rotor se calcula considerando las fuerzas magnéticas $\vec{F}_{lado a}$ y $\vec{F}_{lado a'}$ del circuito y la posición angular de rotor θ_R , como se muestra en la Figura III.7b. Las coordenadas cilíndricas del sistema se observan en la Figura III.9, el vector unitario \hat{z} apunta a lo largo del eje del rotor, $\hat{\theta}$ está en dirección creciente de θ y \hat{r} se encuentra en la dirección creciente de r . En la Figura III.7 se observa que la corriente $i > 0$, en el lado a entra en el circuito y sale en el lado a' , entonces en a , el vector $\vec{\ell} = \ell_1 \hat{z}$, el cual apunta en la dirección positiva del flujo de la corriente, y la fuerza magnética en a se expresa entonces como [Chiasson, 2005]:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{lado a} &= i\vec{\ell} \times \vec{B} \\ \vec{F}_{lado a} &= i(\ell_1 \hat{z}) \times B\hat{r} \\ \vec{F}_{lado a} &= i\ell_1 B\hat{\theta} \end{aligned} \quad \text{III.11}$$

La cual es tangencial al movimiento del rotor (Figura III.7b). Entonces el torque resultante es [Chiasson, 2005]:

$$\begin{aligned}
\vec{\tau}_{lado a} &= \left(\frac{\ell_2}{2}\right) \hat{r} \times \vec{F}_{lado a} \\
\vec{\tau}_{lado a} &= \left(\frac{\ell_2}{2}\right) i \ell_1 B \hat{r} \times \hat{\theta} \\
\vec{\tau}_{lado a} &= \left(\frac{\ell_2}{2}\right) i \ell_1 B \hat{z}
\end{aligned} \tag{III.12}$$

De igual manera la fuerza magnética en el lado a' del rotor es [Chiasson, 2005]:

$$\begin{aligned}
\vec{F}_{lado a'} &= i \vec{\ell} \times \vec{B} \\
\vec{F}_{lado a'} &= i(-\ell_1 \hat{z}) \times (-B \hat{r}) \\
\vec{F}_{lado a'} &= i \ell_1 B \hat{\theta}
\end{aligned} \tag{III.13}$$

El torque correspondiente al lado a' es [Chiasson, 2005]:

$$\begin{aligned}
\vec{\tau}_{lado a'} &= \left(\frac{\ell_2}{2}\right) \hat{r} \times \vec{F}_{lado a'} \\
\vec{\tau}_{lado a'} &= \left(\frac{\ell_2}{2}\right) i \ell_1 B \hat{r} \times \hat{\theta} \\
\vec{\tau}_{lado a'} &= \left(\frac{\ell_2}{2}\right) i \ell_1 B \hat{z}
\end{aligned} \tag{III.14}$$

Teniendo el valor correspondiente del torque en los lados a y a' , se puede encontrar el torque total producido en el rotor, el cual está dado por [Chiasson, 2005]:

$$\begin{aligned}
\vec{\tau}_m &= \vec{\tau}_{lado a} + \vec{\tau}_{lado a'} \\
\vec{\tau}_m &= 2 \left(\frac{\ell_2}{2}\right) i \ell_1 B \hat{z} \\
\vec{\tau}_m &= \ell_1 \ell_2 B i \hat{z}
\end{aligned} \tag{III.15}$$

El torque a lo largo del eje z , que es el eje de rotación, en forma escalar es [Chiasson, 2005]:

$$\tau = K_T i \tag{III.16}$$

Donde $K_T = \ell_1 \ell_2 B$. El par es proporcional a la fuerza del campo magnético en el entrehierro producido por imán permanente.

III.4.2.- Conmutación

La conmutación es el proceso de invertir la corriente en la bobina de la armadura, la inversión se da cuando las barras del conmutador a las que está conectada la bobina pasan bajo una escobilla estacionaria conectada al circuito externo de la armadura. La conmutación se asocia frecuentemente al concepto de bloqueo, la corriente primero se bloquea y enseguida se hace circular en el sentido opuesto. La variación lineal de la corriente en la armadura desde $+I_a$ hasta $-I_a$ es la conmutación ideal (Figura III.10) para los motores de *CD* [Nasar y Unnewehr, 1982].

Otra descripción menciona que la conmutación es el proceso por medio del cual se transforman los voltajes y las corrientes de corriente alterna del inducido de una máquina de corriente directa, en voltajes y corrientes de *CD* en sus terminales. Es la parte más crítica en el diseño y funcionamiento de cualquier máquina de corriente directa [Chapman, 2000].

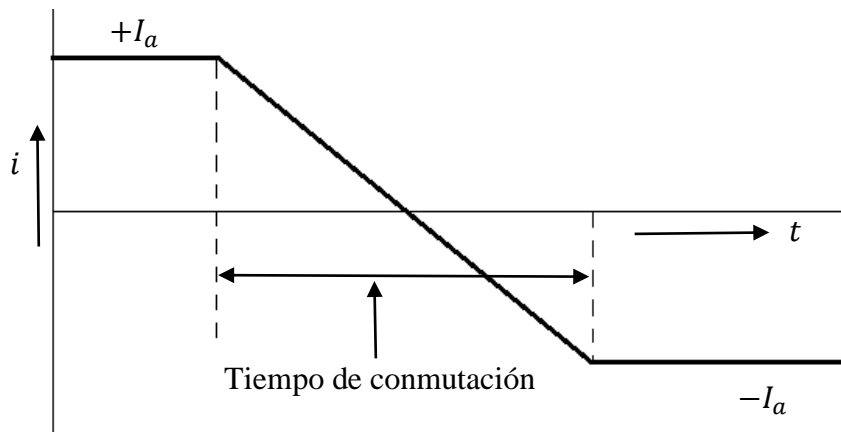


Figura III.10.- Conmutación lineal o ideal

El proceso de conmutación se da cuando $\theta_R = 0$ y $\theta_R = \pi$ mediante el uso de los anillos s_1 y s_2 , y las escobillas b_1 y b_2 , los anillos están unidos rígidamente a la bobina del rotor y giran con ella. Mientras los cepillos están fijados en el espacio con los anillos de deslizamiento, haciendo

contacto eléctrico deslizante con las escobillas cuando la bobina se encuentra girando. Para observar cómo se lleva a cabo el proceso de conmutación de la corriente, se muestra la secuencia en las Figuras III.11a a III.11d. En la Figura III.11a la corriente pasa a través de la escobilla b_1 en el anillo colector s_1 , bajando por el lado a que está por debajo del polo S, regresando por el lado a' que está por debajo del polo N, en el anillo s_2 , saliendo por la escobilla b_2 . La Figura III.11b muestra el circuito del rotor justo antes de la conmutación de corriente [Chiasson, 2005].

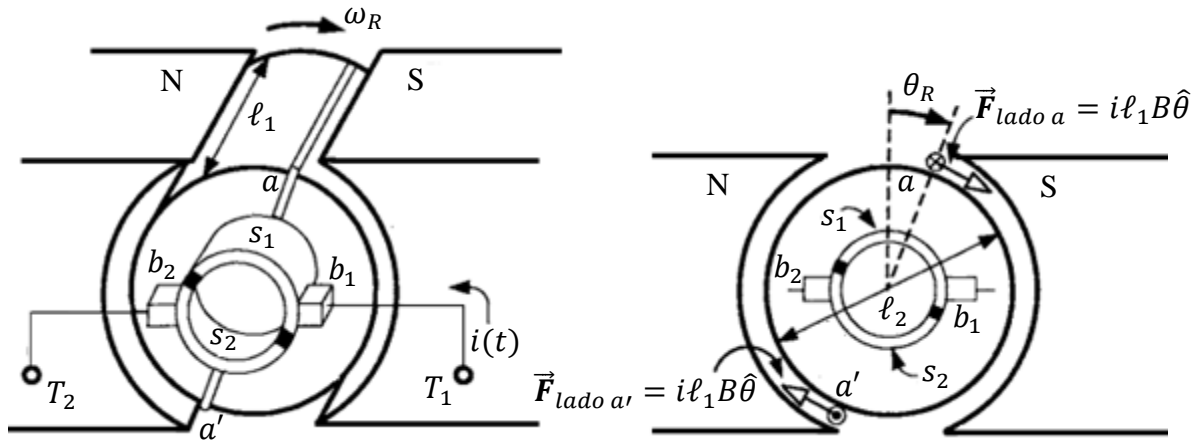


Figura III.11a.- Conmutación cuando $\theta_R = 0$ y $\theta_R = \pi$

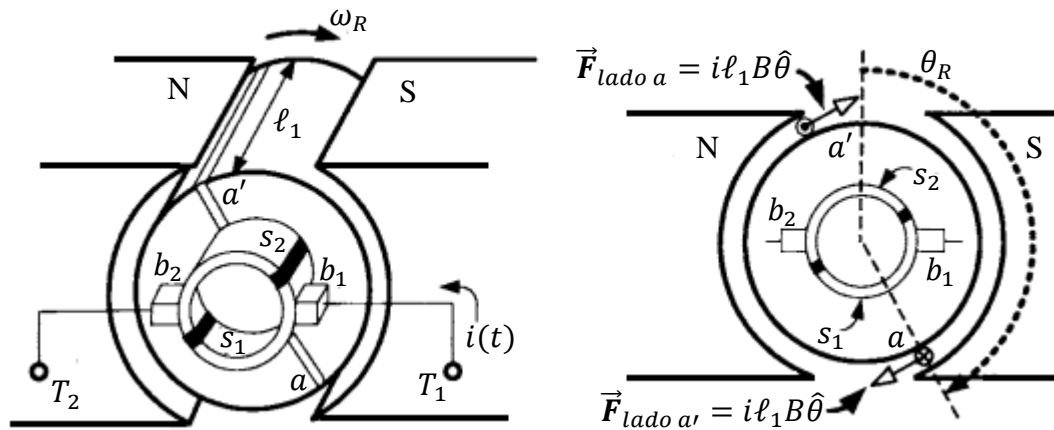


Figura III.11b.- Circuito del rotor justo antes de conmutar donde $0 < \theta_R < \pi$

Cuando $\theta_R = \pi$, los anillos en los extremos del circuito están en cortocircuito por las escobillas, esto obliga que la corriente sea cero en ese momento (Figura III.11c), ocasionando que la corriente pase a través de la escobilla b_1 en el anillo colector s_2 , viajando en dirección del lado a'

del circuito, y regresa por el lado a con $\pi < \theta_R < 2\pi$ (Figura III.11d). En otras palabras la corriente ha invertido su dirección en el circuito. Como resultado la corriente en el circuito cambia su dirección cada media vuelta [Chiasson, 2005].

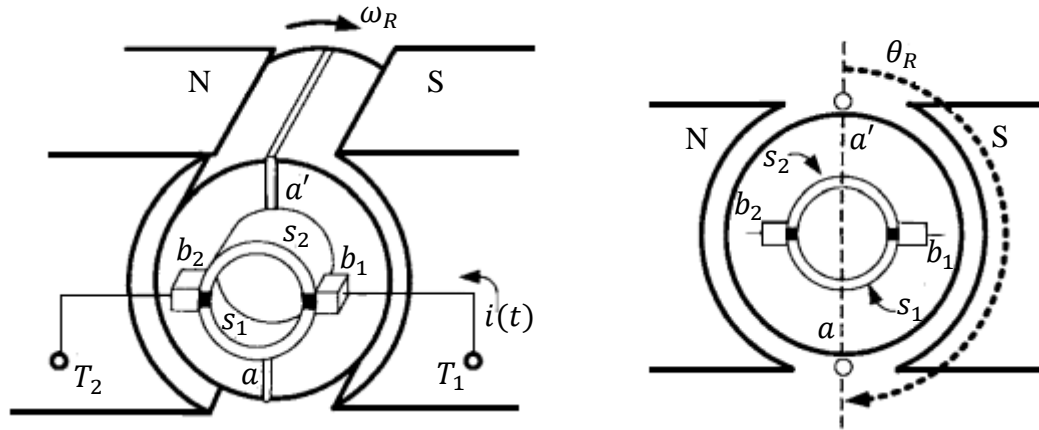


Figura III.11c.- Extremos del circuito del rotor en cortocircuito (cuando $\theta_R = \pi$)

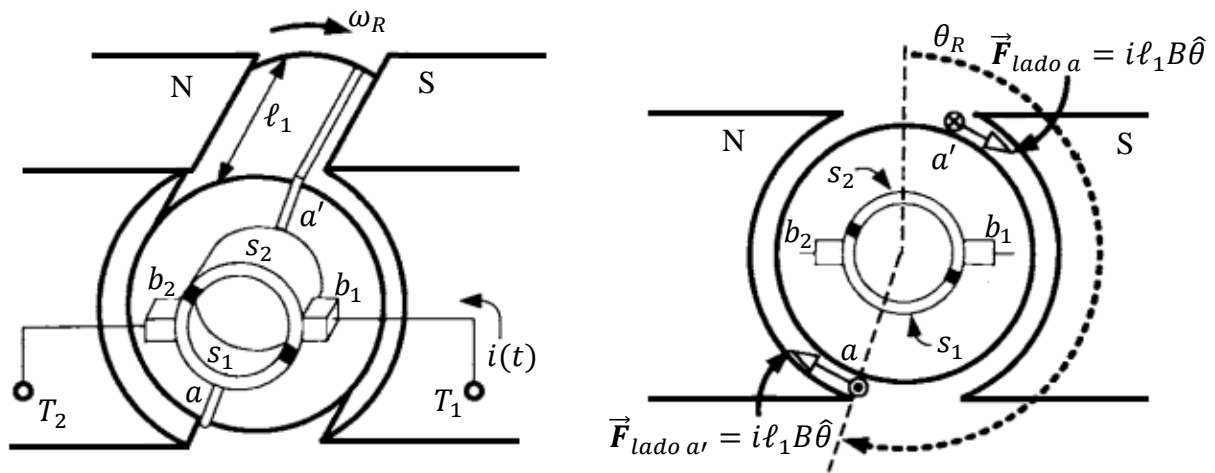


Figura III.11d.- Circuito del rotor después de conmutar (cuando $\pi < \theta_R < 2\pi$)

De acuerdo al análisis realizado del motor de corriente continua y el circuito que representa al motor (Figura III.12), se pueden encontrar las ecuaciones dinámicas que describen el comportamiento del motor de cd.

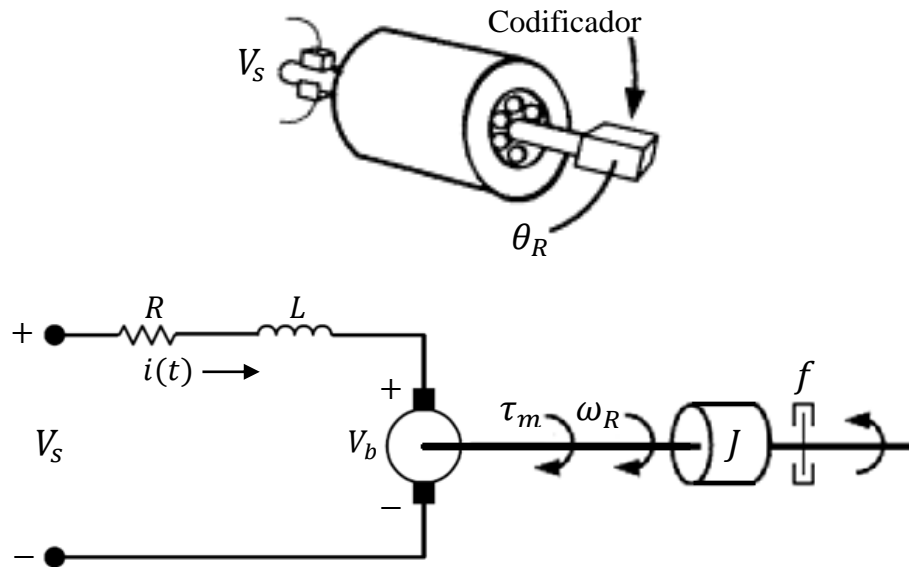


Figura III.12.- Esquema del motor de *CD*

Donde R es la resistencia óhmica de los embobinados del rotor, L es la inductancia de los embobinados del rotor, J es el momento de inercia del rotor, f es el coeficiente de fricción viscosa entre el rotor y el estator, V_s es la fuente de voltaje del sistema, ω_R es la velocidad angular del rotor, τ_m es el torque del rotor, $i(t)$ es la corriente del sistema y V_b es la tensión eléctrica inducida. De esta manera el modelado de la parte eléctrica del sistema se desarrolla observando el circuito electrico (malla electrica) del motor (Figura III.13).

