



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Cuna de héroes, crisol de pensadores

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

***MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN
SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA
EN UN AUTO ELÉCTRICO***

Tesis

**Que para obtener el título profesional de
INGENIERO ELECTRICISTA**

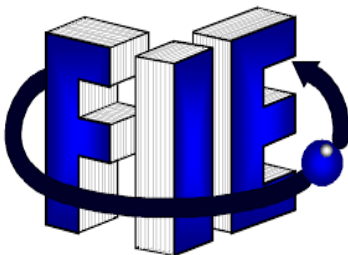
Presenta

Gaspar Martinez Figueroa

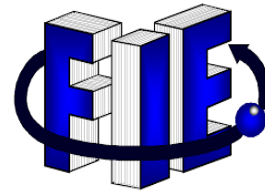
Asesor

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Dr. Gilberto Gonzáles Avalos



Morelia Michoacán, Marzo 2018



**Universidad Michoacana
de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Eléctrica**



***MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE
RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN UN AUTO ELÉCTRICO***

Tesis

Que para obtener el título profesional de

INGENIERO ELECTRICISTA

Presenta

Gaspar Martinez Figueroa gamafi

Asesor

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Dr. Gilberto Gonzáles Avalos

Morelia Michoacán, Marzo 2018

Agradecimientos

¿Cómo agradecer cuando hay tantas personas a las que se les debe algo?

A mis padres:

GASPAR MARTINEZ CORNELIO

CAMELIA FIGUEROA REYES

Por el amor y apoyo incondicional que me han brindado durante todos los días de mi vida, que a pesar de la distancia y las adversidades contra las que hemos luchado siempre han dado prioridad a la formación académica de sus hijos. Papa, mama hoy he concluido esta carrera, muchas gracias.

A mis hermanos:

Que aunque vivimos algunos momentos difíciles en nuestras vidas, gracias al amor y a los valores que nos inculcaron nuestros padres hemos podido salir adelante.

A mi esposa:

CECILIA LUBIA HERNÁNDEZ MARTINEZ

Todos los días le agradezco a la vida por darme una persona como tú, tienes ese don especial de seguir adelante a costa de cualquier vendaval. A pesar de que el camino fue largo y duro, siempre estuviste a mi lado, y por eso te doy las gracias.

A mi asesor:

DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS

Por ser una gran persona y un excelente asesor, por todo el apoyo brindado en el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos:

Si tuviera que hacer un listado para agradecerles por todo lo que han hecho por mí, creo que nunca acabaría. Así que lo resumo diciéndoles: gracias por su valiosa amistad y apoyo.

Dedicatoria

A mis padres Gaspar Martínez y Camelia Figueroa

A mi esposa e hijo Cecilia Lubia Hernández y Yahir Anderson Martínez

Índice

Agradecimientos	i
Dedicatoria.....	ii
Índice	iii
Resumen	vii
Palabras clave	vii
Abstract.....	viii
Keywords.....	viii
Lista de figuras	ix
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Tecnología Actual en Autos Eléctricos	1
1.2 Objetivo	4
1.3 Justificación	4
1.4 Metodología.....	5
1.5 Contenido de la tesis.....	5
Capítulo 2 Antecedentes de Autos Eléctricos.....	7
2.1 Los Primeros Autos Eléctricos	7
2.1.1 La era del olvido	8
2.1.2 Nuevo intento de popularizar los coches eléctricos.....	9
2.1.3 En el Siglo XXI el coche eléctrico viene para quedarse.....	11
2.2 Modelado de un Auto de Combustión Interna	12
2.2.1 Principio de funcionamiento y cinemática del motor	12
2.2.2 El principio de funcionamiento de un motor de combustión interna.....	14
2.2.3 El ciclo de funcionamiento teórico de cuatro tiempos.....	15
2.3 Modelado de un Auto Híbrido.....	16
2.3.1 Principio de funcionamiento del auto híbrido.....	16
2.3.2 Componentes del sistema híbrido	17
2.3.3 Cómo ahorra un híbrido	18

2.3.4 Carga y recarga de las baterías.....	20
2.4 Modelado de un Auto Eléctrico.....	23
2.4.1 Principio de funcionamiento.....	23
2.4.2 ¿Por qué usar electricidad?	23
2.4.3 Partes del coche eléctrico.....	24
2.3.4 ¿Cómo se recarga un coche eléctrico?	27
2.3.5 Tipos de baterías	28
2.4.6 El coche eléctrico llevo para quedarse.....	28
Capítulo 3 Generadores y Motores de Corriente Directa (CD)	30
3.1 Generadores de Corriente Directa	30
3.1.1 Introducción	30
3.1.2 Generador de voltaje de corriente alterna (ca).....	30
3.1.3 Generador de corriente directa.....	32
3.1.4 Diferencia entre generadores ca y cd	33
3.1.5 Mejoramiento de la forma de onda	33
3.1.6 Voltaje inducido.....	36
3.1.7 Valor del voltaje inducido.....	38
3.1.8 Generador bajo carga: proceso de conversión de energía.....	39
3.1.9 Reacción de la armadura	40
3.1.10 Generador con excitación independiente	42
3.1.11 Operación sin carga (o vacío) y curva de saturación	42
3.1.12 Generador en derivación (o shunt).....	44
3.1.13 Control de voltaje de un generador en derivación	45
3.1.14 Circuito equivalente	46
3.1.15 Generador con excitación independiente bajo carga	47
3.1.16 Generador en derivación bajo carga	48
3.1.17 Generador compuesto	48
3.1.18 Generador compuesto diferencial	49
3.1.19 Características de carga.....	50

3.2 Motores de Corriente Directa	51
3.2.1 Introducción	51
3.2.2 Fuerza contra electromotriz (f_{cem}).....	51
3.2.3 Aceleración del motor.....	53
3.2.4 Potencia y par o momento de torsión mecánicos.....	54
3.2.5 Velocidad de rotación	55
3.2.6 Control de la velocidad por medio de la armadura	56
3.2.7 Control de velocidad por medio del campo	58
3.2.8 Motor en derivación (shunt) bajo carga	59
3.2.9 Motor en serie	60
3.2.10 Control de la velocidad de un motor en serie	61
3.2.11 Motor compuesto	62
3.2.12 Inversión de la dirección de rotación	64
3.2.13 Arranque de un motor en derivación	64
3.2.14 Frenado de un motor	65
3.2.15 Frenado dinámico	65
3.2.16 Frenado por inversión de rotación	67
3.2.17 Frenado dinámico y constante de tiempo mecánica	68
3.2.18 Fundamentos del control de velocidad variable	69
3.2.19 Motores de imán permanente.....	73
Capítulo 4 Simulación de un Sistema de Recuperación en un Auto Eléctrico.....	75
4.1 Introducción	75
4.2 Frenado Regenerativo y Principio de Funcionamiento.....	76
4.3 Software 20-sim	78
4.4 Diseño en 20-sim de un Sistema de Recuperación de Energía	80
4.5 Respuestas del Sistema de Recuperación de Energía	84
Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones.....	98
5.1 Conclusiones	98
5.2 Recomendaciones	98

Bibliografía	100
--------------------	-----

Resumen

En este trabajo se realizará un modelo y una simulación de un sistema de recuperación de energía en un auto eléctrico por medio de un motor de corriente continua, baterías y el controlador, teniendo por objetivo aumentar la eficiencia del motor eléctrico utilizado, disminuir el desgaste del freno mecánico, recuperación de energía por medio del motor utilizándolo al mismo tiempo como generador, recargar las baterías de una manera muy eficiente, ayudar al medio ambiente al no utilizar combustibles fósiles y evitar menos emisiones de contaminantes al aire e invitar al automovilista a hacer conciencia cuando se adquiere un automóvil.

Se analizará al automóvil eléctrico desde sus inicios, el frenado regenerativo como es, como funciona y qué ventajas tiene sobre un auto que no lo tiene. Todo sobre el motor y generador de cd.

La simulación se realizará en el software 20-sim de manera que pueda entenderse para el lector.

Palabras clave

Freno, automóvil, regenerativo, recuperación, energía.

Abstract

In this work we going to do a model and a simulation of an energy recovery system in an electric car through of a DC motor, batteries and the controller, we have the objetive increase the efficiency of motor used, decrease the wear of mechanical brake, energy recovery through of a DC motor using it as a generator, recharge batteries efficiently, help to environment and do not use fossil fuel and avoid less pollution, invite to driver to think when he buy a car.

We going to analized to electric car in it´s beginnings, energy recovery system, how it works? and what advantages it has on a car that does not have it? Also we going to investigate all about the motor and cd generator.

We going to do the simulation in 20-sim” software for that it can be understood for the reader.

Keywords

Brake, automobile, regenerative, recuperation, energy.

Lista de figuras

Figura 1.1: Vista externa de un motor hibrido.....	2
Figura 1.2: Posible configuración interna de un auto eléctrico	3
Figura 2.1: Jedlik y Thomas Devenport en su primer experimento con un auto eléctrico, su nombre: La Jamais Contente	7
Figura 2.2: Thomas Alva Edison junto a un auto eléctrico en 1890	8
Figura 2.3: Auto eléctrico de modelo CityCar de Sebring-Vanguard	9
Figura 2.4: Auto eléctrico modelo Impact de 1990	9
Figura 2.5: Toyota RAV4 EV.....	10
Figura 2.6: Citroen AX Electrique (1995).....	11
Figura 2.7: Generals Motors EV-1 desguace (2005).....	12
Figura 2.8: El motor de combustión interna	13
Figura 2.9: El conjunto móvil.....	14
Figura 2.10: Sistema de válvulas.....	15
Figura 2.11: Fases de funcionamiento del motor	16
Figura 2.12: Honda Civic Hybrid	17
Figura 2.13: Partes de un auto eléctrico	17
Figura 2.14: Motor híbrido 1NZ de Toyota: a la izquierda el motor térmico, a la derecha de la cadena el motor eléctrico de propulsión, a la izquierda de la misma el generador	18
Figura 2.15: Motor térmico e hibrido ambos acelerando simultáneamente	19
Figura 2.16: Sistema de recuperación de energía al momento del frenado	20
Figura 2.17: Posible configuración de auto hibrido	21
Figura 2.18: Panel de cambio manual	22
Figura 2.19: Auto eléctrico sólo durante la desaceleración.....	22
Figura 2.20: Auto eléctrico recargándose.....	23
Figura 2.21: Comparativa de emisiones en función de tecnologías	24
Figura 2.22: Motor de un automóvil totalmente eléctrico	26
Figura 2.23: Partes de un auto eléctrico	27
Figura 2.24: Modelo actual de un auto eléctrico de alta eficiencia	29
Figura 3.1: Diagrama esquemático de un generador ca elemental que gira a una revolución por segundo	31
Figura 3.2: Voltaje inducido en el generador de ca como una función del ángulo de rotación	31

Figura 3.3: Voltaje inducido como una función del tiempo	32
Figura 3.4: Un generador de cd elemental es simplemente un generador ca equipado con un rectificador mecánico llamado conmutador	33
Figura 3.5: El generador de cd elemental produce un voltaje de cd pulsante	33
Figura 3.6: Las tres armaduras (a), (b) y (c) tienen devanados idénticos. Según como estén conectados (a anillos colectores o a un conmutador), se obtiene un voltaje de ca o cd	34
Figura 3.7: Diagrama esquemático de un generador cd de cuatro bobinas y 4 barras conmutadoras.....	34
Figura 3.8: El voltaje entre las escobillas es más uniforme que en la figura 3.5.....	34
Figura 3.9: Construcción física real del generador mostrado en la figura 3.7. La armadura tiene 4 ranuras, 4 bobinas y 4 barras conmutadoras	35
Figura 3.10: Posición de las bobinas cuando la armadura de la figura 3.9 ha girado 45°	36
Figura 3.11a: Construcción física de un generador de cd de 12 bobinas, 12 ranuras y 12 barras conmutadoras.....	37
Figura 3.12: Moviendo las escobillas del punto neutro se reduce el voltaje de salida y se producen chispas	38
Figura 3.13: Proceso de conversión de energía. El momento de torsión o par electromagnético producido por F debe ser balanceado por el momento de torsión mecánico aplicado	39
Figura 3.14: Campo magnético producido por la corriente que fluye en los conductores de la armadura.	41
Figura 3.15: La reacción en la armadura distorsiona el campo producido por los polos N y S	41
Figura 3.16: Generador de 2 polos con excitación independiente. Los polos N, S de campo son creados por la corriente que fluye en los devanados de campo.	42
Figura 3.17a: Flujo por polo frente a la corriente de excitación.....	43
Figura 3.18: a. Generador en derivación autoexcitado. b. Diagrama esquemático de un generador en derivación. Un campo en derivación es aquel que está diseñado para conectarse en derivación (término alternativo de paralelo) al devanado de la armadura.....	44
Figura 3.19: Control del voltaje del generador con un reóstato de campo. Un reóstato es un resistor con un contacto deslizable ajustable.....	45
Figura 3.20: El voltaje sin carga depende de la resistencia del circuito de campo en derivación.	46
Figura 3.21: Circuito equivalente de un generador ca.....	47
Figura 3.22: Generador con excitación independiente bajo carga.....	48
Figura 3.23: Característica de carga de un generador con excitación independiente.....	48
Figura 3.24: a. Generador compuesto bajo carga. b. Diagrama esquemático.	50
Figura 3.25: Características de carga típicas de generadores de cd.....	50
Figura 3.26: Arranque de un motor de cd a través de la línea.....	52

Figura 3.27: Fuerza contra electromotriz (f_{cem}) en un motor de cd.	53
Figura 3.28: Sistema de control de velocidad de Ward-Leonard.	57
Figura 3. 29: Control de velocidad de la armadura por medio de un reóstato.....	58
Figura 3.30: a. Diagrama esquemático de un motor en derivación, incluyendo el reóstato de campo. b. Característica de par o momento de torsión-velocidad y par o momento de torsión-corriente de un motor en derivación.	59
Figura 3.31: a. Diagrama de conexión de un motor en serie. b. Diagrama esquemático de un motor en serie.....	61
Figura 3.32: Curvas características típicas de par-velocidad y par-corriente de un motor en serie.....	62
Figura 3.33: a. Diagrama de conexión de un motor de cd compuesto. b. Diagrama esquemático del motor.....	63
Figura 3.34: Características típicas de velocidad frente a momento de torsión de varios motores de cd.....	63
Figura 3.35: a. Conexiones originales de un motor compuesto.....	64
Figura 3.36: Armadura conectada a una fuente de cd Es.	66
Figura 3.37: Armadura en un circuito abierto que genera un voltaje E_o	66
Figura 3.38: Frenado dinámico.....	66
Figura 3.39: Curvas de velocidad-tiempo con varios métodos de frenado.	67
Figura 3.40: Armadura conectada a una fuente de cd Es.	68
Figura 3.41: Inversión de rotación.....	68
Figura 3.42: Diagrama de un circuito por unidad.....	70
Figura 3.43: Grafica torcion-velocida	71
Figura 3.44: Grafica voltage-velocidad, corriente-velocidad	71
Figura 3.45 Grafica flujo-velocidad	71
Figura 3.46: Curva de momento de torsión-velocidad de un motor de cd típico.	73
Figura 3. 47: Motor de imán permanente de 1.5 hp, 90 V, 2900 r/min y 14.5 A. Diámetro de la armadura: 73 mm; longitud de la armadura: 115 mm; ranuras: 20; barras conmutadoras: 40; vueltas por bobina: 5; tamaño de los conductores: Núm. 17 AWG, devanado imbricado. Resistencia de la armadura a 20 °C:0.34 Ω . (Cortesía de Baldor Electric Company)	74
Figura 4.1: Configuración de un motor-generator donde 1: controlador de electrónica de potencia, 2: estator, 3: rotor, 4: reductor.....	77
Figura 4.2: 20-sim 4.0 logo	78
Figura 4. 3: Modelado en 20-sim	79
Figura 4.4: Ventana de trabajo de 20-sim	79
Figura 4.5: Simulación en 20-sim de un sistema de recuperación de energía.....	80

Figura 4.6: Motor de CD, devanado de campo y control de generación	81
Figura 4.7: Devanado de campo del motor de cd	81
Figura 4.8: Control motor-generador, parte en rojo	82
Figura 4.9: Generador de cd, devanado de campo y carga.....	83
Figura 4.10: Carga del sistema	83
Figura 4.11: Tabla de valores de cada elemento del sistema.....	84
Figura 4.12: Corrientes y velocidad del motor y del generador (caso 1)	86
Figura 4.13: Control de operación del motor y del generador, primera velocidad en verde y momento de generación en azul (caso 1).....	87
Figura 4.14: Voltaje, corriente y potencia creada por el generador (caso 1).....	88
Figura 4.15: Corrientes y velocidad del motor y del generador (caso 2)	89
Figura 4.16: Control de operación del motor y del generador, primera velocidad en rojo segunda velocidad en negro y momento de generación en azul (caso 2)	90
Figura 4.17: Voltaje, corriente y potencia creada por el generador (caso 2).....	91
Figura 4.18: Corrientes y velocidad del motor y del generador (caso 3)	93
Figura 4.19: Control de operación del motor y del generador, primera segunda y tercera velocidad (caso 3).....	94
Figura 4.20: Voltaje, corriente y potencia creada por el generador (caso 3).....	95
Figura 4.21: Potencia generada del sistema	96
Figura 4.22: Analogía de interruptores de control motor y generador	97

Capítulo 1

Introducción

1.1 Tecnología Actual en Autos Eléctricos

Protagonista del siglo XX, el automóvil atraviesa ahora una profunda transformación. La conducción autónoma y la movilidad eléctrica y compartida prometen cambiar nuestra forma de vida. [1]

Cada vez más se habla de **coches híbridos**, no solo en los medios especializados, también son más visibles en la televisión y circulan cada día más unidades por nuestras calles y carreteras. Se venden en (casi) todo el mundo.

Y también son cada vez más los fabricantes de automóviles que se deciden a fabricar coches híbridos. ¿Por qué? Pues básicamente por dos motivos: el precio del petróleo es muy elevado y en consecuencia la gasolina y el gasóleo son muy caros, y porque el nivel de emisiones de CO₂ y de contaminación es preocupante.

Y es que la principal ventaja de los coches híbridos es que se mejora la eficiencia del coche de motor de combustión interna, sea gasolina o sea de gasóleo, es decir consumen menos energía para hacer lo mismo, recorrer kilómetros. En general **un coche híbrido consume entre un 30% y 35% menos que un coche convencional** equivalente.

Y si un coche consume menos carburante también genera **menos emisiones** y contamina menos, siempre que hablemos del mismo tipo de combustible, ya que si cambiamos este, las emisiones también cambian (no es lo mismo quemar en un motor gasolina, gasóleo, bioetanol, biodiesel, gas licuado del petróleo o gas natural).

Alguna vez has podido oír que con la hibridación (la técnica de hacer un coche híbrido), no se pretende consumir menos, sino tener más potencia sin consumir más. Bien, claro que sí, pues eso no deja de ser una mejora de la eficiencia del motor de combustión interna (hacer lo mismo con menos, o hacer más con lo mismo) [2].

¿Qué es un coche híbrido?

Se puede definir un coche híbrido como aquel que **combina dos motores** (o más), que se alimentan con diferente tipo de energía. Por un lado hay un motor de combustión interna, ya

sea gasolina o gasóleo, al que también nos podemos referir como motor térmico, y por otro lado hay un motor eléctrico (como mínimo). En la figura 1.1 se ilustra la vista exterior de un auto híbrido en donde se observan el motor de combustión interna y el motor eléctrico.

La función del **motor eléctrico** es complementar al motor térmico de dos maneras: por una parte sumando su potencia, para que la potencia total disponible sea mayor, y por otra parte aprovechando la energía cinética que se desperdicia cada poco. Gracias a esto se puede utilizar un motor térmico pequeño, con no mucha potencia, y que consuma poco.



T

Figura 1.1: Vista externa de un motor híbrido

¿Cómo se aprovecha esa energía que se desperdicia? En pocas palabras, y de manera muy simplificada, como venía haciéndolo la dínamo de una bicicleta, que con el giro de la rueda generaba algo de electricidad con la que se encendía la lámpara del faro de la bicicleta.

Cuando el motor térmico gira en exceso y le sobra potencia para mover el coche, por ejemplo cuando sólo hay que mantener la velocidad en llano, se puede pasar algo de esa energía de más al generador, y cuando se desacelera, se desciende una cuesta, o se frena, también se pasa energía cinética al generador, que recarga unas baterías específicas que la van acumulando en forma de electricidad para cuando sea necesaria, en lugar de perderse sin más.

Esto es lo que se conoce por **recuperar energía**. Un coche híbrido no hay que conectarlo a ninguna parte para recargar sus baterías.

La energía eléctrica guardada en esas **baterías** es la que luego usará el motor eléctrico para funcionar, por sí solo o bien a la vez que el motor térmico, para ayudarlo y complementarlo en las aceleraciones intensas o cuando hay que hacer mucho trabajo, por ejemplo al subir una cuesta.

Y como el motor térmico tiene ayuda, hace menos esfuerzo, y al hacer menos esfuerzo consume menos. Pero hay también otro elemento más que participa en el menor consumo, el

sistema start-stop que para y vuelve a arrancar el motor térmico todas las veces que sea necesario.

En la figura 1.2 se muestra la posible configuración interna de un automóvil eléctrico podemos ver que la configuración es parecida a la misma de un auto de combustión interna.

Este sistema no sólo lo hace cuando el coche está detenido en los semáforos. Según el tipo de coche híbrido de que se trate también lo hace durante la marcha, cuando para seguir moviendo el coche se basta por sí solo el motor eléctrico (por ejemplo para mantener en llano una velocidad moderada).

La gestión de los dos motores, de cuándo funciona uno u otro, de cuando lo hacen a la vez y de cuando se recupera energía, es controlada de manera totalmente automática por un sistema electrónico, sin que el conductor tenga que preocuparse por nada más que conducir el coche como siempre.



Figura 1.2: Posible configuración interna de un auto eléctrico

Lo habitual es que los coches híbridos tengan algún tipo de transmisión automática, y por tanto el conductor tampoco tiene que preocuparse por cambiar de marcha. Suele ser muy habitual emplear cajas de cambio continuamente variables, pero a veces también se utilizan cajas de cambio robotizadas [2].

Ahora, también existen los autos que son cien por ciento eléctricos los cuales sólo constan de unas baterías recargables y un motor eléctrico.

Un auto eléctrico es movido por un motor eléctrico en lugar de un motor a gasolina. Desde el exterior, es casi imperceptible darse cuenta que se trata de un auto eléctrico, y de hecho muchos autos eléctricos son creados al convertir un vehículo de gasolina, limitando las

diferencias. Lo primero que podemos notar cuando conducimos uno de estos vehículos, es que el coche es casi totalmente silencioso.

El corazón de un coche eléctrico es la combinación de:

- El motor eléctrico.
- El controlador del motor.
- Las baterías.

El controlador recoge la energía de las baterías y se lo entrega al motor. El acelerador va conectado a un par de potenciómetros (resistencias variables), los cuales permiten el paso de energía que indique al controlador. El controlador puede enviar/entregar varios niveles de potencia, controlando la velocidad. [3]

1.2 Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo general modelar y simular un sistema de recuperación de energía en un auto eléctrico, el tema a desarrollar será el siguiente: imaginemos que se tiene un auto eléctrico en marcha donde el auto es impulsado por el motor eléctrico que se alimenta de unas baterías de corriente continua, entonces el conductor del auto decide frenar en un tope, un semáforo o desacelerar cuesta abajo, ahora nuestro motor eléctrico pasa a ser un generador eléctrico ya que al momento del frenado el motor seguirá en movimiento por inercia y aprovecharemos esta energía para que sea inyectada en las baterías mientras no es aprovechada por el auto, esperando nuestro automóvil sea más eficiente.

Para lograr el objetivo general se cumplirán los objetivos particulares como se muestran enseguida

- Se investigara el funcionamiento y partes de la máquina de CD.
- Se simulará el sistema de recuperación de energía usando alguno de los softwares existentes (MATLAB, 20 SIM).
- En este tema estudiaremos los pros y contras y veremos qué tan eficiente será implementarlo.

1.3 Justificación

La eficiencia respecto a energía en el automóvil eléctrico es muy importante ya que ayuda al consumidor y al productor, desperdiciar energía es desperdiciar dinero y ninguno de los dos quiere eso, esta es una de las ventajas que tienes estos autos y otras también importantes como lo son:

- Este tipo de vehículo no emite gases contaminantes al medio ambiente.
- No presentan desechos como aceites, filtros, repuestos, etc., que luego podrían contaminar.
- Pueden ser utilizados de 2 formas: Ya sea con un motor híbrido (usando combustión y electricidad) o solamente uno eléctrico.
- Mientras que en los autos que usan combustible derivado del petróleo, rinden alrededor de 800 Km por estanque siendo eso un costo de 60 dólares, los autos eléctricos rinden 400 Km aproximadamente, los que tienen un costo de 7 dólares [4].

1.4 Metodología

La metodología utilizada para el desarrollo del presente proyecto será dependiendo de la etapa del trabajo, se usaran diversas metodologías por ejemplo:

- Investigación de antecedentes en autos eléctricos.
- Investigación sobre tecnología actual en autos eléctricos como lo son los híbridos (compuestos de un motor de combustión interna y de un motor eléctrico).
- Investigación sobre la máquina de corriente continua (CD) su funcionamiento y la forma en que está compuesta.
- Modelado y simulación de un sistema de recuperación de energía en un software.
- Conclusiones y recomendaciones
-

1.5 Contenido de la tesis

En el capítulo uno se encuentra una breve introducción de tecnología actual en autos eléctricos, nuestro objetivo, la justificación para implementarlo, la metodología a seguir para cumplir nuestro objetivo.

En el capítulo dos el lector puede encontrar información sobre antecedentes y principio de funcionamiento en autos eléctricos, autos híbridos y autos totalmente eléctricos.

En el capítulo tres se encuentra todo sobre de la máquina de CD principio de funcionamiento como motor-generador.

En el capítulo cuatro se encuentra el modelo y la simulación de un sistema de recuperación de un auto eléctrico.

El capítulo cinco se encuentran las conclusiones y recomendaciones sobre el sistema.

Capítulo 2

Antecedentes de Autos Eléctricos

2.1 Los Primeros Autos Eléctricos

Alguna vez en la Historia los coches eléctricos eran los dueños de las carreteras. Sí, ocurrió en 1900. Pero vayamos más atrás, al Siglo XIX. Las investigaciones sobre electromagnetismo avanzaron con rapidez y una de sus primeras aplicaciones prácticas fue la de motorizar vehículos.

El vapor no conseguía sustituir al coche de caballos, le salió un competidor nuevo. Tras los primeros experimentos de Jedlik (1828, en figura 2.1) y Thomas Davenport (1835), encontramos el primer vehículo eléctrico en 1838, cuando Robert Davidson consiguió mover una locomotora a 6 km/h sin usar carbón ni vapor.

Entre 1832 y 1839 Robert Anderson inventó el primer carruaje de tracción eléctrica, con pila de energía no recargable. Poco después se patentó la línea electrificada, pero eso no valía para coches, sólo para trolebuses o trenes. Las primeras baterías recargables aparecieron antes de 1880, ahí comenzaron realmente.



Figura 2.1: Jedlik y Thomas Devenport en su primer experimento con un auto eléctrico, su nombre: La Jamais Contente

Se hicieron con las carreteras en poco tiempo, en 1900 podemos considerar su apogeo, cuando eran los coches que más se vendían, mucho más que los de vapor o gasolina.

De hecho, en 1899 un coche eléctrico, “La Jamais Contente” (figura 2.1), superó por primera vez los 100 km/h e instauró un récord de velocidad.

Los primeros coches de gasolina eran muy contaminantes, sucios, ruidosos, requerían bencina o gasolina (no era fácil comprarla al principio), había que cambiar de marcha muy rudimentariamente, había que arrancarlos con manivela y en cualquier lugar eran susceptibles de fallar. Eso acabó cambiando un poco.

El coche eléctrico triunfaba por su simplicidad, fiabilidad, suavidad de marcha, sin cambio de marchas ni manivela, no hacían ruido, eran veloces, la autonomía era razonable y su coste era soportable para la burguesía y las clases altas, los primeros usuarios de automóviles. Superaban por 10 a 1 a los de gasolina.



Figura 2.2: Thomas Alva Edison junto a un auto eléctrico en 1890

Sin embargo, el coche de gasolina recibió el motor de arranque (1912), Henry Ford inventó la producción en masa mecanizada, la gasolina alcanzó un precio muy popular, se empezaron a abrir carreteras al tráfico y entonces la autonomía pasó a ser una característica muy valorada, además del precio.

La tecnología de las baterías avanzaba muy bien, el mismo Thomas Alva Edison (en figura 2.2) puso una batería de níquel a un coche eléctrico antes de 1890 y consiguió más autonomía y prestaciones. Pero el coche de gasolina acabó ganando el pulso a los eléctricos, también a los híbridos.

2.1.1 La era del olvido

Hasta mediados de los 60 casi desaparecieron, algunos sobrevivieron en el sector industrial. En EEUU muchas empresas de tranvías eléctricos se adquirieron por General Motors,

Firestone y Standard Oil, las desmantelaron e impusieron un servicio de autobuses de dudosa calidad para favorecer al transporte privado, crearon una necesidad.



Figura 2.3: Auto eléctrico de modelo CityCar de Sebring-Vanguard

En los años 60-70, más por ecología que por otra cosa, empiezan a aparecer algunos modelos en el sector industrial, el carrito de golf eléctrico y pequeños coches urbanos. En ese período destacamos el CityCar de Sebring-Vanguard (en figura 2.3), fabricaron 2.000 unidades. También hay que acordarse del Elcar, otro microcoche.

La crisis del petróleo fue el detonante de su posterior reaparición, forzando a los fabricantes de coches convencionales a mejorar su eficiencia mientras se buscaban alternativas al petróleo.

Quitando prototipos, modelos anecdóticos y vehículos industriales, hay que irse a 1990, cuando General Motors presenta el Impact en el Salón de Los Ángeles. Fue el precursor del coche eléctrico más famoso de la Historia: el General Motors Experimental Vehicle 1, o EV-1 para abreviar.

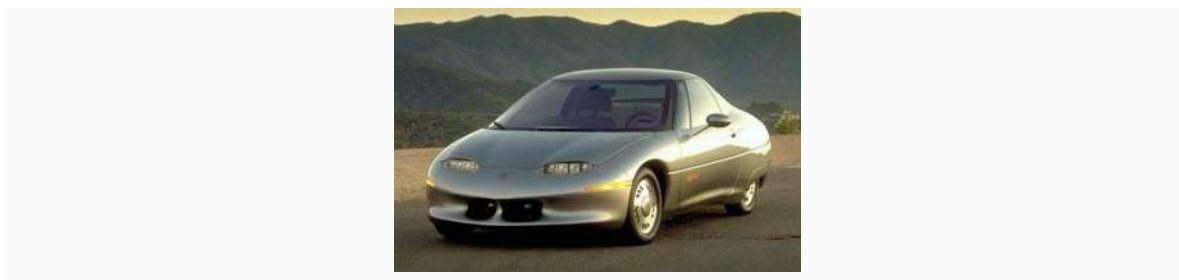


Figura 2.4: Auto eléctrico modelo Impact de 1990

2.1.2 Nuevo intento de popularizar los coches eléctricos

Algunas iniciativas legislativas de exigir vehículos de emisión cero impulsaron a las grandes automovilísticas a investigar en este campo, mientras que a la vez luchaban en los tribunales. El estado de California, el más contaminado de EEUU, fue el pionero con su Zero Emission Mandate (1990) cuyos efectos comenzaban en 1998.

