



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ESTADO DEL ARTE DE LA MOTOCICLETA ELÉCTRICA

Alumno: José Manuel Salmerón Cobos

Tutor: Ignacio Jesús Pérez Guerrero
Dpto: Ingeniería Eléctrica

Septiembre, 2015



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Don IGNACIO JESÚS PÉREZ GUERRERO, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: TRACCIÓN ELÉCTRICA. ESTADO DEL ARTE DE LA MOTOCICLETA ELÉCTRICA, que presenta JOSÉ MANUEL SALMERÓN COBOS, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2015

El alumno:

Los tutores:

JOSÉ MANUEL SALMERÓN COBOS

IGNACIO JESÚS PÉREZ GUERRERO

RESUMEN

El estudio del arte de la motocicleta eléctrica se realiza con el objetivo de mostrar cuáles son los modelos actuales de motocicletas y lo más fundamental de que elementos se componen. Se habla de una evolución histórica a lo largo de los años de los elementos fundamentales, que es en los últimos años cuando más información se tiene y los avances han sido bastante más rápidos.

Hoy en día la tecnología de este tipo de vehículos no tiene límites, bueno, el único inconveniente quizás sea la autonomía pero que se supera con los nuevos supercargadores; esta industria en unos años terminará por desbancar a los vehículos tradicionales, debido al número de ventajas que ofrecen respecto a los vehículos tradicionales. Su aspecto innovador hace de estos vehículos algo nuevo y que capta la atención de los usuarios. Son ya los grandes fabricantes los que poseen vehículos de este tipo y que no paran de innovar.

ABSTRACT

The study of the art of electric motorcycle is very important because it shows what the current models of motorcycles and the most fundamental elements that compose it. There is talk of a historical evolution over the years, which in recent years as more information and progress has been far more rapid .

Today the technology of these vehicles has no limits, well, the only inconvenient may be the autonomy but is overcome by the new supercharger; this industry in a few years will eventually unseat traditional vehicles because of the number of advantages over traditional vehicles. Its innovative aspect makes these something new vehicles and that captures the attention of users. And large manufacturers are those with such vehicles and do not stop innovating.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	8
1.1 INTRODUCCIÓN	8
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	11
2 HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LAS MOTOCICLETAS ELÉCTRICAS	14
3 ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LA MOTOCICLETA ELÉCTRICA	33
3.1 MOTORES	33
3.1.1 HISTORIA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS	33
3.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS	35
3.1.3 PARTES BÁSICAS QUE COMPONEN LOS MOTORES	69
3.1.4 POTENCIA DE UN MOTOR ELÉCTRICO	74
3.1.5 SELECCIÓN DEL MOTOR	75
3.1.6 EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS	82
3.1.7 NORMATIVA SOBRE EFICIENCIA	84
3.1.8 COMPARATIVA DE LOS MOTORES BRUSHLESS DE IMANES PERMANENTES DE CC Y CA	95
3.1.9 MOTOR HEINZMANN	104
3.2 DISEÑO Y UNIDAD DE CONTROL	110
3.2.1 FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL CONTROLADOR	112
3.2.2 CONTROL MULTISWITCHING	112
3.2.3 CONTROLADORES DE ESTADO SÓLIDO	113
3.2.4 UNIDAD DE CONTROL PARA MOTORES DE CC	114
3.2.5 MODULACIÓN PWM	120
3.2.6 UNDERVOLTAGE CUTBACK	120
3.2.7 OVERTEMPERATURE CUTBACK	121
3.2.8 CONTROLADORES DE CA	121
3.2.9 TIPOS DE CHOPPER Y CUADRANTES DE FUNCIONAMIENTO	123
3.2.10 CURTIS INSTRUMENTS	129
3.2.11 CONTROLADORES ZAPI	137
3.2.12 NAVITAS TECHNOLOGIES	142
3.2.13 CONTROLADORES ALLTRAX PARA MOTORES DE CC	145
3.2.14 METRIC MIND ENGINEERING	148
3.2.15 SEVCON	149
3.3 BATERÍAS	154
3.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA BATERÍA	154
3.3.2 PARÁMETROS A TENER EN CUENTA EN UNA BATERÍA	155
3.3.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS BATERÍAS	157
3.3.4 TIPOS DE BATERÍAS	158
3.3.5 CONDENSADOR DE ALTA CAPACIDAD	164
3.3.6 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS)	165
4 EVALUACIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DEL CABLEADO ELECTRICO DE LA MOTOCICLETA ELÉCTRICA	169
4.1 INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA	169
4.2 TEST DE UNA MOTOCICLETA ELÉCTRICA	170
4.3 MEDICIÓN DEL CAMPO CERCA DEL SISTEMA DE CABLEADO	172

5	CIRCUITO DE PROTECCIÓN	177
5.1	CONTRA SOBRETENSIONES	177
5.1.1	<i>DISEÑO DEL CIRCUITO DE PROTECCIÓN DE SOBRETENSIONES.....</i>	<i>178</i>
5.1.2	<i>REALIZACIÓN DEL CIRCUITO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES</i>	<i>182</i>
6	SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN.....	188
6.1	FRENADO REGENERATIVO.....	188
6.1.1	<i>ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CONTROL DE FRENADO REGENERATIVO....</i>	<i>189</i>
6.1.2	<i>ESQUEMA DE CONTROL DE FRENADO REGENERATIVO</i>	<i>196</i>
6.2	ABS INTEGRAL	200
6.3	ASC (AUTOMATIC STABILITY CONTROL)	201
7	CONCLUSIONES	204
8	BIBLIOGRAFÍA	206

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

ÍNDICE 1

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	7
1.1	INTRODUCCIÓN.....	7
1.2	OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	10

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Las motocicletas y ciclomotores eléctricos se hacen hueco en la movilidad urbana y carreteras gracias a los beneficios ambientales, económicos y tecnológicos que ofrecen.

La actual y creciente preocupación por los altos niveles de contaminación, los efectos nocivos del cambio climático y la crisis energética mundial son tres problemas importantes derivados del uso abusivo de combustibles fósiles que hacen que tengamos que cambiar los hábitos y adaptarnos a las circunstancias actuales por medio de unas alternativas que hagan frente al problema que sitúan al transporte como principal contribuyente de la contaminación del medio ambiente.

El desarrollo económico y social depende fuertemente de este tipo de combustible el cual provoca la emisión de gases contaminantes.

Todos estos problemas están propiciando el desarrollo de los vehículos eléctricos como forma alternativa de desplazamiento ya que la electricidad es una fuente de energía más respetuosa con el medio ambiente, siempre y cuando obtengan la electricidad de fuentes de energía limpias.

Las motos eléctricas son ya las fuertes rivales de las motos tradicionales de combustión interna, a las que ya se asimilan en prestaciones como la velocidad, la aceleración y una mejor eficiencia.