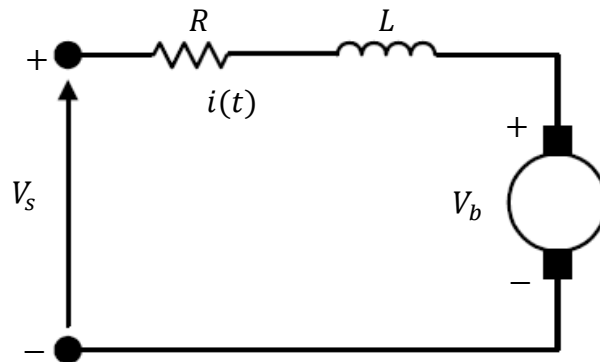


Figura III.13.- Circuito eléctrico del motor de *CD*

La suma de tensiones eléctricas en cada elemento de la malla, es igual a la tensión de la fuente de excitación, y se expresa de la siguiente forma. La fuerza electromotriz (Voltaje) total en el circuito debido a la fuente de voltaje V_s , el imán permanente externo y el cambio de corriente i en el circuito del rotor es [Chiasson, 2005]:

$$V_s - K_b \omega_R - L \frac{di}{dt} \tag{III.17}$$

Este voltaje va en contra de la resistencia del circuito por lo que se tiene [Chiasson, 2005]:

$$Ri = V_s - K_b \omega_R - L \frac{di}{dt} \tag{III.18}$$

Despejando la inductancia de los embobinados se obtiene [Chiasson, 2005]:

$$L \frac{di}{dt} = V_s - K_b \omega_R - Ri \tag{III.19}$$

Y expresado en terminos del voltaje total V_s , la ecuacion se expresa como [Chiasson, 2005]:

$$V_s = Ri + L \frac{di}{dt} + K_b \omega_R \tag{III.20}$$

Donde $K_b \triangleq \ell_1 \ell_2 B$, y es llamada la constante de fuerza contraelectromotriz. Esta relacion se ilustra con el circuito equivalente de la Figura III.14.

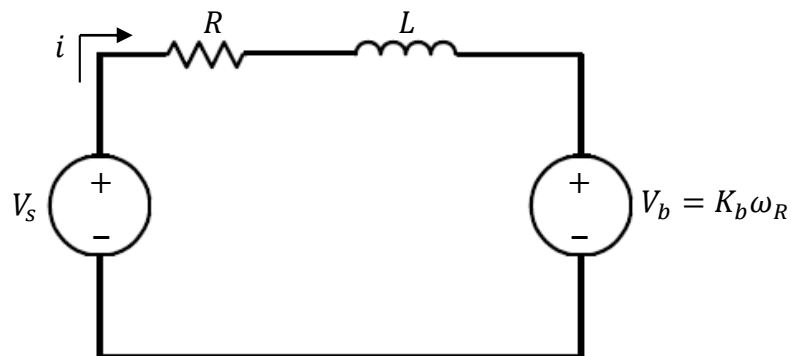


Figura III.14.- Circuito equivalente de la dinámica eléctrica del inducido

El modelado de la parte mecánica se obtiene de acuerdo a el diagrama de cuerpo libre que se muestra a continuación (Figura III,15).

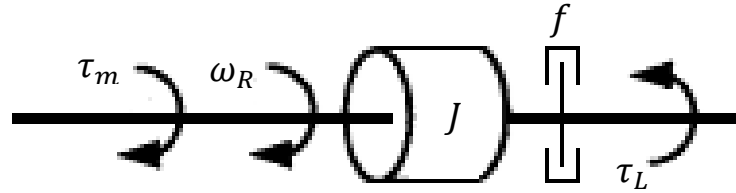


Figura III.15.- Diagrama de cuerpo libre de la parte mecánica

Recordando que el torque τ_m en el circuito provocado por el campo magnetico, actuando sobre la corriente es $\tau_m = K_T i$, el cual es llamado torque constante o torque del motor. Conectando un eje o engranes al final de uno de los lados del circuito, el motor puede seer usado para trabajo, por ejemplo levantar peso, etc. Las escobillas y los cojinetes producen una fricción en el torque y se representa como $-f\omega_R$, donde f es el coeficiente de fricción viscosa, y τ_L es el torque de carga. Estas constantes son utilizadas para hacer vínculo entre la parte mecánica y la parte eléctrica del motor. Entonces utilizando las leyes de *Newton*, la suma de fuerzas que hacen girar al rotor respecto al eje simétrico, es igual a la suma de momentos que se oponen al movimiento del mismo, por lo que se tiene que [*Chiasson, 2005* y *Krause y colaboradores, 2002*]:

$$\begin{aligned} \tau_m - \tau_L - f\omega_R &= J \frac{d\omega_R}{dt} \\ J \frac{d\omega_R}{dt} &= K_T i - \tau_L - f\omega_R \end{aligned} \tag{III.21}$$

Donde J es el momento de inercia del rotor. Después de analizar el motor de *CD*, se obtuvo el sistema de ecuaciones que lo describen, las cuales son [*Chiasson, 2005*]:

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= V_s - K_b \omega_R - Ri \\ J \frac{d\omega_R}{dt} &= K_T i - \tau_L - f\omega_R \\ \frac{d\theta_R}{dt} &= \omega_R \end{aligned} \tag{III.22}$$

III.5.- Conversión de energía electromecánica

Se ha mencionado que los campos magnéticos producen fuerzas mecánicas, para la conversión de energía, el movimiento mecánico es tan importante como la fuerza mecánica. Por lo que, durante un movimiento mecánico, la energía almacenada en el campo magnético se perturba. La fuerza mecánica producida por el motor de CD es [Chiasson, 2005]:

$$\tau_m \omega_R = K_T i \omega_R = i \ell_1 \ell_2 B \omega_R \quad \text{III.23}$$

La energía eléctrica absorbida por la fuerza contra electromotriz es:

$$iV_b = iK_b \omega_R = i \ell_1 \ell_2 B \omega_R \quad \text{III.24}$$

El hecho de que $K_T = K_b = i \ell_1 \ell_2 B$, es por el principio de conservación de la energía, en otras palabras, la energía eléctrica absorbida por la fuerza contra electromotriz es igual a la energía mecánica producida. La ecuación que describe a la conversión de energía es [Chiasson, 2005]:

$$V_s = Ri + \frac{Ldi}{dt} + V_b \quad \text{III.25}$$

La salida de energía de la fuente de voltaje $V_s(t)$ esta dada por [Chiasson, 2005]:

$$\begin{aligned} V_s(t)i(t) &= Ri^2(t) + Li \frac{di}{dt} + iK_b \omega_R \\ V_s(t)i(t) &= Ri^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) + K_T i \omega_R \\ V_s(t)i(t) &= Ri^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) + \tau_m \omega_R \end{aligned} \quad \text{III.26}$$

Por lo tanto, la entrada de potencia $V_s(t)i(t)$ por la fuente, pierde calor en la resistencia R , almacenando energía magnética en la inductancia L del circuito y la cantidad de potencia de iV_b se transfieren a la energía mecánica $\tau_m \omega_R$ [Chiasson, 200, White y Woodson, 1959].

Con las características del motor eléctrico, se tendrá un mejor entendimiento del funcionamiento del mismo, en el capítulo IV se realizará un análisis analítico considerando la fuerza de tracción del vehículo, la inercia total del modelo y la velocidad a la que se trabaja, obteniéndose el modelo matemático representa el sistema mecánico. Esto permitirá desarrollar el sistema de control que describirá la estabilidad y la eficiencia del motor.

III.6.- Sumario

En el presente capítulo se realizó un análisis del motor de corriente directa, en el cual se describió su estructura. Así como el funcionamiento del mismo. Se presentan los conceptos fundamentales del motor de corriente directa y se seleccionó un motor de *CD* de 15 HP (11.4 kW) nominal y 62 HP pico a 4950 rpm, 72-120 V con un peso de 38 kg. El análisis del motor ayudará a entender el funcionamiento del mismo, permitiendo obtener una idea más clara del modelado matemático. El modelado matemático del motor de corriente continua requiere de dos ecuaciones, una ecuación mecánica y otra ecuación eléctrica. Estas ecuaciones están acopladas y se obtienen por medio de las leyes de la dinámica, de *Faraday* y de *Kirchhoff*, respectivamente. Por una parte, la ecuación mecánica modela principalmente el movimiento del rotor, y por otra parte la ecuación eléctrica modela lo que ocurre en el circuito eléctrico del inducido.

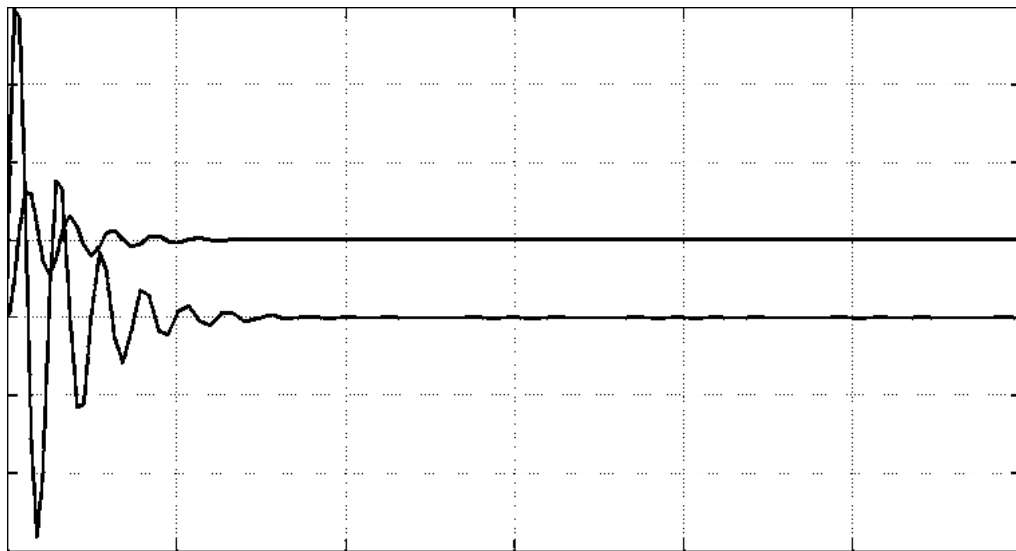
El capítulo siguiente se enfoca a la obtención del modelo matemático con la intención de obtener las ecuaciones que representan el comportamiento del sistema, para después realizar la linealización de éste, con lo que se desarrollará el sistema de control, así como la simulación y características del sistema de control.

III.7.- Referencias

- Advanced DC Motors, <http://www.evmotors.com.au/index.html>, 2012.
- Chapman, S., *Máquinas Eléctricas*, Tercera Edición, Ed. McGraw-Hill, pp 1-50, 2000.
- Chiasson, J., *Modeling and High-Performance Control of Electric Machines*, Ed. Jonh Wiley and Sons, pp. 3-29, 2005.
- Haber-Schaim, U., Dodge, J., Gardner, R. y Shore, E., *PSSC Physics*, Séptima Edición, Ed. Kendall/Hunt, 1991.
- Halliday, D. y Resnick, R., *Physics Volume II*, Ed. John Wiley & Sons, pp 873-877, 1962.

-
- Husain, I., *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*, Ed. CRC Press LLC, pp 95-103, 2003.
- Krause, P., Wasynczuk, O. y Sudhoff, S., *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, Segunda Edición, Ed. John Wiley & Sons, pp 1-28, 67-78, 2002.
- Larminie, J., *Electric Vehicle Technology Explained*, Ed. Oxford Brookes University, pp 140-155, 2003.
- Matsch, L. W. y Deral-Morgan, J., *Electromagnetic and Electromechanical Machines*, Tercera Edición, Ed. John Wiley & Sons, pp 317-403, 1987.
- Nasar, S. A. y Unnewehr, L. E., *Electromecánica y Máquinas Eléctricas*, 1a Edición, Ed. Limusa, pp 181-252, 1982.
- Vehizero, http://www.lohechoenmexico.mx/?p=145#.Vg84p_1_Oko, 1999.
- White D. y Woodson, *Electromechanical Energy Conversion*, Ed. John Wiley & Sons, pp. 421-470, 1959.
- Wilson, J., Buffa, A. y Bo L. *Física*, Sexta Edición, Ed. Pearson, pp. 517-529, 568-583, 623-678, 2007.

CAPÍTULO IV



CONTROL LINEAL

IV.1.- Introducción

En este capítulo se desarrollará el sistema de control del modelo dinámico del freno. El cual permitirá controlar la velocidad del motor eléctrico y obtener una regeneración en el sistema de frenado más eficiente. En la actualidad los sistemas mecánicos, eléctricos, hidráulicos y mecatrónicos tienen la versatilidad de implementar sistemas de control. Con el objetivo de mejorar el desempeño de las maquinas eléctricas. La implementación de los sistemas de control ha sido un eslabón clave en el avance tecnológico. Abriendo paso a los sistemas de control inteligente, aplicados en la industria robótica, automotriz, aérea entre otros. Así como, la flexibilidad en los programas de control le da una amplia gama de soluciones y aplicaciones a los sistemas de control.

El término control se define como el uso de algoritmos y retroalimentación en sistemas de ingeniería, como lazos de retroalimentación en amplificadores electrónicos, controladores de puntos establecidos en procesos químicos y de materiales, sistemas de control de vuelo (*fly-by-wire*) en las aeronaves e incluso control de flujo de datos en internet. Aplicaciones en vehículos autónomos y robots, sistemas de gestión en tiempo real y sistemas de ingeniería biológica. El control es una ciencia de la información, e incluye el uso de información analógica y digital [Astrom y Murray, 2009].

En años recientes el uso de controladores digitales en sistemas de control se ha incrementado de manera sorprendente en la industria como en las diferentes áreas de investigación, controlando los sistemas dinámicos en forma digital para alcanzar un desempeño eficiente y óptimo, buscando como resultado una mayor productividad, minimizar costos y consumo mínimo de energía. La dinámica de sistemas físicos, sean mecánicos, eléctricos, térmicos, económicos, biológicos, etc., se describe en términos de ecuaciones diferenciales. Las cuales se obtienen a partir de leyes físicas que gobiernan un sistema determinado, como las leyes de *Newton* para sistemas mecánicos y las leyes de Kirchhoff para sistemas eléctricos. Obtener un modelo matemático razonable es la parte más importante de todo el análisis [Ogata, 2010].

Las principales funciones del sistema de control son maximizar los kilómetros por litro y reducir al mínimo las emisiones de escape. Funciones menores del sistema de control incluyen la vigilancia y protección de los componentes [Fuhs, 2009].

IV.2.- Modelo dinámico del sistema

Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión. Un sistema puede representarse, con modelos matemáticos diferentes, dependiendo de cada perspectiva. Dependiendo del sistema y de las circunstancias específicas, un modelo matemático puede ser más conveniente que otros. Una vez obtenido un modelo matemático de un sistema físico, se usan diversos recursos analíticos, así como computadoras para estudiarlo y sintetizarlo [Ogata, 2010].