Por entonces, el coche híbrido tenía más viabilidad como alternativa. Sin embargo aparecieron en las carreteras varios coches eléctricos con prestaciones muy razonables y autonomía similar a los de hoy. Casi todos eran coches convencionales transformados, unos pocos fueron desarrollos hechos desde cero.

Antes de dicho estallido podemos mencionar la Chevrolet S-10 (100 km, recarga 7 h), Solectria Geo Metro (80 km, recarga 8 h), Ford Ecostar (112 km/h, hasta 160 km) o Ford Ranger (120 km/h, 105 km). Pero el que fue un éxito con diferencia fue el EV-1, que junto a otros eléctricos, fueron ofrecidos exclusivamente en alquiler a largo plazo.



Figura 2.5: Toyota RAV4 EV

Los grandes fabricantes se apresuraron a poner en las carreteras coches de emisiones cero para poder cumplir con la Ley del estado. Además del EV-1 aparecieron Toyota RAV4 EV (figura 2.5), Honda EV Plus, Ford Th!nk (precursor de este otro), Nissan Altra EV o una nueva Ford Ranger EV.

Estos coches ofrecían una autonomía suficiente para el 90% de los desplazamientos habituales de la población, sus prestaciones eran ya adecuadas y despertaron una contenida expectación. Digamos que los fabricantes se esforzaron el mínimo posible para que los conociese la opinión pública, sin apenas publicidad o muy mala.

Los fabricantes se acabaron saliendo con la suya y lograron rebajar las exigencias de la Ley, cambiando coches de emisión cero por coches de bajas emisiones. Por otra parte, el Gobierno federal (o central en España) luchó contra California para tumbar esa reforma legislativa, y California acabó cediendo.

Diversos intereses acabaron con el coche eléctrico durante un tiempo, se ve perfectamente en el documental “Who killed the electric car?” (2006). La industria petrolera presionó

mucho para crear un clima desfavorable para estos coches, así como los intereses a favor de la pila de combustible, una tecnología en pañales.

El coche eléctrico no interesaba porque había “pocos clientes”, debían mantener repuestos para unas centenas o millares de unidades, no requerían mantenimiento ni generaban dinero en la postventa, suponía mucho dinero.

En un plazo de casi 10 años hubo en California y también Arizona una pequeña flota de coches eléctricos, que llegaron a tener estaciones de recarga públicas. Caras famosas como Tom Hanks o Mel Gibson tuvieron un coche eléctrico y hablaron muy bien de ellos en programas de elevada audiencia.

La mayoría de esos coches fue reclamada por lo fabricantes, deshabilitados o directamente desguazados. Unos pocos pudieron salvarse por las protestas de los clientes, que querían pagarlos incluso sin tener derecho a postventa.

Estos coches casi desaparecen pero los últimos acontecimientos económicos y la creciente mentalidad ecológica han conseguido evitar la presión de los *lobbys* del petróleo. El coche híbrido consiguió emerger y el eléctrico está en ello, tenemos varios modelos de próxima comercialización a la vuelta de la esquina.

Por ejemplo, General Motors cometió un gravísimo error erradicando el EV-1, pero intentará salvar su karma con el Chevrolet Volt y el Opel Ampera. En Europa PSA Peugeot-Citroën vendió unos pocos miles de eléctricos, versiones transformadas de utilitarios y furgonetas ligeras que aún funcionan en Francia.

En la figura 2.6 presenta el modelo Citroen AX pioniere en la electro movilidad.



Figura 2.6: Citroen AX Electrique (1995)

2.1.3 En el Siglo XXI el coche eléctrico viene para quedarse

Próximamente, hablaremos de los coches eléctricos que están por venir, pero la mejora en la tecnología de las baterías está consiguiendo que sean una alternativa a considerar, ya que la pila de combustible está todavía en una fase inicial que no interesa para el público masivo. El coche convencional comienza su decadencia ahora.

La principal esperanza eléctrica, tras los híbridos, es el híbrido enchufable, lo mejor de ambos mundos. En los próximos años ya estarán a la venta varios modelos eléctricos que están apoyados por las administraciones y comienzan a tener aceptación en el mercado.

Una de sus excusas ha sido la “escasa demanda”, fácil de explicar si no hubo anuncios en carreteras paradisíacas. Incluso cuando se demostró que sí había demanda y gente interesada, hicieron oídos sordos. Esta vez no pueden pasar del consumidor, o le comprará a la competencia.

En la figura 2.7 se muestra donde terminaron los EV-1 después de que se detuvo su fabricación



Figura 2.7: Generals Motors EV-1 desguace (2005)

Es la tercera vez que el coche eléctrico quiere venir para quedarse. Siguen sin servir a toda la población, pero no son precisamente inútiles. Afortunadamente para la humanidad, las petroleras han perdido mucho poder mediático [5].

2.2 Modelado de un Auto de Combustión Interna

2.2.1 Principio de funcionamiento y cinemática del motor

Un motor de combustión interna basa su funcionamiento, como su nombre lo indica, en el quemado de una mezcla comprimida de aire y combustible dentro de una cámara cerrada o cilindro, con el fin de incrementar la presión y generar con suficiente potencia el movimiento lineal alternativo del pistón (ver figura 2.8).

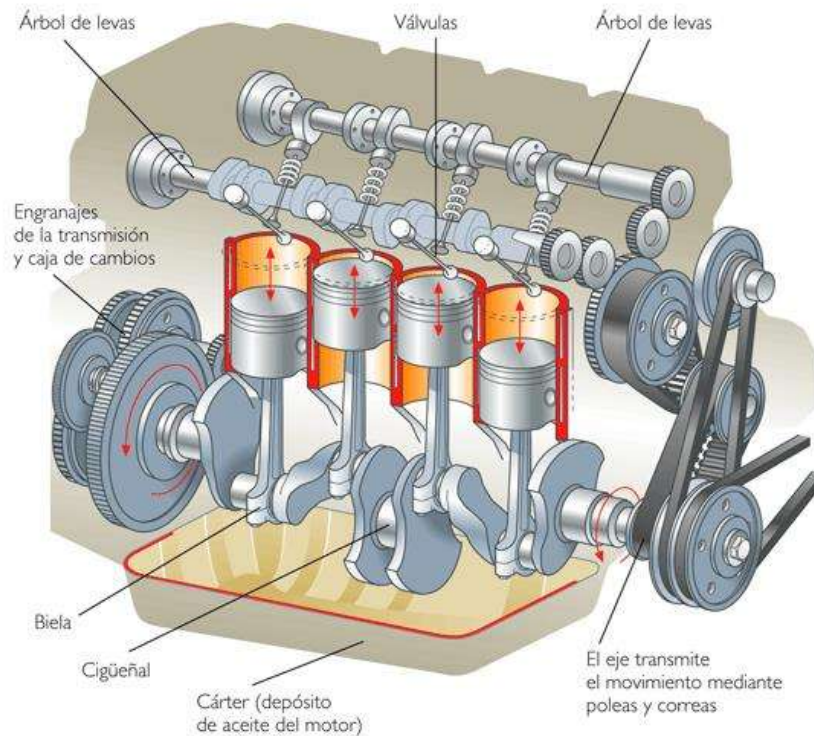


Figura 2.8: El motor de combustión interna

Este movimiento es transmitido por medio de la biela al eje principal del motor o cigüeñal, donde se convierte en movimiento rotativo, el cual se transmite a los mecanismos de transmisión de potencia (caja de velocidades, ejes, diferencial, etc.) y finalmente a las ruedas, con la potencia necesaria para desplazar el vehículo a la velocidad deseada y con la carga que se necesite transportar.

Mediante el proceso de la combustión desarrollado en el cilindro, la energía química contenida en el combustible es transformada primero en energía calorífica, parte de la cual se transforma en energía cinética (movimiento), la que a su vez se convierte en trabajo útil aplicable a las ruedas propulsoras; la otra parte se disipa en el sistema de refrigeración y el sistema de escape, en el accionamiento de accesorios y en pérdidas por fricción.

En este tipo de motor es preciso preparar la mezcla de aire y combustible convenientemente dosificada, lo cual se realizaba antes en el carburador y en la actualidad con los inyectores en los sistemas con control electrónico. Después de introducir la mezcla en el cilindro, es necesario provocar la combustión en la cámara de del cilindro por medio de una chispa de alta tensión que la proporciona el sistema de encendido.

2.2.2 El principio de funcionamiento de un motor de combustión interna

En un motor el pistón se encuentra ubicado dentro del cilindro, cuyas paredes le restringen el movimiento lateral, permitiendo solamente un desplazamiento lineal alternativo entre el punto muerto superior (PMS) y el punto muerto inferior (PMI); a dicho desplazamiento se le denomina carrera (ver figura 2.9).



Figura 2.9: El conjunto móvil.

Tanto el movimiento del pistón como la presión ejercida por la energía liberada en el proceso de combustión son transmitidos por la biela al cigüeñal (ver figura 2.9). Este último es un eje asegurado por los apoyos de bancada al bloque del motor, y con unos descentramientos en cuales se apoyan las bielas, que son los que permiten que el movimiento lineal del pistón transmitido por la biela se transforme en un movimiento circular del cigüeñal.

Este movimiento circular debe estar sincronizado principalmente con el sistema de encendido y con el sistema valvular, compuesto principalmente por el conjunto de válvulas de admisión y de escape, cuya función es la de servir de compuerta para permitir la entrada de mezcla y la salida de gases de escape (ver figura 2.10).

Normalmente las válvulas de escape son aleadas con cromo con pequeñas adiciones de níquel, manganeso y nitrógeno, para incrementar la resistencia a la oxidación debido a las altas temperaturas a las que trabajan y al contacto corrosivo de los gases de escape.

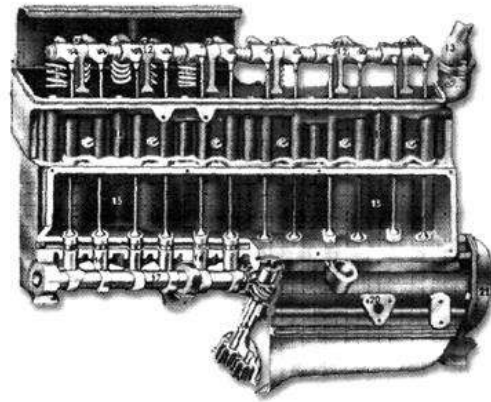


Figura 2.10: Sistema de válvulas

2.2.3 El ciclo de funcionamiento teórico de cuatro tiempos

La mayoría de los motores de combustión interna trabajan con base en un ciclo de cuatro tiempos, cuyo principio es el ciclo termodinámico de Otto (con combustible gasolina o gas) y el ciclo termodinámico de Diésel. Por lo tanto, su eficiencia está basada en la variación de la temperatura tanto en el proceso de compresión isentrópico¹, como en el calentamiento a volumen o presión constante.

El ciclo consiste en dos carreras ascendentes y dos carreras descendentes del pistón. Cada carrera coincide con una fase del ciclo de trabajo (ver figura 2.11), y recibe el nombre de la acción que se realiza en el momento, así:

Admisión Compresión

Combustión - Expansión

Escape [6]

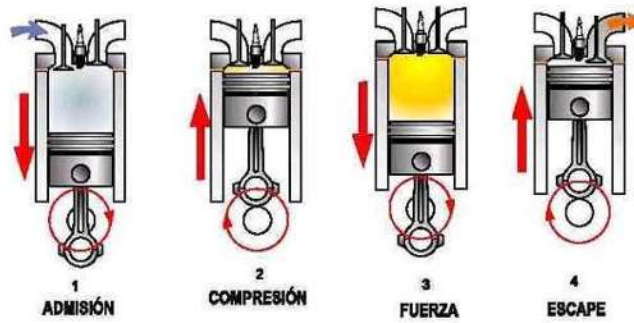


Figura 2.11: Fases de funcionamiento del motor

2.3 Modelado de un Auto Híbrido

2.3.1 Principio de funcionamiento del auto híbrido

La energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma. Cuando hablamos de automoción, aunque sea físicamente incorrecto, podemos contemplar pérdidas.

Al pisar el freno convertimos energía cinética en calor en los discos, por ejemplo. El sonido del motor también podemos considerarlo una pérdida, así como los rozamientos mecánicos, resistencia aerodinámica, estas realidades suponen que del combustible que echamos al depósito se aprovecha menos de la mitad en movimiento útil.

Los coches híbridos tratan de minimizar estas pérdidas todo lo que sea posible, en cada uno de los aspectos. Por ejemplo, en cuanto a aerodinámica, el diseño de los híbridos es de tipo *kammback* (o media gota de agua) si se han diseñado específicamente como tales y no son una versión adicional a la convencional.

Entran en esta definición Honda Insight, Toyota Prius, Chevrolet Volt, Opel Ampera, etc. Los Lexus, Honda Civic Hybrid (figura 2.12) y adaptaciones híbridas de modelos que sí se venden con motores convencionales no tienen una aerodinámica tan trabajada. Un híbrido ahorra energía en cada cable, cada bombilla, cada circuito al máximo. Hasta reducen peso allí donde se puede.



Figura 2.12: Honda Civic Hybrid

2.3.2 Componentes del sistema híbrido

Este tipo de vehículos tiene varios componentes comunes independientemente de la arquitectura. Si fuese un vehículo 100% eléctrico no tendría motor térmico, y el resto es igual.

Motor térmico: Suele ser gasolina (ciclo Otto, Atkinson o Miller) o diesel. También podría funcionar con gas o biocombustibles. Tienen poca cilindrada respecto a un modelo equivalente de motor convencional y prima el par máximo sobre la potencia.

Motor eléctrico: Puede haber más de uno y siempre va conectado a la transmisión o empuja directamente a las ruedas. Su sonoridad es prácticamente nula y dan casi todo el par en un régimen muy bajo de revoluciones.

Generador: No es una pieza sino una función. Recupera energía en las frenadas, retenciones y aceleraciones en las que el motor térmico entregue potencia de más. Lo normal es que el mismo motor eléctrico desempeñe esta función siempre que no esté empujando (ver figura 2.13).

Baterías: Suelen ser de plomo-ácido (Pb), níquel-metal hidrido (NiMh), níquel-cadmio (NiCd) o ión litio, en orden de eficiencia. Se almacenan normalmente en la parte trasera y añaden mucho peso al coche. Necesitan un sistema de refrigeración pero no mantenimiento por parte del usuario. Van aparte de la batería de 12V de siempre.

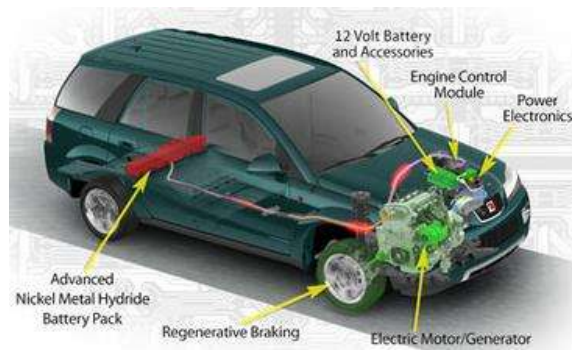


Figura 2.13: Partes de un auto eléctrico

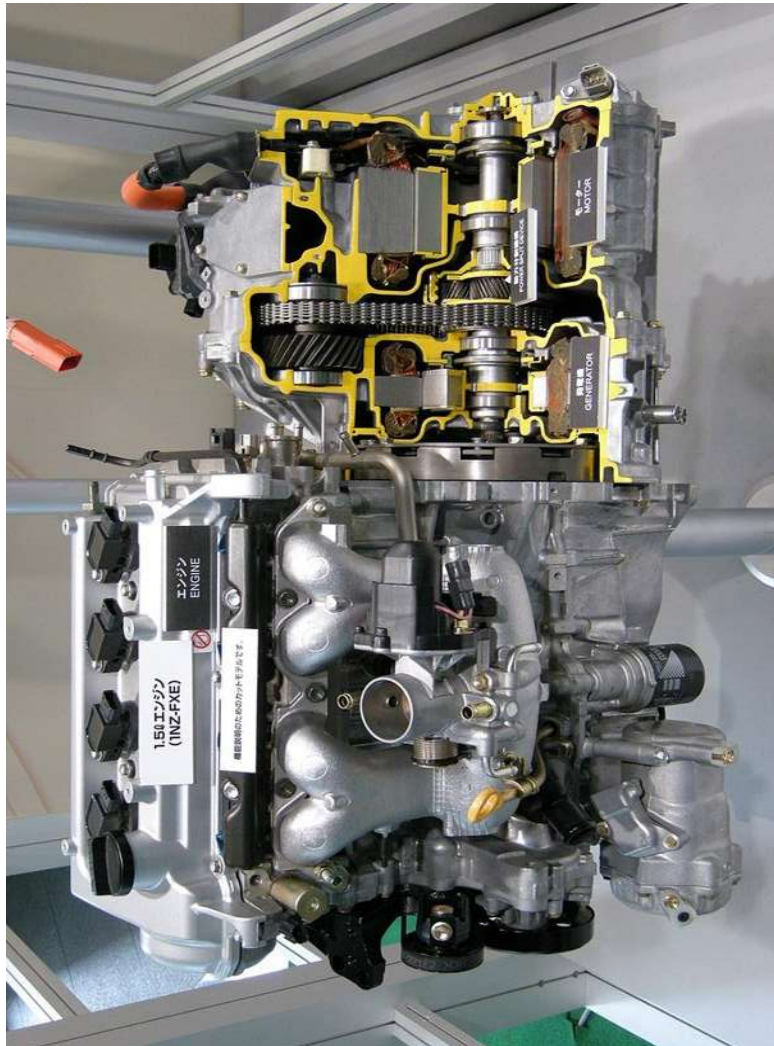


Figura 2.14: Motor híbrido 1NZ de Toyota: a la izquierda el motor térmico, a la derecha de la cadena el motor eléctrico de propulsión, a la izquierda de la misma el generador

Sistema de gestión: Independientemente de que hablemos de un modelo manual (muy raro) o de uno automático, para que un híbrido sea más eficiente debe estar gestionado por un ordenador con múltiples sensores, que decida qué combinación es más eficiente en cada momento (ver figura 2.14).

2.3.3 Cómo ahorra un híbrido

Ahora que sabemos sus componentes, discriminaremos estas situaciones de conducción:

Arranque desde parado: El motor eléctrico se utiliza para mover el coche con o sin el motor térmico (con poca demanda de aceleración). La transición de parado a movimiento es lo más suave posible, alcanzada cierta velocidad el motor de gasolina mueve el coche también si no lo ha hecho ya. Así evitamos un momento de gran ineficiencia del motor térmico. Los semihíbridos siempre arrancan con los dos motores.

Aceleración: Como el motor térmico es de potencia más ajustada, el eléctrico se utiliza para ayudarlo a empujar durante un tiempo suficiente. Al tener que hacer menos esfuerzo el térmico su consumo es menor y el comportamiento similar a si tuviese más potencia (figura 2.15).

Velocidad de crucero baja: En zona urbana y en determinadas circunstancias el motor eléctrico puede realizar toda la labor de empuje mientras el nivel de carga de las baterías lo admita. El consumo de combustible pasa a ser cero, no hay emisiones y el sonido del vehículo se limita al ruido de rodadura de los neumáticos.

Velocidad de crucero media/alta: Es el motor térmico el que empuja al vehículo, con puntuales asistencias del eléctrico para ligeras pendientes, en caso contrario se almacena en las baterías cualquier excedente de potencia del motor térmico. En este caso, la alta eficiencia del motor térmico rebaja el consumo. Es mucho más fácil en términos de esfuerzo mantener una velocidad que hacer variaciones en ella (aceleración en este caso).

Frenado: Si la potencia de frenada exigida es baja, en vez de utilizarse los frenos de disco el generador ofrece una gran resistencia al avance y convierte el movimiento del vehículo en electricidad para recargar baterías. Si exigimos más potencia de frenado actúa el sistema convencional además del regenerativo (figura 2.16).



Figura 2.15: Motor térmico e híbrido ambos acelerando simultáneamente

Detenciones: Cuando estamos detenidos no funciona ninguno de los motores a menos que las baterías estén bajas de carga. No hacemos ningún ruido, ni gastamos, ni emitimos ningún gas. Los peatones pensarán que se nos ha apagado el coche. El sistema de aire acondicionado tirará de la energía almacenada en las baterías para evitar el ralenti, una gran pérdida de energía.



Figura 2.16: Sistema de recuperación de energía al momento del frenado

2.3.4 Carga y recarga de las baterías

Excepto en los modelos recargables mediante red eléctrica (PHEV o REHEV) las baterías se recargan únicamente con el movimiento. El motor térmico trata de trabajar siempre a un régimen máximo de eficiencia, así que el sonido que percibimos es fundamentalmente el mismo, como un ciclomotor pero más agradable.

Si la potencia suministrada por el motor es excesiva se almacena el excedente en las baterías, pasando el motor eléctrico a ser un generador. Si en cambio la potencia del motor térmico es insuficiente, el motor eléctrico utiliza la energía previamente almacenada para realizar la asistencia. En algunos casos el motor eléctrico ni empuja ni recarga, está inactivo, como en cruceros a velocidad media/alta.

En la figura 2.17 se muestra una posible configuración de los dos motores alternándose.



Figura 2.17: Posible configuración de auto híbrido

¿Qué ventaja tiene hacer funcionar al motor térmico en su régimen ideal? Es mucho más eficiente, maximiza la distancia recorrida por combustible consumido, pero además es medioambientalmente muy útil ya que reduce mucho la emisión de óxidos de nitrógeno (NOx), partículas sólidas, hidrocarburos sin quemar (HC), monóxido de carbono (CO), etc.

Cuando el motor térmico no está empujando al estar apagado o en retención, no inyecta nada de combustible, de modo que el consumo es nulo, y las emisiones son cero. Eso significa que podríamos respirar el aire que saldría del tubo de escape con total seguridad. El motor eléctrico no produce contaminación de ningún tipo, es más, ni necesita aire.

Por razones de eficiencia, casi todos los híbridos tienen un cambio de variación continua de múltiples velocidades, aunque pueden tener relaciones prefijadas para simular tener marchas, como el Honda Insight Executive o el Lexus GS 450h. Con un cambio manual o automático de otro tipo (DSG, Tiptronic) no se aprovecharía el potencial del sistema híbrido.

Donde más ahorra un híbrido es en zona urbana, y donde menos en cruceros a alta velocidad por autovía, ya que las baterías no permiten asistencia del eléctrico el tiempo suficiente y el motor térmico puede ir un poco forzado, especialmente si es de poca potencia. Por ejemplo, los Honda Civic Hybrid, Insight o Prius (I o II) recurren a motores térmicos de menos de 95 CV.

Si hablamos de híbridos en serie (sin conexión mecánica del motor térmico a las ruedas) entonces hablamos de una eficiencia máxima. Algunos modelos son capaces de prescindir del motor térmico por completo durante una distancia superior a 32 km e inferior a 100 km,



Figura 2.18: Panel de cambio manual

los denominados PHEV y REHEV. Al bajar las baterías de carga reactivan sus motores térmicos.

Dejando al margen los cruceros a velocidades no legales en la mayor parte del Mundo y las tandas en circuito, los híbridos siempre aprovechan mejor el combustible que un modelo convencional (figura 2.18), ya que convierten en energía eléctrica lo que de otro modo se perdería en rozamientos, calor o ruido.

Cuanta menos energía desperdicie el vehículo, más lo agradecerá su propietario a la hora de repostar. La mayor parte de lo que pagamos en la gasolinera no son impuestos, es contaminación pura y dura [7]



Figura 2.19: Auto eléctrico sólo durante la desaceleración

Hoy día algunos modelos convencionales tratan de imitar a los híbridos desconectando el alternador en las fases de aceleración (lo que se llama regeneración de energía en las frenadas o retenciones) o utilizando sistema micro híbrido o Stop&Start para evitar el ralentí en las detenciones.

2.4 Modelado de un Auto Eléctrico

2.4.1 Principio de funcionamiento

Los autos eléctricos son un invento muy anterior al automóvil con motor de combustión interna de Karl Benz y Nikolaus Otto. La Historia los enterró y ahora los recupera.

El coche eléctrico es, a largo plazo, el futuro del automóvil. Se divide en dos tecnologías principales, los coches eléctricos de baterías y los de pila de combustible. Nos vamos a referir a coches eléctricos con baterías por omisión, ya que la pila de combustible se basa en otro principio y son diferentes.

También tienen mucha relación con los coches híbridos, que no son más que un coche que combina dos tipos de propulsión: térmica y eléctrica. Un coche eléctrico sólo dispone de uno o más motores eléctricos, si incluye un motor térmico entonces estamos hablando de un coche híbrido. En la siguiente figura 2.19 se muestra un coche eléctrico el cual se está recargando en una estación de carga para vehículos de este tipo.



Figura 2.20: Auto eléctrico recargándose

2.4.2 ¿Por qué usar electricidad?

A nivel mecánico los coches eléctricos no pueden ser más simples. El número de piezas móviles se reduce al máximo, apenas hay piezas de desgaste y son los motores más fiables conocidos por el ser humano. Por otra parte, son lo más eficiente que hay, convierten en movimiento más del 90% de la energía que consumen.

No obstante, no se aprovecha toda la energía de la baterías, y se pierde energía por el calor de las mismas, en la transformación de la electricidad, el transporte y por las propias ruedas del vehículo. Aun considerando todas las pérdidas, la eficiencia es indiscutiblemente superior a un coche convencional o híbrido.

Luego está la cuestión del origen de la energía. Partiendo de la energía más contaminante, el carbón, las emisiones “del pozo a la rueda” (Well to Wheel) son menores en un coche eléctrico que el mejor de los coches convencionales, incluyendo híbridos (figura 2.20). A igualdad de fuente de energía, como el petróleo, gastan y contaminan menos.

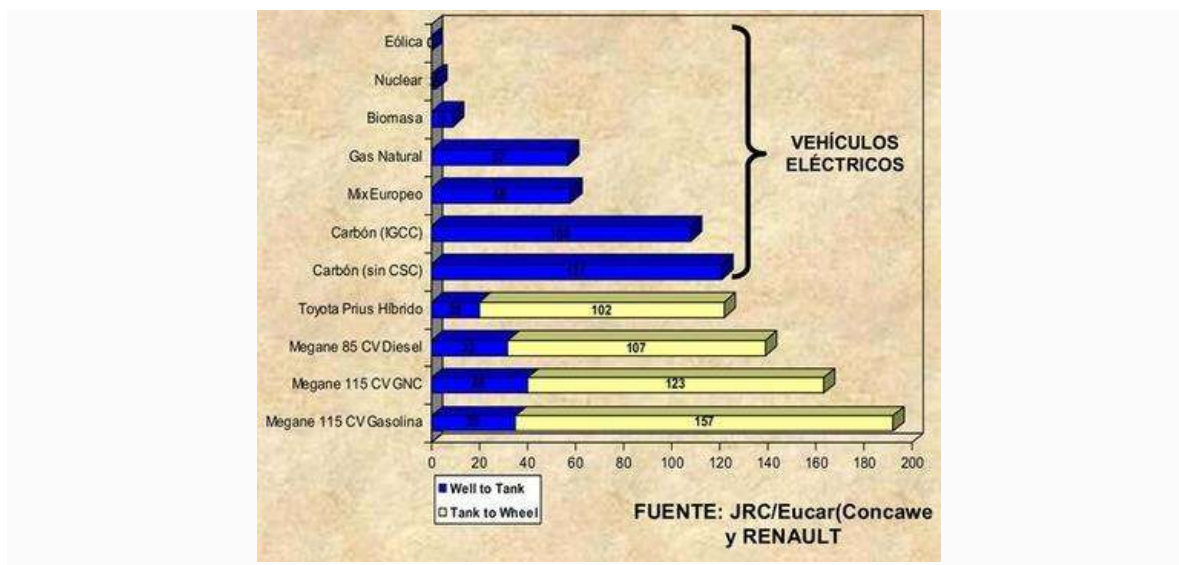


Figura 2.21: Comparativa de emisiones en función de tecnologías

No producen ninguna emisión contaminante en su entorno, solo en los lugares de generación, normalmente aislados de las poblaciones y en lugares controlados, y en menor cantidad. Si el origen de la energía es renovable (solar, eólica, mareomotriz, geotérmica) las emisiones globales son CERO.

Las baterías exigen cierto impacto ambiental en su fabricación, pero al final de su vida útil pueden ser recicladas en casi el 100% de los materiales y de hecho la normativa de la Unión Europea exige que se reciclen todas y en lugares específicos. Este componente fija casi todas las limitaciones del vehículo.

La energía de las baterías sólo puede provenir de contactos de la red eléctrica. El uso de energía solar en el coche está demasiado en pañales, los coches solares son ridículamente ligeros, lentos y no pasan de ser prototipos [8].

2.4.3 Partes del coche eléctrico

Motor: Un auto eléctrico puede funcionar con uno o más motores, y además de impulsar al automóvil funcionan también para recuperar energía y aumentar la autonomía del auto (inversor).

Existen varios tipos de motores que pueden ser utilizados en un auto eléctrico, el uso de cualquier motor depende del fabricante.

El motor asíncrono o de inducción ha sido muy utilizado en la industria, por ser el más económico y con muy baja necesidad de mantenimiento, y se ha utilizado desde principios del siglo XX. Están compuestos por un circuito eléctrico, uno magnético, aislamientos y refrigeración.

El motor síncrono de imanes permanentes, se ha utilizado convencionalmente en la generación de energía eléctrica; y se ha utilizado cada vez más como motor debido a la potencia y mayor rendimiento que presenta a diferencia de los motores asíncronos. Además utiliza imanes de alta energía en vez de circuitos, de ese modo disminuye el tamaño y el peso del motor; sin embargo, pese a sus beneficios, el costo de producción de este es elevado a diferencia del anterior.

Los motores de flujo axial son motores sincrónicos de imanes permanentes con gran densidad que permiten ser integrados en las ruedas del vehículo directamente; simplificando así los acoplamientos mecánicos entre el motor y la rueda.

Por otro lado, los motores de reluctancia conmutada, son de fácil construcción, pero tiene un inconveniente principal que es la necesidad de un sensor especial para detectar la posición del rotor.

Por último, los motores de corriente continua sin escobillas, son los tradicionales en tracción eléctrica, pero su producción es muy costosa, así como su mantenimiento e igual que los motores de reluctancia conmutada, necesitan sensores especiales para reconocer la posición (ver figura 2.22).



Figura 2.22: Motor de un automóvil totalmente eléctrico

Puerto de carga: recibe la electricidad del exterior, puede haber otra toma específica para carga rápida

Transformadores: convierten la electricidad de una toma casera o de recarga rápida en valores de tensión y amperaje válidos para el sistema de recarga. No solo rellenan las baterías, también se preocupan de la refrigeración para evitar riesgo de explosión o derrames

Baterías: Las baterías de un auto eléctrico funcionan como cualquier batería normal y sirven para almacenar la energía eléctrica que servirá para hacer funcionar el motor; lo que se asemeja al funcionamiento de un tanque de gasolina en un auto de combustión.

Existen diferentes tecnologías para las baterías, estas pueden ser de plomo-ácido, níquel hidruro metálico, níquel-cadmio y las más avanzadas de litio.