Algunas de las ventajas que ofrecen estos vehículos eléctricos son:

- ✓ **Bajo coste de desplazamiento:**

El vehículo eléctrico posee altos costes de adquisición, por ello, no es hasta el paso de unos años cuando la rentabilidad de los vehículos eléctricos frente a los de gasolina es positiva. La rentabilidad comienza a partir del sexto año, dependiendo del modelo adquirido.

El bajo coste de desplazamiento es la principal ventaja. Podemos realizar una estimación para comprobar dicha ventaja. Si cogemos como modelo una motocicleta eléctrica de la marca LEMev y la comparamos con una motocicleta de gasolina de 125 c.c., el gasto de la motocicleta eléctrica es de 0,63€/100km, en cambio la motocicleta de combustión suponiendo un gasto de 4l/100km y teniendo en cuenta que el litro cuesta 1,35€ el consumo es de 5,4€/100km.

A partir del año en el que se produce la rentabilidad, es cuando se obtiene un ahorro alrededor del 21%, además de ser un vehículo rápido, ecológico, ágil y ligero.

✓ **Emisiones nulas:**

Para empezar a analizar esta ventaja basta con decir que las motocicletas eléctricas es sinónimo de cuidado con el medio ambiente. Si nos referimos a la eficiencia energética de los vehículos podemos hablar de que los vehículos eléctricos necesitan la mitad de la energía que un modelo de energía convencional para un mismo desplazamiento.

Hablamos de los vehículos eléctricos como no contaminantes debido que no funcionan con gasolina y por lo tanto evitamos la contaminación que produce la extracción de dicho material, más los accidentes que pueden ocurrir y los convenientes vertidos que se producen durante su transporte hasta los consumidores. Existe el llamado “mix de energías”, a grandes rasgos, no sería equitativo comparar ambas tecnologías únicamente por el CO₂ que emite cada vehículo.

Se puede afirmar que un vehículo eléctrico en marcha tiene cero emisiones pero no podemos olvidarnos comentar que la energía eléctrica hay que generarla de alguna manera u otra, por lo tanto en parte habría que recurrir a la quema de combustibles fósiles aunque lo ideal sería generarla a partir de energías renovables como energía solar, eólica, hidráulica, etc.

A continuación voy a mostrar un gráfico de Red Eléctrica Española [4], en el cuál se observa, en tiempo real el porcentaje de las diferentes energías tanto renovables como no que se utiliza para generar energía eléctrica.

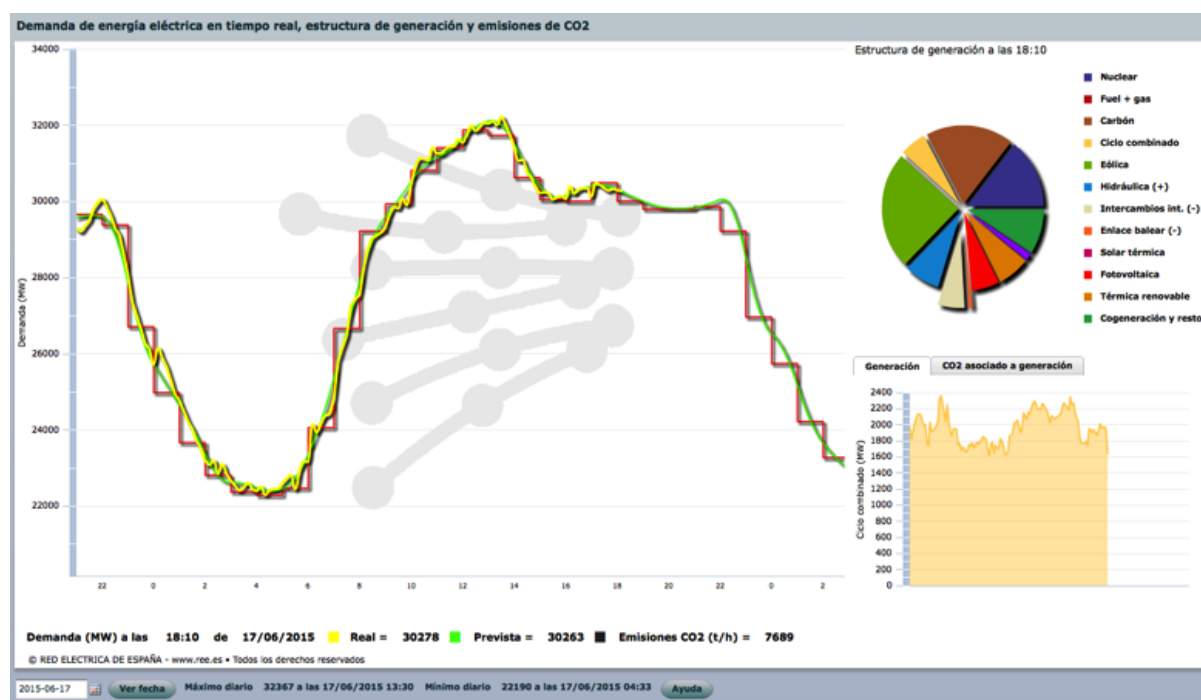


Figura 1. Demanda de energía eléctrica en tiempo real.

Con fecha 17 de Junio de 2015 a las 18:10, se estaba generando una potencia de 30278MW, los cuáles generaban 7689Tn de CO₂. El mayor porcentaje de generación de energía se debía a la energía eólica (25,9%), energía renovable, pero muy seguido de cerca por el carbón (19,7%), energía no renovable.

En la siguiente tabla obtenida a partir de [5] se muestran los diferentes niveles que la normativa Euro tiende a limitar y la apuesta, con la Euro 6 de 2014. Estos límites son tan restrictivos que se están tendiendo a la necesidad de un cambio casi inmediato. Hay que decir que los motores de combustión interna actualmente están muy optimizados pero siguen emitiendo partículas debido al combustible que utilizan. Llegará el día en que las emisiones de dichos motores de combustión interna no podrán reducirse más, propiciado por el propio límite tecnológico. Por lo tanto tenemos que empezar a concienciarnos que el cambio a motores eléctricos y el avance de la tecnología es necesario si queremos cumplir nuestras propias leyes.

Norma	Entrada en vigor	CO (g/km)	HCT (g/km)	NMHC	HCT+NOx (g/km)	NOx (g/km)	PM (g/km)
Motor diésel							
Euro 1**	01/07/92	2,72 (3,16)	----	----	0,97 (1,13)	----	0,14 (0,18)
Euro 2, IDI	01/01/96	1,0	----	----	0,7	----	0,08
Euro 2, DI	01/01/1996 ^a	1,0	----	----	0,9	----	0,10
Euro 3	01/01/00	0,64	----	----	0,56	0,50	0,05
Euro 4	01/01/05	0,50	----	----	0,30	0,25	0,025
Euro 5	01/09/09	0,50	----	----	0,23	0,18	0,005 ^c
Euro 6	01/09/14	0,50	----	----	0,17	0,08	0,005 ^c
Motor gasolina							
Euro 1**	01/07/92	2,72 (3,16)	----	----	0,97 (1,13)	----	----
Euro 2	01/01/96	2,2	----	----	0,5	----	----
Euro 3	01/01/00	2,30	0,20	----	----	0,15	----
Euro 4	01/01/05	1,0	0,10	----	----	0,08	----
Euro 5	01/09/09	1,0	0,10	0,068	----	0,06	0,005 ^{b,c}
Euro 6	01/09/14	1,0	0,10	0,068	----	0,06	0,005 ^{b,c}

Figura 2. Evolución de los límites de emisiones contaminantes de la normativa Euro.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Estudio de la tecnología más actual que se aplica en el desarrollo de la motocicleta eléctrica, evaluando la evolución histórica que han tenido los elementos más importantes que componen una motocicleta eléctrica.