Con las ecuaciones mencionadas en el Capítulo II, se obtendrán valores que representan el comportamiento mecánico del sistema de frenado. En otras palabras el rendimiento mecánico del vehículo eléctrico. Es necesario saber características esenciales del sistema como la fuerza total de tracción, la cual está compuesta por la fuerza de resistencia al viento, la fuerza de resistencia a la tracción entre otras, velocidad angular y momento de inercia de los componentes rotativos por mencionar algunos [Husain, 2003 y Larminie, 2003].

La resistencia a la tracción F_{rr} , está dada por la Ecuación II.1, donde μ_{rr} que es el coeficiente de tracción, tiene un valor de 0.005 con neumáticos para vehículos eléctricos, para ruedas de estructura radial convencional 0.015, con una masa m igual con 737.550 kg, la cual es el peso total del vehículo y una gravedad constante g , se obtiene que [Larminie, 2003]:

$$F_{rr} = \mu_{rr}mg$$

$$F_{rr} = 0.005(737.550kg) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$F_{rr} = 36.176 \text{ kg } m/s^2$$

La fuerza de resistencia al viento F_{ad} , se calcula con la Ecuación II.2, la cual está constituida por ρ que es la densidad del aire igual con 1.25 kgm^3 , A el área frontal con un valor de 1.78 m^2 , v la velocidad del automóvil y $C_d = 0.3$, constante llamada coeficiente de arrastre. El cual se puede

reducir mediante un buen diseño del vehículo. Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación se tiene que [Husain, 2003 y Larminie. 2003]:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2$$

$$F_{ad} = \frac{1}{2} 1.25 \text{kgm}^3 (1.78 \text{m}^2) (0.3) v^2$$

La fuerza necesaria para conducir el vehículo por una pendiente F_{hc} , se encuentra con la Ecuación II.3, donde m es la masa del auto igual con 737.550kg , ψ es el ángulo de inclinación de la pendiente con un valor de 30° y una gravedad constante g , sustituyendo valores en la ecuación se obtiene:

$$F_{hc} = mg \sin \psi$$

$$F_{hc} = (-737.550 \text{kg}) \left(-9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (\sin 30)$$

$$F_{hc} = 3617.682 \text{ N}$$

La fuerza de aceleración F_{la} , se presenta cuando hay cambios en la velocidad del automóvil y está dada por la Ecuación II.4, que es simplemente la segunda ley de *Newton*, donde la masa m del automóvil igual con 737.550 kg y a la aceleración [Larminie, 2003].

$$F_{la} = ma$$

$$F_{la} = (737.550 \text{ kg})a$$

En el Capítulo II, se menciona que es necesario tomar en cuenta el torque del motor eléctrico, así como sus velocidades, ya que por consecuencia hacen girar los elementos rotatorios del automóvil, provocando una aceleración angular y lineal, que es simplemente la aceleración del vehículo. En la aceleración intervienen todos los elementos mecánicos del automóvil, lo que permite representar el rendimiento del mismo [Larminie. 2003].

La fuerza total de tracción F_{te} expresada en la Ecuación II.12, representa la suma de todas las fuerzas involucradas en el vehículo cuando está en movimiento, la cual se expresa de la siguiente manera [Husain, 2003 y Larminie, 2003]:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{\omega a}$$

Sabiendo que la Ecuación II.6, representa el torque del motor eléctrico, la cual se obtiene con la siguiente expresión [Larminie, 2003]:

$$T = \frac{F_{te}r}{G}$$

Despejando F_{te} de la ecuación de torque se obtiene que [Larminie, 2003]:

$$F_{te} = T \frac{G}{r} \quad \text{IV.1}$$

La fuerza necesaria para proporcionar la aceleración angular $F_{\omega a}$, se calcula con la Ecuación II.5.

$$F_{\omega a} = I \frac{G^2}{r^2} a$$

Debido que los sistemas de engranaje o transmisión de los vehículos eléctricos usualmente es muy simple, esta ecuación permite suponer que el sistema de engranaje no causara perdidas y será 100% eficiente y la eficiencia que regularmente se obtiene es alta. Sin embargo, es muy difícil de obtener el 100 %, por lo que se incorpora un coeficiente de eficiencia a los sistemas de engranaje del auto, el cual es conocido como η_g . Por consecuencia la fuerza necesaria en las ruedas para proporcionar la aceleración será un poco más grande, Con la incorporación del coeficiente, la Ecuación II.5 queda de la siguiente manera [Larminie, 2003]:

$$F_{\omega a} = I \frac{G^2}{\eta_g r^2} a \quad \text{IV.2}$$

En el caso de que se desconozca el valor del momento de inercia I , se le da una aproximación razonable, aumentando el valor de la masa del vehículo un 5% en la ecuación II.4, ignorándose el término del momento de inercia en la Ecuación IV.2 [Larminie, 2003].

El torque máximo de un vehículo eléctrico es constante en la mayoría de los casos a una velocidad baja, hasta que la velocidad del motor alcanza un valor crítico ω_c , se presenta una disminución en el torque. En un motor de imán permanente de corriente directa, el torque disminuye linealmente con el aumento de la velocidad, en otros tipos de motor, el torque del motor disminuye de manera que la potencia permanece constante. La velocidad angular del motor depende del radio de transmisión o engranaje y del radio del neumático, por lo que se puede decir que [Larminie, 2003]:

Si $\omega < \omega_c$, o $v < \frac{r}{G} \omega_c$, entonces:

$$T = T_{max} \quad \text{IV.3}$$

Una vez que ha pasado la fase en donde el torque es constante, y en donde en la mayoría de los motores la potencia se vuelve constante, se dice que [Larminie, 2003]:

Si $\omega \geq \omega_c$, o $v \geq \frac{r}{G} \omega_c$, entonces:

$$T = \frac{T_{max}\omega_c}{\omega} = \frac{rT_{max}\omega_c}{Gv} \quad \text{IV.4}$$

Habiendo obtenido las ecuaciones que describen los parámetros del rendimiento mecánico del vehículo, se puede determinar la aceleración del mismo, realizando una combinación de estas. Los términos en las ecuaciones son constantes, lo que permite encontrar estos datos en las especificaciones de los elementos o del propio automóvil. Una vez que se han planteado todos los términos que intervienen en el cálculo de la fuerza de tracción del vehículo, entonces puede determinarse la ecuación de rendimiento.

Sustituyendo los valores de F_{rr} (Ecuación II.1), F_{ad} (Ecuación II.2), F_{hc} (Ecuación II.3), F_{la} (Ecuación II.4) y $F_{\omega a}$ (Ecuación IV.2) en la ecuación II.12, sabiendo que la densidad del aire es igual con 1.25 kgm^3 , y que el auto está a nivel del piso se tiene que [Larminie, 2003]:

$$F_{te} = \mu_{rr}mg + \frac{1}{2}(1.25)AC_d v^2 + ma + I \frac{G^2}{\eta_g r^2} a \quad \text{IV.5}$$

Sabiendo que la aceleración $a = \frac{dv}{dt}$ y sustituyendo el valor de la Ecuación IV.1 en F_{te} , se obtiene la ecuación de rendimiento mecánico del vehículo eléctrico [Larminie, 2003].

$$T \frac{G}{r} = \mu_{rr}mg + \frac{1}{2}(1.25)AC_d v^2 + \left(m + I \frac{G^2}{\eta_g r^2} \right) \frac{dv}{dt} \quad \text{IV.6}$$

Tomando en cuenta que el torque del motor T , es una función de la velocidad, se puede reducir la ecuación anterior, en una función diferencial de primer orden, ya que el valor de la velocidad se puede encontrarse en cualquier valor del tiempo, si la fase inicial de la aceleración presenta un torque de motor $T = T_{max}$, la Ecuación IV.6 se expresa como:

$$T_{max} \frac{G}{r} = \mu_{rr}mg + \frac{1}{2}(1.25)AC_d v^2 + \left(m + I \frac{G^2}{\eta_g r^2} \right) \frac{dv}{dt} \quad \text{IV.7}$$

La Ecuación IV.7, permitirá conocer algunos parámetros del rendimiento mecánico del vehículo se procede a sustituir valores. Como el momento de inercia I del motor eléctrico es desconocido para el último término de la ecuación, se incrementará la masa del vehículo un 5%, obteniendo un valor $m = 774.427 \text{ kg}$ en el último término de la ecuación. Con un rango en el sistema de engranaje $G = 4$, y un radio $r = 0.19 \text{ m}$ de las ruedas, y un motor eléctrico de 120 V de 15 HP (11.4 kW) a 4950 rpm, La eficiencia del acoplamiento entre el motor eléctrico y las ruedas del vehículo se estima en un 95%, por lo que el coeficiente de eficiencia del sistema de engranaje η_g será igual con 0.95. Entonces sustituyendo valores en la Ecuación IV.7, se obtiene que:

$$T_{max} \times 0.95 \times \left(\frac{4}{0.19} \right) = 0.005(737.550)(9.81) + \frac{1}{2} 1.25(1.78)(0.3)v^2 + 774.427 \frac{dv}{dt}$$

$$T_{max} \times 20 = 36.176 + 0.333v^2 + 774.427 \frac{dv}{dt}$$

$$T_{max} = \frac{36.176}{20} + \frac{0.333v^2}{20} + \frac{774.427}{20} \frac{dv}{dt}$$

$$T_{max} = 1.808 + 0.016v^2 + 38.721 \frac{dv}{dt} \quad \text{IV.8}$$

La Ecuación IV.8 representa el modelo mecánico del vehículo, con la cual se realizará el sistema de control, que permitirá tener una manipulación de la velocidad en el motor eléctrico.

IV.3.- Control lineal del modelo matemático del vehículo

Un sistema se denomina lineal si se aplica el principio de superposición. Este principio establece que la respuesta producida por la aplicación simultánea de dos funciones de entradas diferentes es la suma de las dos respuestas individuales, la respuesta a varias entradas se calcula tratando una entrada cada vez y sumando los resultados, permitiendo desarrollar soluciones complicadas para la ecuación diferencial lineal a partir de soluciones simples. Si en un sistema dinámico son proporcionales la causa y el efecto, el sistema se considera lineal [Ogata, 2010].

Cuando se analizan y diseñan sistemas dinámicos no lineales de circuitos eléctricos, sistemas mecánicos, sistemas de control, entre otros, es necesario tener el conocimiento de una amplia gama de herramientas para la estabilidad de los sistemas no lineales, tales como la estabilidad de los sistemas de retroalimentación de entrada – salida, herramientas para la detección y el análisis de las oscilaciones libres, incluido el método de la función que describe. Herramientas asintóticas de teoría de la perturbación, como control de retroalimentación no lineal, linealización, control integral, retroalimentación exacta de linealización, control de modo deslizante, método de Lyapunov, control basado en la pasividad, y control adaptativo [Khalil, 1996].

La teoría de control moderna en los sistemas de ingeniería presenta una mayor complejidad, debido a que los sistemas físicos cuentan con tareas más complejas, las cuales requieren mayor precisión, los sistemas complejos pueden tener múltiples entradas y múltiples salidas y ser variantes en el tiempo. Debido a la necesidad de cumplir requisitos cada vez más exigentes en el comportamiento de los sistemas de control, el aumento en la complejidad del sistema y el fácil

acceso a las computadoras a gran escala, la teoría moderna de control, que es una nueva aproximación al análisis y diseño de los sistemas de control complejo, se ha desarrollado desde 1960. Esta nueva aproximación se basa en el concepto de estado. El concepto de estado ha existido durante bastante tiempo en el campo de la dinámica clásica y en otros campos. El estado de un sistema dinámico es el conjunto de variables más pequeño (variables de estado), de forma que el conocimiento de estas variables, junto con el conocimiento de la entrada, determina completamente el comportamiento del sistema. Las variables de un sistema dinámico son las variables que constituyen el menor conjunto de variables que determinan el estado del sistema dinámico [Ogata, 2010].

Los sistemas dinámicos se modelan por medio de un número finito de ecuaciones diferenciales de primer orden, las cuales representan la memoria pasada del sistema dinámico [Khalil, 1996].

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(t, x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, \dots, u_p) \\ \dot{x}_2 &= f_2(t, x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, \dots, u_p) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(t, x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, \dots, u_p)\end{aligned}\tag{IV.9}$$

Donde:

\dot{x}_1 , es la derivada de x_1 , respecto al tiempo t .

x_1, x_2, \dots, x_n , son variables de estado.

u_1, \dots, u_p , son variables de entrada.

Escribiendo estas ecuaciones en forma matricial se tiene que [Khalil, 1996]:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_p \end{bmatrix}, f(t, x, u) = \begin{bmatrix} f_1(t, x, u) \\ \vdots \\ f_n(t, x, u) \end{bmatrix}\tag{IV.10}$$

Entonces escribiendo la $n - \text{ésima}$ ecuación diferencial de primer orden, como una ecuación vectorial diferencial $n - \text{dimensional}$ de primer orden se tiene la ecuación dinámica del sistema o ecuación de estado [*Khalil, 1996, Astolfi y Marconi, 2008*]:

$$\dot{x} = f(t, x, u) \quad \text{IV.11}$$

La cual se acompaña de la ecuación de salida del sistema, siendo esta [*Astolfi y Marconi, 2008*]:

$$y = h(t, x, u) \quad \text{IV.12}$$

Donde:

y , es un vector de salida, el cual se representa en forma vectorial como:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \text{IV.13}$$

Dando otra descripción, se puede decir también que en un sistema físico, y representa los sensores, x las variables de entrada y u los actuadores. Las Ecuaciones IV.11 y IV.12 forman el modelo de espacio de estados o modelo de estados. Los modelos matemáticos de sistemas físicos, no siempre se encuentran en la forma de modelo de espacio de estados. Analizando el sistema físico y realizando una elección cuidadosa en las variables de estado, se pueden modelar estos sistemas en la forma de modelo de estados [*Astolfi y Marconi, 2008*].

En ocasiones el modelo de estados se encuentra sin presencia explícita de una entrada u y se nombra como, ecuación de estado no forzado. Esto no significa que la entrada al sistema sea cero. Podría ser que la entrada ha sido especificada como una función de tiempo dado $u = \gamma(t)$, una función de retroalimentación de estado $u = \gamma(x)$ o ambos $u = \gamma(t, x)$ [*Khalil, 1996*].

$$\dot{x} = f(t, x) \quad \text{IV.14}$$

Otro caso especial se presenta cuando la función f no depende explícitamente de t , en este caso se dice que el sistema es invariante en el tiempo o autónomo. El comportamiento de un sistema autónomo es invariante a los cambios en el origen del tiempo, debido al cambio de la variable de tiempo t a $\tau = t - a$, no se modifica el lado derecho de la ecuación de estado, entonces el sistema no es autónomo, y es llamado sistema no autónomo o variable en el tiempo [Khalil, 1996].

$$\dot{x} = f(x) \quad \text{IV.15}$$

IV.3.1.- Puntos de equilibrio

Una de las características importantes de los sistemas no lineales en la ecuación de estado es el punto de equilibrio. Un punto $x = x^*$ en el espacio de estados, es punto de equilibrio de $\dot{x} = f(t, x)$, si tiene la propiedad de que cada vez que el estado del sistema comienza en x^* , permanecerá en x^* para todos los tiempos futuros. Su cálculo se obtiene como [Khalil, 1996]:

$$0 = f(x, 0) \quad \text{IV.16}$$

Para el sistema autónomo, los puntos de equilibrio son las raíces reales de la ecuación. Los sistemas no lineales pueden tener más de un punto de equilibrio diferente, entre los cuales se encuentran puntos de equilibrio estable y puntos de equilibrio inestables. Un punto de equilibrio podría ser aislado; es decir, no hay otros puntos de equilibrio en sus proximidades, o podría haber un continuo de puntos de equilibrio [Khalil, 1996].