Al ser la fuente de energía de los autos eléctricos pueden recargarse y dependiendo de su capacidad, dependerá su autonomía y duración; debido al trabajo que realizan suelen calentarse por eso cuentan con un sistema de refrigeración adecuado

Controladores: comprueban el correcto funcionamiento por eficiencia y seguridad, regulan la energía que recibe o recarga el motor, ver figura 2.23

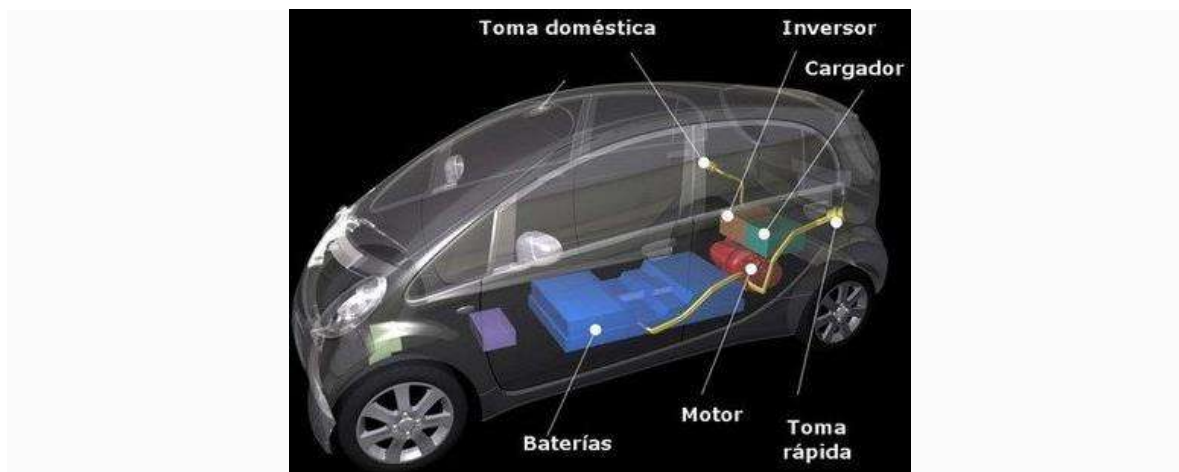


Figura 2.23: Partes de un auto eléctrico

Los motores eléctricos ofrecen una curva de par planísima, con un rendimiento excelente sobre todo a bajas revoluciones. Son capaces de girar a regímenes de 20,000 o más RPM, con un ruido casi nulo y sin vibraciones de ningún tipo. Apenas tienen mantenimiento, si es que lo tienen.

Las baterías determinan la potencia que puede usar el motor, la autonomía y el diseño del vehículo. Esto es así porque son grandes y pesadas, tienen poca densidad de energía por unidad de masa. Su rendimiento se ve afectado por la temperatura, empeoran especialmente con el frío.

Al ser los motores totalmente progresivos, no hace falta caja de cambios, como mucho hay dos relaciones de transmisión. No necesitan embrague, ya que empujan desde 0 RPM sin ningún problema, algo que un motor térmico no puede hacer. Se gana peso por las baterías, pero se ahorra mucha mecánica por otro lado [9].

2.4.4 ¿Cómo se recarga un coche eléctrico?

En una palabra: **conectarlo**. Es un proceso que va desde minutos (en los mejores casos) hasta horas. La principal ventaja de los coches eléctricos es recargarlos de noche, cuando las tarifas son bajas y la demanda energética es muy baja, para aprovechar mejor la potencia instalada de un país.

Durante el proceso de carga, las baterías se mantienen a una temperatura controlada mediante ventiladores. El tiempo depende del voltaje y amperaje, una toma doméstica no puede admitir recarga rápida. Cuanto más vacías están las baterías, más rápido se recargan. Cuanto más llenas, más cuesta que se llenen.

Por eso, la primera mitad de carga es relativamente rápida, la otra mitad se tarda más en llenar. Si el vehículo no se usa en días, va perdiendo la carga por limitaciones electroquímicas, y si hace frío, se pierde antes. En automoción, las baterías no sufren efecto memoria, como sí pasa en pequeños aparatos electrónicos.

2.4.5 Tipos de baterías

Dependiendo de la composición de sus electrolitos varían sus características. Se rellenan con electrones, su masa no varía de la carga total al vacío, al menos no varía en un número relevante por grande que sean las baterías. Las primeras baterías eran de plomo-ácido, luego siguieron las de níquel y en el futuro se piensa en litio.

Hay tres parámetros relevantes en una batería: potencia, capacidad y densidad de carga. Por otro lado tenemos el voltaje, precio, resistencia interna y seguridad. Las que mejor balance ofrecen hoy día son las de Ni-Mh (níquel metal-hidruro) y son las que usan los coches híbridos actuales.

Las baterías de plomo-ácido son muy pesadas y poco potentes en relación a su tamaño y peso. Las de litio en ese sentido son excelentes, pero carísimas. El alto precio de los coches eléctricos viene dado por las baterías, pasará un tiempo hasta que alcancen precios “populares” y sean más económicas para el que las fabrica y el que las usa.

2.4.6 El coche eléctrico llega para quedarse

Sus principales ventajas son la diversidad de fuentes energéticas, sus emisiones casi nulas y su alta eficiencia (figura 2.24). Por contra, tienen poca autonomía, poca oferta comercial, son caros (de adquirir, no de mantener) y requieren una infraestructura adecuada para permitir a sus usuarios una movilidad decente.

A corto plazo, los coches convencionales son más rentables. A medio plazo, los híbridos serán los grandes competidores porque aglutinan lo mejor de ambos mundos, especialmente si son enchufables. A muy largo plazo, los coches eléctricos son tremendamente rentables y fiables.

¿Cuál es el medio de transporte motorizado más eficiente que existe? El tren, pero en automoción no podemos tender catenaria por todas partes, es una locura. Dentro de décadas podrán recuperar energía solar generada por la propia carretera a través de inducción, pero a día de hoy eso no es viable.

Sin duda, la electricidad es el futuro, se puede sacar de cualquier lado y la naturaleza la regala todos los días. Ahora vivimos el apogeo del coche convencional y el comienzo de su declive. Mientras tanto, los coches híbridos tendrán un compromiso excelente entre las ventajas de los dos mundos y pocos inconvenientes.

Pero queda mucho por hacer. Se tienen que mojar los fabricantes, las administraciones y la sociedad. Existen movimientos incipientes que darán sus primeros frutos relevantes durante esta década y aumentarán mucho a partir de 2020, todo depende de lo bien o mal que le vaya a los consumidores de oro negro.

Cuando su implantación sea masiva, se reducirá la dependencia energética del petróleo, mejorará mucho la calidad de vida en la ciudad (ruido, contaminación) y se hará un uso muy eficiente de los recursos energéticos. En su día el caballo dio paso al motor térmico, **ahora el motor térmico empieza a ceder su testigo al eléctrico** [8].



Figura 2.24: Modelo actual de un auto eléctrico de alta eficiencia

Capítulo 3

Generadores y Motores de Corriente Directa (CD)

3.1 Generadores de Corriente Directa

3.1.1 Introducción

Iniciaremos nuestro estudio de la maquinaria rotatoria con el generador de corriente directa. Los generadores de cd ya no son tan comunes como lo eran antes, porque la corriente directa, cuando se requiere, es producida principalmente por rectificadores electrónicos. Estos rectificadores pueden convertir la corriente de un sistema de corriente alterna en corriente directa sin utilizar ninguna parte móvil. No obstante, el conocimiento de los generadores de cd es importante porque representa una introducción lógica al comportamiento de los motores de cd. De hecho, muchos motores cd en la industria operan como generadores durante periodos breves. Los motores y generadores cd se construyen de la misma manera; así, cualquier generador cd puede operar como motor y viceversa. Debido a su construcción similar, las propiedades fundamentales de los generadores y motores son idénticas. Por consiguiente, todo lo que aprendamos acerca de un generador de cd podemos aplicarlo directamente a un motor de cd.

3.1.2 Generador de voltaje de corriente alterna (ca)

Aunque aparentemente no viene al caso, el estudio de un generador de corriente directa (cd) tiene que iniciarse con un conocimiento del generador de corriente alterna (ca). La razón es que el voltaje producido en cualquier generador cd es inherentemente alterno y sólo se transforma en cd una vez que ha sido rectificado por el conmutador. La figura 3.1 muestra un generador ca elemental compuesto de una bobina que gira a 60 r/min entre los polos N, S de un imán permanente. La rotación es producida por una fuerza propulsora externa, como un motor (no se muestra). La bobina está conectada a dos anillos colectores montados en el eje. Los anillos colectores están conectados a una carga externa por medio de dos escobillas estacionarias x y y.

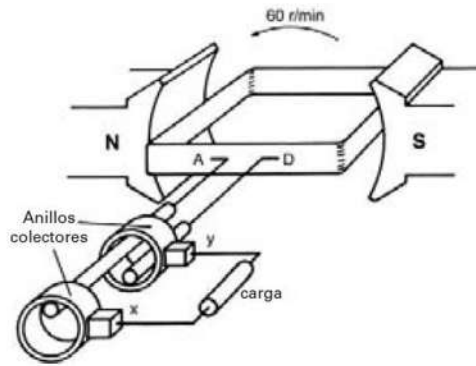


Figura 3.1: Diagrama esquemático de un generador ca elemental que gira a una revolución por segundo

Conforme gira la bobina, se induce un voltaje entre sus terminales A y D. Este voltaje aparece entre las escobillas y, por consiguiente, a través de la carga. El voltaje se genera porque los conductores de la bobina atraviesan el flujo producido por los polos N, S. Por lo tanto, el voltaje inducido es el máximo (unos 20 V) cuando la bobina está momentáneamente en la posición horizontal, como se muestra. Ningún flujo es atravesado cuando la bobina está momentáneamente en la posición vertical; de este modo, el voltaje es cero en estos instantes. Otra característica del voltaje es que su polaridad cambia cada vez que la bobina realiza una media vuelta. Por ello, el voltaje se puede representar como una función del ángulo de rotación (Fig. 3.2). La forma de onda depende de la forma de los polos N, S. Asumimos que éstos fueron diseñados para generar la onda sinusoidal mostrada. La bobina de este ejemplo gira a una velocidad uniforme, por lo que cada ángulo de rotación corresponde a un intervalo de tiempo específico. Como la bobina da una vuelta por segundo, el ángulo de 360° de la figura 4.2 corresponde a un intervalo de un segundo. Por lo tanto, también podemos representar el voltaje inducido como una función del tiempo (Fig. 3.3).

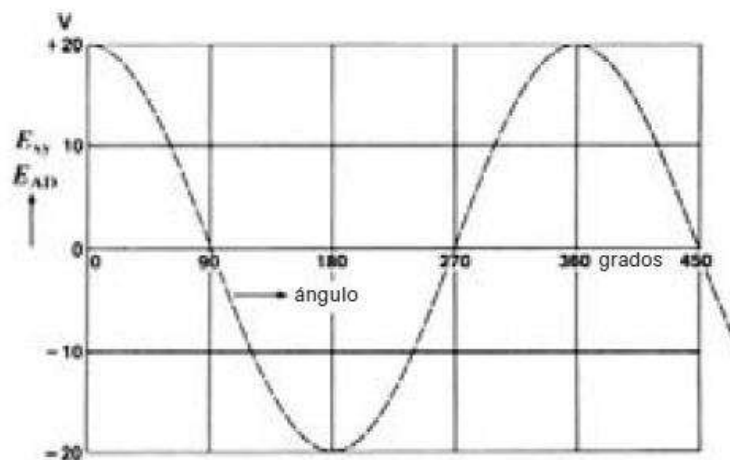


Figura 3.2: Voltaje inducido en el generador de ca como una función del ángulo de rotación

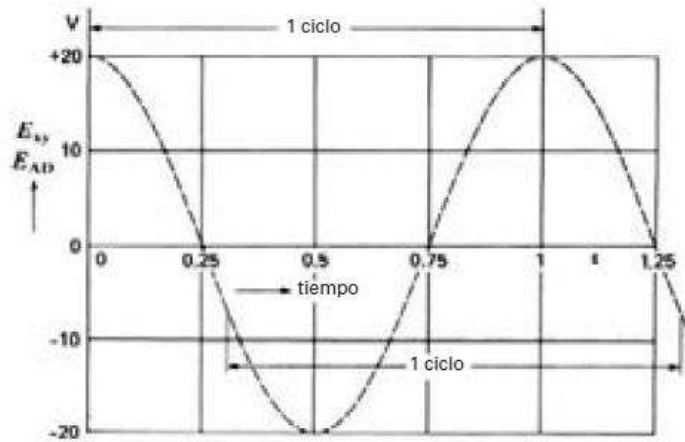


Figura 3.3: Voltaje inducido como una función del tiempo

3.1.3 Generador de corriente directa

Si las escobillas que aparecen en la figura 3.1 se pudieran cambiar de un anillo colector al otro cada vez que la polaridad estuviera a punto de cambiar, obtendríamos un voltaje de polaridad constante a través de la carga. La escobilla x siempre sería positiva y la y negativa. Podemos obtener este resultado por medio de un conmutador (Fig. 3.4). En su forma más simple, un conmutador se compone de un anillo colector cortado a la mitad, con cada segmento aislado del otro así como del eje. Un segmento se conecta al extremo A de la bobina y el otro al extremo D. El conmutador gira junto con la bobina y el voltaje entre los segmentos es captado por dos escobillas estacionarias x y y .

El voltaje entre las escobillas x y y pulsa pero nunca cambia de polaridad (Fig. 3.5). El voltaje alterno en las bobinas es rectificado por el conmutador, el cual actúa como un interruptor de inversión mecánica.

Debido a la polaridad constante entre las escobillas, la corriente de la carga externa siempre fluye en la misma dirección. La máquina representada en la figura 3.4 se llama generador de corriente directa o dínamo.

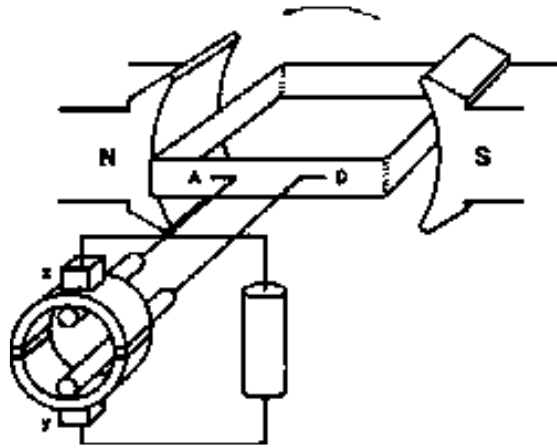


Figura 3.4: Un generador de cd elemental es simplemente un generador ca equipado con un rectificador mecánico llamado conmutador

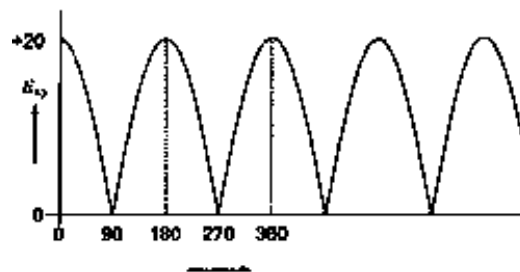


Figura 3.5: El generador de cd elemental produce un voltaje de cd pulsante

3.1.4 Diferencia entre generadores ca y cd

Los generadores ca y cd elementales mostrados en las figuras 3.1 y 3.4 están contruidos básicamente de la misma manera. En cada caso, una bobina gira entre los polos de un imán y se induce un voltaje de ca en ella. Las máquinas sólo difieren en la forma en que las bobinas están conectadas al circuito externo (Fig. 3.6): los generadores ca llevan anillos colectores (Fig. 3.6b), en tanto que los generadores cd requieren un conmutador (Fig. 3.6a). En ocasiones se construyen máquinas pequeñas con anillos colectores y un conmutador (Fig. 3.6c). Tales máquinas pueden funcionar al mismo tiempo como generadores ca y cd.

3.1.5 Mejoramiento de la forma de onda

Volviendo al generador de cd, podemos mejorar el voltaje de cd pulsante mediante cuatro bobinas y cuatro segmentos, como se ve en la figura 3.7. La forma de onda resultante se da

en la figura 3.8. El voltaje continúa pulsando pero no cae a cero; se aproxima más a un voltaje de cd constante. Incrementando el número de bobinas y segmentos, podemos obtener un voltaje de cd muy uniforme. Los generadores de cd modernos producen voltajes con fluctuaciones de menos de 5 por ciento. Las bobinas están alojadas en las ranuras de un cilindro de hierro laminado. Las bobinas y el cilindro constituyen la armadura de la máquina. La fluctuación en porcentaje es la relación del valor RMS o eficaz del componente de ca del voltaje al componente de ca, expresada en porcentaje.

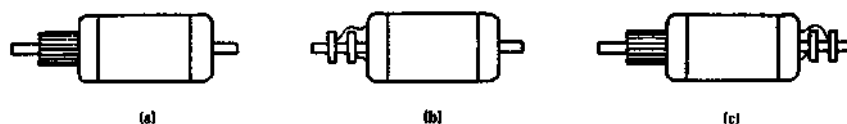


Figura 3.6: Las tres armaduras (a), (b) y (c) tienen devanados idénticos. Según como estén conectados (a anillos colectores o a un conmutador), se obtiene un voltaje de ca o cd

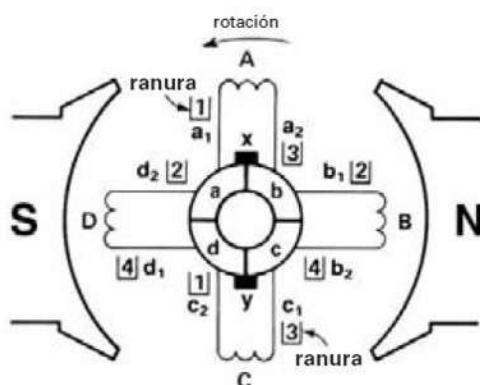


Figura 3.7: Diagrama esquemático de un generador cd de cuatro bobinas y 4 barras conmutadoras

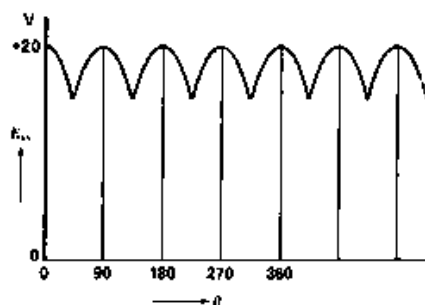


Figura 3.8: El voltaje entre las escobillas es más uniforme que en la figura 3.5

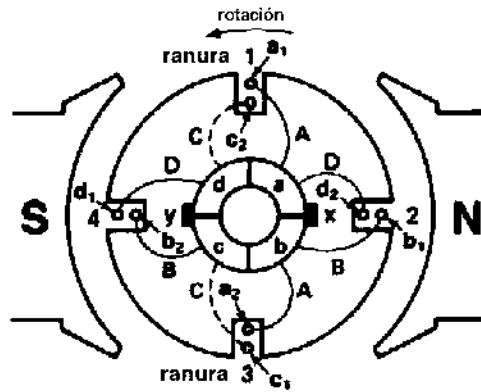


Figura 3.9: Construcción física real del generador mostrado en la figura 3.7. La armadura tiene 4 ranuras, 4 bobinas y 4 barras conmutadoras

Es importante entender el significado físico de la figura 3.7, porque utilizaremos dibujos similares para explicar el comportamiento de las máquinas de cd. Las cuatro bobinas mostradas en la figura son idénticas a la bobina mostrada en la figura 3.1. En el instante mostrado, la bobina A no está cortando ningún flujo y tampoco la bobina C. La razón es que los costados de estas dos bobinas están a la mitad entre los polos. Por otra parte, las bobinas B y D están cortando el flujo que proviene del centro de los polos N y S. Por consiguiente, el voltaje inducido en estas bobinas está a su valor máximo posible (unos 20 V). Ése también es el voltaje entre las escobillas en este instante particular.

Un diagrama como el de la figura 3.7 indica dónde están los costados de las bobinas individuales: entre los polos, debajo de los polos, cerca de las puntas de los polos, y así sucesivamente. Pero debemos recordar que los costados (a_1 , a_2 ; b_1 , b_2 ; etc.) de cada bobina en realidad se encuentran a 180° entre sí y no juntos como la figura 3.7 parece indicar. La construcción real de esta armadura se muestra en la figura 3.9. Las cuatro bobinas están colocadas en cuatro ranuras. Cada bobina tiene dos costados, así que hay dos costados por ranura. De esta manera, cada ranura contiene los conductores de dos bobinas. Por razones de simetría, las bobinas están arrolladas de modo que un costado se encuentra en la parte inferior de una ranura y el otro en la parte superior. Por ejemplo, en la figura 3.7 el costado a_1 está en la parte superior de la ranura 1, mientras que el a_2 está en la parte inferior de la ranura 3. Las conexiones de las bobinas a los segmentos del conmutador son fáciles de seguir en esta armadura simple. Compare estas conexiones con las de la figura 3.9 para verificar que son las mismas. Observe también la posición real y la posición esquemática de las escobillas con respecto a los polos. La figura 3.10 muestra la posición de las bobinas cuando la armadura se ha movido 45° . Los costados a_1 , a_2 , de la bobina A barren más allá de la punta del polo 1 y la punta del polo 4. Los costados de la bobina C experimentan el mismo flujo porque están

en las mismas ranuras que la bobina A. Por consiguiente, el voltaje e_a inducido en la bobina A es exactamente igual que el voltaje e_c inducido en la bobina C. Observe, sin embargo, que la bobina A está descendiendo, mientras que la C está subiendo. Por lo tanto, las polaridades de e_a y e_c son opuestas, como se muestra. El mismo razonamiento nos permite concluir que e_b y e_d son iguales y de polaridad opuesta. Esto significa que $e_a + e_b + e_c + e_d = 0$ en todo momento. Por ello, no fluirá corriente en el lazo cerrado formado por las cuatro bobinas. Esto es muy afortunado, porque cualquier corriente circulante produciría pérdidas $I^2 R$. El voltaje entre las escobillas es igual a $e_b + e_c$ (o $e_a + e_d$) en el instante mostrado, y corresponde al voltaje mínimo mostrado en la figura 3.8. El devanado de la armadura que acabamos de describir recibe el nombre de *devanado de lazo* o *imbricado*. Es el tipo más común de devanado utilizado en generadores y motores de corriente directa.

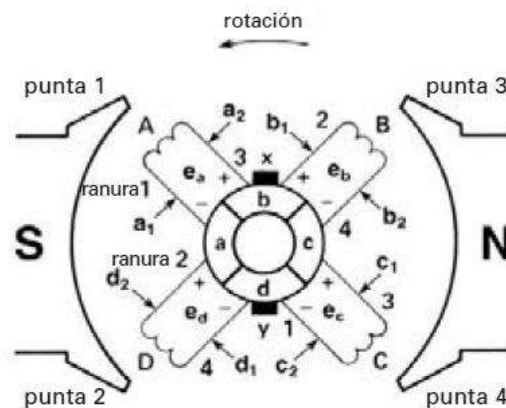


Figura 3.10: Posición de las bobinas cuando la armadura de la figura 3.9 ha girado 45°

3.1.6 Voltaje inducido

Las figuras 3.11a y 3.11b muestran una armadura más real que tiene 12 bobinas y 12 ranuras en lugar de 4. Cuando la armadura gira, el voltaje E inducido en cada conductor depende de la densidad de flujo que corta. Este hecho está basado en la ecuación

$$E = Blv \quad (3.1)$$

Como la densidad en el entrehierro varía de un punto a otro, el valor del voltaje inducido por bobina depende de su posición instantánea. Considere, por ejemplo, los voltajes inducidos en la armadura cuando ocupa la posición mostrada en la figura 3.11. Los conductores en las ranuras 1 y 7 están exactamente entre los polos, donde la densidad de flujo es cero. Por lo tanto, el voltaje inducido en las dos bobinas alojadas en las ranuras 1 y 7 es cero. Por otra

parte, los conductores en las ranuras 4 y 10 están directamente debajo del centro de los polos, donde la densidad de flujo es máxima. Por consiguiente, el voltaje inducido en las dos bobinas alojadas en estas ranuras es máximo.

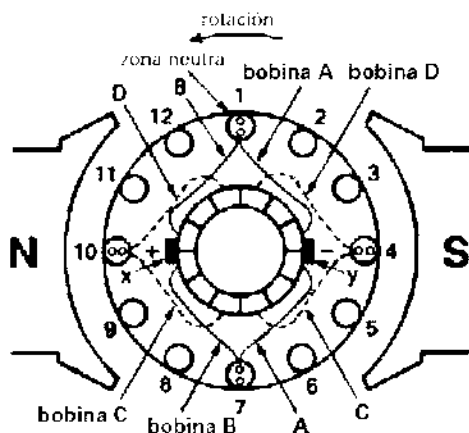


Figura 3.11a: Construcción física de un generador de cd de 12 bobinas, 12 ranuras y 12 barras conmutadoras

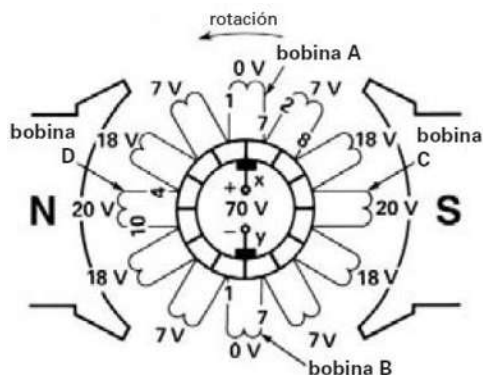


Figura 3. 11b: Diagrama esquemático de la armadura y los voltajes inducidos en las 12 bobinas

Finalmente, debido a la simetría magnética, el voltaje inducido en las bobinas alojadas en las ranuras 3 y 9 es igual que el inducido en las bobinas alojadas en las ranuras 5 y 11.

La figura 3.11b muestra el voltaje instantáneo inducido en cada una de las 12 bobinas de la armadura. Son 0, 7, 18 y 20 V, respectivamente. Observe que las escobillas ponen en cortocircuito las bobinas en las cuales el voltaje es momentáneamente cero. Tomando en cuenta las polaridades, podemos ver que el voltaje entre las escobillas es $(7 + 18 + 20 + 18 + 7) = 70$ V, y la escobilla x es positiva con respecto a la y. Este voltaje permanece básicamente constante a medida que gira la armadura, porque el número de bobinas entre las escobillas siempre es el mismo, independientemente de la posición de la armadura.

Observe que la escobilla x de la figura 3.11b abarca dos segmentos del conmutador que están conectados a la bobina A. Por consiguiente, la escobilla pone en cortocircuito la bobina A. Sin embargo, como el voltaje inducido en esta bobina es momentáneamente cero, no fluirá corriente por la escobilla. Lo mismo aplica para la escobilla y, la cual pone momentáneamente en cortocircuito la bobina B. Se dice que las escobillas están en la posición neutra cuando se encuentran colocadas sobre el conmutador de modo que pongan en cortocircuito aquellas bobinas cuyo voltaje inducido sea momentáneamente cero. Ése es el caso en las figuras 3.11a y 3.11b.

Si moviéramos 30° la corona de escobillas (Fig. 3.12), el voltaje entre las escobillas sería $(0 + 7 + 18 + 20 + 18) = 63 \text{ V}$.

Por lo tanto, si movemos las escobillas el voltaje de salida disminuye. Además, en esta posición, las escobillas ponen continuamente en cortocircuito las bobinas que generan 7 V. Grandes corrientes fluirán en las bobinas y escobillas en cortocircuito y se producirán chispas. Por lo tanto, cambiar la posición neutra de las escobillas reduce el voltaje entre éstas y al mismo tiempo provoca chisporroteo. Cuando se produce chisporroteo, se dice que la conmutación es deficiente.

Las zonas neutras son aquellos lugares en la superficie de la armadura donde la densidad de flujo es cero. Cuando el generador opera sin carga, las zonas neutras se encuentran exactamente entre los polos. No se inducen voltajes en una bobina que corta la zona neutral.

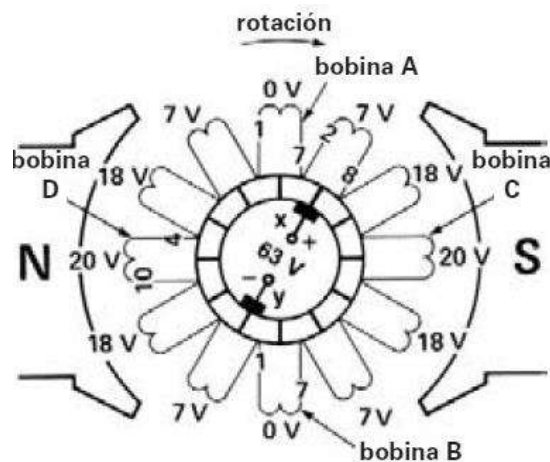


Figura 3.12: Moviendo las escobillas del punto neutro se reduce el voltaje de salida y se producen chispas

3.1.7 Valor del voltaje inducido

El voltaje inducido en un generador de cd que tiene un devanado imbricado o de lazo está dado por la ecuación

$$E_o = Zn\Phi/60 \quad (3.2)$$

Donde

E_o = voltaje entre las escobillas [V]

Z = número total de conductores en la armadura

n = velocidad de rotación [r/min]

Φ = flujo por polo [Wb]

Esta importante ecuación muestra que para un generador dado el voltaje es directamente proporcional al flujo por polo y a la velocidad de rotación. La ecuación sólo es verdadera si las escobillas están en la posición neutra. Si se cambian de dicha posición, el efecto equivale a reducir el número de conductores Z .

3.1.8 Generador bajo carga: proceso de conversión de energía

Cuando un generador de corriente directa se encuentra sometido a carga, ocurren algunas relaciones fundamentales de flujo y corriente que están directamente relacionadas con el proceso de conversión de energía mecánica a energía eléctrica. Considere, por ejemplo, un generador de 2 polos impulsado en sentido contrario al de las manecillas del reloj mientras suministra corriente I a una carga (Fig. 3.13).

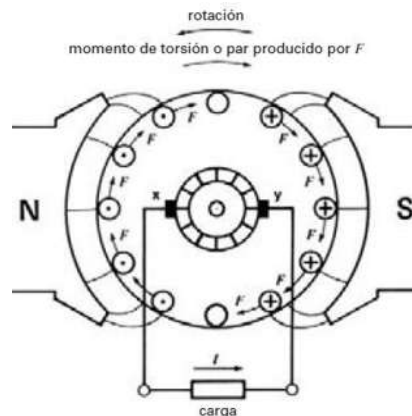


Figura 3.13: Proceso de conversión de energía. El momento de torsión o par electromagnético producido por F debe ser balanceado por el momento de torsión mecánico aplicado

La corriente suministrada por el generador también fluye a través de todos los conductores de la armadura. Si pudiéramos ver el interior de la máquina, descubriríamos que la corriente siempre fluye en la misma dirección en los conductores que están momentáneamente debajo de un polo N. Lo mismo sucede en los conductores que están momentáneamente debajo de un polo S. Sin embargo, las corrientes que están debajo del polo N fluyen en la dirección opuesta a aquellas que están debajo de un polo S. En la figura 3.13 vemos que los conductores de la armadura debajo del polo S transportan corrientes que fluyen *hacia* la página, *alejándose* del lector. Por el contrario, las corrientes de la armadura debajo del polo N fluyen *de* la página *hacia* el lector.

Como los conductores quedan en un campo magnético, están sometidos a una fuerza, de acuerdo con la ley de Lorentz. Si examinamos la dirección de la corriente y la dirección del flujo, encontramos que todas las fuerzas individuales F en los conductores actúan en el sentido de las manecillas del reloj. De hecho, producen un momento de torsión que actúa en sentido *opuesto* a la dirección en la que el generador está siendo propulsado. Para mantener funcionando el generador, debemos ejercer un momento de torsión en el eje para vencer este momento de torsión electromagnético opuesto. La potencia mecánica resultante se convierte en potencia eléctrica, la cual es suministrada a la carga del generador. Así es como se lleva a cabo el proceso de conversión de energía.