Se analizarán los componentes más importantes que componen una motocicleta eléctrica y el alcance actual dependiendo el medio donde vaya a desarrollar su función.

HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LAS MOTOCICLETAS ELÉCTRICAS

ÍNDICE 2

2	HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LAS MOTOCICLETAS ELÉCTRICAS	13
----------	--	-----------

2 HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LAS MOTOCICLETAS ELÉCTRICAS

Siglo XIX

La historia de las motocicletas eléctricas comienza en el año 1865 cuando Ogden Bolton Jr en la ciudad de Canton, Ohio solicitó la primera patente para una bicicleta eléctrica. En 1897 el fabricante Humber mostró al público en la exposición Stanley Cycle Show una bicicleta eléctrica a baterías que tenía el motor delante de la rueda trasera.

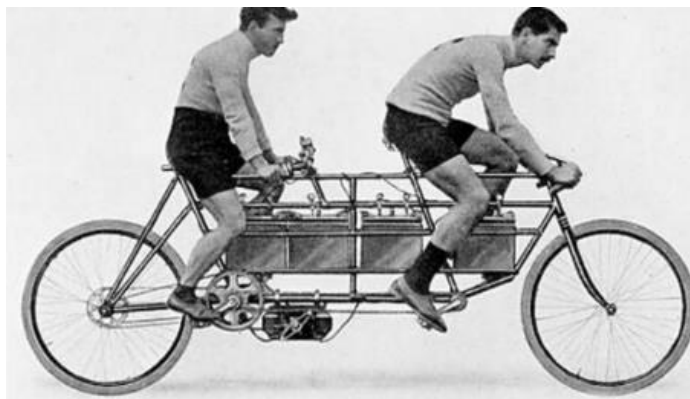


Figura 3. Modelo diseñado por Humber en 1897

Primera mitad siglo XX

En el año 1911, las motocicletas eléctricas ya estaban en la calle, según un artículo de *Popular Mechanics* y en el año 1919, el fabricante Ransomes, Sims & Jefferies desarrolló un prototipo de una motocicleta eléctrica pero no superó la etapa de prueba.

Para el año 1936, los hermanos austríacos Limelette fundaron una compañía de motocicletas eléctricas llamada Socovel y crearon un total de 400 unidades para el año 1948.

Earle Williams pudo convertir una motocicleta común en una motocicleta eléctrica a inicios de la década de 1940. Fue en el año 1947 cuando se produjo el lanzamiento de este vehículo creado por B. G. Bowden y que se denominó Electric Bike.

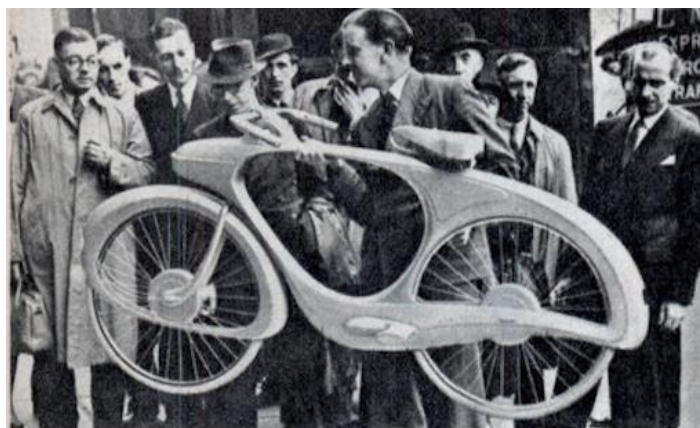


Figura 4. Electric bike del año 1947

Segunda mitad siglo XX

En 1967 Indian Motorcycle creó el prototipo Papoose bajo la dirección de Floyd Clymer. En 1973, Mike Corbin consiguió el primer récord de velocidad de una motocicleta eléctrica 163km/h. Al año siguiente, 1974, Corbin Gentry comenzó a comercializar las primeras motocicletas eléctricas.

Unos años más tarde, en el año 1978, fue construido por Steven Brooks en Honolulu, Hawái, el prototipo Transitron MK2 usando como base una Hardley-Davidson Sporster XLH del año 1971.



Figura 5. Transitron MK2 del año 1978

A partir del año 1990, Scott Cronk y EMB crearon la motocicleta eléctrica EMB Lectra VR 24. Esta motocicleta promovió el uso de motores de reluctancia variable (VR). En esta última década se construyó la KawaSHOC-Ki por la empresa Eyeball Engineering y la Peugeot Scoot'Elec, vehículo que fue lanzado por primera vez masivamente al mercado.

Siglo XXI

Killacycle cambió un poco la tecnología en el año 2000 y estableció un récord de velocidad de 245km/h en un tiempo de 9,4seg en una distancia 400m en Woodland, Oregon. Esta misma motocicleta el 23 de Octubre de 2008 en el circuito de velocidad de Bandimere volvió a romper el récord de velocidad al alcanzar los 245km/h en tan solo 7,89seg y que aparece en la Asociación de Carreras Nacional Eléctricas (NEDRA) demostrando así que la Killacycle es la motocicleta más rápida en 400m.

Unos años más tarde en el mismo circuito de Bandimere le instalaron unos neumáticos M&H Racemaster propiciando a la motocicleta una adherencia a la pista ideal que hizo que la Killacycle llegará a alcanzar los 280km/h en 7,96seg.

El siguiente salto fue el de la instalación de baterías de Li-ion A123, un gran salto tecnológico para la industria del transporte eléctrico.

El modelo de Electra Cruiser fue una idea que se convirtió en realidad después de mucho trabajo y determinación. Es una realidad hoy en día que el vehículo eléctrico pueda ser construido usando diseños simples e innovadores. El resultado es único, robusto, diseño retro, muy equilibrado, cómodo y divertido para conducir. A parte de zero emisiones y la utilización de solo baterías como fuente de energía.



Figura 6. Primer modelo de Electra Cruiser

Siglo XXI...Actualidad

✓ Zero Motorcycles

Zero Motorcycles es un paso grande en la evolución de la motocicleta eléctrica. Esta compañía combina los mejores aspectos de una motocicleta tradicional con la tecnología más avanzada actualmente. Zero fabrica un abanico de motocicletas de alto rendimiento, ligeras, eficientes y rápidas. El chasis de estas motocicletas es rígido de aluminio aeroespacial para reducir peso y tienen un par de baterías Z-Force™ muy revolucionario.