Para sistemas lineales, el modelo de estado formado por las Ecuaciones IV.11 y IV.12, toma la forma especial de [Byrnes, Delli e Isidori, 1997 y Ogata, 2010]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(t, x, u) \rightarrow \dot{x} = A(t)x + B(t)u \\ y &= h(t, x, u) \rightarrow y = C(t)x + D(t)u \end{aligned} \quad \text{IV.17}$$

Donde:

$A(t)$ matriz de estado.

$B(t)$ matriz de entrada.

$C(t)$ matriz de salida.

$D(t)$ matriz de transmisión directa.

Sin embargo, la linealización por sí sola no será suficiente, por lo que se deben desarrollar e implementar herramientas para el análisis de sistemas no lineales. En la linealización existen dos limitaciones básicas [Khalil, 1996].

En primer lugar, la linealización es una aproximación en un campo de trabajo de un punto de funcionamiento, se puede predecir solamente el comportamiento local del sistema no lineal dentro del campo de trabajo de ese punto. En segundo lugar, la dinámica de un sistema no lineal presenta fenómenos no lineales que no pueden ser descritos por los modelos lineales. A continuación se mencionan algunos fenómenos no lineales [Khalil, 1996]:

- Tiempo de escape finito.- El estado de un sistema lineal inestable tiende a infinito, el estado de un sistema no lineal, puede ir a infinito en tiempo finito.
- Equilibrios múltiples aislados.- Un sistema lineal puede tener sólo un punto aislado de equilibrio, sólo tiene un punto de funcionamiento en estado estacionario, que atrae el estado del sistema, independientemente del estado inicial. Un sistema no lineal puede tener más de un punto aislado de equilibrio. El estado puede converger a uno de los puntos de operación de estado estacionario, dependiendo del estado inicial del sistema.
- Ciclos límite.- Un sistema lineal invariante en el tiempo puede oscilar, si tiene por lo menos un par de valores propios en el eje imaginario, la cual es una condición casi imposible de mantener por la presencia de perturbaciones, si se logra, la amplitud de oscilación será dependiente del estado inicial. La oscilación estable en casos reales se produce mediante sistemas no lineales. En algunos casos pueden entrar en una oscilación de amplitud y frecuencia fija, con independencia del estado inicial. Este tipo de oscilación se conoce como un ciclo límite.
- Oscilaciones sub-armónicas, armónicas, o casi-periódicas.- En un sistema lineal estable, con una entrada periódica produce una salida de la misma frecuencia. Un sistema no lineal bajo excitación periódica puede oscilar con frecuencias que son submúltiplos o múltiplos de la frecuencia de entrada. Incluso puede generar una

oscilación casi periódica, un ejemplo es la suma de oscilaciones periódicas con frecuencias que no son múltiplos de uno al otro.

- Caos.- Un sistema no lineal puede tener un comportamiento en estado estacionario que no está en equilibrio, oscilación periódica, u oscilación casi periódica. Algunos de estos movimientos caóticos se exhiben aleatoriamente. Tal comportamiento se refiere generalmente como el caos.

IV.3.2.- Control lineal del sistema

Considerando el modelo matemático (IV.8), se encontrará la ecuación del espacio de estados lineal, con la cual se realizará el control lineal del sistema. Esto permitirá obtener el control de la velocidad en el vehículo, dando seguridad y eficiencia al sistema. Con la finalidad de obtener un modelo matemático lineal para un sistema no lineal, las variables sólo se desvían ligeramente de alguna condición de operación [Ogata, 2010].

IV.3.2.1.- Linealización del modelo

Con la Ecuación IV.8, se obtendrá el sistema lineal del modelado. En primer lugar se realiza un cambio de coordenadas, con la intención de establecer las variables de entrada y de salida del sistema.

$$T_{max} = 1.808 + 0.016v^2 + 38.721 \frac{dv}{dt}$$

Para realizar el cambio de coordenadas se establecerán las variables de entrada y salida del sistema, las cuales se presentan a continuación:

$$x_1 = \text{desplazamiento}$$

$$x_2 = \text{velocidad}$$

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \dot{v} = \text{aceleración}$$

$$u = T = \text{Torque}$$

Se despeja la aceleración de la ecuación del modelo y se realiza el cambio de variables en la misma, con lo que se tiene que:

$$T = 1.808 + 0.016v^2 + 38.721\dot{v}$$

$$T - 1.808 - 0.016v^2 = 38.721\dot{v}$$

$$\dot{v} = \frac{T}{38.721} - \frac{2.856}{38.721} - \frac{0.026v^2}{38.721}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{u}{38.721} - 0.073 - 0.000671x_2^2 \quad \text{IV.18}$$

Para linealizar el sistema en el origen, se obtendrán las derivadas parciales de la Ecuación IV.18, lo que dará como resultado la ecuación dinámica y la ecuación de salida del sistema lineal. Entonces si $x_1 = 0$, y $x_2 = 0$.

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}; \quad \frac{\partial f}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \end{bmatrix}$$

$$A = \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 2(-0.000671x_2) \end{bmatrix}$$

$$A = \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.00134(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{\partial f}{\partial u} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 38.721 \end{bmatrix}$$

$$C = \frac{\partial h}{\partial x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \frac{\partial h}{\partial x} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

De esta manera se obtiene el sistema lineal y se representa con la Ecuación IV.17, como:

$$\dot{x} = f(x, u) \rightarrow \dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = h(x, u) \rightarrow y = Cx + Du$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 38.721 \end{bmatrix} u \rightarrow \text{Ecuación dinámica} \quad \text{IV.19}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \rightarrow \text{Ecuación de salida} \quad \text{IV.20}$$

El sistema lineal obtenido en el origen es:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{38.721} u$$

$$y_1 = x_1$$

$$y_2 = x_2 \quad \text{IV.21}$$

El siguiente paso es obtener los puntos de equilibrio, estos permitirán tener un punto de referencia para el sistema, es decir permanecerá el punto sin cambiar en cada ciclo que realice el sistema, y se calculan igualando a cero las variables de entrada de \dot{x}_2 (Ecuación IV.18), como lo muestra la Ecuación IV.16, cuando $x_1 = 0$; $x_2 = 0$.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$0 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{u}{38.721} - 0.073 - 0.000671x_2^2$$

$$0 = \frac{u}{38.721} - 0.073$$

$$\therefore u = 0.073 \times 38.721 \quad \text{IV.22}$$

Con las variables de entrada, el sistema lineal y los puntos de equilibrio se realiza un programa en un software matemático (Figura IV.1), con el cual se cotejarán los resultados obtenidos, desarrollando también el control lineal del sistema.

```

1 - clear all
2 - clc;
3 - syms x1 x2 u
4 - dx=[x2; ((u/38.721)-0.073-0.000671*(x2)^2)];
5 - y=[x1; x2]
6 - A_jac=jacobian(dx,[x1 x2])
7 - B_jac=jacobian(dx, u)
8 - C_jac=jacobian(y,[x1 x2])
9 - D_jac=jacobian(y,u)
10 %punto de operacion
11 xe1=20;
12 xe2=10;
13 %control que convierte el punto de operacion en punto d equilibrio
14 Ue=0.073*38.721;
15 x1=xe1;
16 x2=xe2;

```

Figura IV.1.- Programa de control

Al correr el programa nos da como resultado las matrices A, B, C y D (Figura IV.2), las cuales son simplemente la linealización del modelo matemático del sistema, estas fueron calculadas anteriormente analíticamente, cotejando los resultados son exactamente iguales, lo que demuestra que el cálculo para obtener el sistema lineal está correcto.

A =	B =	C =	D =
$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0.0164 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

Figura IV.2.- Matrices calculadas en el programa

Un diagrama de bloques de un sistema es una representación gráfica de las funciones que lleva a cabo cada componente, así como el flujo de señales. Tales diagramas muestran las relaciones existentes entre los diversos componentes, las variables del sistema se enlazan unas con otras mediante bloques funcionales. El bloque funcional es un símbolo para representar la operación matemática que sobre la señal de entrada hace el bloque para producir la salida [Ogata, 2010]. La Figura IV.3 muestra el diagrama de bloques que representa el sistema lineal, el cual realizará la simulación del control lineal, dando como resultado el comportamiento del sistema.

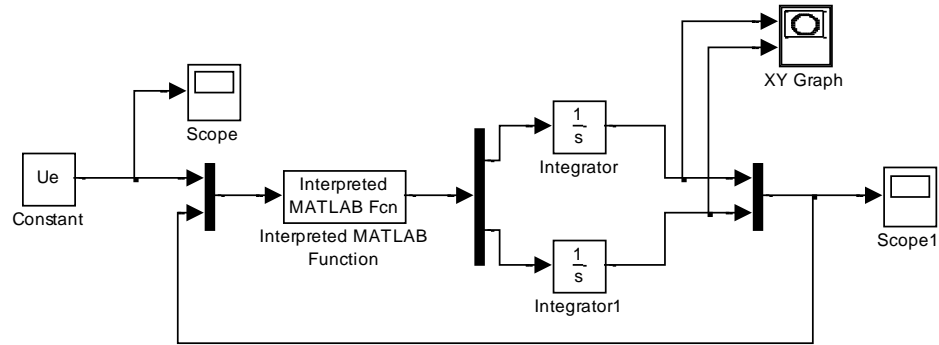


Figura IV.3.- Diagrama de bloques del sistema lineal

El sistema dinámico debe contener elementos que recuerden los valores de la entrada, los integradores en un sistema de control en tiempo continuo sirven como dispositivo de memoria, las salidas de tales integradores se pueden considerar como las variables que describen el estado interno del sistema dinámico. Así las salidas de los integradores sirven como variables de estado. El número de variables de estado para definir completamente la dinámica del sistema es igual al número de integradores que aparezcan en el mismo [Ogata, 2010]. De esta manera el sistema de control, se representa con el siguiente diagrama de bloques.

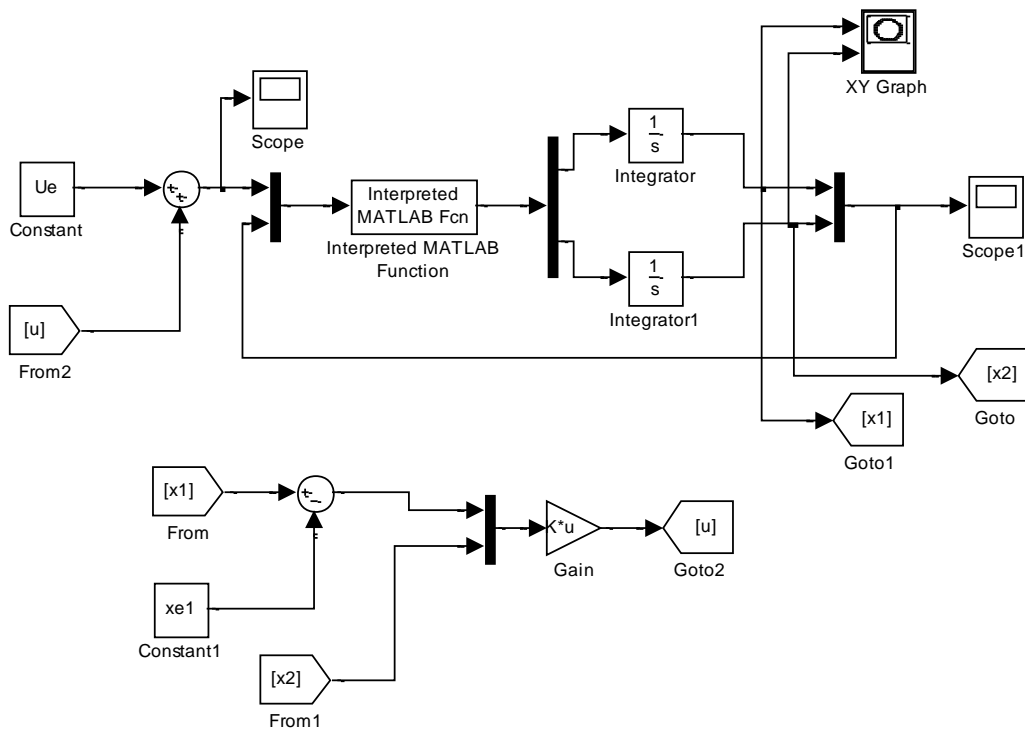


Figura IV.4.- Diagrama de bloques del sistema de control lineal.

La simulación se realizará con diferentes puntos de operación (20 km, 70 km y 45 km), los resultados obtenidos se muestran en las siguientes figuras. La Figura IV.5 muestra una oscilación hasta linealizarse en 20 km, este tipo de amortiguamiento no es eficiente para el caso de estudio, ya que el automóvil necesita avanzar o retroceder en una misma dirección. Por lo que se realiza un ajuste en los parámetros del programa para obtener la posición establecida en los puntos de operación.