3.1.9 Reacción de la armadura

Hasta el momento, hemos considerado que sólo la fuerza magneto motriz (fmm) que actúa en un generador de cd es la producida por el campo. Sin embargo, la corriente que fluye en las bobinas de la armadura también crea una poderosa fuerza magneto motriz que distorsiona y debilita el flujo que proviene de los polos. Esta distorsión y este debilitamiento de campo ocurren en motores y generadores. El efecto producido por la fmm de la armadura se llama *reacción de armadura*.

Para entender el impacto de la fmm de la armadura, regresemos al generador sometido a carga (Fig. 3.13). Si consideramos la armadura sola, producirá un campo magnético como se muestra en la figura 3.14. Este campo actúa en ángulos rectos al campo producido por los polos N, S. La intensidad del flujo en la armadura depende de su fmm, la que a su vez depende de la corriente transportada por la armadura. Por lo tanto, contrario al flujo de campo, el flujo en la armadura no es constante sino que varía con la carga.

De inmediato podemos prever que el flujo a través de la armadura ocasionará problemas. La figura 3.14 muestra que el flujo en la zona neutra ya no es cero, por lo que se inducirá un

voltaje en las bobinas puestas en cortocircuito por las escobillas. El resultado puede ser un severo chisporroteo. La intensidad de éste dependerá del flujo a través de la armadura y, por ende, de la corriente a través de la carga suministrada por el generador.

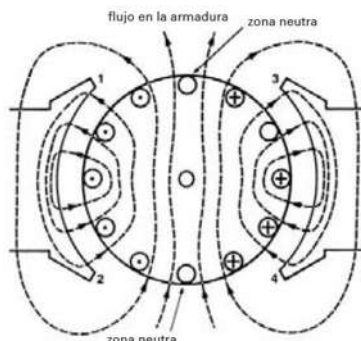


Figura 3.14: Campo magnético producido por la corriente que fluye en los conductores de la armadura.

El segundo problema creado por la fmm de la armadura es que distorsiona el flujo producido por los polos. De hecho, la combinación de la fmm de la armadura y la fmm del campo produce un campo magnético cuya forma se ilustra en la figura 3.15. Las zonas neutras cambiaron en la dirección de rotación de la armadura. Esto ocurre en todos los generadores cd. La distorsión del flujo produce otro efecto más: la densidad de flujo más intensa en las puntas de los polos 2 y 3 provoca saturación. Por lo tanto, el incremento del flujo bajo las puntas de los polos 2 y 3 es menor que su disminución bajo las puntas de los polos 2 y 4. Como resultado, el flujo total producido por los polos N, S es menor que cuando el generador estaba funcionando sin carga. Esto provoca una reducción correspondiente en el voltaje inducido dado por la ecuación (3.2) En máquinas grandes, la reducción del flujo puede ser hasta de 10 por ciento. Es importante señalar que la orientación del flujo a través de la armadura permanece fija en el espacio; el flujo no gira con la armadura.

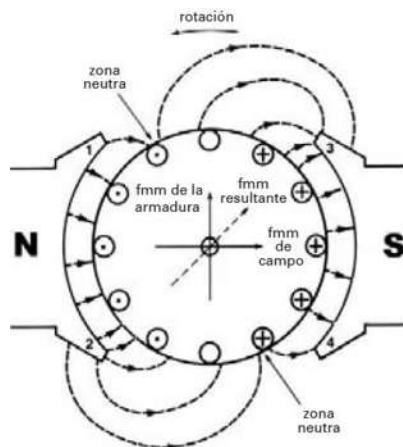


Figura 3.15: La reacción en la armadura distorsiona el campo producido por los polos N y S

3.1.10 Generador con excitación independiente

Ahora que hemos aprendido algunos puntos básicos sobre generadores de cd, podemos estudiar los diversos tipos y sus propiedades. Así, en lugar de utilizar imanes permanentes para crear el campo magnético, podemos utilizar un par de electroimanes, llamados *polos de campo*, como se muestra en la figura 3.16. Cuando la corriente directa de campo de un generador como ese es suministrada por una fuente independiente (como una batería u otro generador, llamado *excitador* o *excitatriz*), se dice que el generador es *excitado independientemente*. De esta manera, en la figura 3.16 la fuente de cd conectada a las terminales **a** y **b** hace que fluya una corriente de excitación I_x . Si la armadura es impulsada por un motor eléctrico o un motor de diesel, aparece un voltaje E_o entre las terminales de escobillas **x** y **y**.

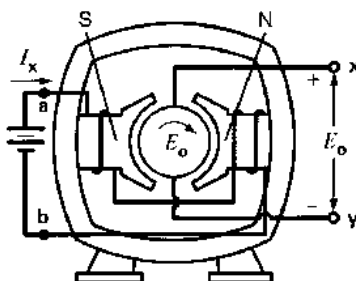


Figura 3.16: Generador de 2 polos con excitación independiente. Los polos N, S de campo son creados por la corriente que fluye en los devanados de campo.

3.1.11 Operación sin carga (o vacío) y curva de saturación

Cuando un generador de cd con excitación independiente funciona sin carga o en condiciones de vacío (circuito de la armadura abierto), un cambio en la corriente de excitación provoca un cambio correspondiente en el voltaje inducido. A continuación examinaremos la relación entre ambos.

Flujo de campo vs. Corriente de excitación. Si elevamos gradualmente la corriente de excitación I_x , de modo que la fmm del campo se incremente, aumentará el flujo F por polo. Si trazamos Φ como una función de I_x , obtenemos la curva de saturación de la figura 3.17a. Esta curva se obtiene ya sea que el generador esté girando o no.

Cuando la corriente de excitación es relativamente pequeña, el flujo es pequeño y el hierro de la máquina no está saturado. Se requiere muy poca fmm para establecer el flujo a través del hierro, por lo que la fmm desarrollada por las bobinas de campo está casi totalmente

disponible para mover el flujo a través del entrehierro. Como la permeabilidad del aire es constante, el flujo se incrementa en proporción directa a la corriente de excitación, como lo muestra la porción lineal **0a** de la curva de saturación.

Sin embargo, conforme la corriente de excitación continúa elevándose, el hierro del campo y la armadura comienza a saturarse. Ahora se requiere un incremento grande de la fmm para producir un incremento pequeño del flujo, como lo muestra la porción **bc** de la curva. Ahora se dice que la máquina está saturada. La saturación del hierro comienza a cobrar importancia cuando alcanza la llamada “rodilla” **ab** de la curva de saturación.

¿Cómo se relaciona la curva de saturación con el voltaje inducido E_o ? Si hacemos funcionar el generador a una velocidad constante, E_o es directamente proporcional al flujo Φ . Por consiguiente, trazando E_o como una función de I_x , obtenemos una curva idéntica a la curva de saturación de la figura 3.17a. El resultado se muestra en la figura 3.17b; se llama *curva de saturación sin carga* del generador.

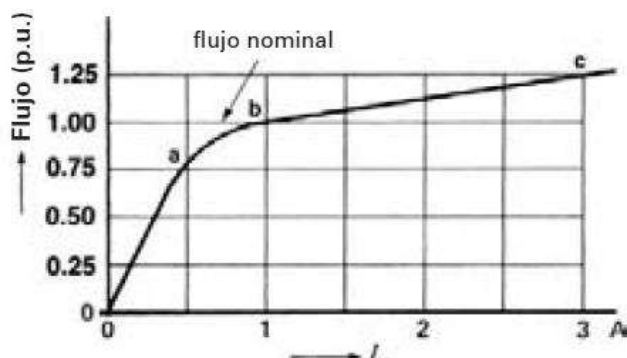


Figura 3.17a: Flujo por polo frente a la corriente de excitación.

El voltaje nominal de un generador de cd casi siempre se encuentra un poco arriba de la rodilla de la curva. En la figura 3.17b, por ejemplo, el voltaje nominal es de 120 V. Variando la corriente de excitación, podemos variar el voltaje inducido como deseamos. Además, invirtiendo la corriente, el flujo se invertirá, así como la polaridad del voltaje inducido.

Voltaje inducido vs velocidad. Con una corriente de excitación dada, el voltaje inducido se incrementa en proporción directa a la velocidad, un resultado que se deduce de la ecuación 3.1.

Si invertimos la dirección de rotación, la polaridad del voltaje inducido también se invierte. No obstante, si invertimos tanto la corriente de excitación como la dirección de rotación, la polaridad del voltaje inducido no cambia.

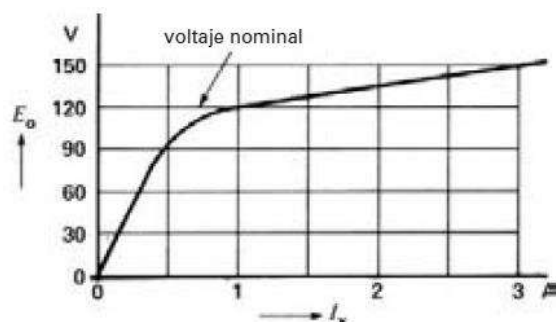


Figura 3.17b: Curva de saturación de un generador de cd.

3.1.12 Generador en derivación (o shunt)

Un generador con excitación en derivación es una máquina cuyo devanado de *campo en derivación* está conectado en paralelo a las terminales de la armadura, de modo que el generador puede ser autoexcitado (Fig. 3.18). La ventaja principal de esta conexión es que elimina la necesidad de una fuente externa de excitación.

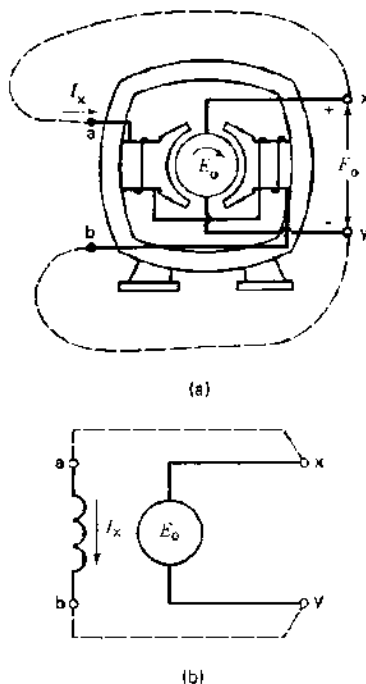


Figura 3.18: a. Generador en derivación autoexcitado. b. Diagrama esquemático de un generador en derivación. Un campo en derivación es aquel que está diseñado para conectarse en derivación (término alternativo de paralelo) al devanado de la armadura.

¿Cómo se logra la autoexcitación? Cuando se pone en marcha un generador en derivación, se induce un pequeño voltaje en la armadura, producido por el flujo remanente en los polos. Este voltaje produce una pequeña corriente de excitación I_x en el campo en derivación. La pequeña fmm resultante actúa en la misma dirección que el flujo remanente, y hace que el flujo por polo aumente. El flujo incrementado aumenta E_o , el cual incrementa I_x , ésta aumenta aún más el flujo, el cual incrementa aún más E_o , y así sucesivamente. Este incremento progresivo continúa hasta que E_o alcanza un valor máximo determinado por la resistencia del campo y el grado de saturación.

3.1.13 Control de voltaje de un generador en derivación

Es fácil controlar el voltaje inducido de un generador con excitación en derivación. Simplemente variamos la corriente de excitación mediante un reóstato conectado en serie al campo en derivación (Fig. 3.19).

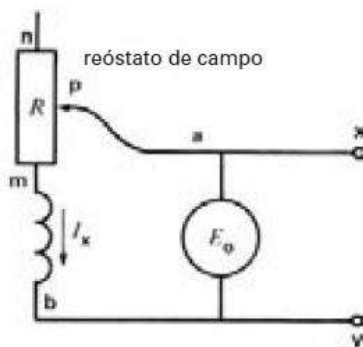


Figura 3.19: Control del voltaje del generador con un reóstato de campo. Un reóstato es un resistor con un contacto deslizable ajustable

Para entender cómo varía el voltaje de salida, suponga que E_o es de 120 V cuando el contacto móvil **p** está en el centro del reóstato. Si movemos el contacto hacia el extremo **m**, la resistencia R_t entre los puntos **p** y **b** disminuye, lo que provoca que la corriente de excitación aumente. Esto incrementa el flujo y, por consiguiente, el voltaje inducido E_o . Por otra parte, si movemos el contacto hacia el extremo **n**, R_t aumenta, la corriente de excitación disminuye, el flujo disminuye y de esa manera E_o disminuirá.

Podemos determinar el valor sin carga de E_o si conocemos la curva de saturación del generador y la resistencia total R_t del circuito de campo en derivación entre los puntos **p** y **b**. Trazamos una línea recta correspondiente a la pendiente de R_t y la superponemos en la curva de saturación (Fig. 3.20). Esta línea punteada pasa por el origen, y el punto donde corta la curva da el voltaje inducido.

Por ejemplo, si el campo en derivación tiene una resistencia de $50\ \Omega$ y el reóstato se coloca en el extremo **m**, entonces $R_t = 50\ \Omega$. La línea correspondiente a R_t debe pasar por la coordenada $E = 50\text{ V}$, $I = 1\text{ A}$. Esta línea corta la curva de saturación por donde el voltaje es de 150 V (Fig. 3.20). Ése es el voltaje máximo que el generador en derivación puede producir.

Cambiando la colocación del reóstato, la resistencia total del circuito de campo se incrementa, y hace que E_o disminuya progresivamente. Por ejemplo, si R_t se incrementa a $120\ \Omega$, la línea de la resistencia corta la curva de saturación a un voltaje E_o de 120 V .

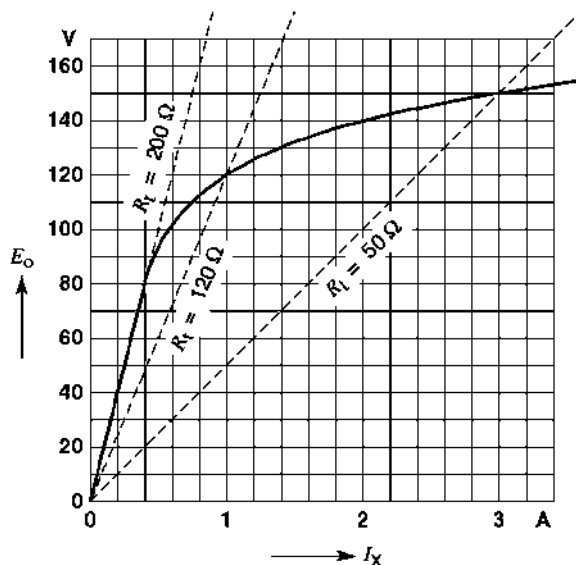


Figura 3.20: El voltaje sin carga depende de la resistencia del circuito de campo en derivación.

Si continuamos elevando R_t , se alcanzará un valor crítico donde la pendiente de la línea de resistencia es igual a la de la curva de saturación en su región no saturada. Cuando se alcanza esta resistencia, el voltaje inducido cae repentinamente a cero y permanecerá así con cualquier R_t mayor que este valor crítico. En la figura 3.20 la resistencia crítica corresponde a $200\ \Omega$.

3.1.14 Circuito equivalente

Hemos visto que el devanado de la armadura contiene un juego idéntico de bobinas, las cuales poseen cierta resistencia. La resistencia total de la armadura R_o es la que existe entre las terminales de la armadura cuando la máquina está detenida, y se mide en la superficie del conmutador entre aquellos segmentos que quedan debajo de las escobillas (1) y (2). La resistencia casi siempre es muy pequeña, con frecuencia de menos de un centésimo de ohm. Su valor depende principalmente de la potencia y el voltaje del generador. Para simplificar

el circuito del generador, podemos representar R_o como si estuviera en serie con una de las escobillas. Si la máquina tiene interpolos, la resistencia de estos devanados está incluida en R_o . Por lo tanto, el circuito equivalente de un generador se compone de una resistencia R_o en serie con un voltaje E_o (Fig. 4.22). Éste es el voltaje inducido en los conductores rotatorios. Las terminales 1, 2 son las terminales externas de la armadura de la máquina, y F1, F2 son las terminales del devanado de campo.

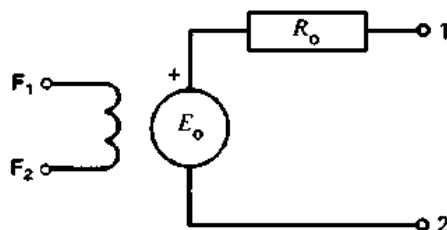


Figura 3.21: Circuito equivalente de un generador ca.

Con este circuito, a continuación estudiaremos los tipos más comunes de generadores de corriente directa y su comportamiento bajo carga.

3.1.15 Generador con excitación independiente bajo carga

Considere un generador con excitación independiente que es impulsado a velocidad constante y cuyo campo es excitado por una batería (Fig. 3.22). La corriente de excitación es constante y también el flujo resultante. Por lo tanto, el voltaje inducido E_o es fijo. Cuando la máquina funciona sin carga, el voltaje entre terminales $E12$ es igual al voltaje inducido E_o porque la caída de voltaje en la resistencia de la armadura es cero. Sin embargo, si conectamos una carga a través de la armadura (Fig. 3.22), la corriente resultante a través de la carga I ocasiona una caída de voltaje a través de la resistencia R_o . El voltaje entre terminales $E12$ ahora es menor que el voltaje inducido E_o . Conforme incrementamos la carga, el voltaje entre las terminales disminuye progresivamente, como se muestra en la figura 3.23. La gráfica del voltaje entre terminales como una función de la corriente a través de la carga se llama *curva de carga* del generador.

En la práctica, el voltaje inducido E_o también disminuye un poco con la carga creciente, porque la saturación en la punta de los polos tiende a reducir el flujo a través del campo. Por consiguiente, el voltaje entre terminales $E12$ disminuye con más rapidez de lo que se puede atribuir a la resistencia de la armadura sola.

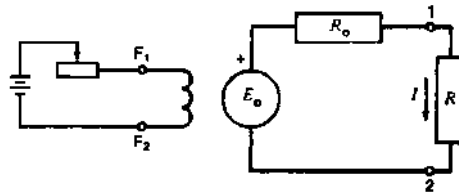


Figura 3.22: Generador con excitación independiente bajo carga.

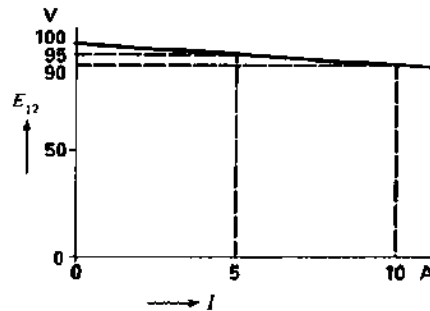


Figura 3.23: Característica de carga de un generador con excitación independiente.

3.1.16 Generador en derivación bajo carga

El voltaje en las terminales de un generador en derivación autoexcitado disminuye más abruptamente al incrementarse la carga que el de un generador con excitación independiente. La razón es que la corriente de campo en una máquina con excitación independiente permanece constante, mientras que en un generador autoexcitado la corriente de excitación se reduce a medida que el voltaje en las terminales se reduce. En un generador autoexcitado, la caída de voltaje sin carga y a plena carga es aproximadamente de 15 por ciento del voltaje a plena carga, mientras que en un generador con excitación independiente casi siempre es de menos de 10 por ciento. Se dice que la *regulación de voltaje* es de 15 y 10%, respectivamente.

3.1.17 Generador compuesto

El generador compuesto fue desarrollado para evitar que el voltaje en las terminales de un generador de cd disminuyera al incrementarse la carga. Por lo tanto, aun cuando en general se puede tolerar una caída razonable del voltaje en las terminales conforme se incrementa la carga, éste es un efecto serio en circuitos de iluminación. Por ejemplo, el sistema de distribución de un buque suministra energía tanto a maquinaria de cd como a lámparas incandescentes. La corriente suministrada por el generador fluctúa continuamente, en

respuesta a las cargas variables. Estas variaciones de corriente producen cambios correspondientes en el voltaje en las terminales del generador, lo que provoca que las luces parpadeen. Los generadores compuestos eliminan este problema.

Un **generador compuesto** (Fig. 3.24a) es similar a un generador en derivación, excepto que tiene bobinas de campo adicionales conectadas en serie a la armadura. Estas bobinas de *campo en serie* se componen de varias vueltas de alambre grueso, suficientemente grande para transportar la corriente de la armadura. Por ello, la resistencia total de las bobinas en serie es pequeña. La figura 3.24b es un diagrama esquemático que muestra las conexiones de campo en derivación y en serie.

Cuando el generador funciona sin carga, la corriente de las bobinas en serie es cero. Las bobinas en derivación, sin embargo, transportan corriente de excitación I_x , la cual produce el flujo en el campo, justo como en un generador en derivación autoexcitado estándar. A medida que el generador se carga, el voltaje en las terminales tiende a disminuir, pero ahora la corriente de carga I_c fluye a través de las bobinas de campo en serie. La fmm desarrollada por estas bobinas actúa en la misma dirección que la fmm del campo en derivación. Por consiguiente, el flujo en el campo bajo carga se eleva por encima de su valor original sin carga, el cual eleva el valor de E_o . Si las bobinas en serie están diseñadas de manera adecuada, el voltaje en las terminales permanece prácticamente constante en condiciones sin carga y a plena carga. El aumento del voltaje inducido compensa la caída IR en la armadura. En algunos casos tenemos que compensar no sólo la caída de voltaje en la armadura, sino también la caída IR en la línea de alimentación entre el generador y la carga. El fabricante del generador agrega entonces una o dos vueltas extra al devanado en serie para que el voltaje en las terminales se *incrementa* a medida que aumenta la corriente de carga. Tales máquinas se conocen como *generadores sobre compuestos*. Si la composición es demasiado fuerte, se coloca una resistencia baja en paralelo con el campo en serie. Ésta reduce la corriente en el campo en serie y produce el mismo efecto que la reducción del número de vueltas. Por ejemplo, si el valor de la resistencia de *desviación* es igual al del campo en serie, la corriente en este último se reduce a la mitad.

3.1.18 Generador compuesto diferencial

En un *generador compuesto diferencial* la fmm del campo en serie actúa en sentido opuesto al campo en derivación. Como resultado, el voltaje en las terminales cae drásticamente a medida que se incrementa la carga. Podemos construir uno de estos generadores invirtiendo simplemente el campo en serie de un generador compuesto estándar. Anteriormente, los generadores compuestos diferenciales se utilizaban en soldadoras de arco cd, porque tendían a limitar la corriente en cortocircuito y a estabilizar el arco durante el proceso de soldadura.

La regulación de voltaje del generador compuesto diferencial que se muestra en la figura 3.25 es (sin carga - plena carga)/plena carga = $(100 - 70)/70 = 42.9\%$.

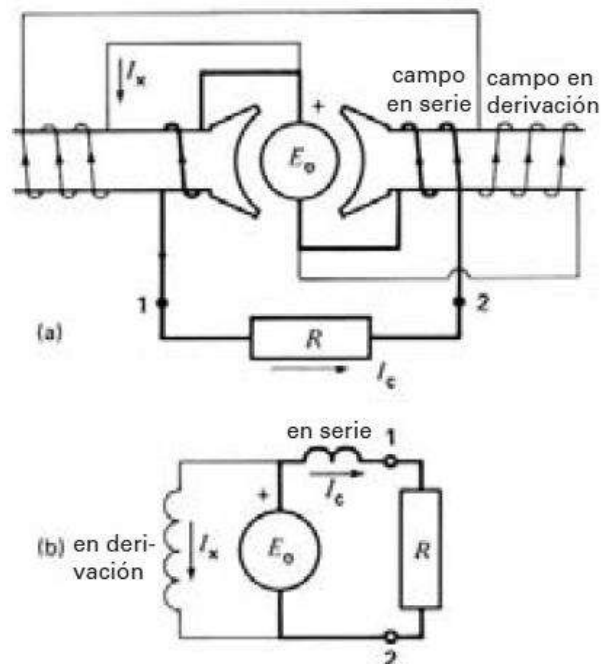


Figura 3.24: a. Generador compuesto bajo carga. b. Diagrama esquemático.

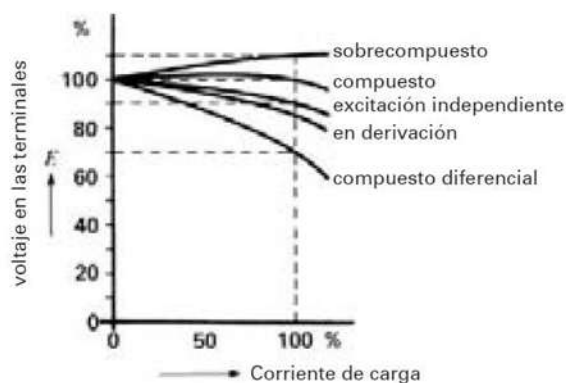


Figura 3.25: Características de carga típicas de generadores de cd.

3.1.19 Características de carga

En la figura 3.25 se dan las características de carga de algunos generadores en derivación y compuestos. El voltaje de un generador sobre compuesto se incrementa en un 10% cuando se aplica toda la carga, mientras que el de un generador compuesto simple permanece

constante. Por otra parte, el voltaje a plena carga de un generador en derivación es 15% más bajo que su valor sin carga, mientras que el de un generador compuesto diferencial es 30% más bajo.

3.2 Motores de Corriente Directa

3.2.1 Introducción

Ahora que tenemos un buen entendimiento de los generadores de corriente directa, podemos iniciar el estudio de los motores de corriente directa. Este tipo de motores transforman la energía eléctrica en energía mecánica. Impulsan dispositivos tales como malacates, ventiladores, bombas, calandrias, prensas punzadoras y carros. Estos dispositivos pueden tener una característica de par o momento de torsión-velocidad muy definida (como una bomba o un ventilador) o una extremadamente variable (como un malacate o un automóvil). La característica de par o de momento de torsión- velocidad del motor debe ser adaptada al tipo de carga que tiene que impulsar, y este requerimiento ha dado lugar a tres tipos básicos de motores:

1. Motores en derivación (o shunt)
2. Motores en serie
3. Motores compuestos

Los motores de corriente directa rara vez se utilizan en aplicaciones industriales ordinarias ya que todos los sistemas eléctricos suministran corriente alterna. Sin embargo, en aplicaciones especiales, como fábricas de acero, minas y trenes eléctricos, en ocasiones es conveniente transformar la corriente alterna en corriente directa para utilizar motores de cd. La razón es que las características de par o momento de torsión-velocidad de los motores de cd pueden ser variadas dentro de un amplio intervalo sin perder su alta eficiencia.

Hoy en día, este planteamiento general puede ser cuestionado porque la disponibilidad de manejadores eléctricos complejos ha hecho posible utilizar motores de corriente alterna en aplicaciones de velocidad variable. No obstante, aún existen millones de motores de cd en servicio y se están produciendo algunos miles más cada año.

3.2.2 Fuerza contra electromotriz (f_{cem})

Los motores de corriente directa se construyen del mismo modo que los generadores; por consiguiente, una máquina de cd puede operar como motor o como generador. Para ilustrar lo anterior, considere un generador de cd en el que la armadura, inicialmente en reposo, está conectada a una fuente de cd E_s por medio de un interruptor (Fig. 3.26). La armadura tiene una resistencia R y el campo magnético es creado por un juego de imanes permanentes. En cuanto se cierra el interruptor, una gran corriente fluye en la armadura porque su resistencia es muy baja. Los conductores individuales de la armadura de inmediato se someten a una fuerza porque están inmersos en el campo magnético creado por los imanes permanentes. Estas fuerzas se suman para producir un poderoso par o momento de torsión que hace girar la armadura.

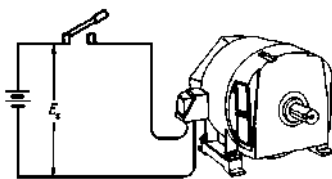


Figura 3.26: Arranque de un motor de cd a través de la línea.

Por otra parte, en cuanto la armadura comienza a girar, ocurre un segundo fenómeno: el efecto de generador. Sabemos que un voltaje E_o es inducido en los conductores de la armadura en cuanto éstos atraviesan un campo magnético (Fig. 3.27). Esto siempre es cierto, sin importar qué provoque la rotación. El valor y la polaridad del voltaje inducido son los mismos que los obtenidos cuando la máquina opera como generador. Por lo tanto, el voltaje inducido E_o es proporcional a la velocidad de rotación n del motor y al flujo F por polo, como vimos en la ecuación 3.3:

$$E_o = Z n \Phi / 60 \quad (3.3)$$

Como en el caso de un generador, Z es una constante que depende del número de vueltas en la armadura y del tipo de devanado. En el caso de devanados imbricados o de lazo, Z es igual al número de conductores de la armadura. En el caso de un motor, el voltaje inducido E_o se conoce como fuerza contra electromotriz (fcem) porque su polaridad siempre actúa contra el voltaje de la fuente E_s . Actúa contra el voltaje en el sentido de que el voltaje neto que actúa en el circuito en serie de la figura 3.27 es igual a $(E_s - E_o)$ volts y no a $(E_s + E_o)$ volts.

El voltaje neto que actúa en el circuito de la armadura en la figura 3.27 es $(E_s - E_o)$ volts. La corriente resultante I en la armadura está limitada sólo por la resistencia R de ésta, por lo que

$$I = (E_s - E_o) / R \quad (3.4)$$

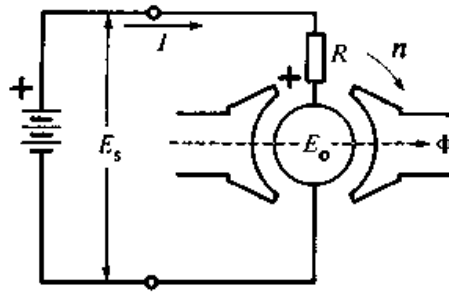


Figura 3.27: Fuerza contra electromotriz (fcem) en un motor de cd.

3.2.3 Aceleración del motor

Cuando el motor está en reposo, el voltaje inducido $E_o = 0$, por lo que la corriente de arranque es

$$I = E_s/R$$

La corriente de arranque puede ser 20 o 30 veces mayor que la corriente a plena carga nominal del motor. En la práctica, esto haría que los fusibles se quemaran o que los cortacircuitos o sistemas de protección se activaran. Sin embargo, si están ausentes, las grandes fuerzas que actúan en los conductores de la armadura producen un poderoso par o momento de torsión de arranque y, en consecuencia, una rápida aceleración de la armadura.

Conforme se incrementa la velocidad, la fcem E_o también se incrementa, lo que provoca que el valor de $(E_s - E_o)$ disminuya. De la ecuación 3.4 deducimos que la corriente I en la armadura disminuye progresivamente a medida que se incrementa la velocidad.

Aun cuando la corriente en la armadura disminuye el motor continúa acelerándose hasta que alcanza una velocidad máxima definida. Sin carga, esta velocidad produce una fcem E_o un poco menor que el voltaje de la fuente E_s . De hecho, si E_o fuera igual a E_s , el voltaje neto $(E_s - E_o)$ sería cero, por lo que la corriente I también sería cero. Las fuerzas impulsoras dejarían de actuar en los conductores de la armadura y la resistencia mecánica impuesta por el ventilador y los cojinetes harían que el motor se desacelerara de inmediato. A medida que disminuye la velocidad, el voltaje neto $(E_s - E_o)$ aumenta y también la corriente I . La velocidad dejará de disminuir en cuanto el par o momento de torsión desarrollado por la corriente en la armadura sea igual al par o momento de torsión de la carga. De este modo, cuando un motor funciona sin carga, la fcem debe ser un poco menor que E_s , como para

permitir que fluya una pequeña corriente, suficiente para producir el par o momento de torsión requerido.