La idea de esta empresa comenzó en un garaje de Santa Cruz, California y se ha convertido rápidamente en una compañía de motocicletas reconocida internacionalmente. Desde el año 2006 es cuando empezaron a verse los primeros prototipos de Zero.

El interés y el desarrollo en la industria de las motos eléctricas crecen de forma exponencial cada día. El éxito que ha obtenido Zero es debido al desarrollo de productos reales, bien posicionados en el mercado y facilitando su distribución.

Zero se centra en crear un equilibrio entre rendimiento, autonomía, peso y asequibilidad para fabricar las mejores motocicletas eléctricas disponibles en este momento.

Zero dispone ahora mismo en el mercado de 4 modelos que se presentan a continuación:

- Zero S Streetfighter

Modelo de Zero con un par motor y una potencia instantánea desde la posición de parada. Presenta una aceleración suave a la salida de las curvas. Esta motocicleta está diseñada tanto para espacios urbanos como para visitar algunos sitios de campo.



Figura 7. Modelo Zero S Streetfighter

El resultado es una motocicleta con un rendimiento impresionante y una apariencia sofisticada. Alcanza velocidades por encima de los 150km/h y ofrece una autonomía en ciudad de hasta 298km.

- Zero SR Max Performance

Este modelo añade la configuración “R” que la diferencia del anterior modelo ya que presenta una mayor agresividad, es decir, mayor velocidad y una gran aceleración. Este modelo incorpora un controlador más grande de 660A que proporciona un 25% más de potencia y un 56% más de par motor. Para suministrar el incremento de potencia, el motor utiliza imanes de alta temperatura para asegurar un rendimiento durante períodos prolongados a altas velocidades.



Figura 8. Modelo Zero SR Max Performance

Este modelo es capaz de acelerar de 0-100km en menos de 4seg. y de alcanzar más de 160km/h utilizando el accionamiento directo que ofrece una

conducción deportiva. La SR incorpora un controlador del motor con un disipados de calor atrevido y elegantemente diseñado.

- Zero DS Dual Sport

La Zero DS combina innovación con pasión para proporcionar al mundo la motocicleta eléctrica más versátil. Diseñada para ser ágil y rápida en la carretera.



Figura 9. Modelo Zero DS Dual Sport

La DS es resistente cuando se necesita y elegante cuando lo requiere la ocasión. El chasis de dicho modelo es de sobre brazo de aluminio, rígido y ligero.

Propulsada por la tecnología más avanzada de la industria, es diseñada para ser disfrutada en cualquier terreno

- Zero FX Stealthfighter

Modelo todoterreno que desafía a lo que se ponga por delante. Equipada con un sistema de transmisión sin mantenimiento, correa de transmisión y batería completamente modular.



Figura 10. Modelo Zero FX Stealthfighter

La FX con un par motor casi instantáneo de 95Nm, 44CV y un peso de tan solo 131kg. Conducción silenciosa con una moto que representa los elementos de conducción más básicos y excitantes.

✓ BMW Motorrad

El fabricante alemán de motocicletas BMW Motorrad comenzó en el año 2014 la venta de su primer scooter eléctrico el C Evolution. Es un scooter con una gran corpulencia equivalente a la de un maxi scooter con una potencia de 11kW entre 0.4650rpm, aunque tiene picos de hasta 35kW (48CV).



Figura 11. Serie de BMW C Evolution

El bastidor de este modelo es la misma carcasa de aluminio donde contiene la batería Li-Ion y los módulos de electrónica de gestión y carga. La autonomía de la batería puede llegar a ser de hasta 120km con un tiempo de recarga de cuatro horas.



Figura 12. Interior de BMW C Evolution

Este scooter ofrece cuatro modos de conducción: Road gestiona una recuperación energética media y ofrece una aceleración máxima, Eco Pro se caracteriza por una recuperación energética máxima y una aceleración limitada, la Dynamic por una recuperación y aceleración máximas y la más moderna Sail que ofrece máxima capacidad de aceleración y ausencia de recuperación energética en deceleración.

✓ Proyecto LimeWire

A lo largo de los años el fabricante más famoso de las motocicletas custom Harley-Davidson se ha distinguido del resto de fabricantes por el manejo y confort de la conducción además del ruido característico que generan sus motores en V. LimeWire es un proyecto con el que pretenden realizar una motocicleta eléctrica.



Figura 13. Proyecto motocicleta LimeWire

Las características de LimeWire es que puede pasar de 0-100km/h en 4seg., esto gracias al motor 100% eléctrico que genera alrededor de 75cv, y una velocidad máxima de 150km/h.

El diseño también llama mucho la atención ya que nunca se había visto algo parecido en la marca con líneas más deportivas. Según el jefe de marketing y vicepresidente de la marca, Mark-Hans Richer, la primera Harley eléctrica tendrá un sonido único, diseñado especialmente para diferenciarla de las motos de combustión interna y del resto de motocicletas eléctricas del mercado.



Figura 14. Visión lateral LimeWire

Hasta el momento solo es un proyecto que está circulando por los diferentes concesionarios de la marca alrededor de EEUU antes de ir para Canadá y Europa.

✓ Bultaco

El 17 de Mayo de 1958, en el transcurso de una histórica cena, Paco Bultó y un reducido grupo de incondicionales dispuestos a acompañarle en una apasionante aventura, tomaban la decisión de crear una nueva marca de motor: Bultaco, la marca española de motocicletas más legendaria de todos los tiempos.



Figura 15. Paco Bultó con la primera motocicleta de Bultaco

Recientemente ha llegado al mercado dos modelos de motocicletas eléctricas como son la Rapián y Rapián Sport presentadas en Londres.



Figura 16. Modelo Rapián de Bultaco

El sistema de propulsión de los prototipos se compone de un motor eléctrico que ofrece una potencia de 40kW y un par de 125Nm, lo que permite una velocidad máxima de 145km/h y una autonomía de 200km. Esta motocicleta utiliza una batería

Li-Ion que puede cargarse de modo rápido en una hora y modo normal que tarda 3 horas y se compone también de ultracondensadores que aseguran un rendimiento superior, este sistema es denominado EndurancePACK y es similar al sistema ERS de la Fórmula 1.

Estos prototipos llevan instalados un sistema de tracción eléctrico llamado BEDTS (Bultaco Electric Drive Train System) que permite sacar el máximo rendimiento energético de la frenada regenerativa. El chasis que compone la bultaco maximiza la adherencia de la rueda trasera en frenada.



Figura 17. Modelo Rapitán Sport de Bultaco

Mediante la aplicación Biker Manager permite al usuario gestionar la potencia del motor, la recuperación de la energía, la recarga de la batería y conexión con dispositivos móviles a través del software de la unidad de control BCU (Bultaco Control Unit).