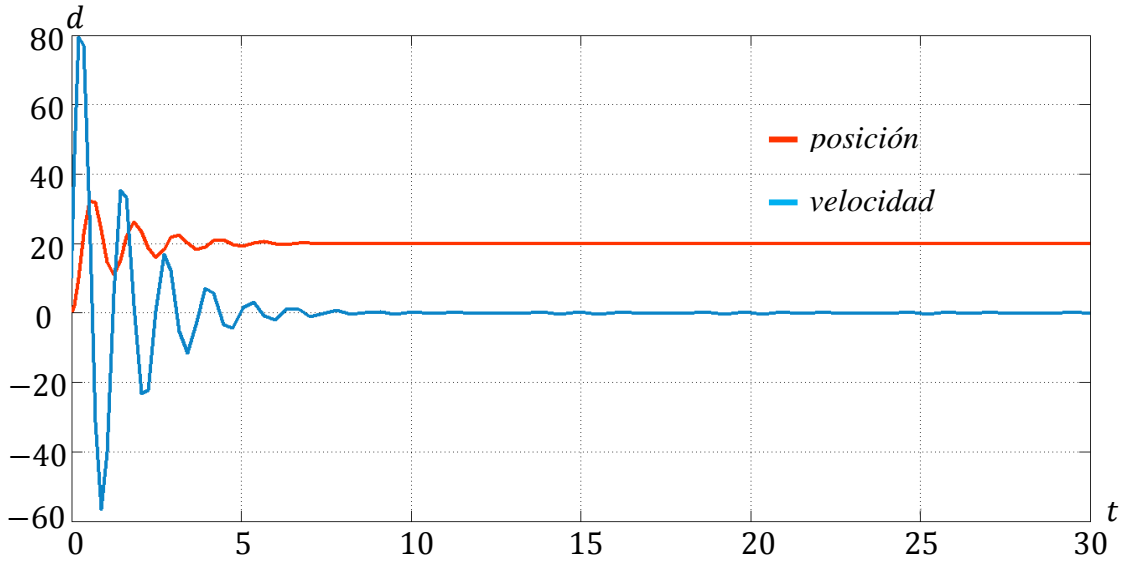


Figura IV.5.- Simulación a 20 km con amortiguamiento

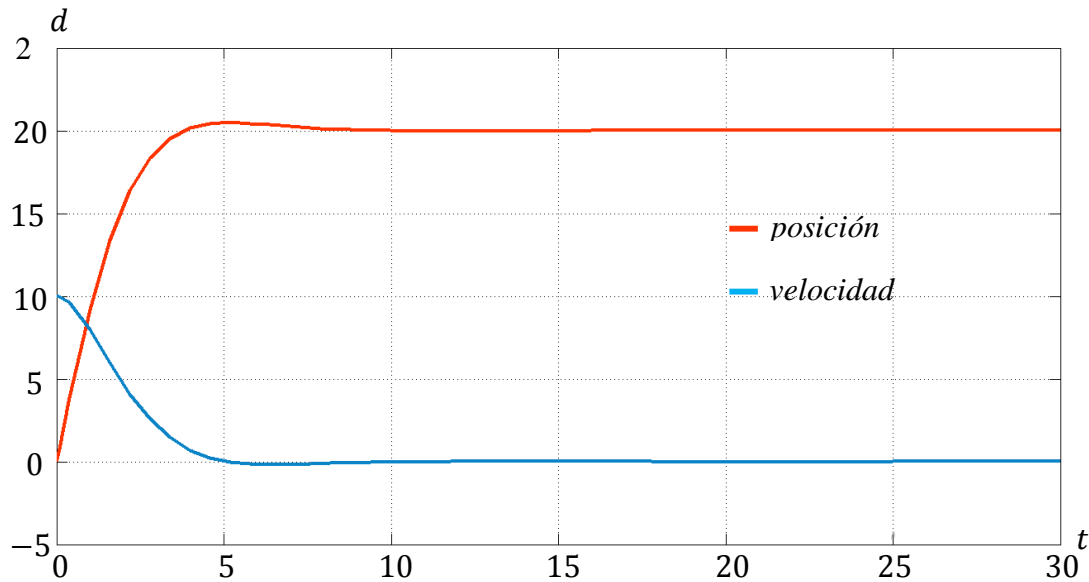


Figura IV.6.- Simulación lineal a 20 km

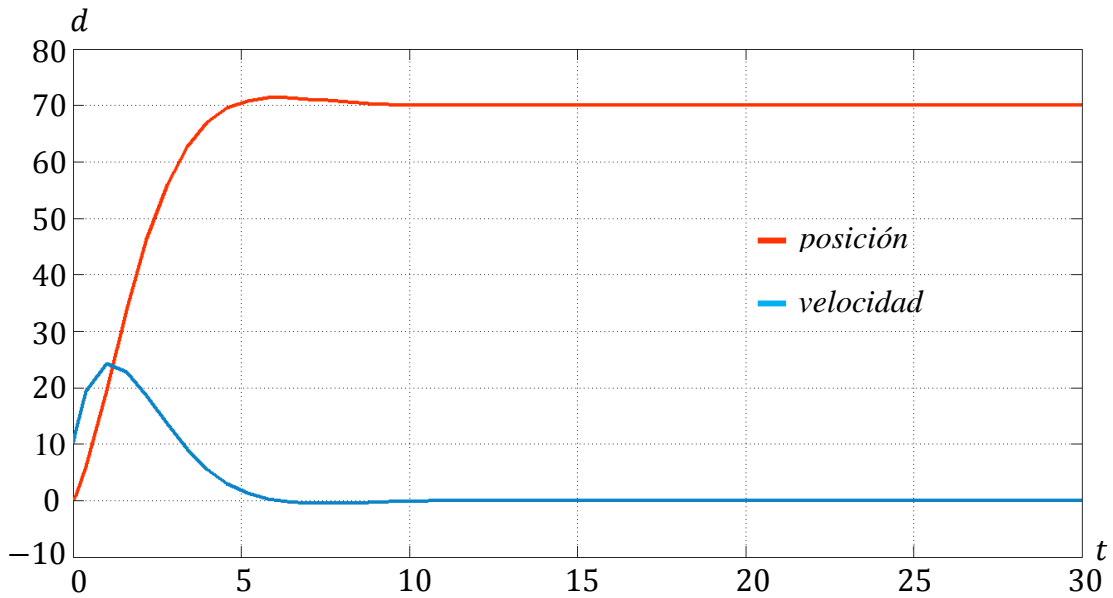


Figura IV.7.- Simulación a 70 km

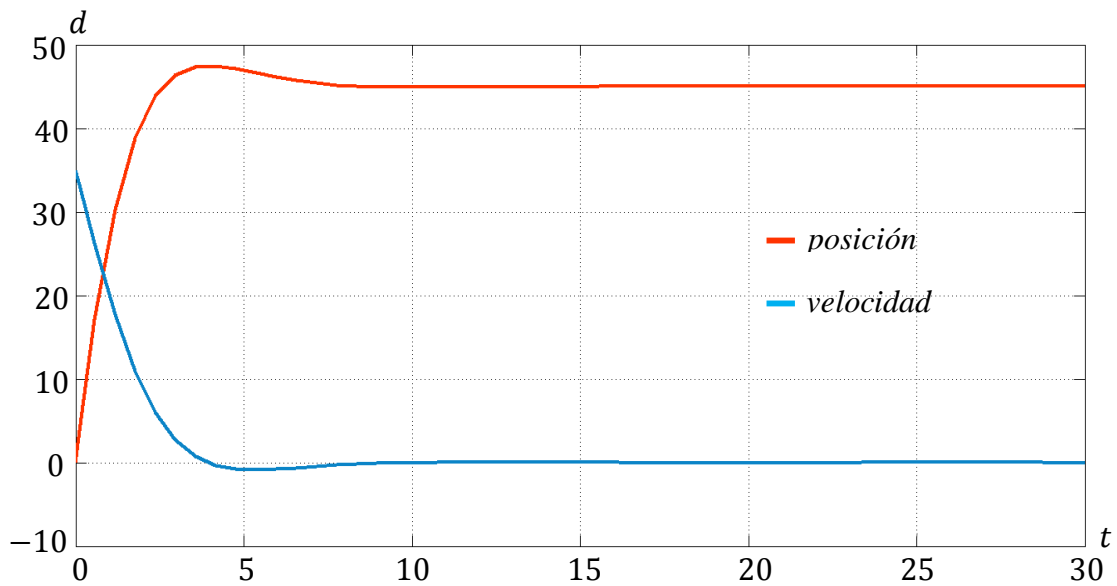


Figura IV.8.- Simulación a 45 km

Como se aprecia en las Figuras IV.6, IV.7 y IV.8, la simulación del control linealiza los puntos de operación en el valor establecido, sin presentar ninguna perturbación en el resultado, lo que determina el funcionamiento correcto y exacto del sistema de control.

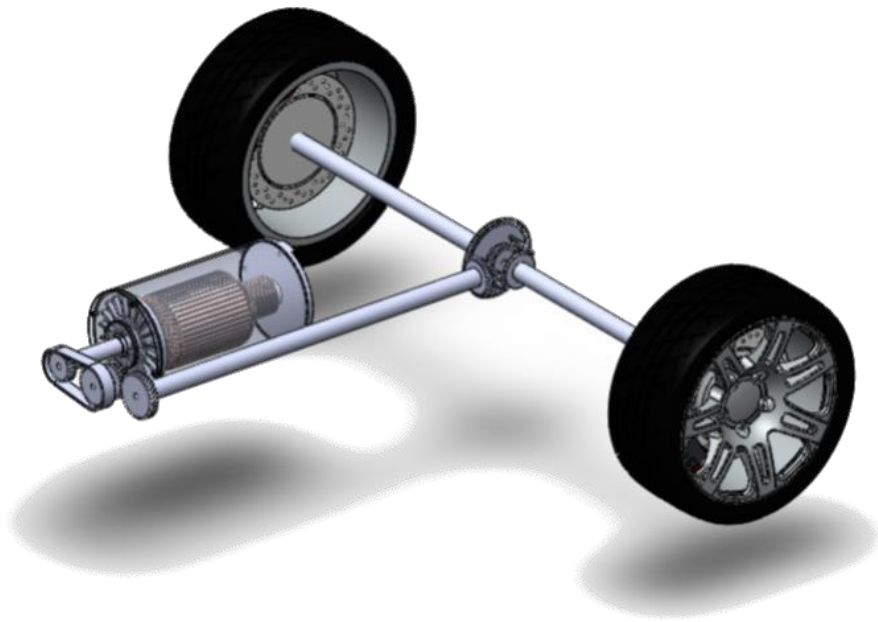
IV.4.- Sumario

En este capítulo se describe el cálculo del modelo matemático del sistema, así como la descripción de los parámetros que interfieren el funcionamiento del mismo. Con las ecuaciones obtenidas se determina la aceleración del mismo, realizando una combinación de estas. Los términos en las ecuaciones son constantes, lo que permite encontrar estos datos en las especificaciones de los elementos o del propio automóvil. Una vez que se han planteado todos los términos que intervienen en el cálculo de la fuerza de tracción del vehículo, entonces puede determinarse la ecuación de rendimiento. El modelado matemático permite realizar el control lineal del sistema, manipulando la velocidad del mismo, utilizando las variables de entrada y salida, se obtiene el sistema lineal, con el fin de facilitar el desarrollo del sistema de control, el cual se simula en un software matemático, elaborando un diagrama de bloques, y obteniendo como resultado graficas que muestran la linealización del sistema en diferentes puntos de operación. Dándole al sistema eficacia y exactitud. Esto permitirá tener un control flexible en el cual se podrá realizar cualquier modificación sin presentar ningún problema.

IV.5. - Referencias

- Astolfi, A. y Marconi, L., *Analysis and Design of Nonlinear Control Systems*, Ed. Springer, pp 21-39, 2008.
- Astrom, K., Murray, R., *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*, Ed. Princeton University Press, pp 1-25, 2009.
- Byrnes, C., Delli, F. e Isidori, A., *Output Regulation of Uncertain Nonlinear Systems*, Ed. Birkhäuser, pp 1-17, 1997.
- Fuhs, A., *Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation*, Ed. CRC Press, pp 181-183, 2009.
- Husain, I., *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*, Ed. CRC Press LLC, pp 1-41, 2003.
- Larminie, J. *Electric Vehicle Technology Explained*, Ed. Oxford Brookes University, pp 140-155, 2003.
- Ogata, K., *Ingeniería de Control Moderna*, 5ª edición, Ed. Pearson, pp 1-72, 2010.

CAPÍTULO V



RENDIMIENTO DEL VEHÍCULO HÍBRIDO

V.1.- Introducción

La predicción del rendimiento y alcance en los vehículos es importante, por medio de esta información se podrá conocer que tan eficiente será el funcionamiento del auto y cambiar parámetros para obtener sistemas que den como resultados una eficiencia alta y por consecuencia un vehículo con rendimiento de calidad. Hoy en día las computadoras permiten obtener estos resultados fácilmente. Los métodos y programas basados en computadora, permiten experimentar de una manera rápida con los parámetros del vehículo, tales como la potencia del motor, el tipo de batería y el tamaño, el peso, entre otros, con el fin de observar los cambios que afectan al rendimiento y alcance [Larminie, 2003].

En este capítulo, se realizará una simulación numérica del rendimiento del sistema mecánico y eléctrico del auto, utilizando las ecuaciones que se desarrollaron en el capítulo anterior, con las cuales se pueden llevar a cabo simulaciones muy precisas y útiles. Utilizando programas matemáticos y hojas de cálculo estándar, siendo estos una excelente herramienta para estas simulaciones. Algunas características de los vehículos eléctricos hacen que el modelado matemático de rendimiento sea más fácil que para otros vehículos.

Un vehículo se mueve hacia adelante con la ayuda de la fuerza suministrada por la unidad de propulsión, superando las fuerzas de resistencia debida a la gravedad, aire y la resistencia de los neumáticos. La aceleración y la velocidad del vehículo dependen de la potencia y de la unidad de tracción, condiciones de carretera y condiciones aerodinámicas. La aceleración también depende de la masa compuesta del vehículo, incluyendo la unidad de propulsión, todos los componentes mecánicos, eléctricos y las baterías [Husain, 2003]. El análisis numérico permitirá predecir el comportamiento del automóvil en términos mecánico y energético, en parámetros como potencia, torque, rpm, rango de operación del vehículo o rendimiento de las baterías. El desarrollo del análisis se basa en la formulación analítica de parámetros tales como fuerzas, velocidades, aceleraciones, ciclos de manejo y tipos de baterías.

V.2.- Rendimiento del vehículo

Rendimiento es una palabra que todo lo abarca, incluye muchos factores como la dinámica del vehículo, tiempo de aceleración, confort de marcha, distancia de frenado y radio de giro. Por

rendimiento se entiende aceleración y velocidad, una zona donde los vehículos eléctricos tienen una reputación de ser muy pobres. Cualquier vehículo eléctrico necesita tener un rendimiento que permita, lidiar de manera segura con el tráfico ordinario de la ciudad. Para los autos híbridos, el rendimiento se mide por el kilometraje y la distancia recorrida en modo eléctrico únicamente. Ciertos puntos de referencia se utilizan para especificar el rendimiento. Dos medidas de aceleración son: el tiempo que lleva de 0 a 60 millas por hora y la velocidad a una distancia de un cuarto de milla [Fuhs, 2009]. La energía necesaria para la unidad de propulsión depende de la aceleración deseada y la carga de la carretera, fuerza que el vehículo tiene que superar. La aceleración máxima está limitada por la potencia máxima de tracción y las condiciones de la carretera en el momento de la operación del vehículo [Husain, 2003].

V.2.1.- Rendimiento mecánico y parámetros de aceleración

La aceleración de un automóvil, un camión o una motocicleta es un indicador clave del rendimiento, ya que están involucrados todos los elementos mecánicos del mismo, aunque no sea esta una medida estándar que se utilice. Una norma para los vehículos eléctricos menciona que la aceleración normalmente se encuentra entre 0-30 km/h y 0-50 km/h, pero no se presentan estos tiempos para todos los vehículos. Tales cifras de aceleración se encuentran desde la simulación o prueba de vehículos reales. Para los vehículos eléctricos estas simulaciones se realizan tomando como referencia el par máximo del motor eléctrico. En los autos con motor de combustión interna, se llevan a cabo a la máxima potencia, o aceleración máxima (*wide open throttle WOT*) [Larminie, 2003].

Para realizar la simulación se tomara en cuenta el modelo matemático obtenido en el Capítulo IV (Ecuación IV.7), ya que este incluye en su composición los parámetros mecánicos, que permiten conocer el comportamiento del vehículo. A continuación se mencionan los datos del automóvil propuesto, así como sus características principales:

- El vehículo propuesto cuenta una masa $m = 337.550 \text{ kg}$, y una capacidad máxima de 4 pasajeros, dando un valor exagerado de 80 kg cada uno, y sumando 80 kg como variante promedio, por lo que la masa total del vehículo es de 737.550 kg . Se

incrementará la masa del vehículo un 5%, obteniendo un valor $m = 774.427 \text{ kg}$, ya que el momento de inercia I del motor eléctrico es desconocido.

- Con un rango en el sistema de engranaje $G = 4$, y un radio $r = 0.19 \text{ m}$ en las ruedas.
- Cuenta con un motor eléctrico de 120 V con 15 HP (11.4 kW) a 4950 rpm . Con un $T_{max} = 197.949 \text{ Nm}$, con una velocidad angular $\omega_c = 314.159 \text{ rad/s}$.
- La eficiencia del acoplamiento entre el motor eléctrico y las ruedas del vehículo se estima en un 95%, por lo que el coeficiente de eficiencia del sistema de engranaje η_g será igual con 0.95.
- Con una densidad de aire de 1.25 kgm^3 .
- El coeficiente de arrastre aerodinámico $C_d = 0.3$.
- El área frontal del vehículo A con un valor de 1.78 m^2 .
- El coeficiente de tracción (resistencia a la rodadura) $\mu_{rr} = 0.005$, con neumáticos para vehículos eléctricos.