3.2.4 Potencia y par o momento de torsión mecánicos

La potencia y el par o momento de torsión de un motor de cd son dos de sus propiedades más importantes. A continuación derivaremos dos ecuaciones simples que nos permitirán calcularlas.

1. De acuerdo con la ecuación 3.3, la fcm inducida en una armadura de devanado imbricado o de lazo es

$$E_o = Z n \Phi / 60 \quad (3.3)$$

En la figura 3.27 se ve que la potencia eléctrica P_a suministrada a la armadura es igual al voltaje de suministro E_s multiplicado por la corriente I en la armadura:

$$P_a = E_s I \quad (3.5)$$

Sin embargo, E_s es igual a la suma de E_o más la caída IR en la armadura:

$$E_s = E_o + IR \quad (3.6)$$

Deducimos que

$$\begin{aligned} P_a &= E_s I \\ &= (E_o + IR) I \\ &= E_o I + I^2 R \end{aligned} \quad (3.7)$$

El término $I^2 R$ representa el calor disipado en la armadura, pero el muy importante término $E_o I$ es la potencia eléctrica que es convertida en potencia mecánica. Por lo tanto, la potencia mecánica del motor es exactamente igual al producto de la fcm multiplicada por la corriente en la armadura.

$$P = E_o I \quad (3.8)$$

Donde

P = potencia mecánica desarrollada por el motor [W]

E_o = voltaje inducido en la armadura (fcm) [V]

I = corriente total suministrada a la armadura [A]

2. Volviendo la atención al par o momento de torsión T , sabemos que la potencia mecánica P está dada por la expresión

$$P = nT/9.55 \quad (3.9)$$

Donde n es la velocidad de rotación.

Combinando las ecuaciones obtenemos

$$\begin{aligned} nT/9.55 &= EoI \\ &= Zn\Phi I/60 \end{aligned}$$

Así, el par o momento de torsión desarrollado por un motor con devanado imbricado está dado por la expresión

$$T = Z\Phi I/6.28 \quad (3.10)$$

Donde

T = par o momento de torsión [N·m]

Z = número de conductores en la armadura

F = flujo efectivo por polo [Wb]*

I = corriente en la armadura [A]

6.28 = constante, para ajustar las unidades [valor exacto = 2π]

*flujo efectivo está dado por $\Phi = 60 Eo/Zn$.

La ecuación 3.10 muestra que podemos aumentar el par o momento de torsión de un motor aumentando la corriente en la armadura o aumentando el flujo creado por los polos.

3.2.5 Velocidad de rotación

Cuando un motor de cd impulsa una carga entre las condiciones sin carga y plena carga, la caída IR provocada por la resistencia de la armadura siempre es pequeña comparada con el voltaje de suministro E_s . Esto indica que la fcm E_o es casi igual a E_s .

La ecuación para la velocidad de rotación será

$$n = \frac{60E_s}{Z\Phi} (\text{aprox}) \quad (3.11)$$

Donde

n = velocidad de rotación [r/min]

E_s = voltaje de la armadura [V]

Z = número total de conductores en la armadura

Esta importante ecuación muestra que la velocidad del motor es directamente proporcional al voltaje suministrado a la armadura e inversamente proporcional al flujo por polo. Ahora veremos cómo se aplica esta ecuación.

3.2.6 Control de la velocidad por medio de la armadura

De acuerdo con la ecuación 3.11, si el flujo por polo Φ se mantiene constante (campo de imán permanente o campo con excitación fija), la velocidad depende sólo del voltaje de la armadura E_s . Aumentando o disminuyendo E_s , la velocidad del motor aumentará o disminuirá proporcionalmente.

En la práctica, podemos variar E_s conectando la armadura del motor M a un generador de cd G de voltaje variable con excitación independiente (Fig. 3.28). La excitación en el campo se mantiene constante, pero la excitación en el generador I_x puede variar desde cero hasta un valor máximo e incluso se puede invertir. Por lo tanto, el voltaje de salida del generador E_s puede variar desde cero hasta un valor máximo, con polaridad positiva o negativa. Por consiguiente, la velocidad del motor puede variar desde cero hasta un valor máximo en una u otra dirección. Obsérvese que el generador es impulsado por un motor de ca conectado a una línea trifásica. Este método de control de velocidad, conocido como sistema de Ward-Leonard, se encuentra en fábricas de acero, elevadores de rascacielos, minas y fábricas de papel.

En instalaciones modernas, el generador es reemplazado con frecuencia por un convertidor electrónico de alta potencia que cambia la potencia de ca del suministro eléctrico a cd, por medios electrónicos.

El sistema de Ward-Leonard es más que una simple manera de aplicar un voltaje de cd variable a la armadura de un motor de cd. En realidad, es capaz de hacer que el motor desarrolle el par o momento de torsión y la velocidad requeridos por la carga. Por ejemplo, suponga que ajustamos E_s a un valor un poco más alto que la f_{cem} E_o del motor. En ese caso, la corriente fluirá en la dirección mostrada en la figura 3.28 y el motor desarrollará un par o momento de torsión positivo. La armadura del motor absorbe potencia porque I fluye hacia la terminal positiva.

Ahora suponga que reducimos E_s reduciendo la excitación en el generador Φ_G . En cuanto E_s llega a ser menor que E_o , la corriente I se invierte. Como resultado, (1) el par o momento de torsión del motor se invierte y (2) la armadura del motor *suministra* potencia al generador

G. De hecho, repentinamente el motor de cd se convierte en generador y el generador G se convierte en motor. La potencia eléctrica que el motor de cd suministra ahora a G proviene de la energía cinética de la armadura que se está desacelerando con rapidez y de su carga mecánica conectada. Por lo tanto, si reducimos E_s , el motor se ve forzado repentinamente a desacelerarse. ¿Qué le sucede a la potencia de ca recibida por el generador G? Cuando G recibe potencia eléctrica, opera como motor, ¡e impulsa su propio motor de ca como generador asíncrono! Por consiguiente, la potencia de ca es retroalimentada a la línea que normalmente alimenta al motor de ca. El hecho de que se pueda recobrar la potencia de esta manera hace que el sistema de Ward-Leonard sea muy eficiente, lo que constituye otra de sus ventajas.

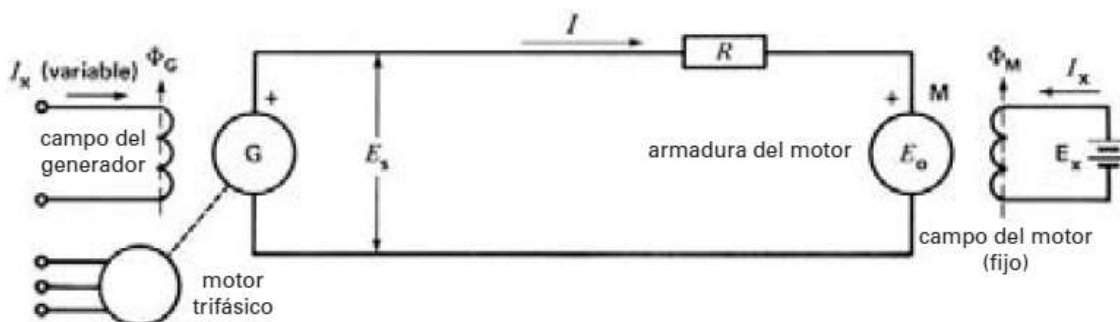


Figura 3.28: Sistema de control de velocidad de Ward-Leonard.

Control de velocidad por medio de reóstato Otra forma de controlar la velocidad de un motor de cd es colocar un reóstato en serie con la armadura (Fig. 3.29). La corriente en el reóstato provoca una caída de voltaje que se sustrae del voltaje fijo de la fuente E_s , dando como resultado un voltaje de suministro menor a través de la armadura. Este método permite *reducir* la velocidad por debajo de la velocidad nominal. Sólo se recomienda para motores pequeños porque se desperdicia mucha potencia y calor en el reóstato, y la eficiencia total es baja. Además, la regulación de la velocidad es deficiente, incluso con un ajuste fijo del reóstato. De hecho, la caída IR a través del reóstato se incrementa conforme se incrementa la corriente en la armadura. Esto produce una caída sustancial de la velocidad con la carga mecánica creciente.

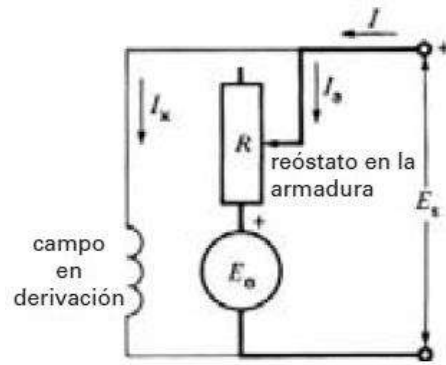


Figura 3. 29: Control de velocidad de la armadura por medio de un reóstato.

3.2.7 Control de velocidad por medio del campo

De acuerdo con la ecuación 3.11, también podemos variar la velocidad de un motor de cd variando el flujo en el campo Φ . Ahora mantengamos constante el voltaje E_s en la armadura, para que el numerador en la ecuación 3.11 sea constante. De esta manera, la velocidad del motor cambia en proporción inversa al flujo Φ : si incrementamos el flujo, la velocidad disminuirá, y viceversa.

Este método de controlar la velocidad se utiliza frecuentemente cuando el motor tiene que funcionar por encima de su velocidad nominal, llamada velocidad base. Para controlar el flujo (y por consiguiente, la velocidad), conectamos un reóstato R_f en serie con el campo (Fig. 3.30a).

Para entender este método de control de velocidad, suponga que el motor de la figura 3.30a está funcionando inicialmente a una velocidad constante. La f_{cem} E_o es un poco menor que el voltaje de suministro en la armadura E_s , debido a la caída IR en la armadura. Si incrementamos súbitamente la resistencia del reóstato, tanto la corriente de excitación I_x como el flujo F disminuirán. Esto reduce de inmediato la f_{cem} E_o , causando así que la corriente I en la armadura tenga un valor mucho más alto. La corriente cambia dramáticamente porque su valor depende de la pequeñísima *diferencia* entre E_s y E_o .

A pesar del campo más débil, el motor desarrolla un par o momento de torsión mayor que antes. Acelera hasta que E_o sea de nuevo casi igual que E_s . Obviamente, para desarrollar el mismo E_o con un flujo más débil, el motor debe girar más rápido. Por ello, podemos aumentar la velocidad del motor sobre su valor nominal introduciendo una resistencia en serie con el campo. En motores devanados en derivación, este método de control de velocidad

permite relaciones alta velocidad/velocidad base de 3 a 1. Los intervalos de velocidad más amplios tienden a producir inestabilidad y una conmutación deficiente.

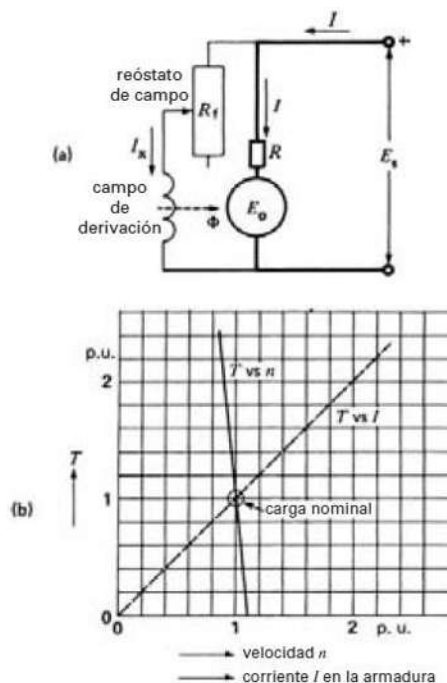


Figura 3.30: a. Diagrama esquemático de un motor en derivación, incluyendo el reóstato de campo. b. Característica de par o momento de torsión-velocidad y par o momento de torsión-corriente de un motor en derivación.

En ciertas condiciones anormales, el flujo puede caer a valores peligrosamente bajos. Por ejemplo, si la corriente de excitación de un motor en derivación se interrumpe por accidente, el único flujo restante es el provocado por el magnetismo remanente en los polos. Este flujo es tan pequeño que el motor tiene que girar a una velocidad peligrosamente alta para inducir la f_{cem} requerida. Para evitar tales condiciones de embalamiento o aceleración brusca, se introducen dispositivos de seguridad.

3.2.8 Motor en derivación (shunt) bajo carga

Considere un motor de cd que funciona sin carga. Si se aplica repentinamente una carga mecánica al eje, la pequeña corriente sin carga no produce un par o momento de torsión suficiente para soportar la carga y el motor comienza a desacelerarse. Esto hace que la f_{cem} disminuya y el resultado es una corriente más alta y un par o momento de torsión

correspondientemente más alto. Cuando el par o momento de torsión desarrollado por el motor es exactamente igual al par o momento de torsión impuesto por la carga mecánica, entonces, y sólo entonces, la velocidad permanecerá constante. En resumen, conforme la carga mecánica se incrementa, la corriente en la armadura aumenta y la velocidad disminuye.

La velocidad de un motor en derivación permanece relativamente constante al funcionar sin carga y pasara plena carga. En motores pequeños, sólo disminuye de 10 a 15 por ciento cuando se aplica la carga completa. En máquinas grandes, la disminución es incluso menor, debido en parte a la bajísima resistencia de la armadura. Ajustando el reóstato de campo, se puede mantener la velocidad absolutamente constante a medida que cambia la carga.

En la figura 3.30b se muestran las características típicas de par o momento de torsión-velocidad y momento de torsión-corriente de un motor en derivación. La velocidad, el par o momento de torsión y la corriente se dan en valores por unidad. El par o momento de torsión es directamente proporcional a la corriente en la armadura. Además, la velocidad cambia sólo de 1.1 a 0.9 pu a medida que el par o momento de torsión se incrementa de 0 a 2 pu (valor por unidad).

3.2.9 Motor en serie

Un motor en serie se construye de la misma manera que un motor en derivación, excepto por lo referente al campo. El campo está conectado en serie a la armadura, por lo que debe transportar toda la corriente de la armadura (Fig. 3.31a). Este *campo en serie* se compone de unas cuantas vueltas de alambre que tiene una sección transversal suficientemente grande para transportar la corriente.

Aunque la construcción es similar, las propiedades de un motor en serie son completamente diferentes a las de un motor en derivación. En un motor en derivación el flujo F por polo es constante para todas las cargas porque el campo en derivación está conectado a la línea. Pero en un motor en serie el flujo por polo depende de la corriente en la armadura y, por consiguiente, de la carga. Cuando la corriente es grande, el flujo es grande y viceversa. A pesar de estas diferencias, los mismos principios y ecuaciones básicos aplican a ambas máquinas.

Cuando un motor en serie opera a plena carga, el flujo por polo es igual que el de un motor en derivación de potencia y velocidad idénticas. Sin embargo, cuando el motor en serie arranca, la corriente en la armadura es más alta que la normal, lo que da como resultado que el flujo por polo también sea mayor que el normal. Se deduce que el par o momento de torsión de arranque de un motor en serie es considerablemente mayor que el de un motor en

derivación. Esto se puede apreciar comparando las curvas T con las I de las figuras 3.30 y 3.32.

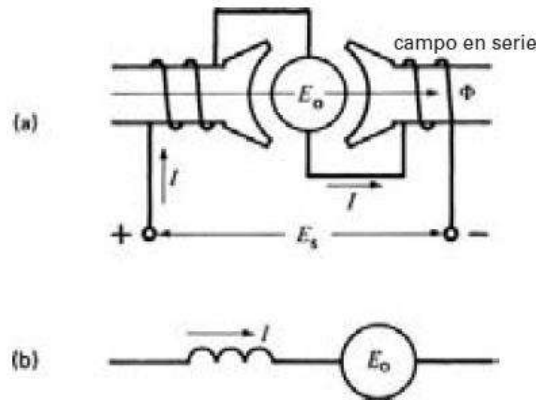


Figura 3.31: a. Diagrama de conexión de un motor en serie. b. Diagrama esquemático de un motor en serie.

Por otra parte, si el motor opera con una carga menor que la plena, la corriente en la armadura y el flujo por polo son menores que los normales. El campo más débil eleva la velocidad del mismo modo que lo haría en un motor en derivación con un campo en derivación débil. Por ejemplo, si la corriente de carga de un motor en serie cae a la mitad de su valor normal, el flujo disminuye a la mitad, por lo que la velocidad se duplica. Obviamente, si la carga es pequeña, la velocidad puede elevarse a valores peligrosamente altos. Por esta razón, nunca se permite que un motor en serie opere sin carga. Tiende a embalsarse y las fuerzas centrífugas resultantes podrían arrancar los devanados de la armadura y destruir la máquina.

3.2.10 Control de la velocidad de un motor en serie

Cuando un motor en serie soporta una carga, se tiene que ajustar un poco su velocidad. Así, la velocidad puede incrementarse colocando una resistencia pequeña en paralelo con el campo en serie. La corriente en el campo es entonces menor que antes, lo cual produce una disminución del flujo y un aumento de la velocidad.

Por el contrario, se puede reducir la velocidad conectando un resistor externo en serie a la armadura y al campo. La caída IR total a través del resistor y el campo reduce el voltaje suministrado a la armadura, por lo que la velocidad debe reducirse. En la figura 3.32 se muestran las características típicas de par o momento de torsión-velocidad y par o momento de torsión-corriente. Son bastante diferentes a las características del motor en derivación dadas en la figura 3.31b.

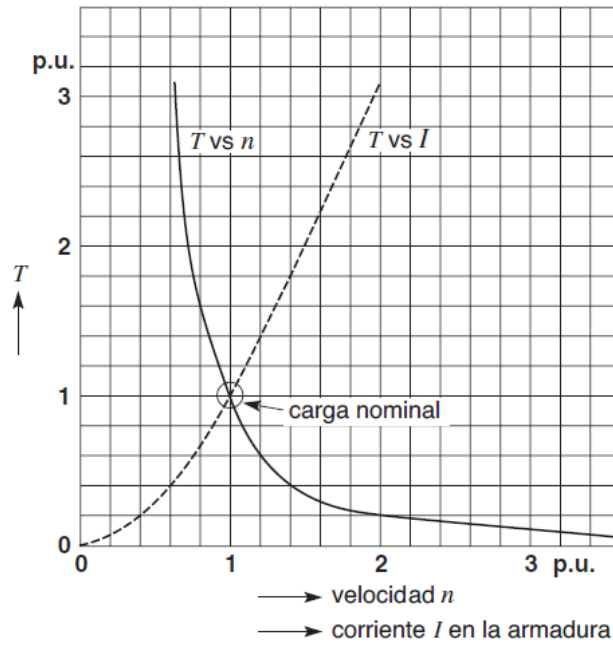


Figura 3.32: Curvas características típicas de par-velocidad y par-corriente de un motor en serie.

3.2.11 Motor compuesto

Un motor de cd compuesto tiene tanto un campo en serie como uno en derivación. En un *motor compuesto acumulativo*, la fmm de los dos campos se suma. El campo en derivación siempre es más fuerte que el campo en serie.

La figura 3.33 muestra la conexión y los diagramas esquemáticos de un motor compuesto. Cuando el motor funciona sin carga, la corriente I en el devanado en serie de la armadura es baja y la fmm del campo en serie es mínima. Sin embargo, el campo en derivación es excitado completamente por la corriente I_x , por lo que el motor se comporta como una máquina en derivación: no tiende a embalsarse sin carga.

Cuando la carga se incrementa, la fmm del campo en serie también se incrementa, pero la del campo en derivación permanece constante. Por lo tanto, la fmm total (y el flujo por polo resultante) es mayor con carga que sin carga. La velocidad del motor disminuye con la carga en aumento y la reducción de la velocidad al estar sin carga y pasar a plena carga en general es de 10 a 30 por ciento.

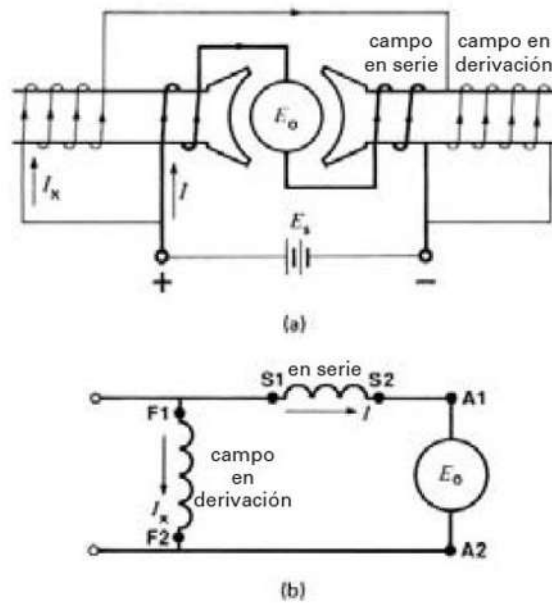


Figura 3.33: a. Diagrama de conexión de un motor de cd compuesto. b. Diagrama esquemático del motor.

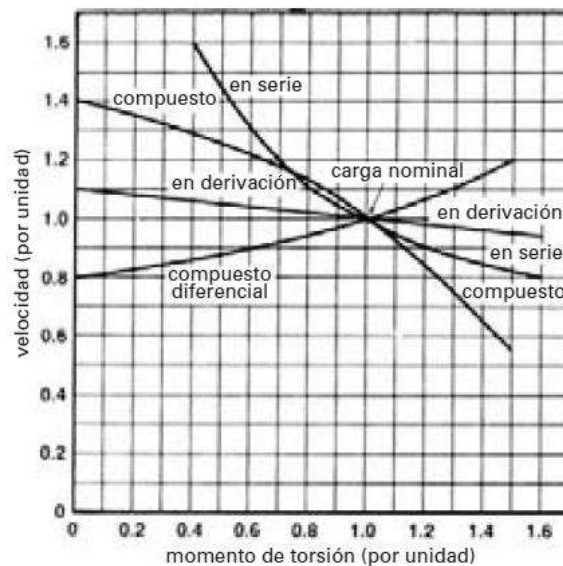


Figura 3.34: Características típicas de velocidad frente a momento de torsión de varios motores de cd.

Si conectamos el campo en serie de modo que se oponga al campo en derivación, obtenemos un *motor compuesto diferencial*. En un motor como este, la fmm total disminuye conforme se incrementa la carga. La velocidad aumenta a medida que se incrementa la carga, y esto puede causar inestabilidad. El motor compuesto diferencial tiene muy pocas aplicaciones. La

figura 3.34 muestra las curvas típicas de par o momento de torsión-velocidad de motores en derivación, compuestos y en serie, basadas en valores por unidad.

3.2.12 Inversión de la dirección de rotación

Para invertir la dirección de rotación de un motor de cd, debemos invertir (1) las conexiones de la armadura o (2) tanto las conexiones del campo en serie como las del campo en derivación. Se considera que los interpolos forman parte de la armadura. El cambio de las conexiones se muestra en la figura 5.15.

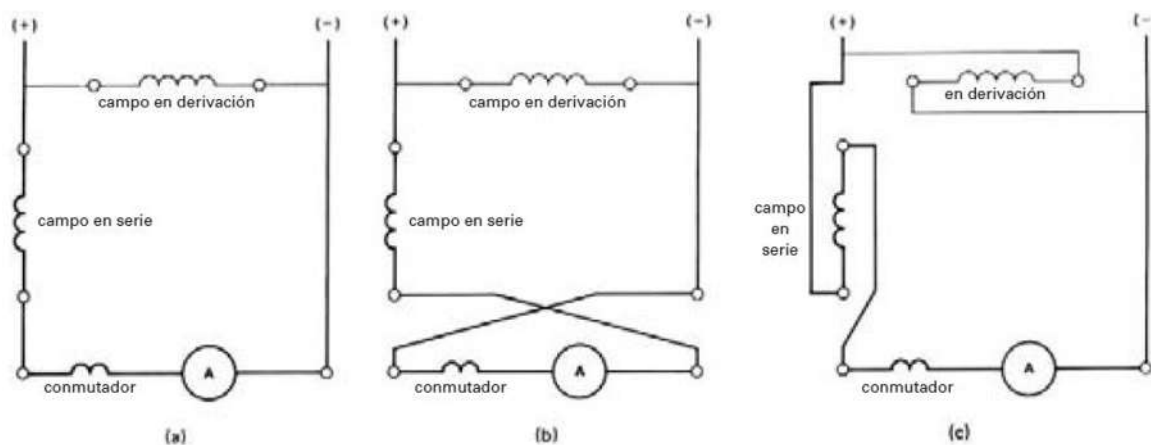


Figura 3.35: a. Conexiones originales de un motor compuesto.

- b. Inversión de las conexiones de la armadura para invertir la dirección de rotación.
- c. Inversión de las conexiones del campo para invertir la dirección de rotación.

3.2.13 Arranque de un motor en derivación

Si aplicamos un voltaje completo a un motor en derivación estacionario, la corriente de arranque en la armadura será muy alta y corremos el riesgo de

- a. Quemar la armadura;
- b. Dañar el conmutador y las escobillas, a causa de la intensa producción de chispas;
- c. Sobrecargar el alimentador;
- d. Romper el eje a causa de un choque mecánico;

e. Dañar el equipo impulsado por causa del repentino golpe mecánico.

Por lo tanto, todos los motores de cd deben tener una forma de limitar la corriente de arranque a valores razonables, por lo general entre 1.5 y dos veces la corriente a plena carga. Una solución es conectar un reóstato en serie a la armadura (arrancador de reóstato manual). La resistencia se reduce gradualmente a medida que el motor se acelera, y desaparece por completo cuando la máquina alcanza su velocidad tope. Hoy en día, con frecuencia se utilizan métodos electrónicos para limitar la corriente de arranque y para controlar la velocidad.

3.2.14 Frenado de un motor

A menudo pensamos que detener un motor de cd es una operación simple, casi trivial. Desafortunadamente, esto no siempre es cierto. Cuando un motor de cd grande está acoplado a una pesada carga inercial, el sistema podría tardar una hora o más en detenerse. Por muchas razones, semejante tiempo de desaceleración es inaceptable y, en esas circunstancias, debemos aplicar un par o momento de torsión de frenado para garantizar un rápido frenado. Una forma de frenar el motor es mediante fricción mecánica simple, del mismo modo que detenemos un carro. Un método más elegante consiste en hacer circular una corriente inversa en la armadura, para frenar el motor eléctricamente. Se emplean dos métodos para crear un freno electromecánico: (1) frenado dinámico y (2) inversión de la rotación.

3.2.15 Frenado dinámico

Considérese un motor en derivación cuyo campo está conectado directamente a una fuente E_s y cuya armadura está conectada a la misma fuente por medio de un interruptor de dos vías. El interruptor conecta la armadura a la línea o a un resistor externo R (Fig. 3.36, 3.37 y 3.38).

Cuando el motor está funcionando normalmente, la dirección de la corriente I_1 en la armadura y la polaridad de la f_{cem} E_o son las mostradas en la figura 3.36. Sin tomar en cuenta la caída IR en la armadura, E_o es igual a E_s . Si abrimos de repente el interruptor (Fig. 3.37), el motor continúa girando, pero su velocidad se reducirá gradualmente por la fricción en los cojinetes y la fricción del aire. Por otra parte, como el campo en derivación aún está excitado, el voltaje inducido E_o continúa existiendo, disminuyendo igual que la velocidad. En esencia, el motor ahora es un generador cuya armadura es un circuito abierto. Si cerramos el interruptor en el segundo conjunto de contactos, la armadura se conecta repentinamente al resistor externo (Fig. 3.38). El voltaje E_o producirá de inmediato una corriente I_2 en la armadura. Sin embargo, esta corriente fluye en la dirección *opuesta* a la corriente original I_1 .

Se desprende que se desarrolla un par o momento de torsión inverso cuya magnitud depende de I_2 . Este par o momento de torsión inverso provoca un rápido pero muy suave frenado de la máquina.

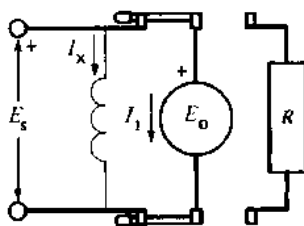


Figura 3.36: Armadura conectada a una fuente de cd E_s .

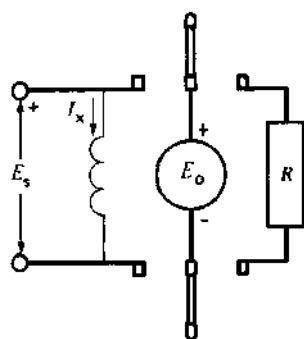


Figura 3.37: Armadura en un circuito abierto que genera un voltaje E_o .

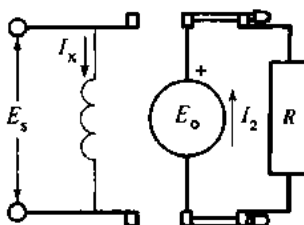


Figura 3.38: Frenado dinámico

En la práctica, el resistor R se elige de modo que la corriente de frenado inicial sea aproximadamente dos veces la corriente nominal del motor. Así, el par o momento de torsión de frenado inicial será dos veces el par o momento de torsión normal del motor.

A medida que el motor se desacelera, la disminución gradual de E_o produce una disminución correspondiente de I_2 . Por consiguiente, el par o momento de torsión de frenado se vuelve cada vez menor y finalmente llega a cero cuando la armadura deja de girar. La velocidad disminuye rápidamente al principio y luego más lentamente, a medida que la armadura se detiene. La velocidad disminuye exponencialmente, un poco como el voltaje a través de un capacitor de descarga. Por lo tanto, la velocidad disminuye a la mitad en intervalos de tiempo T_o iguales. Para ilustrar la utilidad del frenado dinámico, la figura 3.39 compara las curvas

de velocidad-tiempo de un motor equipado con frenado dinámico y uno que simplemente gira por inercia hasta detenerse.

3.2.16 Frenado por inversión de rotación

Podemos detener el motor aún más rápido con un método llamado *inversión de rotación*, el cual consiste en invertir repentinamente la corriente en la armadura invirtiendo las terminales de la fuente (Fig. 3.40).

En condiciones normales de motor, la corriente I_1 en la armadura es

$$I_1 = (E_s - E_o)/R_o$$

Donde R_o es la resistencia de la armadura. Si invertimos repentinamente las terminales de la fuente, el voltaje neto que actúa en el circuito de la armadura es $(E_o + E_s)$. La llamada fuerza contra electromotriz E_o de la armadura ya no se opone a nada sino que en realidad se suma al voltaje de suministro E_s . Este voltaje neto produciría una enorme corriente inversa, quizás 50 veces más grande que la corriente en la armadura a plena carga. Esta corriente iniciaría un arco alrededor del conmutador y destruiría los segmentos, escobillas y soportes incluso antes de que los disyuntores de circuito puedan abrirse.

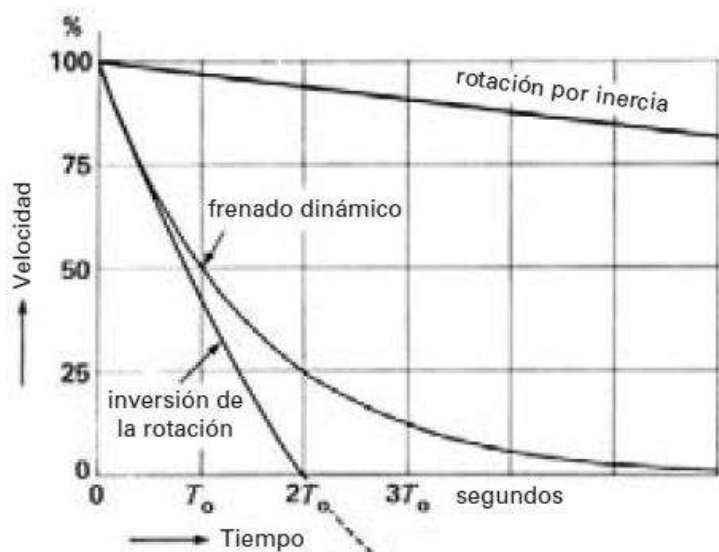


Figura 3.39: Curvas de velocidad-tiempo con varios métodos de frenado.