✓ Vectrix

Vectrix fue fundada en el año 1996 con el objetivo de proporcionar un transporte urbano, limpio, eficiente, confiable y económico. Los ingenieros y diseñadores se pusieron mano a la obra para la creación de un vehículo 100% eléctrico potente y con estilo. La velocidad máxima de esta motocicleta es de 110km/h y una aceleración de 0-80 en 6,8seg.

Vectrix dispone de tres modelos:

- Vectrix VX-1 Li

Presenta un diseño aerodinámico y una conducción suave.



Figura 18. Vectrix VX-1 Li

- Vectrix VX-2

Modelo muy similar a los ciclomotores de 50cc con una velocidad limitada a 45km/h y una autonomía de hasta 120km.



Figura 19. Vectrix VX-2

- Vectrix VX-3

Es el modelo más rápido y potente del fabricante de Vectrix, perfecta para su uso en ciudad. Tiene una autonomía de hasta 128km y se carga al 80% de su capacidad en 4 horas.



Figura 20. Vectrix VX-3

✓ Gogoro

Aprovechando el poder de los grandes datos y la demanda incesante de las tecnologías más inteligentes. Gogoro tiene su sede principal en Taiwán ha ideado un producto atractivo desde el punto de vista estético, pero también lo es por contar con la última tecnología. Gogoro está ayudando a crear un sistema más inteligente y adaptable para las ciudades más dinámicas. Gogoro ha creado un scooter rápido en el que la ingeniería de rendimiento llega a todos los niveles de potencia, agilidad y control. Dispone de sistemas inteligentes integrados para optimizar la manera de conducción.



Figura 21. Modelo Gogoro

Esta motocicleta ha sido creada para circuito urbano. Gogoro ha de instalar unas estaciones de carga, llamadas “GoStations”, con baterías disponibles, para que el usuario reemplace su batería agotada por una nueva. Para ello cada usuario dispondrá de una llave NFC para realizar el intercambio de batería.



Figura 22. GoStations

En primer lugar, es rápida, puede llegar a alcanzar hasta 100km/h. En segundo lugar, es inteligente, posee 30 sensores que permiten detectar el movimiento, la velocidad óptima de conducción, etc. Además algo muy novedoso y que se empezará a montar en gran variedad de motocicletas es la incorporación de dispositivos móviles a través de una app de tu smartphone.

Este scooter se sirve de un sistema intercambiable de baterías de Panasonic para “abastecer” su depósito de energía cuando es necesario. No es necesario enchufarla. La Gogoro utiliza dos baterías de 9kg cada una. La autonomía de esta scooter se establece en 100km.



Figura 23. Modelo Scooter Gogoro conducida por un usuario

Esta motocicleta tiene un valor de mercado de 3600€, obviamente es un precio más elevado que si se compara con una scooter 125cc tradicional, pero la filosofía de Gogoro es completamente distinta y que tras una inversión inicial mayor con el tiempo ocasionará los beneficios económicos. Para dar un empujón a las ventas, el coste de las baterías de los dos primeros años corre a cargo de la propia compañía a parte de otros servicios.

✓ LIC-1

La movilidad urbana está evolucionando en una clara tendencia hacia el desarrollos de minivehículos eléctricos, más económicos y ecológicos. El prototipo creado por Lit Motors denominado C1 es una motocicleta de carrocería cerrada que desafía las leyes de la física.



Figura 24. Imagen lateral-trasera de LIT C1

Lo que destaca de esta peculiar motocicleta es la estabilidad que presenta. No es excusa que sus dos únicas ruedas eviten que la motocicleta caida al suelo. Para ello Lit Motors ha patentado un estabilizador giroscópico que incorpora un volante de inercia que ofrece 1762Nm de par estabilizador. Este vehículo es propulsado por dos motores eléctricos de 54cv cada uno ubicados en las ruedas, es capaz de alcanzar una velocidad punta de 190km/h con una aceleración de 0-100km/h en 6seg. y presenta una autonomía de hasta 240km.



Figura 25. Imagen lateral-frontendal de LIT C1

El interior de este vehículo se asemeja más a un coche, debido a que presenta un asiento con respaldo y un volante más parecidos.

En las siguientes líneas se va a trabajar en ir analizando los diferentes bloques que disponemos para instalar en una motocicleta eléctrica y hablaremos también de las tecnologías más actuales y existentes hoy en día en el mercado.

ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LA MOTOCICLETA ELÉCTRICA

ÍNDICE 3

3 ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LA MOTOCICLETA ELÉCTRICA	32
3.1 MOTORES	32
3.1.1 HISTORIA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS	32
3.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS	34
3.1.3 PARTES BÁSICAS QUE COMPONEN LOS MOTORES	68
3.1.4 POTENCIA DE UN MOTOR ELÉCTRICO	73
3.1.5 SELECCIÓN DEL MOTOR	74
3.1.6 EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS	81
3.1.7 NORMATIVA SOBRE EFICIENCIA	83
3.1.8 COMPARATIVA DE LOS MOTORES BRUSHLESS DE IMANES PERMANENTES DE CC Y CA	94
3.1.9 MOTOR HEINZMANN	103
3.2 DISEÑO Y UNIDAD DE CONTROL	109
3.2.1 FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL CONTROLADOR	111
3.2.2 CONTROL MULTISWITCHING	111
3.2.3 CONTROLADORES DE ESTADO SÓLIDO	112
3.2.4 UNIDAD DE CONTROL PARA MOTORES DE CC	113
3.2.5 MODULACIÓN PWM	119
3.2.6 UNDERVOLTAGE CUTBACK	119
3.2.7 OVERTEMPERATURE CUTBACK	120
3.2.8 CONTROLADORES DE CA	120
3.2.9 TIPOS DE CHOPPER Y CUADRANTES DE FUNCIONAMIENTO	122
3.2.10 CURTIS INSTRUMENTS	128
3.2.11 CONTROLADORES ZAPI	136
3.2.12 NAVITAS TECHNOLOGIES	141
3.2.13 CONTROLADORES ALLTRAX PARA MOTORES DE CC	144
3.2.14 METRIC MIND ENGINEERING	147
3.2.15 SEVCON	148
3.3 BATERÍAS	153
3.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA BATERÍA	153
3.3.2 PARÁMETROS A TENER EN CUENTA EN UNA BATERÍA	154
3.3.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS BATERÍAS	156
3.3.4 TIPOS DE BATERÍAS	157
3.3.5 CONDENSADOR DE ALTA CAPACIDAD	163
3.3.6 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS)	164

3 ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LA MOTOCICLETA ELÉCTRICA

3.1 MOTORES

La primera definición de motor eléctrico es la siguiente, máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas.