Ahora sustituyendo valores en la Ecuación IV.7, considerando que el torque del motor es constante, se obtiene que:

$$197.949 \times 0.95 \times \left(\frac{4}{0.19}\right) = 0.005(737.550)(9.81) + \frac{1}{2} 1.25(1.78)(0.3)v^2 + 774.427 \frac{dv}{dt}$$

$$3958.98 = 36.176 + 0.333v^2 + 774.427 \frac{dv}{dt}$$

$$3958.98 - 36.176 - 0.333v^2 = 774.427 \frac{dv}{dt}$$

$$\frac{3922.804}{774.427} - \frac{0.333v^2}{774.427} = \frac{dv}{dt}$$

$$\frac{dv}{dt} = 5.065 - 0.000429v^2 \quad \text{V.1}$$

Como segundo paso, considerando que la velocidad v alcanza los $70 \text{ km/h} = 19.444 \text{ m/s}$, y el motor eléctrico opera a una potencia constante de 62.182 kW , de acuerdo a la Ecuación IV.4, el torque es:

$$T = \frac{T_{max}\omega_c}{\omega} = \frac{rT_{max}\omega_c}{Gv}$$

$$T = \frac{62182.45(0.19)}{4v} = \frac{2953.67}{v} \quad V.2$$

Sustituyendo el valor de T en la Ecuación IV.7, se tiene que:

$$0.95 \times 13.333 \left(\frac{2953.67}{v} \right) = 0.005(737.550)(9.81) + 0.333v^2 + 774.427 \frac{dv}{dt}$$

$$\frac{37412,218}{v} - 36.176 - 0.333v^2 = 774.427 \frac{dv}{dt}$$

$$\frac{59071.841}{774.427v} - \frac{36.176}{774.427} - \frac{0.333v^2}{774.427} = \frac{dv}{dt}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{48.309}{v} - 0.046 - 0.000429v^2 \quad V.3$$

Entonces las Ecuaciones (V.1 y V.3) que describen el rendimiento del vehículo son:

$$\frac{dv}{dt} = 5.065 - 0.000429v^2$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{48.309}{v} - 0.046 - 0.000429v^2$$

Existen varias maneras de resolver ecuaciones diferenciales, de las cuales estas ecuaciones se resolverán con el método de diferencias finitas, con ayuda de los programas matemáticos y hojas de cálculo. Obteniendo como resultado el comportamiento de los parámetros en las siguientes gráficas.

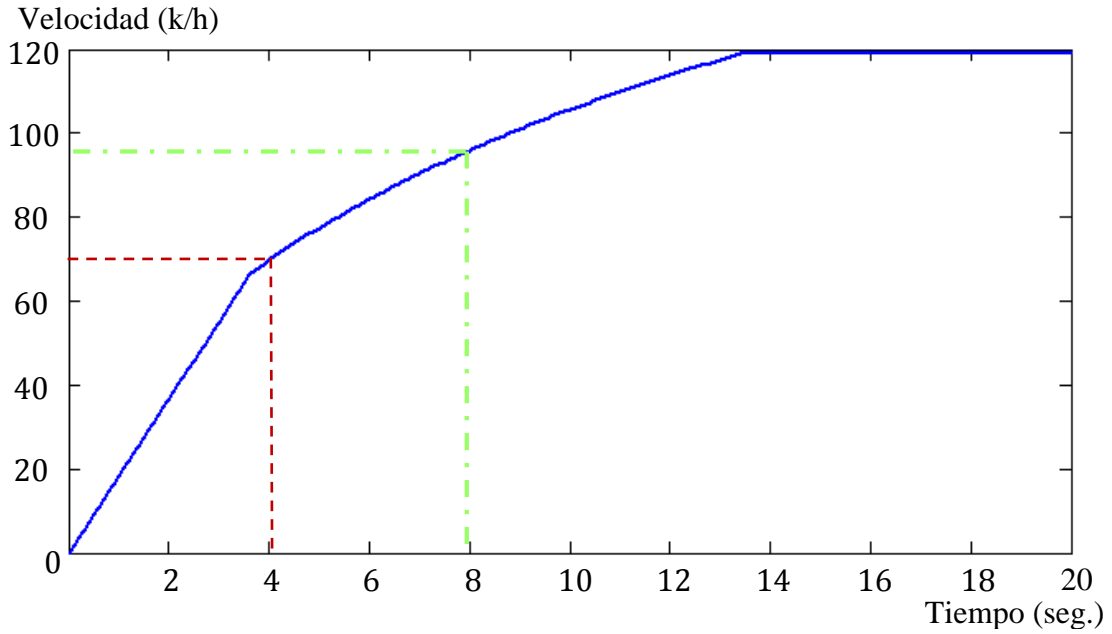


Figura V.1.- Gráfica velocidad/tiempo

En la Figura V.1, se puede observar que el vehículo alcanza una velocidad de 70 km/h en un tiempo aproximado de 4.1 segundos y a los 7.9 segundos alcanza los 96 k/h (60 millas por hora), que es el parámetro establecido para pruebas de velocidad en los autos.

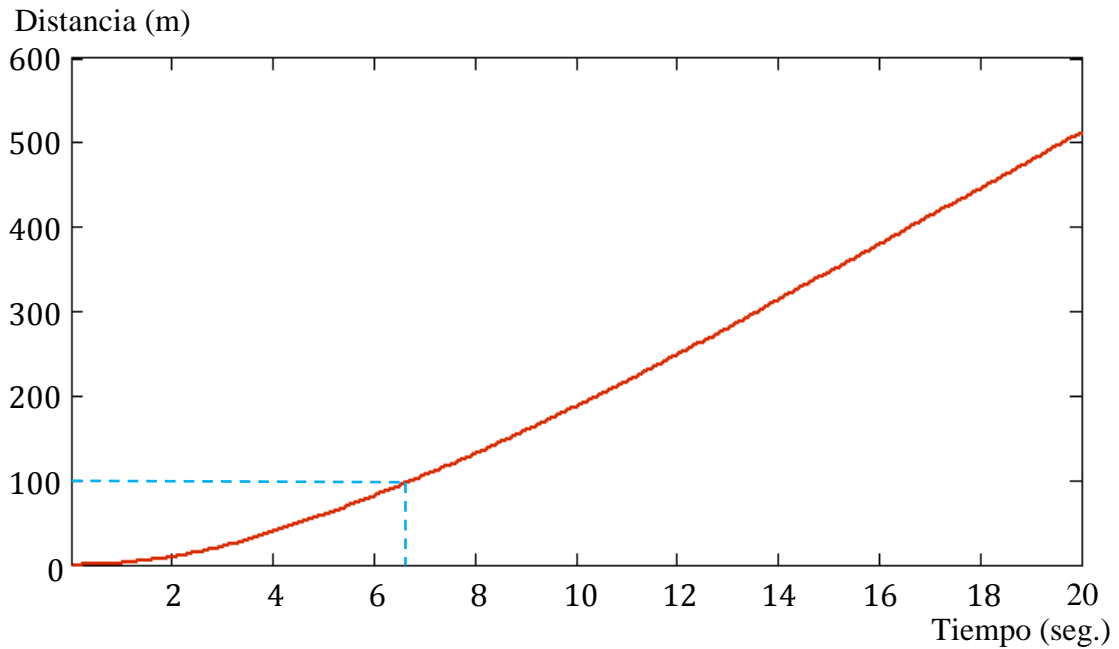


Figura V.2.- Gráfica distancia/tiempo

En la Figura V.2, se puede observar que el vehículo alcanza una distancia de 100 m. en 6.5 segundos.

V.3.1.- Rendimiento energético

Un requisito básico para los vehículos eléctricos, es contar con una fuente portátil de energía eléctrica, para la propulsión del vehículo. La fuente de energía eléctrica portátil presenta el mayor obstáculo en la comercialización de vehículos eléctricos. La energía eléctrica se obtiene normalmente a través de la conversión de la energía química almacenada en los dispositivos tales como baterías y pilas de combustible. Un volante de inercia es una fuente portátil alternativa en la que la energía se almacena en forma mecánica para ser convertida en energía eléctrica para la propulsión del automóvil. Una solución a corto plazo para minimizar el problema de la contaminación del medio ambiente, debido a la ausencia de una fuente de energía de alta densidad energética para vehículos eléctricos se percibe en los vehículos eléctricos híbridos, que combinan los motores de gasolina y motores eléctricos para la propulsión del automóvil [Husain, 2003].

En la actualidad los vehículos eléctricos y eléctricos híbridos utilizan baterías como fuente de energía eléctrica. Entre las opciones disponibles de fuentes de energía portátiles, las baterías han sido la elección más popular para vehículos eléctricos desde el inicio de los programas de investigación y desarrollo en este tipo de autos. Las diversas baterías suelen ser comparadas en términos de descripción, como la energía específica, potencia específica, vida útil, etc. Al igual que la energía específica, la potencia específica es la potencia disponible por unidad de masa de la fuente. La vida útil de una batería es el número de ciclos de descarga profunda que se pueden obtener en su tiempo de vida o el número de años de servicio esperados en una determinada aplicación [Husain, 2003].

Algunas de las características deseables en baterías para vehículos eléctricos y eléctricos híbridos son [Dhameja, 2002]:

- Alta densidad de energía, se puede obtener con una sola carga para proporcionar un largo alcance o el kilometraje.

- Alta densidad de energía, hace posible alcanzar una potencia estable con características de descarga profunda para permitir la capacidad de potencia y la aceleración ascendente en estos vehículos.
- Alta potencia específica.
- Largo ciclo de vida con el mantenimiento y mecanismos de alta seguridad incorporado en la batería.
- La amplia aceptación como una batería reciclable desde el punto de vista ambiental.
- De alta carga, aceptación para la recarga y el frenado regenerativo.

Cuestiones técnicas adicionales incluyen métodos y diseños para equilibrar los segmentos de baterías o paquetes eléctricos y térmicos, técnicas precisas para determinar el estado de una batería de carga y las instalaciones de reciclaje de componentes de la batería. El costo de las baterías debe ser razonable para ser comercialmente viable [Husain, 2003].

Las características de las baterías de Li Ion, como potencia muy alta, alto voltaje, bajo peso, pequeño volumen y ciclo de vida largo, las hacen ser un candidato muy atractivo para los autos híbridos. Las baterías deben proporcionar alta potencia en la demanda, y aceptar la carga rápida de frenado regenerativo. La Tabla 4.19 lista la mayoría de los requisitos importantes que una batería debe tener para los vehículos híbridos [Broussely y Pistoia, 2007].

Tabla V.1. – Requisitos técnicos de baterías para vehículos híbridos

Características	Unidades	Requerimiento
Potencia de descarga de impulsos	kW	25 (18 seg.)
Potencia pico de impulso regenerativa	kW	30 (2 seg.)
Energía total disponible	kWh	0.3 (a C/1 carga/descarga)
Eficiencia mínima en viaje redondo	%	90
Potencia de arranque en frío a -30 °C	kW	5
Ciclo de vida a 25 Wh (ciclo de energía)	ciclos	300,000
Calendario de vida	años	15
Peso máximo / volumen	kg/L	40/32
Límites de voltaje en funcionamiento	V cd	$V_{\max} \leq 440 / V_{\min} \geq 0.5 * V_{\max}$
Descarga máxima permisible	Wh/día	50
Rango de temperatura (operación)	°C	-30 to +52 ; -46 to +66

Una comparación de la energía específica de las fuentes de energía disponibles, se da en la Tabla V.2. La energía específica es la masa de energía por unidad de la fuente de energía. Las energías específicas se muestran sin tomar en consideración la contención. La energía específica de hidrógeno y gas natural sería significativamente menor que la de la gasolina cuando se considera contención.

Tabla V.2. – Densidad nominal de fuentes de energía

Fuente de energía	Energía específica nominal (Wh / kg)
Gasolina	12500
Gas natural	9350
Metanol	6050
Hidrogeno	33000
Carbón (bituminoso)	8200
Batería de plomo-ácido	35
Batería de litio-polímero	200
Volante (fibra de carbono)	200

V.3.1.1.- Ciclos de manejo

El rango de rendimiento energético en los vehículos eléctricos e híbridos, presenta un problema importante en el diseño de cualquier auto eléctrico, ya que es muy difícil almacenar la energía eléctrica de manera eficientemente. Existen dos tipos de prueba para calcular el rendimiento energético del este tipo de vehículos [Larminie, 2003].

La primera prueba se realiza a velocidad constante, es la más simple, pero ningún vehículo es conducido de esta manera, especialmente a nivel del suelo y con el viento en calma. Las normas en este tipo de pruebas son claras y explícitas, incluso si la prueba pareciera irreal. Se puede argumentar que dan cifras comparativas útiles. [Husain, 2003 y Larminie, 2003].

El segundo tipo de prueba, se lleva acabo con el funcionamiento real o simulación del vehículo, en la realidad o en la simulación, a través de un perfil en los cambios de velocidad, haciendo esta prueba más útil, pero compleja. Estos ciclos de prueba se han desarrollado con el fin de obtener patrones de conducción realistas en diferentes condiciones. Durante estas pruebas la velocidad del vehículo es variable, por lo tanto el rendimiento de las partes que constituyen el sistema,

también presenta cambios. Como consecuencia los cálculos son más complejos. Sin embargo, los programas computacionales hacen que estas situaciones complejas sean razonablemente sencillas. Los ciclos de conducción se desarrollaron principalmente con el fin de proporcionar una prueba realista y práctica para las emisiones de los vehículos. Uno de los primeros ciclos, fue basado en el tráfico real de Los Angeles CA y se conoce como el ciclo de LA-4. Este se convirtió en el Programa Federal de conducción urbana FUDS, el cual tiene una duración de 1500 segundos, y para cada segundo se presenta un cambio de velocidad. Existe también una versión simplificada de este ciclo conocido como SFUDS, que cuenta con una duración de 360 segundos, en el que se realiza con velocidad media, proporción de tiempo fijo, aceleración máxima y frenado [Larminie, 2003].

V. 3.1.2.- Rendimiento eléctrico y parámetros de las baterías

Para predecir el rendimiento eléctrico, se tiene que realizar el cálculo de la energía necesaria para mover el vehículo por cada segundo del ciclo de conducción, así como la pérdida de energía durante el ciclo. El proceso se repite hasta que la batería se descarga totalmente, utilizando intervalos de un segundo de tiempo, la potencia y la energía que se consume es igual. El punto de partida en estos cálculos es encontrar la fuerza de tracción F_{te} , que se calcula a partir de la Ecuación II.12 [Husain, 2003 y Larminie, 2003].

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{ta} + F_{\omega a}$$

La potencia es igual a la fuerza de tracción multiplicada por la velocidad. Usando el diagrama de flujo de energía. La energía requerida para mover el vehículo durante un segundo es igual a la potencia, por lo que [Husain, 2003]:

$$\text{Energía requerida por segundo} = P_{te}$$

$$P_{te} = F_{te}v \quad \text{V.4}$$

El flujo de energía de una batería en un vehículo eléctrico se muestra en el siguiente diagrama (Figura V.3) [Husain, 2003].

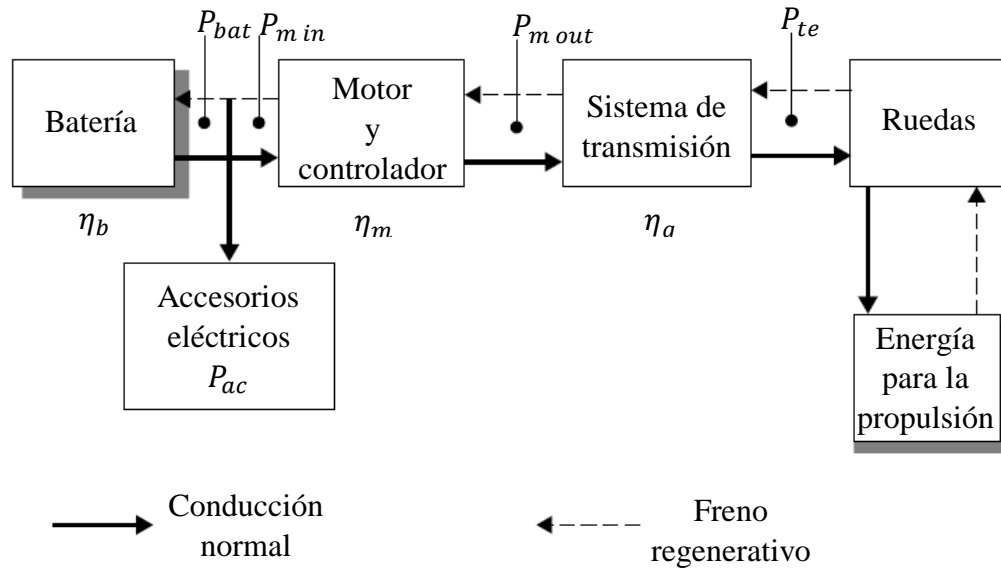


Figura V.3.- Diagrama de flujo de energía en un sistema con freno regenerativo

Donde:

- η_b es el coeficiente de eficiencia de la batería.
- η_m es el coeficiente de eficiencia del motor eléctrico.
- η_g es el coeficiente de eficiencia del sistema de engranaje.
- P_{bat} es la potencia total de la batería.
- $P_{m in}$ es la potencia eléctrica suministrada al motor eléctrico.
- $P_{m out}$ es la potencia mecánica dada por el motor eléctrico.
- P_{te} es la potencia suministrada a las ruedas de un vehículo.
- P_{ac} es la potencia media para accesorios eléctricos.