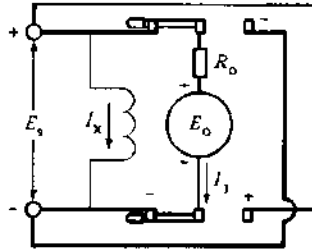


Figura 3.40: Armadura conectada a una fuente de cd E_s .

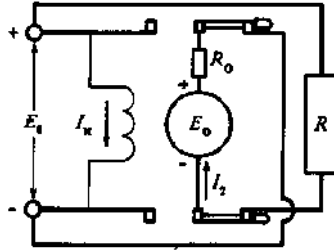


Figura 3.41: Inversión de rotación

Para evitar semejante catástrofe, debemos limitar la corriente inversa introduciendo un resistor R en serie con el circuito inversor (Fig. 3.41). Como en el frenado dinámico, el resistor está diseñado para limitar la corriente de frenado inicial I_2 a aproximadamente dos veces la corriente a plena carga. Con este circuito inversor, se desarrolla un par o momento de torsión inverso aun cuando la armadura se haya detenido. De hecho, a velocidad cero, $E_o=0$, pero $I_2=Es/R$, lo cual es aproximadamente la mitad de su valor inicial. En cuanto el motor se detiene, se debe abrir de inmediato el circuito de la armadura, de lo contrario comenzará a girar a la inversa. Por lo general, la interrupción del circuito es controlada por un dispositivo de velocidad nula automático montado en el eje del motor.

Las curvas de la figura 3.39 nos permiten comparar el frenado de inversión de rotación y el frenado dinámico con la misma corriente de frenado inicial. Observe que la inversión de rotación detiene el motor por completo después de un intervalo $2T_o$. Por otra parte, si se utiliza frenado dinámico, la velocidad aún es del 25 por ciento de su valor original en este momento. No obstante, la simplicidad comparativa del frenado dinámico hace que sea más utilizado en la mayoría de las aplicaciones.

3.2.17 Frenado dinámico y constante de tiempo mecánica

Mencionamos que la velocidad disminuye exponencialmente con el tiempo cuando un motor de cd es detenido mediante frenado dinámico. Por consiguiente, podemos hablar de una

constante de tiempo mecánica T del mismo modo que hablamos de la constante de tiempo eléctrica de un capacitor que se descarga hacia un resistor.

En esencia, T es el tiempo que se requiere para que la velocidad del motor se reduzca a 36.8 por ciento de su valor inicial. Sin embargo, es mucho más fácil trazar las curvas de velocidad-tiempo definiendo una nueva constante de tiempo T_o , que es el tiempo requerido para que la velocidad disminuya 50 por ciento de su valor original. Existe una relación matemática directa entre la constante de tiempo convencional T y la constante de medio tiempo T_o . Es decir

$$T_o = 0.693T \quad (3.13)$$

Podemos demostrar que esta constante de tiempo mecánica está dada por

$$T_o = \frac{J n_1^2}{131.5 P_1} \quad (3.14)$$

Donde

T_o = tiempo para que la velocidad del motor se reduzca a la mitad de su valor previo [s]

J = momento de inercia de las partes rotatorias, con respecto al eje del motor [kg·m²]

n_1 = velocidad inicial del motor cuando se inicia el frenado [r/min]

P_1 = potencia inicial suministrada por el motor al resistor de frenado [W]

131.5 = una constante [valor exacto $5 (30/\pi)^2 / \log_e 2$]

0.693 = una constante [valor exacto $= \log_e 2$]

Esta ecuación está basada en la suposición de que el efecto de frenado se debe por completo a la energía disipada en el resistor de frenado. En general, el motor está sometido a un par o momento de torsión de frenado extra provocado por la fricción del aire y la fricción en los cojinetes, y por lo tanto el tiempo de frenado será menor que el dado por la ecuación 12.

3.2.18 Fundamentos del control de velocidad variable

Las salidas más importantes de un motor de cd son su velocidad y par o momento de torsión. Es útil determinar los límites de cada uno a medida que aumenta la velocidad desde cero hasta rebasar la velocidad base. Para hacerlo, los valores nominales de la corriente en la

armadura, del voltaje en la armadura y del flujo en el campo no deben excederse, aunque se pueden utilizar valores menores.

Para realizar nuestro análisis, suponemos un motor en derivación ideal con excitación independiente, en el que la resistencia de la armadura es mínima (Fig. 3.42). El voltaje en la armadura E_a , la corriente en la armadura I_a , el flujo Φ_f , la corriente de excitación I_f y la velocidad n se expresan en valores por unidad. De esta manera, si el voltaje nominal en la armadura E_a es de 240 V y la corriente nominal en la armadura I_a es de 600 A, a ambos se les da un valor por unidad de 1. Asimismo, el flujo Φ_f en el campo en derivación nominal tiene un valor por unidad de 1. La ventaja del enfoque por unidad es que proporciona la curva universal para velocidad.

Por lo tanto, el par o momento de torsión por unidad T está dado por el flujo Φ_f por unidad multiplicado por la corriente I_a por unidad en la armadura.

$$T = \Phi_f * I_a \quad (3.14)$$

Mediante el mismo razonamiento, el voltaje E_a por unidad en la armadura es igual a la velocidad por unidad n multiplicada por el flujo Φ_f por unidad

$$E_a = n * \Phi_f \quad (3.15)$$

El punto de inicio lógico de la curva de par o momento de torsión-velocidad (Fig. 3.43) es la condición en la que el motor desarrolla el momento de torsión nominal ($T=1$) a una velocidad nominal ($n=1$). La velocidad nominal también se conoce como *velocidad base*.

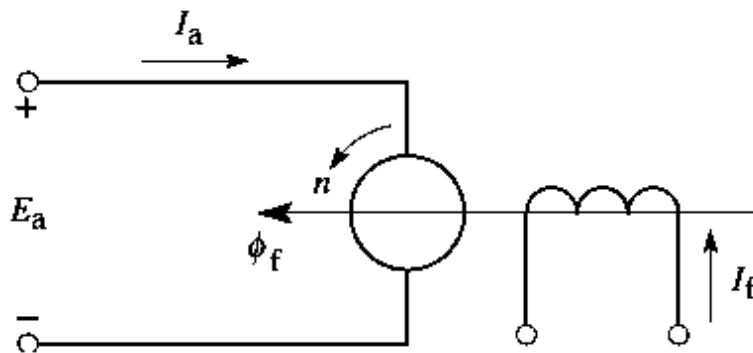


Figura 3.42: Diagrama de un circuito por unidad

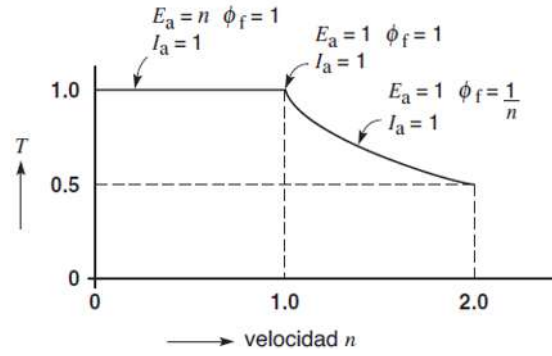


Figura 3.43: Grafica torcion-velocida

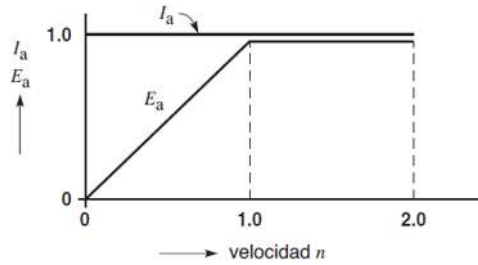


Figura 3.44: Grafica voltage-velocidad, corriente-velocidad

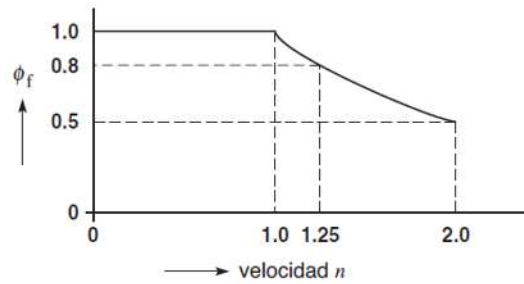


Figura 3.45 Grafica flujo-velocidad

Para reducir la velocidad por debajo de la velocidad base, reducimos gradualmente a cero el voltaje en la armadura, y mantenemos los valores nominales de I_a y Φ_f constantes a su valor por unidad de 1. Aplicando la ecuación 13, el momento de torsión por unidad correspondiente $T = 1 \times 1 = 1$. Además, de acuerdo con la ecuación 3.14, el voltaje por unidad $E_a = n \times 1 = n$. Las figuras 3.44 y 3.45 muestran el estado de E_a , I_a y Φ_f durante esta fase de operación del motor, conocido como modo de par o *momento de torsión continuo*.

Después, para aumentar la velocidad por encima de la velocidad base, observamos que el voltaje de la armadura no puede ser incrementado porque ya está en su nivel nominal de 1.

La única solución es mantener E_a a su nivel nominal de 1 y reducir el flujo. De acuerdo con la ecuación 3.15, esto significa que $n\Phi f = 1$, por lo que $\Phi f = 1/n$. De este modo, por encima de la velocidad base, el flujo por unidad es igual al recíproco de la velocidad por unidad. Durante este modo de operación, la corriente en la armadura puede mantenerse en su nivel nominal de 1. Recordando la ecuación 3.14, deducimos que $T = \Phi f I_a = (1/n \times 1) = 1/n$.

Así, por encima de la velocidad base, el par o momento de torsión por unidad disminuye como el recíproco de la velocidad por unidad. Está claro que como la corriente por unidad en la armadura y el voltaje en la armadura son iguales a 1 durante esta fase, la potencia alimentada al motor también es igual a 1. Habiendo supuesto una máquina ideal, el rendimiento de potencia mecánica por unidad también es igual a 1, el cual corresponde a la potencia nominal. Es por eso que la región sobre la velocidad base recibe el nombre de modo de *caballos de potencia constantes*.

Concluimos entonces que el motor de cd ideal en derivación puede operar dondequiera dentro de los límites de la curva par o momento de torsión-velocidad ilustrada en la figura 3.43.

En la práctica, la curva real de par o momento de torsión- velocidad puede diferir considerablemente de la mostrada en la figura 3.43. La curva indica un límite de velocidad superior de 2, pero algunas máquinas pueden ponerse a límites de 3 e incluso 4, reduciendo el flujo como corresponda. Sin embargo, cuando la velocidad sobrepasa la velocidad base, se presentan problemas de conmutación y las fuerzas centrífugas pueden llegar a ser peligrosas. Cuando el motor funciona por debajo de la velocidad base, la ventilación se vuelve más deficiente y la temperatura tiende a elevarse por encima de su valor nominal. Por ello, la corriente en la armadura debe reducirse, lo cual reduce el par o momento de torsión. A la larga, cuando la velocidad es cero, toda la ventilación forzada cesa e incluso la corriente en el campo debe reducirse para evitar el sobrecalentamiento de las bobinas de campo en derivación. Como resultado, el par o momento de torsión detenido admisible sólo puede tener un valor por unidad de 0.25. La curva de par o momento de torsión-velocidad práctica resultante se muestra en la figura 3.46

La drástica caída del par o momento de torsión conforme disminuye la velocidad puede superarse en gran medida con el uso de un ventilador externo para enfriar el motor. El ventilador genera una corriente de aire constante, sin importar cuál sea la velocidad del motor. En estas condiciones, la curva de par o momento de torsión-velocidad se aproxima a la mostrada en la figura 3.43.

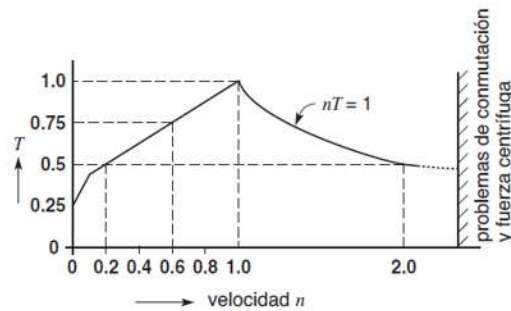


Figura 3.46: Curva de momento de torsión-velocidad de un motor de cd típico.

3.2.19 Motores de imán permanente

Hemos visto que los motores con campo en derivación requieren bobinas y una corriente en el campo para producir el flujo. La energía consumida, el calor producido y el espacio relativamente grande ocupado por los polos de campo son desventajas de un motor de cd. Utilizando imanes permanentes en lugar de bobinas de campo, se eliminan estas desventajas. El resultado es un motor más pequeño y más eficiente, que además no tiene el riesgo de embalamiento a causa de la falla de campo.

Otra ventaja de utilizar imanes permanentes es que el entrehierro efectivo se incrementa muchas veces. La razón es que los imanes tienen una permeabilidad casi igual a la del aire. Por consiguiente, la fmm de la armadura no puede crear el campo intenso que es posible cuando se emplean piezas polares de hierro blando. Así, el campo creado por los imanes no se distorsiona. Por lo tanto, la reacción en la armadura se reduce y la conmutación se mejora, al igual que la capacidad de sobrecarga del motor. Una ventaja más es que el entrehierro grande reduce la inductancia de la armadura, por lo que responde más rápido a cambios de la corriente en la armadura. Los motores de imán permanente son particularmente ventajosos con capacidades por debajo de 5 hp. Los imanes son aleaciones cerámicas o de tierras raras/cobalto. La figura 3.47 muestra la construcción de un motor de imán permanente de 1.5 hp, 90 V y 2900 r/min. Su armadura alargada garantiza una baja inercia y una respuesta rápida cuando se utiliza en aplicaciones servo.

La única desventaja de los motores de imán permanente es el costo relativamente alto de los imanes y la inestabilidad para obtener velocidades altas debilitando el campo [10].

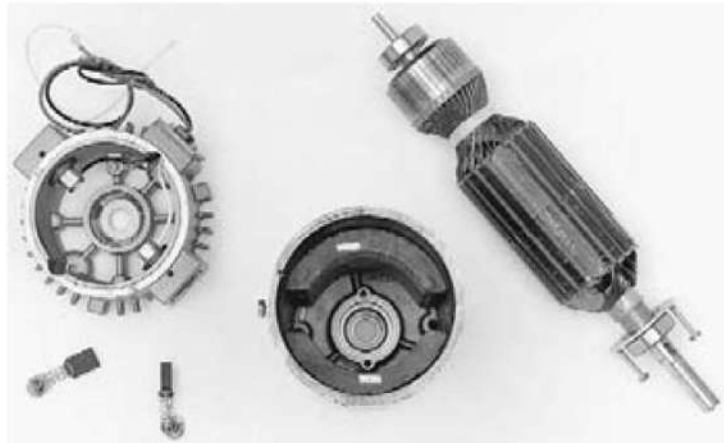


Figura 3. 47: Motor de imán permanente de 1.5 hp, 90 V, 2900 r/min y 14.5 A. Diámetro de la armadura: 73 mm; longitud de la armadura: 115 mm; ranuras: 20; barras conmutadoras: 40; vueltas por bobina: 5; tamaño de los conductores: Núm. 17 AWG, devanado imbricado. Resistencia de la armadura a 20 °C:0.34 Ω . (Cortesía de Baldor Electric Company)

Capítulo 4

Simulación de un Sistema de Recuperación en un Auto Eléctrico

4.1 Introducción

La recuperación de energía en frenada es una expresión que cada vez escuchamos más de boca de todos los fabricantes. Ya sea en un vehículo eléctrico, híbrido, o uno convencional con start-stop (también conocidos como micro híbridos) la energía que antiguamente **se perdía en forma de calor** se reconduce a un sistema que la convierte en energía eléctrica que podemos almacenar en una batería o acumulador y reutilizar más tarde.

Los objetivos de la energía recuperada difieren ligeramente según el vehículo del que hablemos, aunque tienen algo en común en todos, buscan ahorrar en consumo y prolongar la autonomía del coche sin perder por ello prestaciones o confort. Simplemente vamos a aprovechar una energía que en un vehículo sin este sistema se desperdiciaría, siendo además una fuente de **energía limpia y gratuita**.

En un freno convencional el vehículo adquiere una inercia al acelerar, que pierde suavemente si dejamos de hacerlo. Pero si queremos una detención más rápida, necesitamos aplicar una **fuerza contraria al movimiento**. Se utiliza habitualmente el rozamiento de un disco o un tambor metálicos contra un compuesto de ferodo más blando que dicho metal, creando una resistencia al pisar el pedal del freno que el sistema hidráulico del coche multiplica para hacerlo más efectivo. El resultado es que disminuimos el movimiento y obtenemos a cambio mucho calor en los materiales en rozamiento.

En un freno regenerativo en su lugar se utiliza un **generador eléctrico**, que no es más que un motor eléctrico realizando su función a la inversa, para absorber la energía cinética del vehículo transformándola en energía eléctrica. Para hacer más efectiva la frenada, y poder dosificarla, se suele utilizar una transmisión equivalente a la del vehículo (o la misma en la mayoría de híbridos o eléctricos), con la ventaja de que si necesitamos más resistencia al avance, sólo tenemos que ajustar la transmisión.

Para entenderlo de forma más natural, el efecto es el mismo que si reducimos una marcha corta en un coche convencional, forzamos al motor a trabajar a más revoluciones y obtenemos una deceleración del vehículo. En un motor eléctrico al forzar más revoluciones generamos

más electricidad, y la poca resistencia de este provoca que no se sobrecargue la transmisión. El freno regenerativo no deja de ser un freno motor, sólo que en este caso el motor genera electricidad.

Existe sin embargo un límite físico por el que no podemos estar creando energía continuamente: **las baterías se llenan**. Además, cuanto menor es la velocidad, menos resistencia crea el conjunto de generador/transmisión, por lo que llega un momento en el que no es capaz de detener el vehículo por completo.

Tampoco es posible recuperar energía de las ruedas no motrices, a menos que lleven un sistema de generadores propio. Es por todo ello que los vehículos con freno regenerativo incluyen también frenos convencionales, usualmente de menores dimensiones de lo normal, y cuyo desgaste suele ser muy bajo por su menor uso [10].

4.2 Frenado Regenerativo y Principio de Funcionamiento

Un **freno regenerativo** es un sistema de frenado aplicable a cualquier vehículo y que al actuar hace disminuir la velocidad, acumula parte de la energía cinética que tiene el vehículo en forma aprovechable, bien para volver a impulsar el vehículo más adelante, bien para accionar otros sistemas. Los frenos clásicos o un motor térmico al retener, trabajan mediante rozamiento y expulsan toda la energía fuera del vehículo en forma de calor. El freno regenerativo, sin embargo, **acumula esa energía en forma de energía eléctrica** dentro del vehículo para su reaprovechamiento.

El tipo de freno regenerativo más utilizado es el de los vehículos eléctricos e híbridos, que genera de nuevo energía eléctrica al frenar el coche cargando las baterías, transformando energía cinética en eléctrica, igual que lo hace un generador eléctrico. Por tanto, habría que instalar un generador eléctrico en el vehículo, a no ser que podamos utilizar el propio motor eléctrico como generador. Un generador y un motor eléctrico son máquinas iguales funcionando de diferentes maneras.

El propio motor eléctrico que impulsa el vehículo puede trabajar como generador si se invierte su funcionamiento, veamos cómo se consigue.

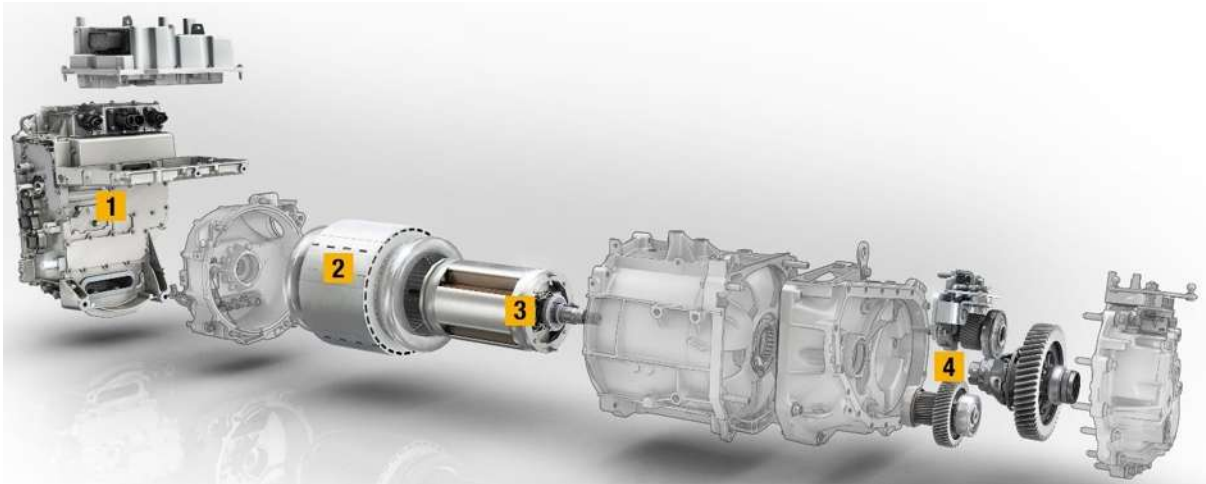


Figura 4.1: Configuración de un motor-generator donde 1: controlador de electrónica de potencia, 2: estator, 3: rotor, 4: reductor

Los protagonistas serán los elementos principales de un coche eléctrico: el controlador eléctrico, el motor y las baterías.

En el funcionamiento en modo motor el controlador eléctrico, que es el director del sistema, se encarga de tomar corriente continua de las baterías, transformarla en una onda eléctrica alterna (para el caso de un motor de cd es el mismo principio de funcionamiento solo con una señal de corriente continua) y enviarla al estator (parte fija, posición 2 de la figura 4.1), donde gracias a esa electricidad se genera un campo magnético giratorio con una velocidad de giro e intensidad adecuadas a cada circunstancia. La intensidad magnética es variable en función de la fuerza que demande el conductor con el acelerador. El campo magnético generado en el estator “empuja” al rotor haciéndole girar con fuerza para mover el coche.

Ahora el **conductor levanta el pie del acelerador: es la señal para pasar el motor a modo generador**. Para ello el controlador deja de enviar electricidad al estator desapareciendo así el campo magnético que antes empujaba al coche. A cambio envía sólo electricidad al rotor el cual genera un campo magnético que **al girar induce una corriente eléctrica en las bobinas del estator**. El controlador transforma esa electricidad alterna que ahora sale del generador, por los mismos cables por donde entraba en modo motor, de manera que pueda ser almacenada de nuevo en las baterías. Este fenómeno de creación de electricidad por movimiento magnético requiere una fuerza, siendo ésta la frenante que ahora actúa sobre el vehículo.

Si el conductor además pisa el pedal del freno suavemente, el controlador aumenta la intensidad magnética del rotor, aumentando la intensidad eléctrica generada y con ello la fuerza frenante.

Si el conductor sigue aumentando la presión sobre el freno comienzan a actuar los frenos mecánicos combinados con el efecto de frenada magnética del motor.

Ni este ni ningún sistema de recuperación de energía es perfecto, es decir, nunca tomará toda la energía que anteriormente se usó para impulsar el vehículo; sin embargo sí puede recuperar una parte notable y, dado que no requiere de la instalación de ningún componente importante en un coche eléctrico, su implementación resulta de lo más lógica para no ir desperdiciando energía en cada frenada. Esto es básico para aumentar la autonomía de nuestros coches eléctricos [11].

4.3 Software 20-sim

20-sim es un programa de simulación y modelado para sistemas mecatrónicos. Con 20-sim, puede ingresar el modelo gráficamente, de forma similar al dibujo de un esquema de ingeniería. Con estos modelos, puede simular y analizar el comportamiento de sistemas dinámicos multidominio y crear sistemas de control. Incluso puede generar código C y ejecutar este código en hardware para la creación rápida de prototipos y la simulación HIL.



Figura 4.2: 20-sim 4.0 logo

20-sim (logo fig. 4.2) le proporciona herramientas que le permiten crear modelos muy rápida e intuitivamente. Puede crear modelos usando ecuaciones, diagramas de bloques, componentes físicos y gráficos de enlace. Varias cajas de herramientas lo ayudan a construir sus modelos, simularlos y analizar su desempeño. Descubrirá que el paquete tiene algunas capacidades excepcionales que lo ayudarán en numerosas aplicaciones en muchas industrias.

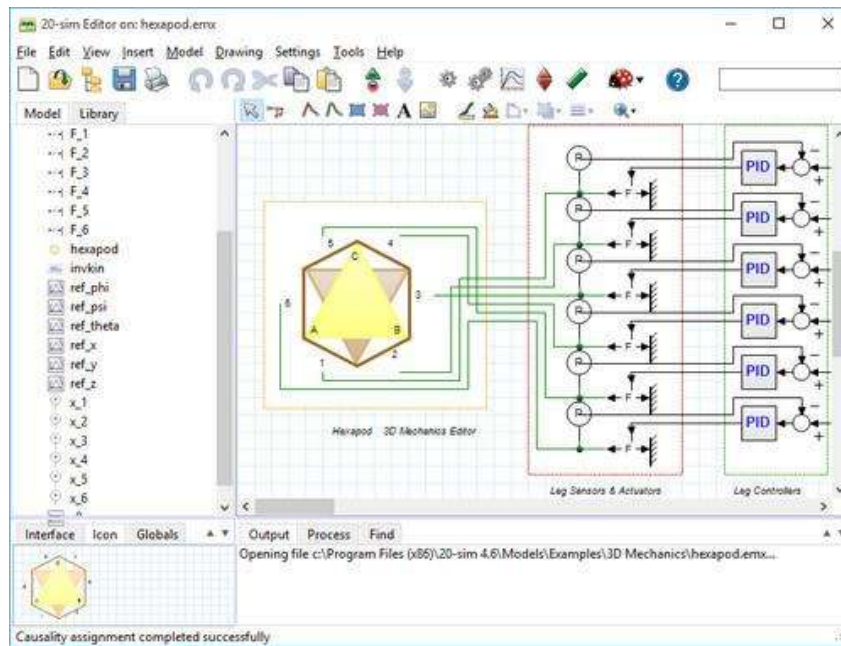


Figura 4. 3: Modelado en 20-sim

La figura 4.3 de arriba muestra 20-sim con un modelo de robot cargado. El robot se genera con 3D Mechanics Toolbox y se conecta con un actuador estándar y modelos de sensores de la biblioteca mecánica. El robot está controlado por controladores PID que están sintonizados en el dominio de la frecuencia. Todo lo que se requiere para construir y simular este modelo está dentro del paquete. ¡No se necesita ningún software o compilador externo!

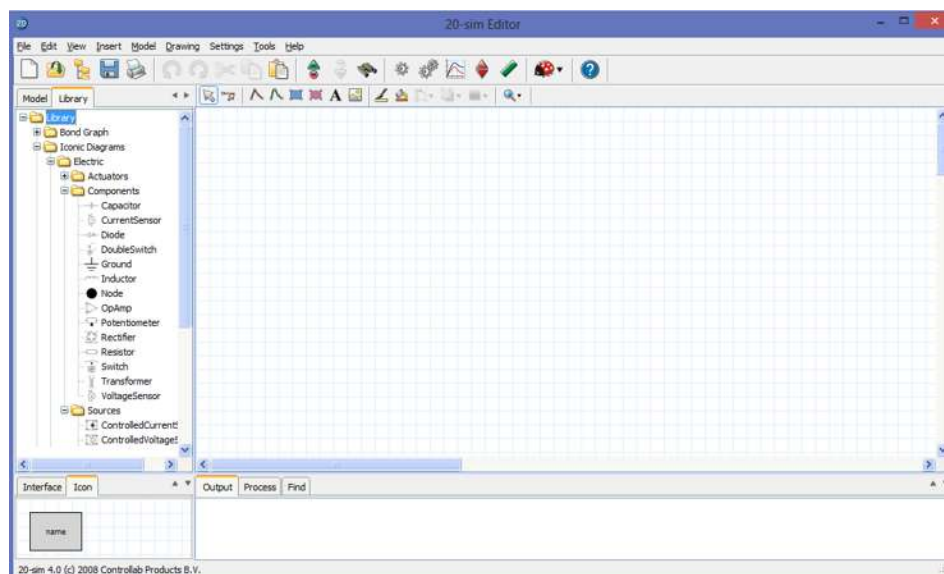


Figura 4.4: Ventana de trabajo de 20-sim

Los modelos están integrados en el **Editor 20-sim** . Este Editor contiene una gran **Biblioteca de Modelos** con bloques de construcción para ayudarlo a construir modelos usando **Diagramas de Bloques** , **Diagramas Icónicos** , **Gráficos de Bonos** o una combinación de estos (figura). Varias cajas de herramientas lo ayudarán a crear modelos especiales:

- Caja de herramientas de control
- Caja de herramientas eléctricas
- Caja de herramientas de meca trónica
- Caja de herramientas de mecánica

En el simulador puede ejecutar modelos y mostrar los resultados en gráficos y animaciones 3D .

Puede analizar sus modelos utilizando **Time Domain Toolbox** y **Frequency Domain Toolbox** .

Con **Code Generation Toolbox** puede exportar modelos como código C para usar en **20-sim 4C** , Matlab, Simulink y otros paquetes.

Esto es de las pocas cosas que puede hacer nuestro software 20-sim, nosotros lo utilizaremos para la simulación de la recuperación de energía en el frenado regenerativo.

4.4 Diseño en 20-sim de un Sistema de Recuperación de Energía

En la siguiente figura 4.5 se muestra nuestro sistema completo de recuperación de energía.