Los motores eléctricos son los dispositivos mecánicos más eficientes conocidos en este momento. Entre el 85% y el 90% de la energía utilizada por un motor eléctrico se transfiere a las ruedas de la motocicleta. Hay que tener en cuenta, que para instalar un motor eléctrico no hay que basarse en su tamaño, debido a que los motores eléctricos tienen mucha potencia y energía, debido a que la potencia de un motor eléctrico es instantánea, toda la potencia está disponible desde el principio.

3.1.1 HISTORIA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

El desarrollo del motor eléctrico debemos de decir que ha sido desarrollado por varias personas. Todo se centra a lo largo de la década de 1800, cuando se encuentra una gran cantidad de investigación y desarrollo por parte de varios ingenios. El motor eléctrico se desarrolló a través de un proceso de investigación y descubrimiento que comienza con el descubrimiento del electromagnetismo en el año 1820 por el ingenio Hans Oersted y que fue complementándose con aportaciones de otros ingenios, este es el caso de William Sturgeon, Joseph Henry, André Marie Ampere, Michael Faraday, Thomas Davenport y alguno que otro más. La fuente más documentada fue la aportación de Michael Faraday.

En 1821, el científico británico Faraday demostró mediante un dispositivo simple que la energía mecánica podría ser creada por medios electromagnéticos. Para ello construyó un dispositivo en el cual creaba una inmersión, un alambre libre que cuelga que sumerge en un frasco de mercurio, se colocó un imán en medio del frasco que contenía mercurio; cuando circulaba una corriente por el alambre, el alambre empezaría a girar alrededor del imán, lo que originó un campo magnético.

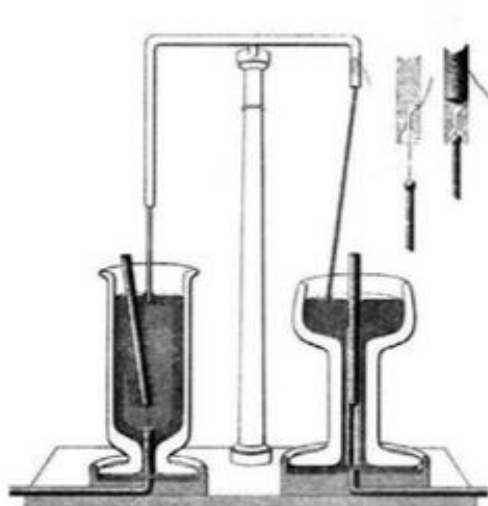


Figura 26. Primer motor eléctrico, año 1821

El primer motor eléctrico real utilizando electroimanes para piezas giratorias fue demostrado por Anyos Jedlik en 1828 en Hungría, más adelante desarrolló un motor de gran alcance para propulsar un vehículo. Para muchos es considerado el padre no reconocido del motor eléctrico. En ese tiempo aparte de Jedlik había más ingenios en la creación de máquinas simples.

En 1873, el motor que conocemos de corriente continua fue inventado por accidente por Zénobe Gramme durante una feria de inventos. Cuando se estaba celebrando la feria, un trabajador sin querer conectó los terminales de una dínamo Gramme a otra dínamo (generador que produce corriente continua) que producía electricidad y la dínamo de Gramme comenzó a girar por si misma. Grammé descubrió que su dispositivo podía actuar como un motor eléctrico cuando se le aplicaba una tensión constante. Este fue el primer motor que tuvo éxito en la industria.

En 1888 Nikola Tesla inventó el primer motor de corriente alterna y con él el sistema polifásico de la transmisión de energía.

La selección de un motor eléctrico es una de las decisiones más importantes que se han de tener en cuenta para el diseño de una motocicleta. ¿Qué tipo de comportamiento es el que realmente queremos conseguir?

El motor es uno de los tres componentes cruciales en el diseño y construcción junto al controlador y la unidad de baterías.

Para la elección de los diferentes tipos de motores que podemos adaptar a nuestra motocicleta eléctrica, debemos de tener en cuenta unos aspectos para evitar la causa de algunos problemas durante el aprovechamiento de dicho vehículo como son velocidad, par, inercia, frenos, modo de control, etc.; por ello debemos de buscar un motor que cumpla con los siguientes requisitos:

- ✓ Reducido coste de mantenimiento.
- ✓ Gran facilidad en el manejo de la moto. Colocar el motor en el sitio ideal para que tengamos en el vehículo una conducción dinámica y divertida, esto conlleva, a que el motor debe tener un tamaño reducido.
- ✓ Buscar un motor con un rendimiento óptimo con el menor coste posible.

3.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

Los motores eléctricos se clasifican en dos grandes grupos, según el tipo de alimentación eléctrica a la que se encuentren conectados.

- Motores eléctricos de corriente alterna.
- Motores eléctricos de corriente continua.

3.1.2.1 Motores eléctricos de corriente alterna

Se estima que aproximadamente el 50% de la energía que se consume en el mundo es a través de los motores de inducción trifásico por constituir la fuerza motriz principal de la industria moderna. Las ideas fundamentales sobre los motores de corriente alterna fueron llevadas a cabo por el gran Nikola Tesla, hacia finales del año 1880.

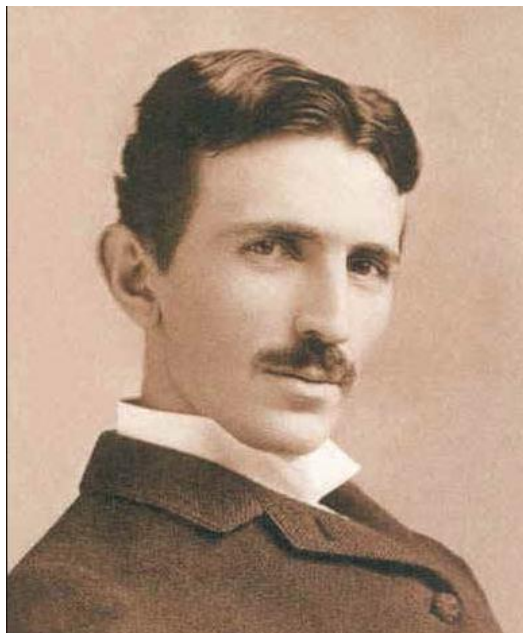


Figura 27. Nikola Tesla a sus 39 años

A este tipo de motores se les denomina motores de inducción debido a que el funcionamiento se basa en la interacción de campos magnéticos producidos por corrientes eléctricas. Las corrientes que circulan por el rotor son producidas por el fenómeno de inducción electromagnética, conocido comúnmente como ley de Faraday, que establece que si una espira es atravesada por un campo magnético variable en el tiempo se establece entre sus extremos una diferencia de potencial dado por la expresión:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Donde e = inducción electromagnética

ϕ = flujo magnético

t = tiempo

Los criterios que se aplican para su clasificación se presentan a continuación:

- ✓ Por su velocidad de giro.

Tenemos motores síncronos y asíncronos. Un motor es síncrono cuando la velocidad del campo magnético del estator es igual a la

velocidad del giro del motor y asíncrono cuando la velocidad del campo magnético generado por el estator supera a la velocidad de giro del rotor.