La eficiencia del sistema de engranajes η_g normalmente es alta, ya que los vehículos eléctricos cuentan con una transmisión muy simple. La eficiencia del motor y su controlador se considera generalmente la misma para los dos componentes juntos, ya que es conveniente al medir la eficiencia de todo el sistema. La eficiencia del motor varía considerablemente con la potencia, el torque del motor, así como con el tamaño del motor y está dada por la ecuación [Larminie, 2003]:

$$\eta_m = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i \omega + k_\omega \omega^3 + C} \tag{V.5}$$

Donde:

k_c es el coeficiente de pérdidas en el Cobre.

k_i es el coeficiente de pérdidas de Hierro.

k_ω es el coeficiente de pérdida de resistencia al viento.

T es el torque del motor eléctrico.

ω es la velocidad angular del motor eléctrico.

C representa las pérdidas constantes que se aplican a cualquier velocidad.

A continuación se muestran los valores típicos para estas constantes, en dos tipos de motores que pueden ser usados en vehículos eléctricos [Larminie, 2003].

Tabla V.3. – Parámetros de eficiencia de motores eléctricos

Parámetros	Motor de imanes permanentes con escobillas, 2-5 kW	Motor de inducción, de alta velocidad, 100 kW
k_c	1.5	0.3
k_i	0.1	0.01
k_ω	10^{-5}	5×10^{-6}
C	20	600

V. 3.1.3.- Potencia del motor eléctrico

Cuando la potencia del motor eléctrico no es la misma que la potencia de tracción y la potencia eléctrica requerida por el motor es mayor que la potencia de salida mecánica, significa que el motor, el controlador y el sistema de engranajes presentan ineficiencia en su funcionamiento. De acuerdo con las ecuaciones, se tiene que [Larminie, 2003]:

$$P_{m\ in} = \frac{P_{m\ out}}{\eta_m} \tag{V.6}$$

$$P_{m\ out} = \frac{P_{te}}{\eta_g} \tag{V.7}$$

Las Ecuaciones V.6 y V.7, se emplean para el caso en donde el vehículo está en funcionamiento, si el motor está siendo utilizado para detener el vehículo, la eficiencia (o más bien la ineficiencia) funciona en el sentido opuesto. La potencia eléctrica en el motor se reduce, por lo que se utilizan las siguientes ecuaciones [Larminie, 2003]:

$$P_{m\ in} = P_{m\ out} * \eta_m \quad V.8$$

$$P_{m\ out} = P_{te} * \eta_g \quad V.9$$

V. 3.1.4.- Potencia en la batería

Para determinar el uso de la potencia eléctrica y mecánica en el motor, se realiza el cálculo con las Ecuaciones V.6, V.7, V.8 y V.9. Tomando en cuenta los sistemas eléctricos del vehículo, las luces, los indicadores, los accesorios, etc. Se estima una potencia media para estos elementos, la cual se añade a la potencia del motor, para dar la potencia total requerida de la batería. Durante el frenado, la potencia del motor es negativa, por lo tanto esto reducirá la magnitud de la potencia. De tal manera que la potencia total de la batería se expresa como [Larminie, 2003]:

$$P_{bat} = P_{m\ in} + P_{ac} \quad V.10$$

V. 3.1.5.- Voltaje de circuito abierto en la batería

Para el cálculo de voltaje en la batería, se utiliza una variable (DoD) que representa la profundidad de descarga, la cual tiene un valor de cero cuando está completamente cargada y cuando se encuentra descargada tiene un valor de uno. Entonces el voltaje se da con la siguiente ecuación [Husain, 2003].

$$E = n (2.15 - DoD(2.15 - 2)) \quad V.11$$

Donde n es el número de celdas en la batería y E el voltaje del circuito abierto. Para las baterías de níquel, la ecuación cambia a una forma polinómica. En donde la curva voltaje-estado, está lejos de ser lineal. Afortunadamente, ahora es muy fácil de usar software matemático, para resolver este tipo de ecuaciones. Un ejemplo de estas, se obtiene a partir de los resultados experimentales de una batería de tracción NiCad, la cual se expresa como:

$$E = n \left(\begin{array}{l} -8.28DoD^7 + 23.57DoD^6 - 30DoD^5 + 23.70DoD^4 \\ -12.58DoD^3 + 4.13DoD^2 + 0.86DoD + 1.37 \end{array} \right) \quad V.12$$

La construcción de un circuito equivalente de una batería (Figura V.4), es importante para realizar la simulación, el cual está compuesto de elementos, y cada uno de ellos tiene un comportamiento predecible. El voltaje del circuito abierto de la batería, es el primer elemento que se tiene que establecer para la simulación. El voltaje cambia de acuerdo con el estado de carga de la batería.

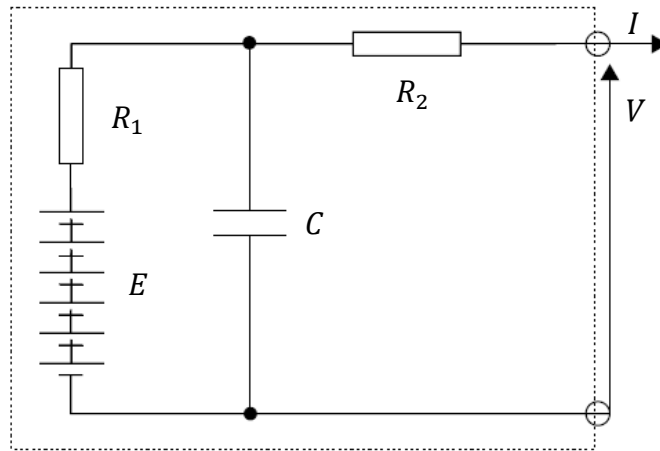


Figura V.4.- Circuito equivalente de una batería

V. 3.1.6.- Corriente de la batería

Para realizar la simulación del funcionamiento de una batería de tracción, es necesario conocer el valor de la corriente I , ya que el vehículo al viajar a una velocidad determinada, requerirá de cierta potencia que proporcionara el motor eléctrico, a través de la energía eléctrica proporcionada por las baterías. La ecuación para la corriente cuando opera una potencia P es:

$$P = V I \quad \text{V.13}$$

Las baterías y las células eléctricas tienen voltajes nominales que da el voltaje total cuando la célula proporciona energía eléctrica. Estas pueden ser conectadas en serie para dar el voltaje requerido. Las baterías de tracción utilizadas en vehículos eléctricos son de 6 V o 12 V, y estas unidades están a su vez conectados en serie para producir el voltaje requerido. La ecuación del voltaje de las terminales de la batería se expresa como:

$$V = E - IR \quad \text{V.14}$$

Si la corriente I es cero, el voltaje terminal es igual a E , donde E representa el voltaje del circuito abierto. El voltaje se incrementará en IR , cuando la batería se encuentra cargada. Para las baterías de vehículos eléctricos el valor de resistencia R debe ser lo más bajo posible. Al combinar la Ecuación V.13 y V.14 se obtiene:

$$P = VI = (E - IR)I = EI - RI^2 \quad \text{V.15}$$

Para obtener la ecuación de la corriente, se despeja I de V.15, y se tiene que:

$$I = E - \frac{\sqrt{E^2 - 4RP}}{2R} \quad \text{V.16}$$

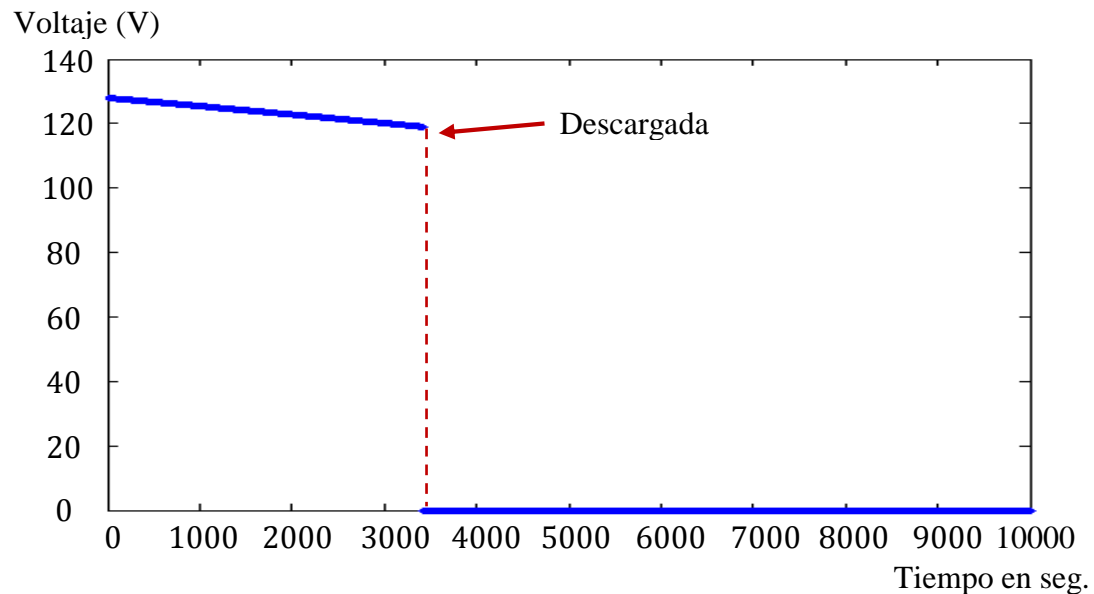


Figura V.5.- Descarga de potencia constante de una batería de Plomo-ácido

La Figura V.5, muestra la descarga de un sistema de 10 baterías Plomo-ácido con 6 celdas cada una, de 5000 W, 120 V a 50Ah, el voltaje contra el tiempo a una potencia constante.

V. 3.1.7.- Densidad de energía

La densidad de energía es la cantidad de energía eléctrica almacenada por metro cúbico de volumen en las baterías. Es un parámetro importante ya que la capacidad de energía de la batería (Wh) puede ser dividida por la densidad de energía de la batería (Wh/m³), para encontrar el

volumen requerido de la batería. Alternativamente, si un volumen conocido está disponible para las baterías, el volumen (m^3) se puede multiplicar por la densidad de energía de las baterías, para dar una aproximación de la cantidad de energía eléctrica que puede estar disponible. El volumen de la batería también puede tener un impacto considerable en el diseño de vehículos. Al igual que con la energía específica, la densidad de energía es una figura nominal [Fuhs, 2009 y Larminie, 2003].

V. 3.1.8.- Energía específica

La energía específica es la cantidad de energía eléctrica almacenada por cada kilogramo de batería (masa). Una vez que la capacidad de energía de la batería necesaria para un vehículo se conoce, puede ser dividida por la energía específica para dar una aproximación de la masa de la batería. Energías específicas citadas pueden no ser más que una guía, porque, la energía almacenada en una batería varía considerablemente con factores tales como la temperatura y la velocidad de descarga [Fuhs, 2009 y Larminie, 2003].

V. 3.1.9.- Potencia específica

La potencia específica es la cantidad de energía obtenida por kilogramo de batería. La potencia depende más de la carga conectada a la batería, Aunque esta tiene una potencia máxima, si se opera al máximo se descargaría en poco tiempo e ineficientemente. La Figura V.6 muestra la comparación de dos tipos de baterías entre potencia y energía específicas [Larminie, 2003].

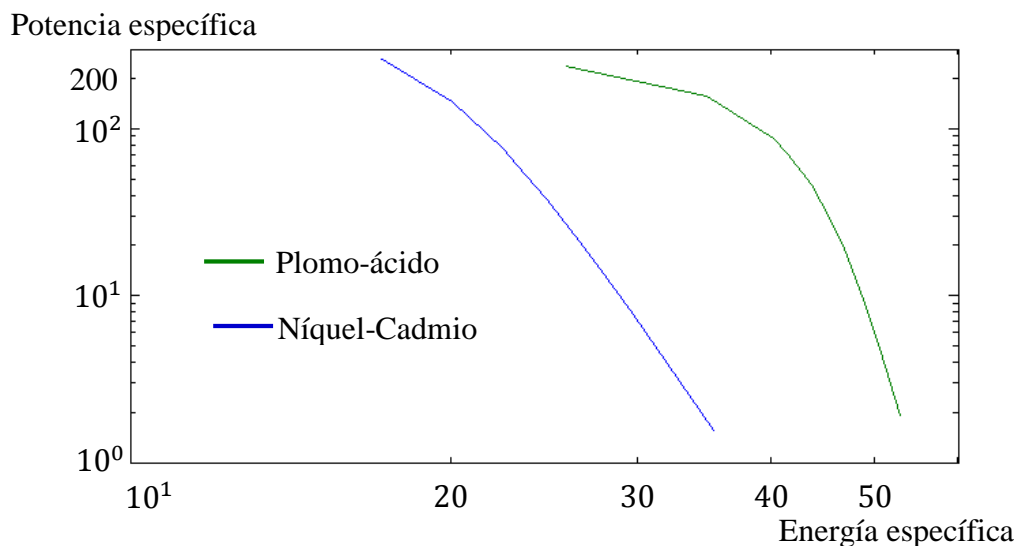


Figura V.6.- Potencia específica / energía específica de baterías Plomo-ácido/Níquel-Cadmio

V.4.- Capacidad de la batería

La capacidad de una batería se reduce si la corriente se extrae más rápidamente. Un ampere (A) durante 10 horas no toma la misma carga de una batería que está en funcionamiento a 10A durante 1 hora. Este fenómeno es de gran importancia para los vehículos eléctricos, ya que las corrientes demandadas son muy altas, y por consecuencia la capacidad de la batería sería muy baja [Fuhs, 2009].

V.4.1.- Capacidad *Peukert* de la batería

Es importante predecir el efecto de capacidad de corriente, tanto en el diseño de vehículos, como en los instrumentos que miden la carga restante en la batería como los medidores de combustible de la batería. De igual manera es importante conocer la profundidad de la descarga de una batería para encontrar el voltaje en vacío utilizando ecuaciones V.11 y V.12. La mejor manera de hacerlo es usando el modelo *Peukert* del comportamiento de la batería. El cual se usa para corrientes altas, la capacidad es constante, y está dada por la ecuación [Larminie, 2003]:

$$C_p = I^k T \quad \text{V.17}$$

Donde k es una constante llamada coeficiente de *Peukert*. Esta ecuación supone que la batería está descargada totalmente, a un ampere de corriente constante con una duración T h. Por ejemplo, una batería de Plomo-ácido tiene una capacidad nominal de 40 Ah a razón de 5 horas. Esto significa que tiene una capacidad de 40 Ah, si se descargan a una corriente de:

$$I = \frac{40}{5} = 8 \text{ A} \quad \text{V.18}$$

Si el coeficiente de *Peukert* es 1.2, la capacidad *Peukert* es [Larminie, 2003]:

$$C_p = 8^{1.2}(5) = 60.6 \text{ Ah} \quad \text{V.19}$$

Para encontrar el tiempo que la batería durará cargada en cualquier corriente I , se tiene la siguiente ecuación [Fuhs, 2009].

$$T = \frac{C_p}{I^k} \quad \text{V.20}$$

La Figura V.7 muestra el compartamiento de una batería de 42 Ah con una capacidad nominal de 10 horas. 42 V y se observa cómo la capacidad cambia con el tiempo de descarga. La precisión del modelo Peukert se puede ver teniendo en cuenta los datos de la batería. La línea roja en la figura muestra cómo la capacidad decrece con el aumento de descarga de corriente. Con el uso de ecuación de *Peukert* se observa que la línea de cruces color azul, que se encuentra muy cerca los valores reales medidos.