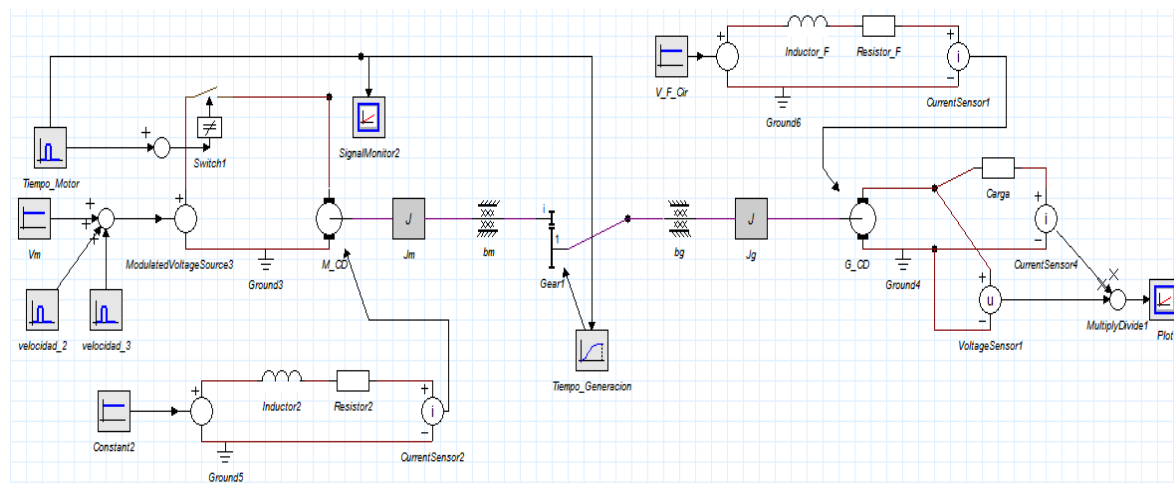


Figura 4.5: Simulación en 20-sim de un sistema de recuperación de energía

Para la explicación de la figura 4.5 dividiremos en partes de izquierda a derecha como sigue:

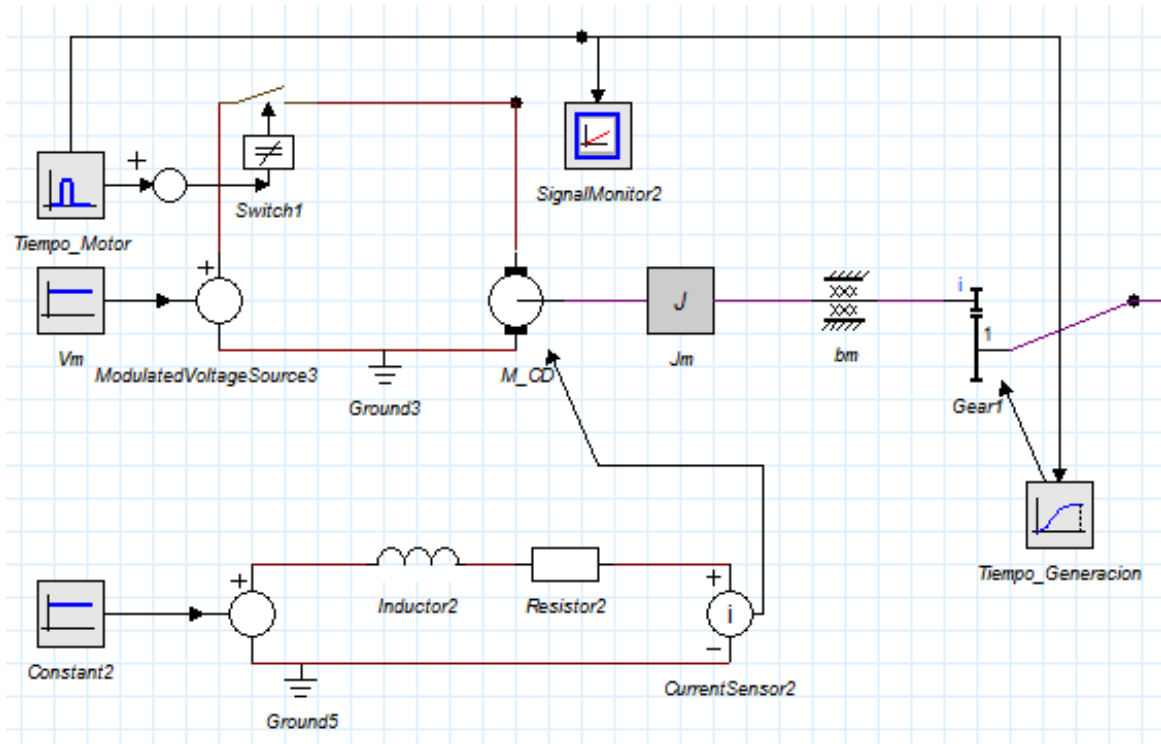


Figura 4.6: Motor de CD, devanado de campo y control de generación

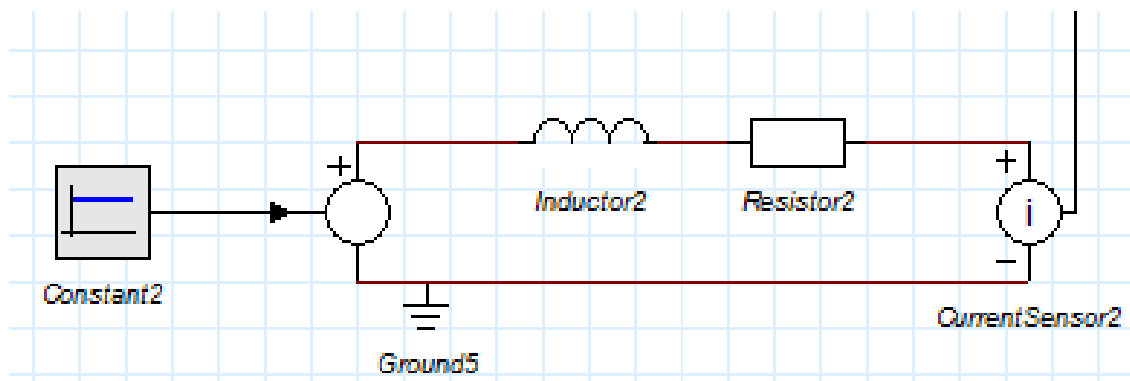


Figura 4.7: Devanado de campo del motor de cd

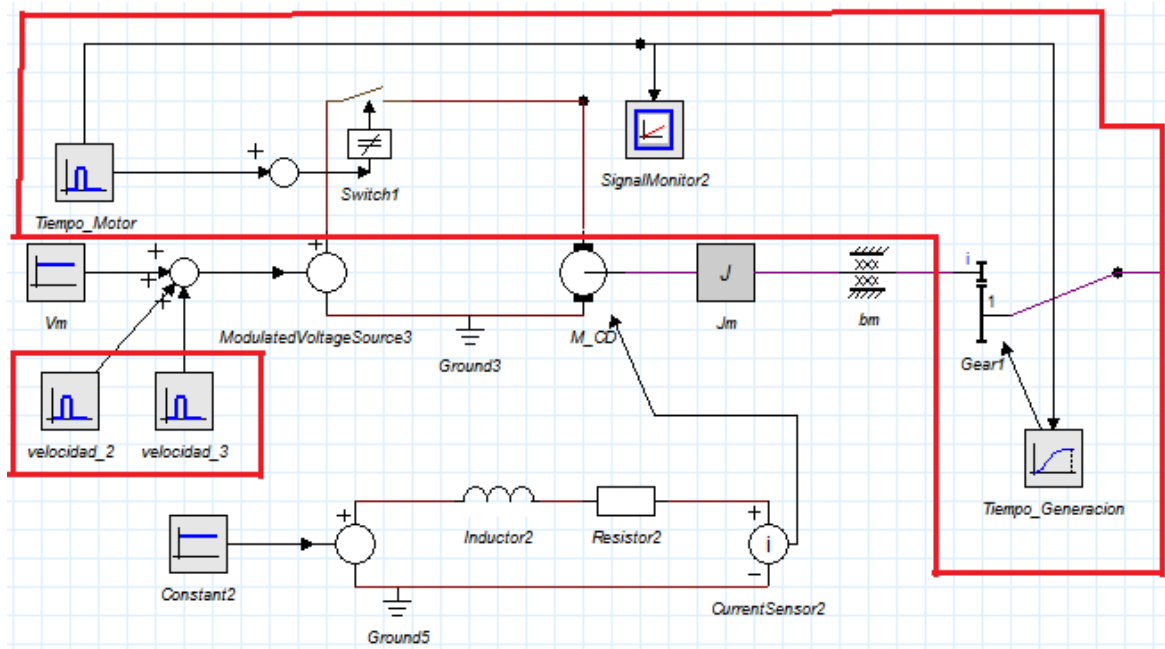


Figura 4.8: Control motor-generator, parte en rojo

En la figura 4.5 tenemos de lado izquierdo el motor de cd como “M_CD” (figura 4.6), su devanado de campo en la figura 4.7 con un voltaje de 10v su resistencia e inductancia internas, en la figura 4.8 tenemos el control de encendido y apagado del motor y del generador representado por “Tiempo_Motor” y “Tiempo_Generación”, “Gear1” representa un interruptor el cual es el punto de conexión mecánica entre el motor y el generador que se cerrara o se abrirá para activar el generador dependiendo del tiempo programado al igual que “Switch1”(parte encerrada en color rojo). También tenemos “Jm” y “bm” los cuales representan el momento de inercia y fricción rotacional respectivamente. En la misma figura encerrado en un rectángulo rojo tenemos “velocidad_2” y “velocidad_3” que representan las velocidades del motor.

De igual forma en la figura 4.5 tenemos de lado derecho al generador de cd como “G_CD” (figura 4.9), su devanado de campo como el de la figura 4.7 con un voltaje de 10v y su resistencia e inductancia internas también, en la figura 4.10 tenemos la “carga” la cual también puede representar una batería de almacenaje. En la figura 4.11 se muestran los valores con sus respectivas unidades de cada elemento del sistema completo, estos valores no fueron seleccionados bajo ningún criterio por lo que podemos cambiar su valor.

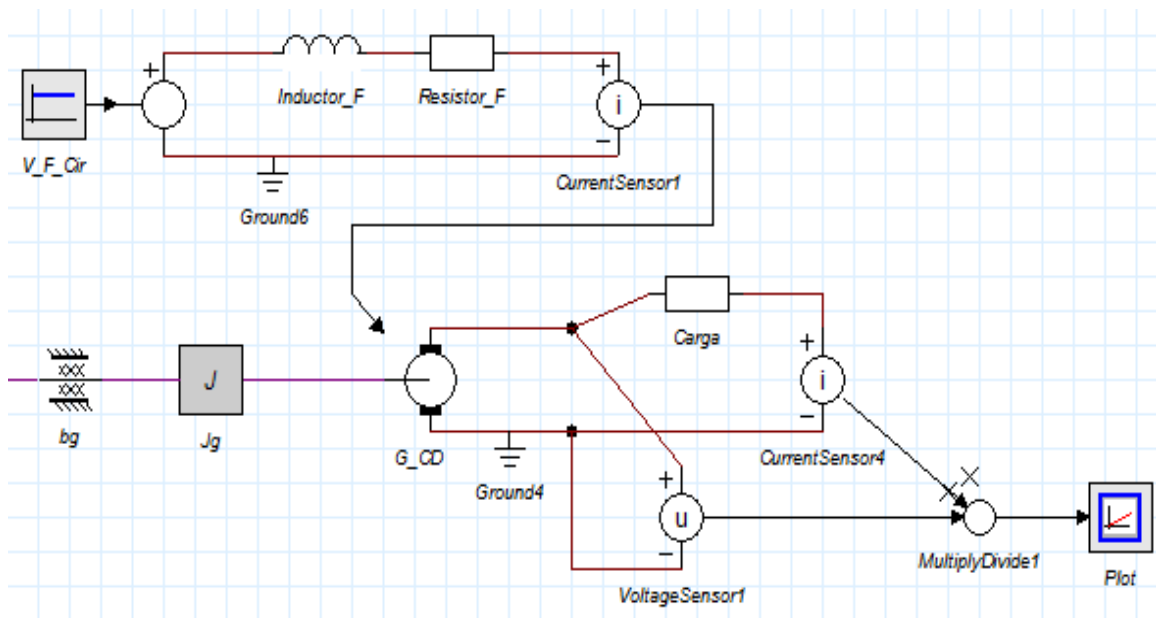


Figura 4.9: Generador de cd, devanado de campo y carga

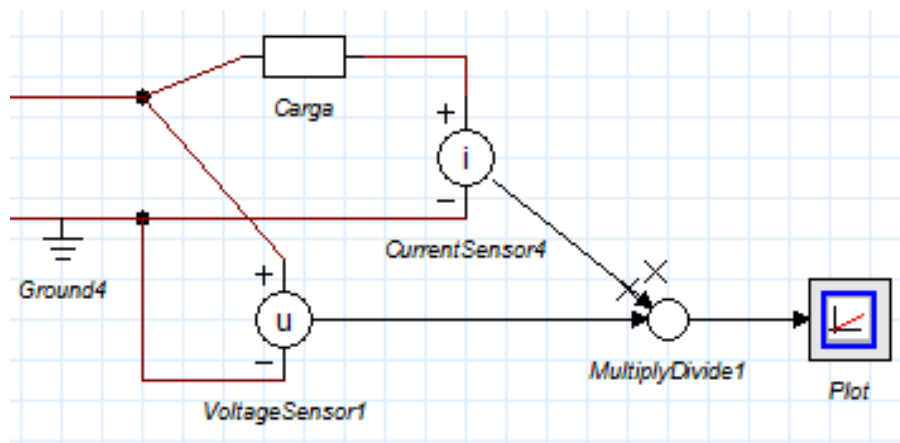


Figura 4.10: Carga del sistema

Name	Value	Quantity	Unit
◆ bg\d	1.2 {N.m.s/rad}	Rotational Friction	newton meter second per radian
◆ bm\d	1.2 {N.m.s/rad}	Rotational Friction	newton meter second per radian
◆ Carga\R	1 {ohm}	Electric Resistance	ohm
◆ Constant2\C	10		
◆ G_CD\L	10 {mH}	Inductance	henry
◆ G_CD\R	100 {mohm}	Electric Resistance	ohm
◆ Inductor2\L	1 {mH}	Inductance	henry
◆ Inductor_F\L	1 {mH}	Inductance	henry
◆ Jg\J	4 {kg.m2/rad}	Moment of Inertia	kilogram meter squared per radian
◆ Jm\J	4 {kg.m2/rad}	Moment of Inertia	kilogram meter squared per radian
◆ M_CD\L	10 {mH}	Inductance	henry
◆ M_CD\R	100 {mohm}	Electric Resistance	ohm
◆ Resistor2\R	10 {ohm}	Electric Resistance	ohm
◆ Resistor_F\R	10 {ohm}	Electric Resistance	ohm
◆ Switch1\R1\R	1 {Mohm}	Electric Resistance	ohm
◆ Switch1\R2\R	1 {Mohm}	Electric Resistance	ohm
◆ Switch1\Resistance12\Roff	100 {kohm}	Electric Resistance	ohm
◆ Switch1\Resistance12\Ron	10 {uohm}	Electric Resistance	ohm
◆ Switch1\Resistance12\vt	0.5		
◆ Tiempo_Generacion\amplitude	1	Magnitude	none
◆ Tiempo_Motor\amplitude	1	Magnitude	none
◆ Tiempo_Motor\start_time	2 {s}	Time	second
◆ Tiempo_Motor\stop_time	12 {s}	Time	second
◆ velocidad_2\amplitude	2	Magnitude	none
◆ velocidad_2\start_time	4 {s}	Time	second
◆ velocidad_2\stop_time	10 {s}	Time	second
◆ velocidad_3\amplitude	3	Magnitude	none
◆ velocidad_3\start_time	6 {s}	Time	second
◆ velocidad_3\stop_time	8 {s}	Time	second
◆ Vm\C	20		
◆ V_F_Cir\C	10		

Figura 4.11: Tabla de valores de cada elemento del sistema

4.5 Respuestas del Sistema de Recuperación de Energía

Para entender el diseño del sistema planteado en la figura 4.5 se muestra entonces los parámetros de la figura 4.11 y tres casos que a continuación plantearemos.

Caso 1: primera velocidad

Se analiza el sistema solo en primera velocidad y las gráficas son las de la figuras 4.12, 4.13, 4.14 se analiza como sigue:

Con $0 > t > 2$ “Switch1” y “Gear1” son interruptores abiertos por lo que todos los valores de las gráficas son de 0, no existe conexión alguna, si lo asimilamos con un auto eléctrico, es como si el auto estuviera apagado o no estuviéramos presionando ningún pedal.

Con $2 > t > 12$ “Switch1” se cierra pero “Gear1” se mantiene abierto por lo que solo nuestro motor funciona, se presiona el acelerador del auto para ponerlo en marcha en primera velocidad.

Con $t > 12$ “Switch1” se abre y “Gear1” se cierra, por inercia el motor seguirá girando e inducirá a nuestro generador por medio del interruptor mecánico, el generador creará energía por esa inercia, la energía recuperada se almacenará en un banco de baterías.

Caso 2: segunda velocidad

De igual manera son los mismo parámetros solo ahora se añade la segunda velocidad y las gráficas son las figura 4.15, 4.16 y 4.17

Con $0 > t > 2$ “Switch1” y “Gear1” son interruptores abiertos por lo que todos los valores de las gráficas son de 0, igual que en caso 1

Con $2 > t > 4$ “Switch1” se cierra pero “Gear1” se mantiene abierto por lo que solo funciona nuestro motor, se presiona el acelerador del auto en primera velocidad para ponerlo en marcha (esta velocidad se mantiene de $2 > t > 12$).

Con $4 > t > 6$ se suma una segunda velocidad, aumenta la corriente, voltaje y velocidad en el motor, acelera nuestro auto (se mantiene de $4 > t > 10$).

Con $10 > t > 12$ bajamos a primera velocidad

Con $t > 6$ “Switch1” se abre y “Gear1” se cierra, al igual que en el caso 1 aquí empieza a funcionar el generador.

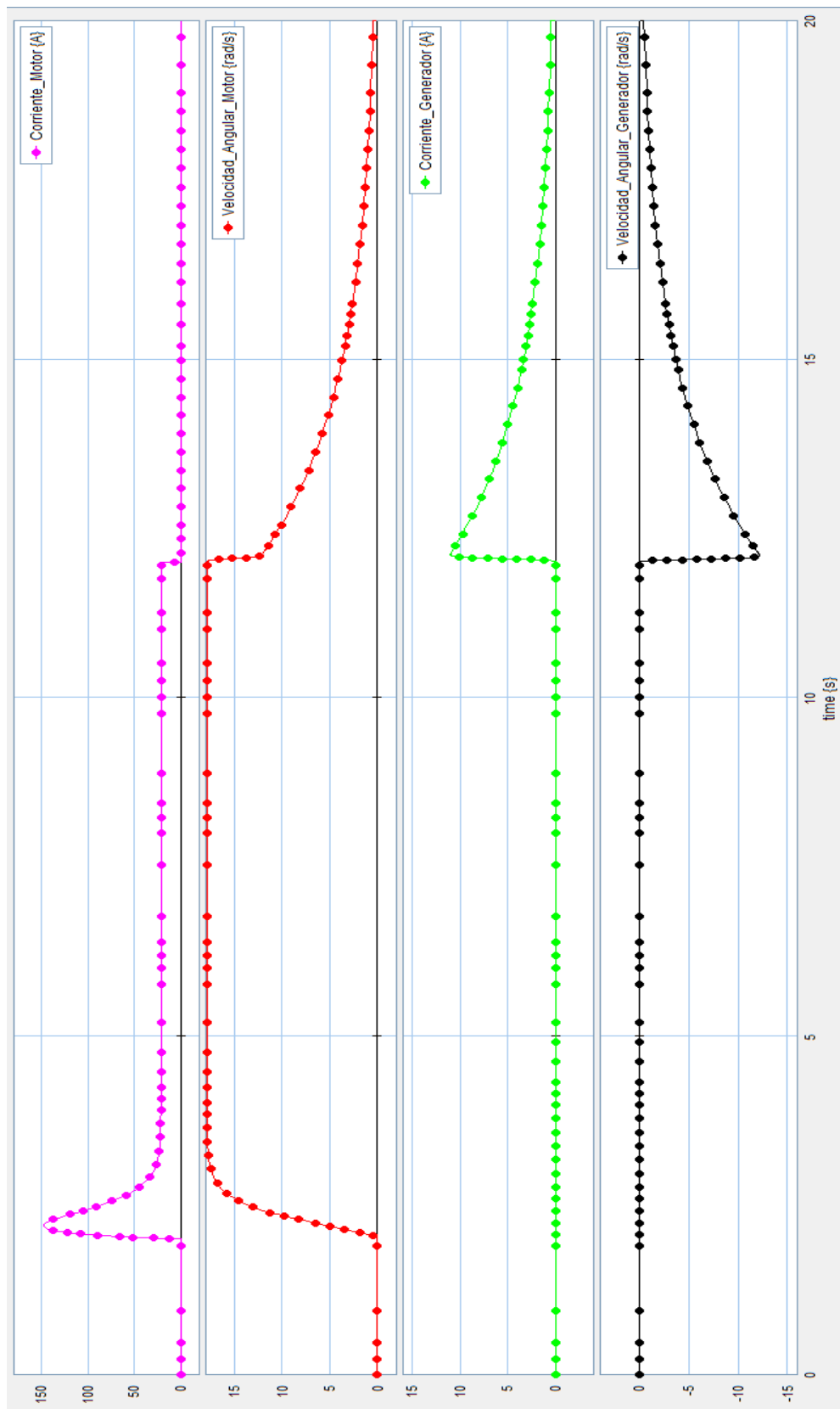


Figura 4.12: Corrientes y velocidad del motor y del generador (caso 1)

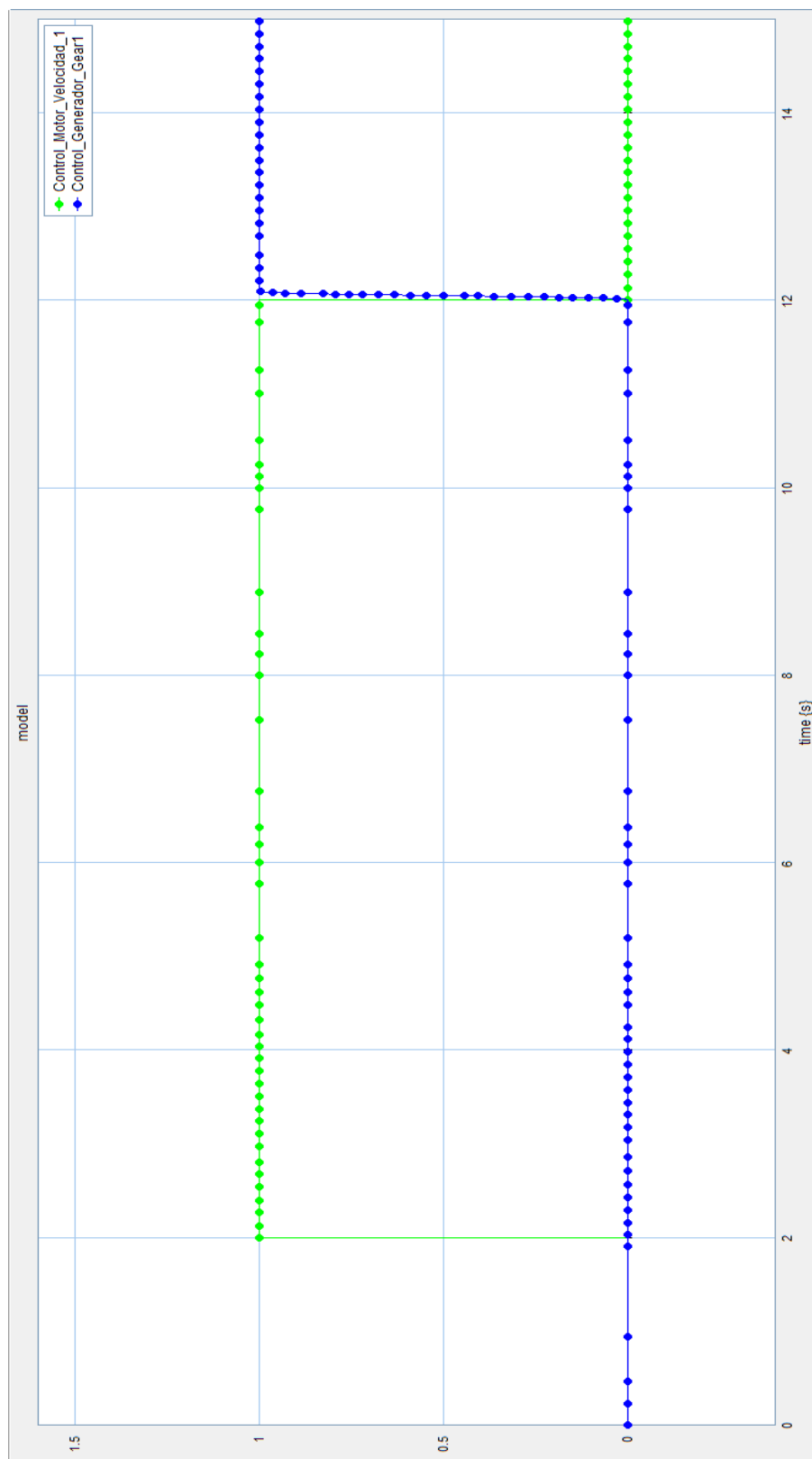


Figura 4.13: Control de operación del motor y del generador, primera velocidad en verde y momento de generación en azul (caso 1)

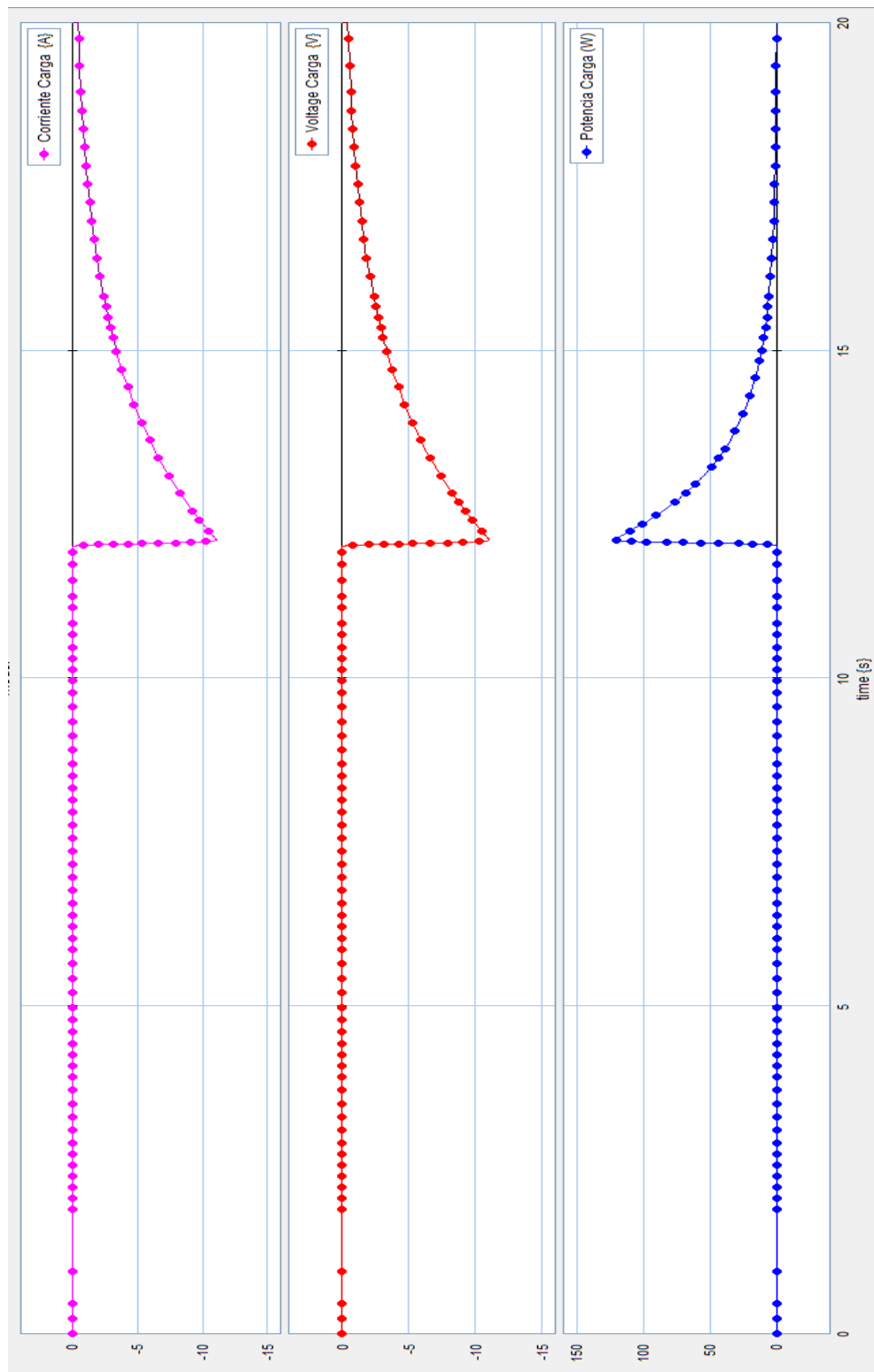


Figura 4.14: Voltaje, corriente y potencia creada por el generador (caso 1)

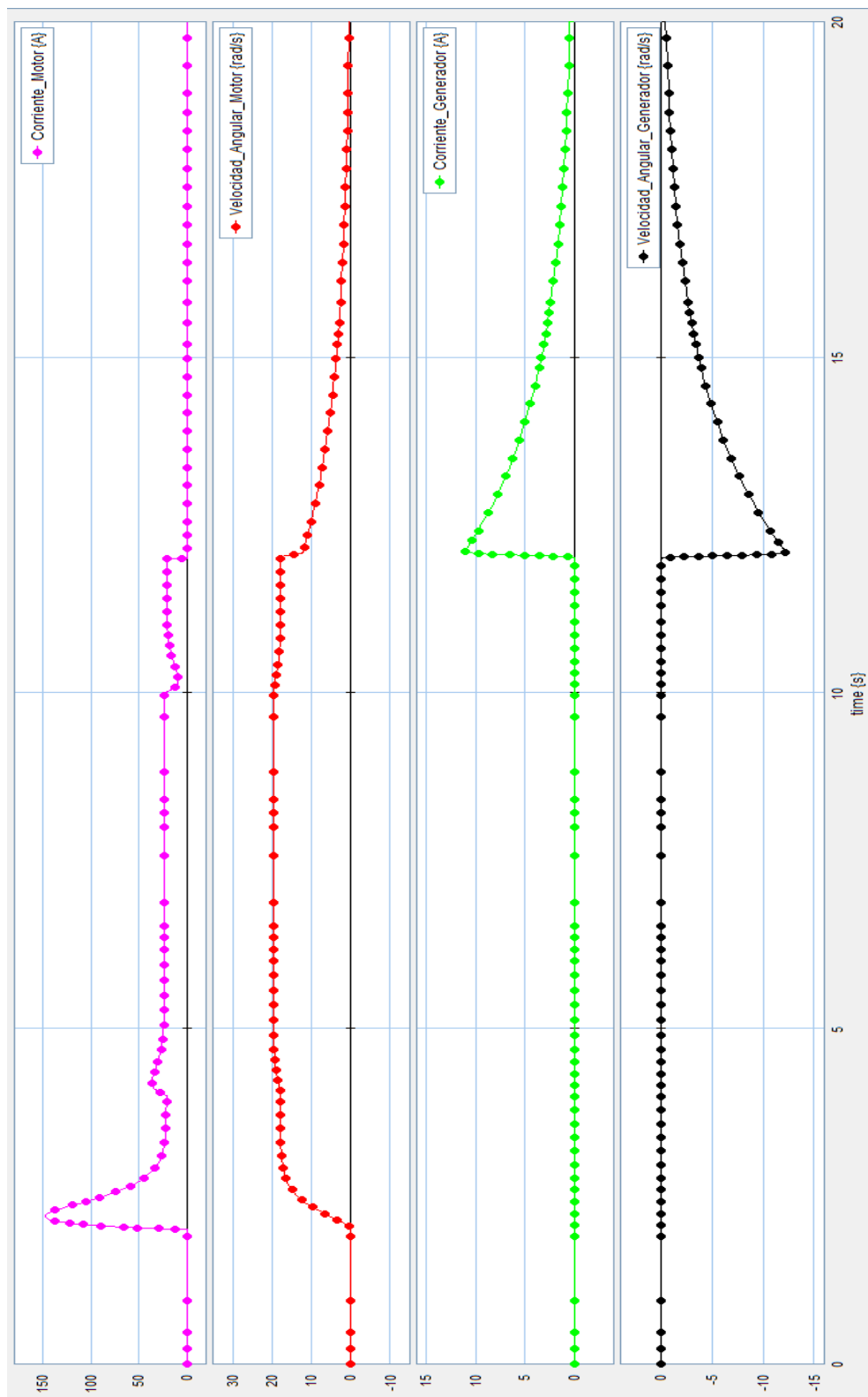


Figura 4.15: Corrientes y velocidad del motor y del generador (caso 2)