- ✓ Por el tipo de motor.

Existen motores con el rotor de jaula de ardilla o de rotor devanado.

- ✓ Por el número de fases de alimentación.

Podemos encontrar motores alimentados por una única fase (motores monofásicos), por dos (motores bifásicos), e incluso por tres fases (motores trifásicos).

El motor de inducción de corriente alterna es una forma común de motor asíncrono cuyo funcionamiento depende de tres fenómenos electromagnéticos.

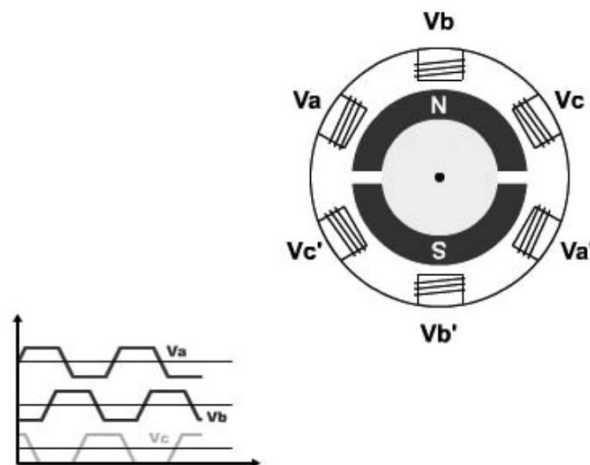


Figura 28. Fases de un motor de imanes permanentes de CA

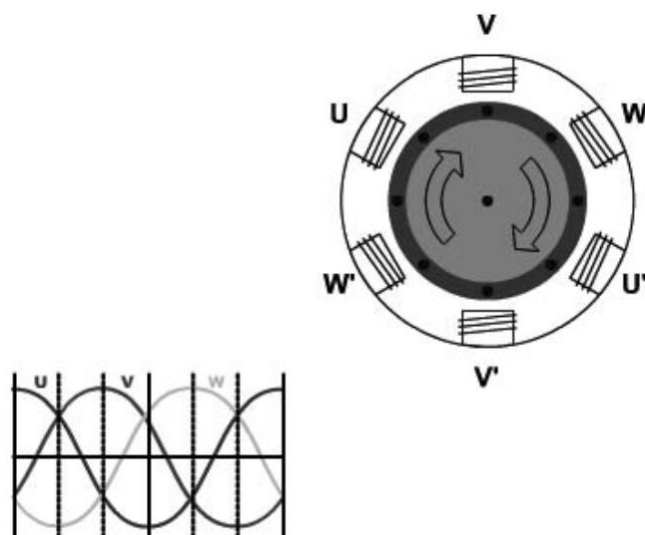


Figura 29. Fases de un motor rotatorio de CA

El motor de corriente alterna ofrece muchas ventajas. En primer lugar, se requiere poco o ningún mantenimiento, porque no hay conmutadores o escobillas. En segundo lugar, los motores de corriente alterna son relativamente ligeros y de pequeño tamaño dado su capacidad de tensión y velocidad. En tercer lugar, son más económicos y por último la eficiencia del motor de corriente alterna tiende a ser unos pocos puntos más alta que la del motor de corriente continua debido a las bajas pérdidas de calor en el cobre y el hierro.

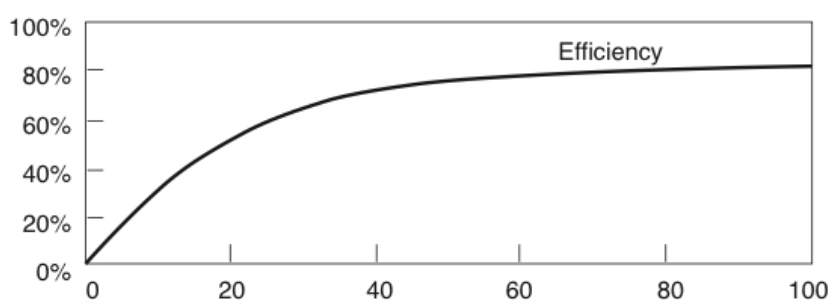


Figura 30. Eficiencia en un motor de CA

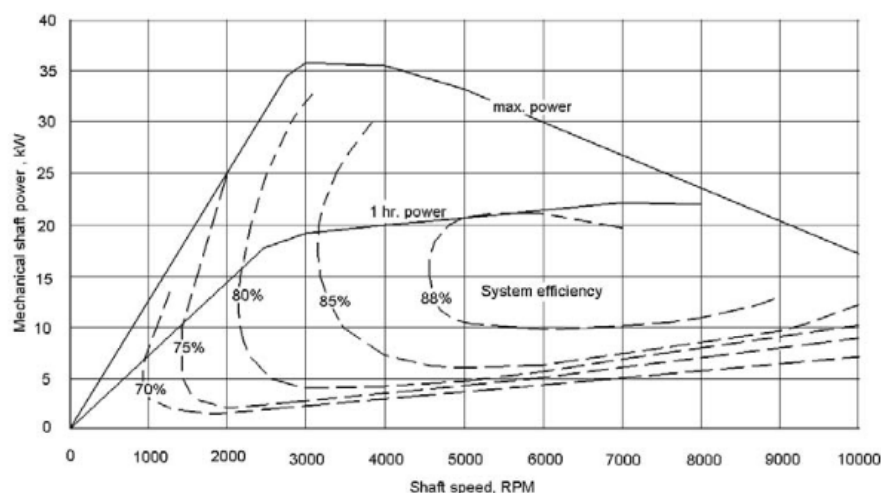


Figura 31. Gráfica de potencia frente a velocidad con diferentes valores de eficiencia de un motor de CA

El motor de inducción de corriente alterna está diseñado para funcionar con una fuente de tensión trifásica. El estator es un clásico estator trifásico con el devanado desplazado 120° . El tipo más común de motor de inducción tiene un rotor de jaula de ardilla en el que los conductores o barras de aluminio están en cortocircuito en ambos extremos del rotor por anillos de extremo de aluminio fundido. Cuando tres corrientes fluyen a través de los tres devanados colocados simétricamente, se produce un flujo en el entrehierro distribuido sinusoidal provocando la generación de corriente del rotor. La interacción del flujo en el entrehierro distribuido sinusoidal y las corrientes inducidas del rotor produce un par en el rotor. En las aplicaciones de velocidad ajustable, los motores de corriente alterna en vehículos de tracción son impulsados por inversores. El inversor convierte la corriente continua de la alimentación de corriente alterna a la frecuencia y la amplitud requerida. La tensión de salida es principalmente creada por una técnica PWM. Las ondas de tensión trifásica están desplazadas 120° entre sí, y por lo tanto un motor de tres fases pueden ser suministradas.

Las partes más relevantes de un motor de corriente alterna se detallan a continuación:

El estator, que es la parte fija de la máquina, está constituido por una corona de chapas magnéticas aisladas entre si por medio de barniz, ranuradas interiormente y sujetas a una carcasa fabricada, por lo general, con fundición de hierro o aluminio.