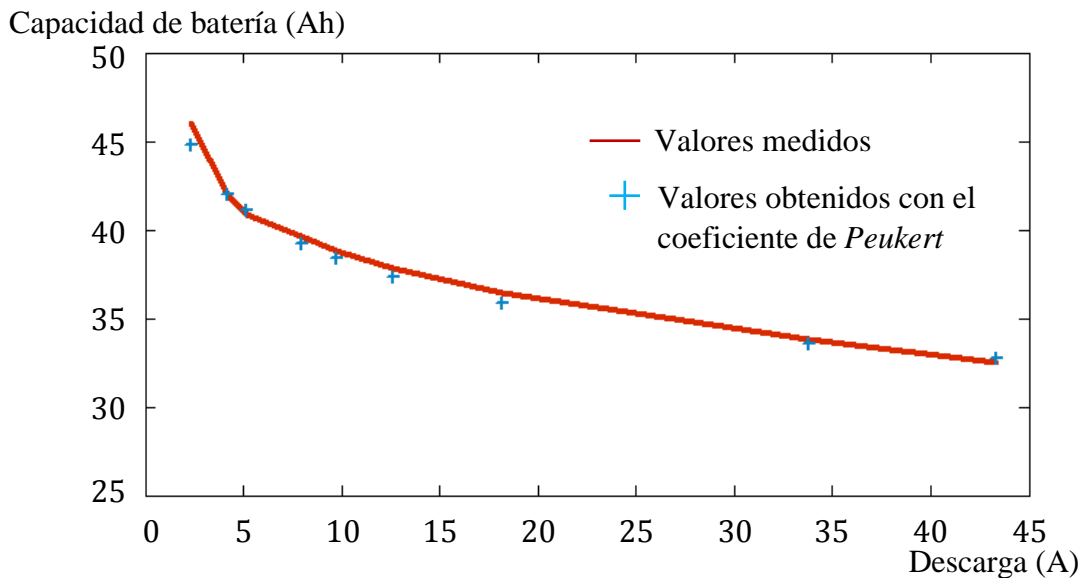


Figura V.7.- Comportamiento de descarga en batería Plomo-ácido

La carga total eliminada de la batería (CR_n) se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$CR_{n+1} = CR_n + \frac{\delta t I^k}{3600} \text{ Ah} \quad \text{V.21}$$

Como δt es una unidad de tiempo dada en segundos, se tiene que dividir entre 3600 con el fin de obtener unidades en Ah. Es importante aclarar que esta es la carga retirada de las placas de la batería, no es realmente la carga total suministrada por la batería al sistema eléctrico del vehículo, la cual recibe el nombre de carga suministrada CS, Normalmente se presenta una diferencia en

los resultados, la cual es causada por reacciones de auto-descarga que tienen lugar dentro de la batería, la fórmula para la carga suministrada se expresa como [Larminie, 2003]:

$$CS_{n+1} = CS_n + \frac{\delta t I}{3600} Ah \tag{V.22}$$

La profundidad de la descarga (DOD) de una batería es la relación de la carga eliminada CR_n con la capacidad original C_p y se representa con la siguiente ecuación [Larminie, 2003]:

$$DOD_n = CR_n / C_p \tag{V.23}$$

En la Figura V.8, se observa la descarga de una batería a corriente constante de Níquel-Cadmio, de 50Ah usando tres valores diferentes de corriente (100 A, 50 A y 5 A). La corriente se representa frente a la carga real suministrada por la batería.

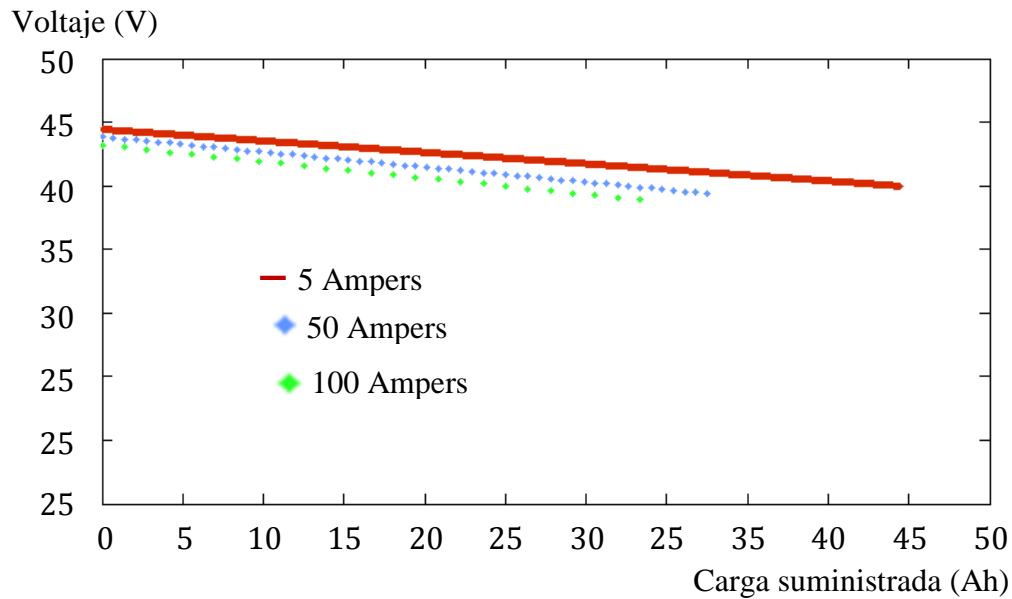


Figura V.8.- Descarga de corriente constante de una batería de Níquel-Cadmio de 50Ah

V.5.- Energía cinética

La energía suministrada por la unidad de propulsión se convierte en diferentes formas de energía, algunos de los cuales se almacenan en el sistema del vehículo, mientras que otros se pierden

debido a las fuerzas no constructivas. Cuando un vehículo de masa m (kg), está viajando a una velocidad v (m/s), su energía cinética se obtiene por [Husain, 2003 y Larminie, 2003]:

$$KE = \frac{1}{2} mv^2 \quad V.24$$

Además de la importancia de reducir al mínimo el peso del vehículo, para disminuir la pérdida de energía cinética, también es importante tratar de minimizar el momento de inercia I de los componentes de rotación, como energía cinética de rotación almacenada. El momento de inercia se expresa como [Larminie, 2003]:

$$I = mr^2 \quad V.25$$

La energía almacenada E_r se expresa con la siguiente ecuación:

$$E_r = \frac{1}{2} I\omega^2 \quad V.26$$

Sustituyendo los valores de los parámetros del vehículo propuesto en las ecuaciones V.24, donde $m = 774.427 \text{ kg}$, $v = 19.444 \frac{m}{s}$, $\omega = 314.159 \text{ rpm}$ y $r = 0.19 \text{ m}$, se tiene que la energía cinética producida por el auto es:

$$KE = \frac{1}{2} (774.427 \text{ kg}) \left(19.444 \frac{m}{s}\right)^2$$
$$KE = 146393.473 \text{ J}$$

Los resultados obtenidos en el rendimiento mecánico y energético del vehículo, permiten predecir el comportamiento del mismo. Ayudando de manera tal, elegir parámetros que entreguen mejores resultados en la simulación del auto.

V.6.- Sumario

En este capítulo se realizó la simulación del rendimiento del vehículo. Como en la mayoría de los vehículos eléctricos la simulación se realiza tomando en cuenta su desempeño mecánico y eléctrico. La cual puede ser de tipo analítico, numérico y experimental. Es importante predecir el desempeño de un automóvil durante la operación, ya que por medio de los resultados obtenidos, se pueden modificar los parámetros en las pruebas para obtener un mejor rendimiento del automóvil. Las herramientas computacionales y programas permiten realizar estas simulaciones de una manera rápida, fácil y con resultados precisos. Tomando en cuenta las características y sistemas esenciales del vehículo eléctrico, como tipo de motor, potencia del motor, peso del auto, tipo de batería, tamaño, entre otros, En este capítulo, se presentó un análisis analítico y numérico que permite observar el funcionamiento mecánico y eléctrico de un vehículo eléctrico. Donde se consideraron aspectos como la velocidad, aceleración, tiempo, la capacidad de la batería, ciclos de conducción, voltaje, corriente, entre otros. Finalmente se obtuvieron el cálculo del voltaje del rack de baterías, cálculo de la corriente de la batería, la carga que se extrae de las baterías y el nivel de descarga de la batería. El estudio que se ha realizado por muchos años en la propulsión eléctrica, ha alcanzado una etapa decisiva con el creciente interés en autos híbridos. Porque se han desarrollado varios tipos de vehículos híbridos, diferentes sistemas de baterías y se sigue trabajando en los sistemas de regeneración de energía eléctrica, para obtener una carga y descarga de energía completamente autónoma. Lo que aumenta el éxito en los autos híbridos y beneficia al desarrollo de nuevas tecnologías para obtener un alto nivel de rendimiento en estos vehículos.

V.7. - Referencias

- Fuhs, A., *Hybrid vehicles and the future of personal transportation*, Ed. CRC Press, pp 99-144, 2009.
- Husain, I., *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*, Ed. CRC Press LLC, pp 17-79, 253-279, 2003.
- Larminie, J. *Electric Vehicle Technology Explained*, Ed. Oxford Brookes University, pp 22-67, 140-155, 2003.
- Dhameja, S., *Electric Vehicle Battery Systems*, Ed. Newnes, pp 1-21, 2002.

-
- Ehsani, M., Gao, Y. y Emadi, A., *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*, Segunda Edición, Ed. CRC Press Taylor & Francis Group, Second edition, pp 19-48, 2010.
- Broussely, M. y Pistoia, G., *Industrial Applications of Batteries: From Cars to Aerospace and Energy Storage*, Primera Edición, Ed. Elsevier B. V., pp 203-268, 2007.

CONCLUSIONES

Conclusiones generales

La investigación presentada en este trabajo es una muestra de las tendencias de los sistemas de control en las distintas áreas industriales, en este caso en el área automotriz ya que se tiene un gran interés en cubrir las necesidades que se presentan en los sistemas mecatrónicos, sobre todo en la obtención de precisión y autonomía en los autos eléctricos.

El desarrollo de nuevas metodologías de control es parte de una serie de investigaciones que se han realizado alrededor del mundo, con la finalidad de crear sistemas de control que sean capaces de dar autonomía a los dispositivos que auxilien a los diferentes elementos que integran al vehículo para su funcionamiento, como lo es el control del motor eléctrico lo que lleva a la conclusión de este trabajo como una herramienta más, donde se aplican técnicas de control en dispositivos que por sí solos ya son un elemento necesario para el funcionamiento del automóvil.

El objetivo general planteado al inicio de este trabajo, propone realizar el análisis y control del sistema de freno regenerativo de un automóvil híbrido, específicamente el control del motor eléctrico, ya que es la fuente de energía y propulsión del mismo, así como caracterizar los parámetros que describen el comportamiento y rendimiento del vehículo durante su funcionamiento. De acuerdo a lo anterior se puede señalar que estos fueron satisfechos de acuerdo a la metodología propuesta en este trabajo.

El estado del arte (Capítulo I), permitió la identificación de los diferentes tipos de vehículos híbridos y componentes que lo constituyen, así como los sistemas de frenado que se usan en este tipo de autos, y el desarrollo de sistemas de control que se ha dado a través de los años por medio de las investigaciones en las diferentes áreas de estudio. Lo que llevo a seleccionar los temas desarrollados en el Capítulo II. En el Capítulo III se conocen las características y funcionamiento del motor eléctrico.

El capítulo IV da como resultado del modelo matemático del sistema, así como la descripción de los parámetros que interfieren en el funcionamiento del mismo. Permitiendo obtener las ecuaciones dinámicas del sistema. Con las cuales se desarrolló el control lineal del sistema, manipulando la posición y la velocidad del mismo, utilizando las variables de entrada y salida del modelo.

Se elaboró un diagrama de bloques con el fin de facilitar el desarrollo del sistema de control, para la simulación del mismo, por medio de un software matemático, obteniendo como resultado la linealización del sistema en diferentes puntos de operación. Dándole al sistema eficacia y exactitud, permitiendo tener un control flexible en el cual se podrá realizar cualquier modificación sin presentar ningún problema.

Una vez que se han planteado todos los términos que intervienen en el cálculo de la fuerza de tracción del vehículo, entonces puede determinarse la ecuación de rendimiento en un análisis analítico y numérico. Las pruebas que se realizaron en el Capítulo V, miden el desempeño de un automóvil híbrido, mostrando datos importantes sobre el desempeño del vehículo propuesto, estableciendo la eficiencia del mismo en términos mecánicos y eléctricos.

Los resultados obtenidos en las pruebas de aceleración, permiten ver que el diseño propuesto entra en el rango establecido, de 0 a 96 k/h en 7.9 segundos, en comparación con los autos híbridos que existen en el mercado, como el Toyota Prius, el cual acelera de 0 a 100k/h en 13.4 segundos.

Los datos que estas pruebas arrojen serán esenciales para el desarrollo del automóvil, además de realizar una comparación de los autos híbridos y los convencionales, entre costos de manufactura, costos de operación, mantenimiento, sistemas eléctricos de baterías, sistema de frenado, sistema de regeneración de energía, entre otros y determinar las ventajas o desventajas que puedan existir.

Los resultados obtenidos en el rendimiento mecánico y energético del vehículo, permiten predecir el comportamiento del mismo. Ayudando de manera tal, elegir parámetros que entreguen mejores resultados en la simulación del auto.

El estudio que se ha realizado por muchos años en la propulsión eléctrica, ha alcanzado una etapa decisiva con el creciente interés en autos híbridos. Porque se han desarrollado varios tipos de vehículos híbridos, diferentes sistemas de baterías y se sigue trabajando en los sistemas de regeneración de energía eléctrica, para obtener una carga y descarga de energía completamente autónoma. Lo que aumenta el éxito en los autos híbridos y beneficia al desarrollo de nuevas tecnologías para obtener un alto nivel de rendimiento en estos vehículos. Incluyendo también los

beneficios ambientales, ya que estos automóviles pueden reducir las emisiones contaminantes hasta un 50%. Siendo una opción de solución para el problema de contaminación ambiental.

Finalmente con la metodología planteada, se dio solución a los problemas derivados de los objetivos particulares, por lo que se puede concluir que el objetivo general se solucionó satisfactoriamente.

TRABAJOS FUTUROS

Trabajos futuros

- Desarrollo del sistema de control de la dirección del automóvil.
- Análisis aerodinámico del vehículo.
- Análisis de impacto del automóvil.
- La manufactura del vehículo.

ANEXOS



Mexico DF, May 6th, 2015

José Omar Hernández Monterrosas

Instituto Politécnico Nacional

I am pleased to inform you that your contribution "**DESIGN AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR AUTOMATION OF PRODUCTION PROCESSES IN A PILOT PLANT**" by *José Omar Hernández Monterrosas, David Torres Franco, Beatriz Romero Ángeles, Héctor Alonso Benítez García, Sergio Viveros Bretón, Javier Espinoza Zavala, Guillermo Urriolagoitia Sosa,* has been **accepted** to be presented in symposium **8A, Estrategias de Vinculación Academia Industria (Strategies for Academy- Industry Relationship)** at the XXIV International Materials Research Congress, to be held in Cancun in August 16 - 20, 2015.

The presentation has been accepted in the **Poster Presentation** modality. Remember that in order to include your abstract in the program book you must register before June 7th, 2015.

Organizer of the Symposium

"Estrategias de Vinculación Academia Industria (Strategies for Academy-Industry Relationship)"