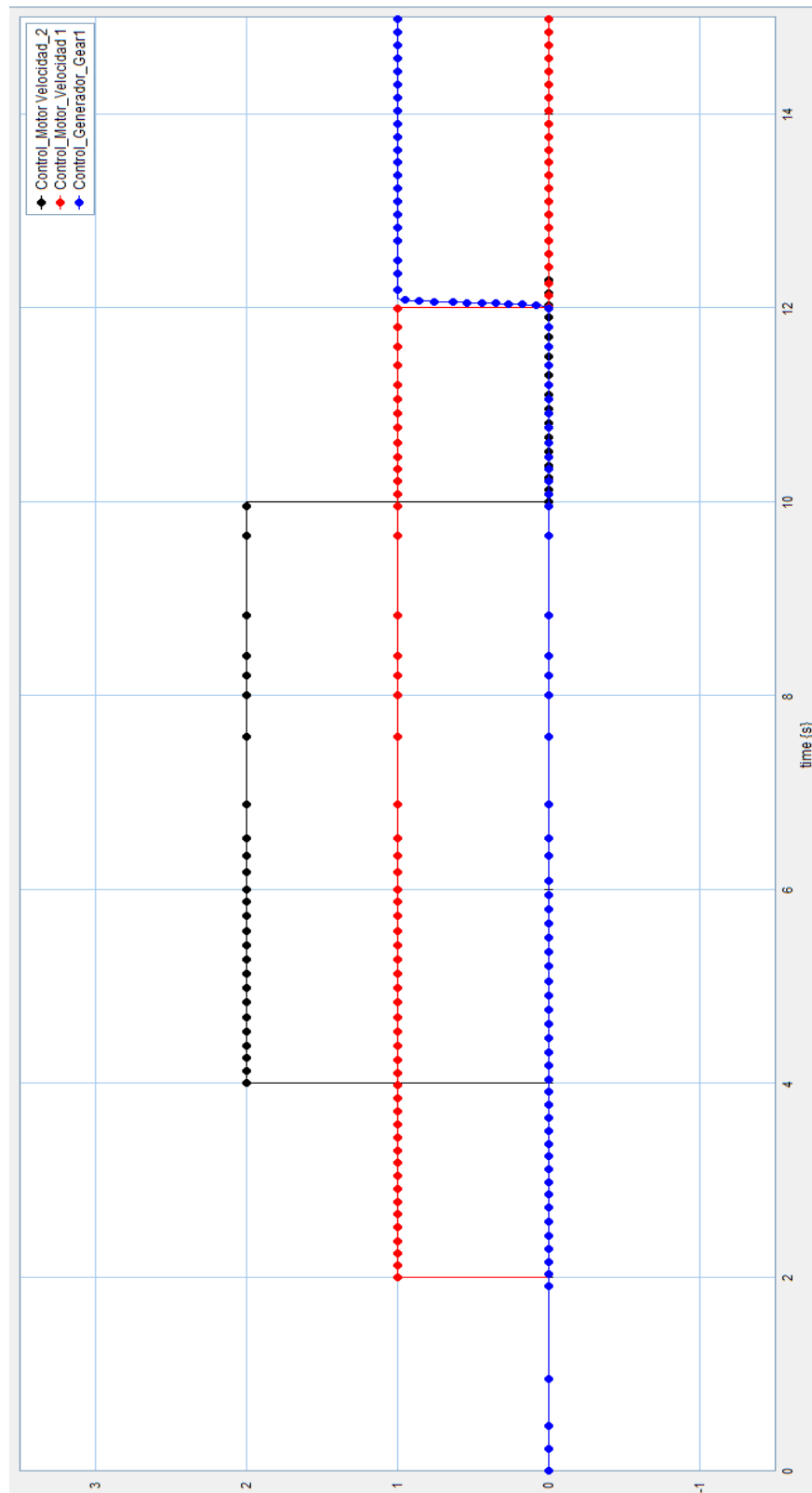


Figura 4.16: Control de operación del motor y del generador, primera velocidad en rojo segunda velocidad en negro y momento de generación en azul (caso 2)

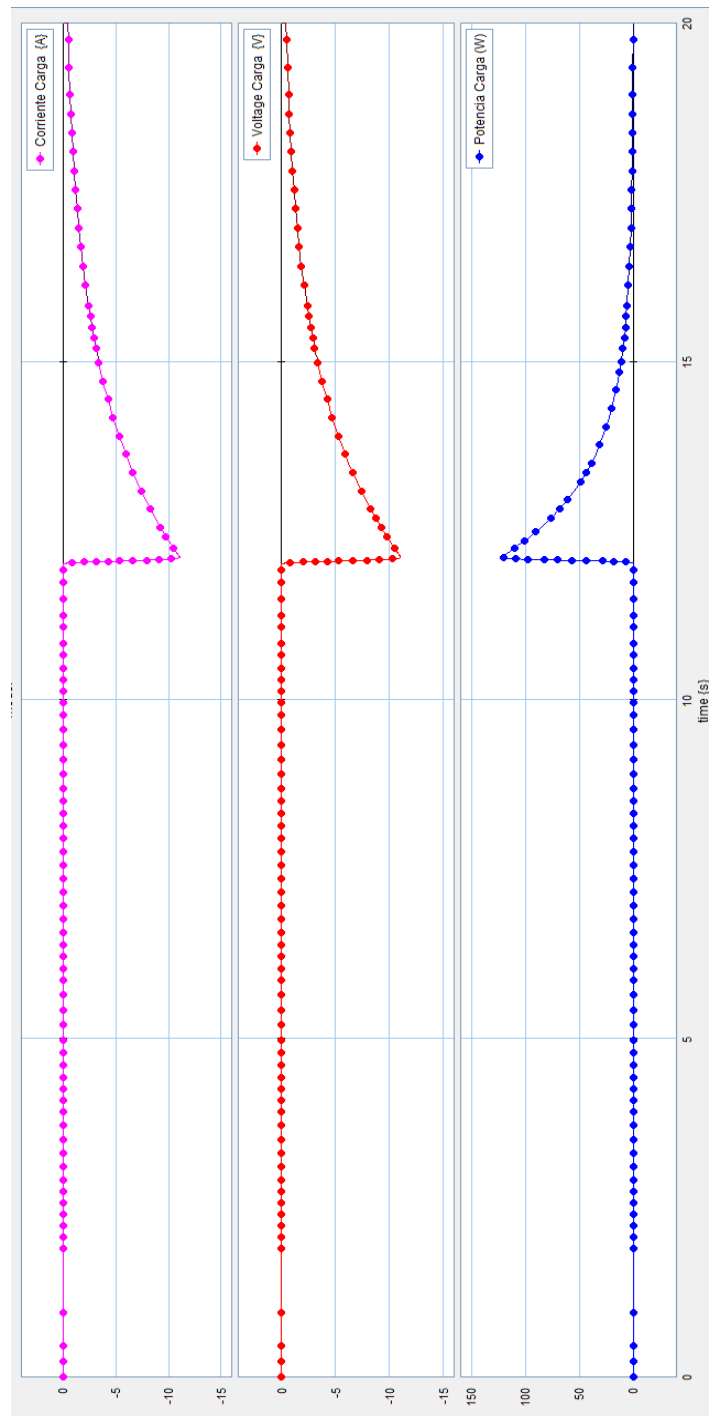


Figura 4.17: Voltaje, corriente y potencia creada por el generador (caso 2)

Caso 3: tercera velocidad

Se suma una tercera y última velocidad al motor se presenta en las gráficas de las figura 4.18, 4.19 y 4.20

A continuación se analizan los intervalos de las gráficas de la simulación del caso 3.

Con $0 > t > 2$ “Switch1” y “Gear1” son interruptores abiertos por lo que todos los valores de las gráficas son de 0, no existe conexión alguna, si lo asimilamos con un auto eléctrico, es como si el auto estuviera apagado o no estuviéramos presionando ningún pedal.

Con $2 > t > 4$ “Switch1” se cierra pero “Gear1” se mantiene abierto por lo que solo funciona nuestro motor, se presiona el acelerador del auto en primera velocidad para ponerlo en marcha (esta velocidad se mantiene de $2 > t > 12$).

Con $4 > t > 6$ se suma una segunda velocidad, aumenta la corriente, voltaje y velocidad en el motor, acelera nuestro auto (se mantiene de $4 > t > 10$).

Con $6 > t > 8$ se suma una tercera y última velocidad (se mantiene de $6 > t > 8$).

Con $8 > t > 10$ bajamos a segunda velocidad.

Con $10 > t > 12$ bajamos a primera velocidad

Con $t > 6$ “Switch1” se abre y “Gear1” se cierra, (asimilamos que soltamos el acelerador y empezamos a presionar el freno) por inercia el motor seguirá girando e inducirá a nuestro generador por medio del interruptor mecánico el cual creará energía por esa inercia, la energía recuperada se almacenará en un banco de baterías, en nuestro caso la carga.

Las gráficas de la figura 4.18 con los títulos “Corriente_Motor” representa la corriente del motor al arranque (primera velocidad), el aumento de corriente en la segunda y tercera velocidad y el momento de apagado en $t = 12s$, “Velocidad_Angular_Motor” representa las revoluciones por segundo a la cual está girando el motor, se aprecia el momento cuando el motor pasa a segunda y tercera velocidad, “Corriente_Generador” representa la corriente generada e inyectada a las baterías en el momento en que se deja de alimentar el motor y comienza a funcionar el generador, “Velocidad_Angular_Generador” indica las revoluciones del generador en el momento que entra a funcionar en $t = 12s$, los valores negativos representan solo el sentido de giro, como en caso 1 y 2.

Las gráficas de la figura 4.19 con los títulos “Control_Motor” velocidades 1, 2 y 3 representa solo las velocidades en las que se opera al motor y el momento en que se ponen en marcha, “Control_Generador” es el momento en que entra a operar el generador $t = 12s$, como en caso 1 y 2.

Las gráficas de la figura 4.20 con los títulos “Corriente_Carga”, “Voltaje_Carga”, “Potencia_Carga” indican las magnitudes de corriente, voltaje y potencia generada e inyectada a las baterías, como en caso 1 y 2.

En la figura 4.21 tenemos la potencia generada en el sistema que para el caso 1 y 2 es la misma potencia generada.

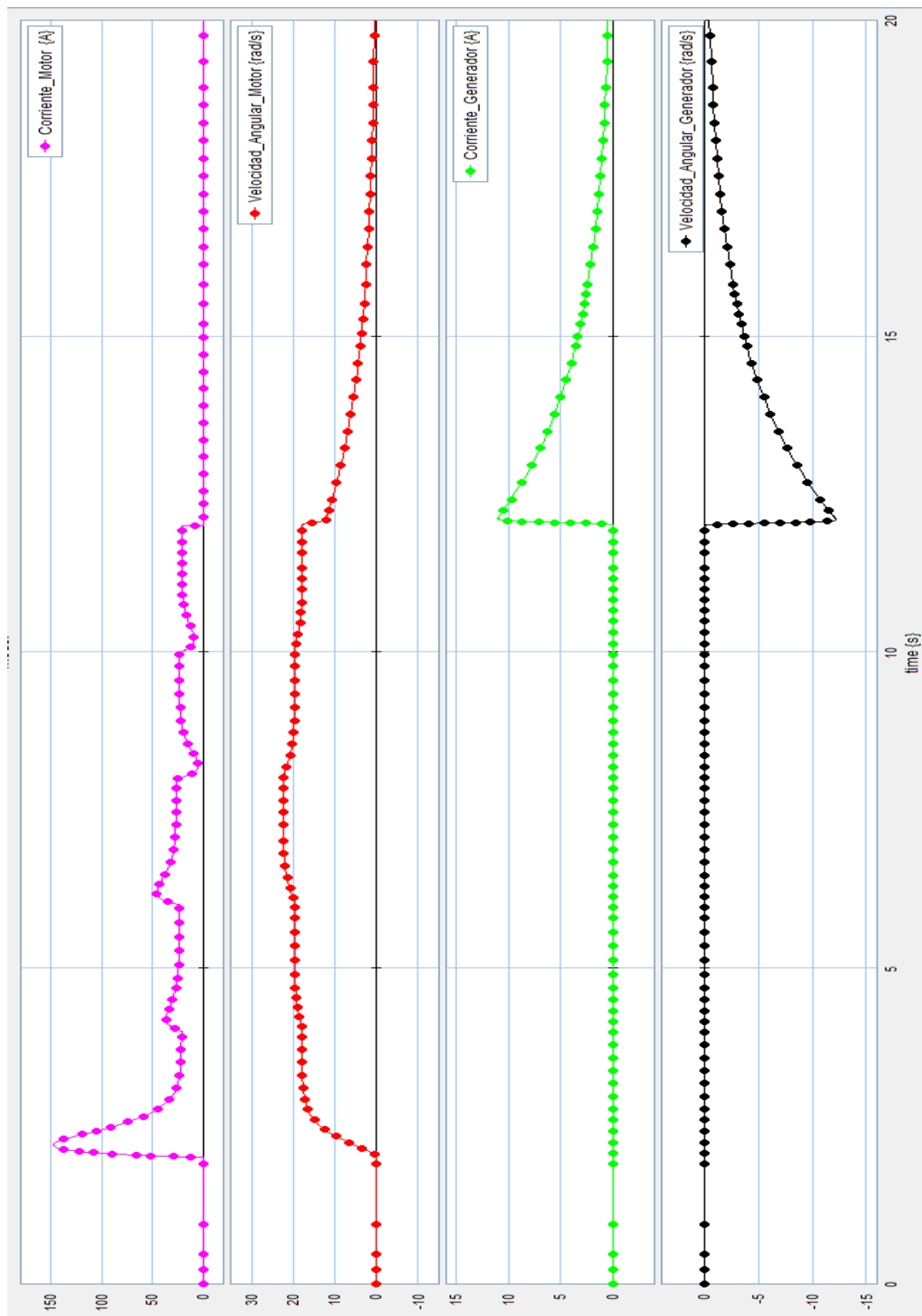


Figura 4.18: Corrientes y velocidad del motor y del generador (caso 3)

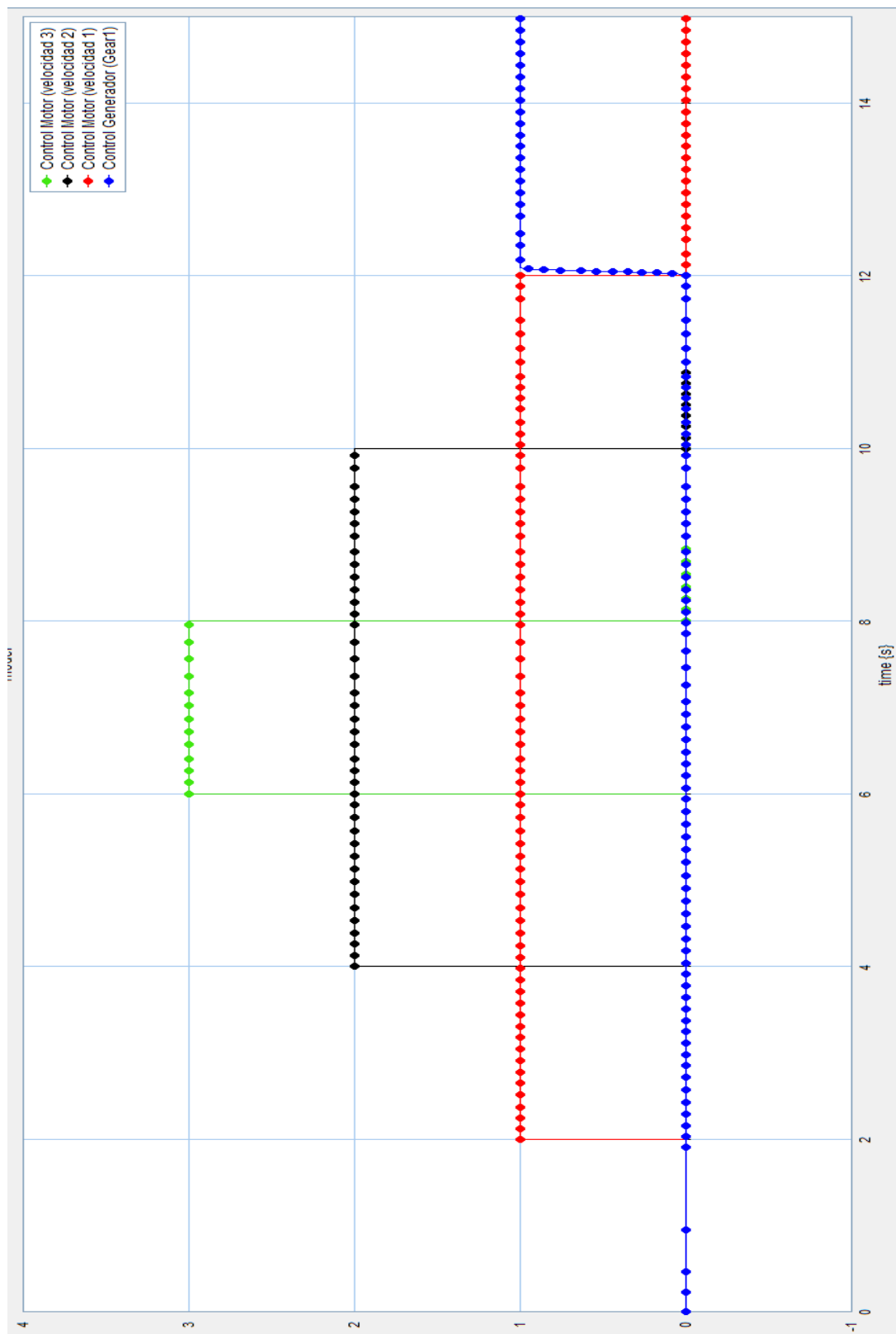


Figura 4.19: Control de operación del motor y del generador, primera segunda y tercera velocidad (caso 3)

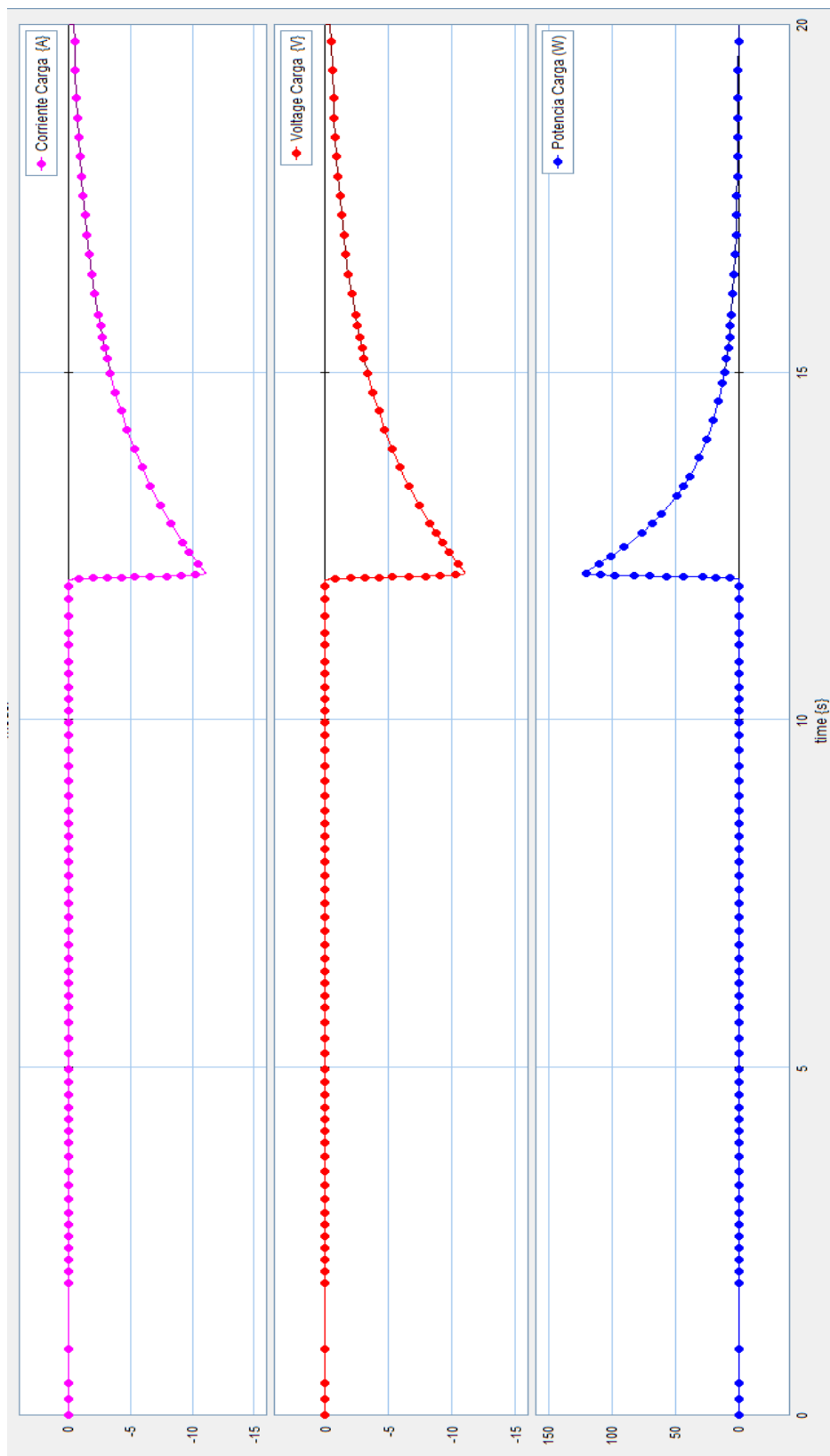


Figura 4.20: Voltaje, corriente y potencia creada por el generador (caso 3)

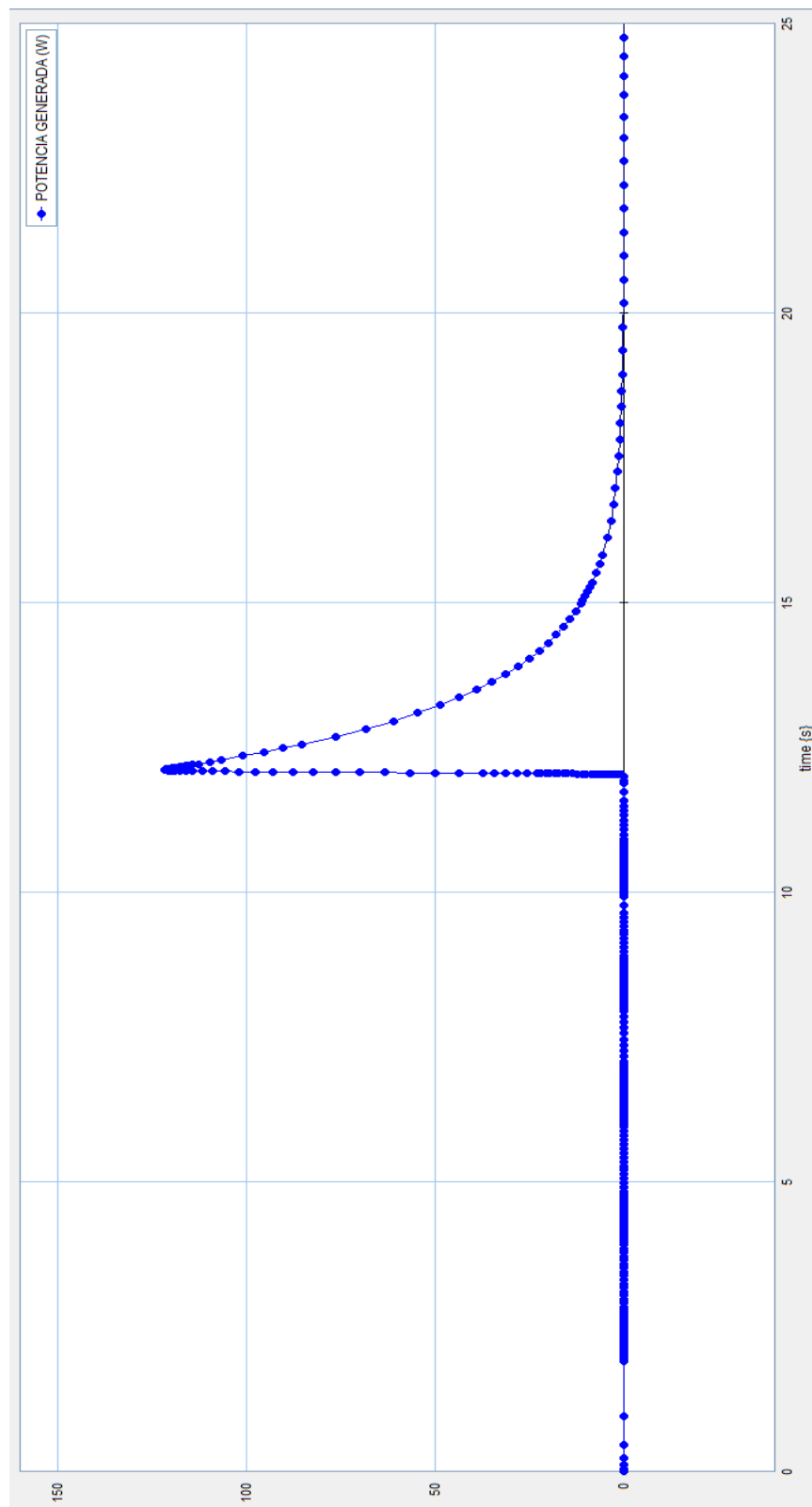


Figura 4.21: Potencia generada del sistema

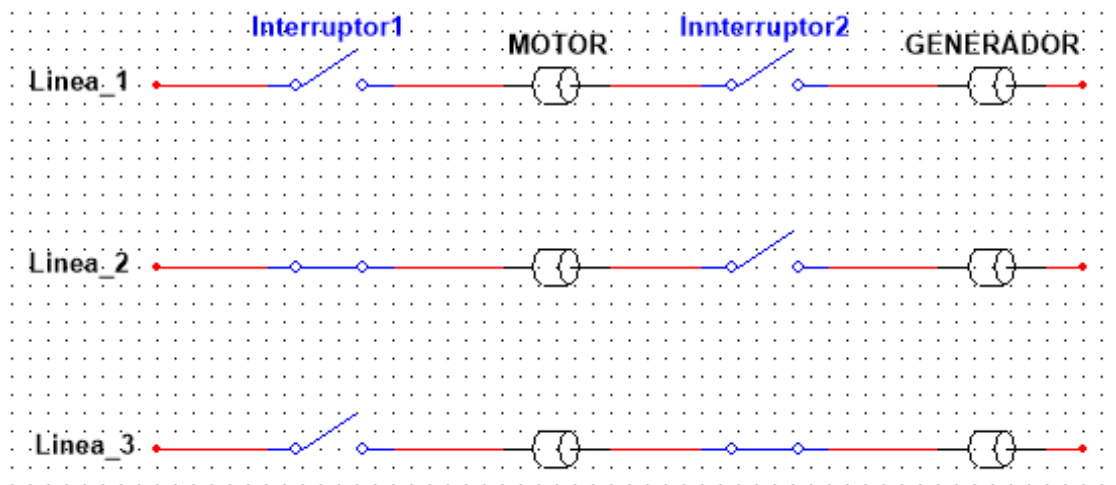


Figura 4.22: Analogía de interruptores de control motor y generador

Si hacemos una analogía de cómo funcionan los interruptores es como si tuviéramos la imagen de la figura 4.16, “Línea_1” representa a $0 > t > 2$ donde los 2 interruptores están abiertos, el intervalo $2 > t > 12$ representado por “Línea_2” en este intervalo es donde se pone segunda y tercera velocidad, solo el motor funciona y por ultimo tenemos $t > 12$ se deja de alimentar el motor y se cierra el interruptor 2 para que la inercia del motor sea transferida al generador y esta energía recuperada sea inyectada a unas baterías.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

El análisis de eficiencia del sistema de recuperación de energía eléctrica, cumple con los objetivos que se buscaban al tener un ahorro importante de energía y en consecuencia un ahorro económico.

La realización de este trabajo del automóvil eléctrico ayuda a tener mejores hábitos en la vida cotidiana, como el no usar tantos combustibles fósiles, ayudando al automóvil a obtener energía propia por medio de un sistema de recuperación.

No siempre los automóviles con más caballos son los mejores, el automóvil eléctrico resulta que nos ahorra energía, combustible y emite mucho menos gases contaminantes, aunque no nos da una potencia mayor.

El uso de sistemas de recuperación de energía eléctrica mejora el uso de la energía que es disipada a causa del frenado y tenemos un menor desgaste de frenos mecánicos gracias al regenerativo.

Con el uso continuo del freno regenerativo se produce menos desgaste en el mecánico, devuelve la alimentación a la batería y protege los componentes del desgaste prematuro, ofreciendo una mejor eficiencia de la energía, ayudando a prolongar su autonomía y su vida útil.

Este trabajo brinda una aportación al concientizar al automovilista de considerar el momento de comprar un automóvil, sea amigable con el medio ambiente y al mismo tiempo tendrá una ganancia de ahorro a largo plazo en el gasto de gasolina y electricidad.

5.2 Recomendaciones

El análisis del sistema de recuperación de energía sólo se hizo en un simulador de computadora, por lo que sabemos no es lo mismo un sistema simulado a un sistema real, se

recomienda tomar las herramientas de un laboratorio y poner en marcha el análisis de este sistema regenerativo los resultados pueden cambiar.

En nuestra simulación observamos a simple vista que la corriente de arranque del motor de cd es hasta de seis veces más elevada que la nominal, por lo que debe de tenerse en cuenta un sistema de arranque del motor que no eleve la corriente a esa magnitud.

Utilizamos un motor y un generador funcionando independientemente uno del otro para que el sistema fuera a simple vista más entendible, pero ya que el motor de cd y el generador de cd funcionan de la misma manera solo que en sentidos opuestos puede simularse un sistema con un solo motor-generador.

Se recomienda además analizar ahora el sistema pero desde el punto de vista de las baterías para saber cuánto es la energía recuperada y que tipo de baterías utilizar.

Se utilizó un motor de cd como caso especial, aunque el sistema puede trabajar con cualquier otro motor como un asíncrono, imanes permanentes o cualquier otro que sea de interés.

Bibliografía

- [1] https://elpais.com/tecnologia/2017/01/26/actualidad/1485435443_182055.html.
- [2] <https://www.xataka.com/automovil/tecnologia-para-el-coche-todo-sobre-la-tecnologia-hibrida>.
- [3] <http://www.deperu.com/autos/caracteristicas-de-un-auto-electrico-707>.
- [4] <http://electricmotorsccc.blogspot.mx>.
- [5] <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/historia-de-los-coches-electricos>.
- [6] <http://www.banrepcultural.org/node/92121>.
- [7] <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/como-funciona-un-coche-hibrido>.
- [8] <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/coches-electricos-que-son-y-como-funcionan>.
- [9] <http://prendanet.mx/como-funciona-un-auto-electrico/>.
- [10] «Máquinas eléctricas y sistemas de potencia – Theodore Wildi – 6ta Edición».
- [11] <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/freno-regenerativo-recuperando-energia>.
- [12] <https://corrienteelectrica.renault.es/asi-funciona-freno-capaz-generar-energia/>.