En las ranuras del estator se dispone un devanado, constituido por un número de fases igual al de la red eléctrica que alimenta el motor.

El rotor, que es la parte móvil de la máquina, está constituido por una corona de chapas magnéticas apiladas directamente sobre el eje de la máquina. La corona rotórica presenta una serie de ranuras interiores en las que se encuentra dispuesto el devanado rotórico.

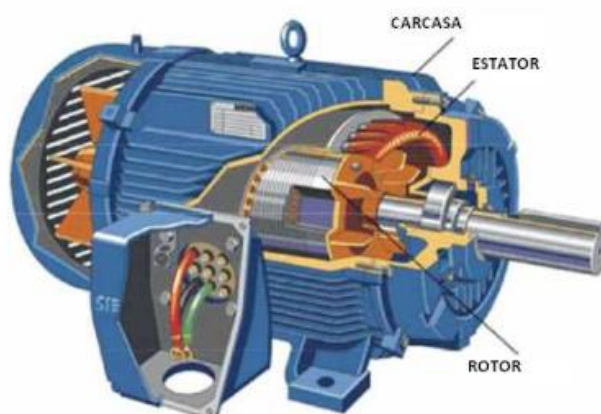


Figura 32. Motor trifásico

Desde el punto de vista constructivo, podemos distinguir dos formas típicas de rotor:

- Rotor de jaula de ardilla.

También conocido de rotor en cortocircuito, el más sencillo. El núcleo del rotor está construido de chapas estampadas de acero al silicio en el interior de las cuales se disponen unas barras, generalmente de aluminio moldeado a presión.

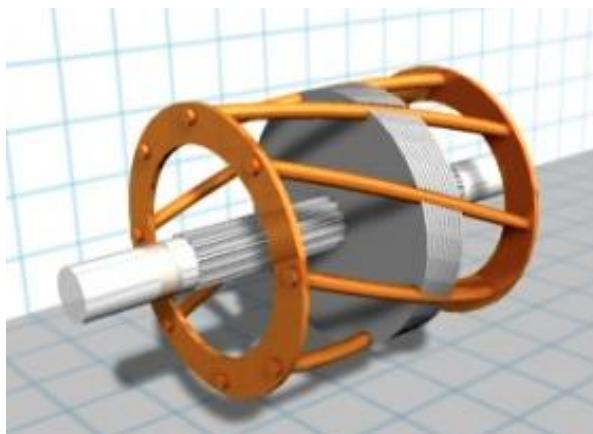


Figura 33. Rotor jaula de ardilla

El rotor de jaula de ardilla presenta una baja resistencia por lo que proporcionan excelentes características para marchas a velocidad constante. Un inconveniente es que este tipo de rotor en el arranque absorbe una intensidad intensa de 4 a 7 veces la intensidad nominal, con un bajo factor de potencia.

- Rotor bobinado.

En los motores de rotor bobinado, el arrollamiento rotórico está constituido por unas bobinas de hilo de cobre por lo general. Los extremos están en conexión a unos anillos (anillos rozantes) por los que se alimentaran las bobinas.



Figura 34. Rotor bobinado

Con este tipo de rotor se puede controlar desde el exterior la resistencia total del circuito rotórico, facilitando un control de la

velocidad y corriente de arranque con un elevado par de arranque y un mejor factor de potencia que con el rotor en jaula de ardilla.

3.1.2.1.1 Términos significativos

La velocidad de sincronismo es la velocidad teórica de un motor de corriente alterna a la que el motor debe girar si el campo magnético inducido en el rotor sigue perfectamente el campo magnético giratorio del estator. La velocidad de sincronismo se mide en rpm y viene dada por la siguiente fórmula:

$$rpm = 120 \cdot \frac{\text{frecuencia eléctrica}}{n^{\circ} \text{ de polos}} \quad (2)$$

Sin embargo, para producir el par debemos de tener en cuenta el parámetro de deslizamiento. Este parámetro es el resultado del campo de inducido en los devanados del rotor atrasado con respecto al campo magnético giratorio en los devanados del estator. La energía que se pierde es este parámetro es lo que produce el trabajo útil en un motor de inducción.

$$s = \frac{\text{velocidad de sincronismo} - \text{velocidad actual}}{\text{velocidad de sincronismo}} \cdot 100 \quad (3)$$

Los valores de deslizamiento varía entre el 1% (motores de gran potencia) y el 5% (motores de menor potencia). Este parámetro es necesario para el control preciso de la velocidad.

3.1.2.1.2 Motor síncrono de corriente alterna

El motor síncrono de corriente alterna es similar es similar al de una máquina polifásica en la que el estator produce un campo giratorio. Un motor síncrono de corriente alterna gira a una velocidad fija, independientemente de cualquier aumento o disminución de la carga. El motor mantendrá una velocidad fija, independiente del par requerido hasta que alcanza su par motor de la parada. Si la carga es mayor que el par de parada del motor, el motor síncrono no se ralentizará hasta que alcance un punto en el que se detendrá y deje de girar. Ningún conductor o amplificador caro es necesario. La mayoría de los motores síncronos se utilizan cuando se requieren sincronización precisa y velocidad constante. Una característica única del motor síncrono de corriente alterna es que no es de arranque automático. Tiene sólo par cuando está funcionando a la velocidad de sincronismo. Cualquiera de un devanado

de jaula de ardilla se añade al rotor para hacer que se inicie, o un motor de corriente continua se utiliza para llevar el rotor a la velocidad casi de sincronismo, momento en el cual se aplica la corriente alterna. El motor síncrono no es adecuado para vehículos de tracción debido a su velocidad fija.

3.1.2.1.3 Motor polifásico

El tipo más común de motor de corriente alterna es el trifásico. El término polifásico significa más de una fase. El motor trifásico está alimentado por tres tensiones alternas monofásicas de igual frecuencia y amplitud (y por consiguiente, valor eficaz) que presentan una cierta diferencia de fase entre ellas, en torno a 120° , y están dadas en un orden determinado. El motor trifásico consta de un estator con devanados y un rotor construido como un bastidor cilíndrico de barras de metal dispuestos en un tipo de jaula de ardilla con una configuración.

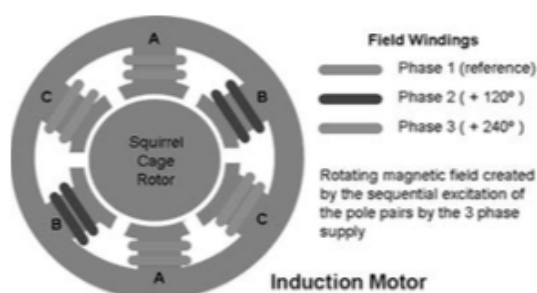


Figura 35. Motor trifásico de CA

No tiene conmutador, esto elimina arcos, chispas, polvo de grafito, ajuste de las escobillas y la sustitución del conmutador.

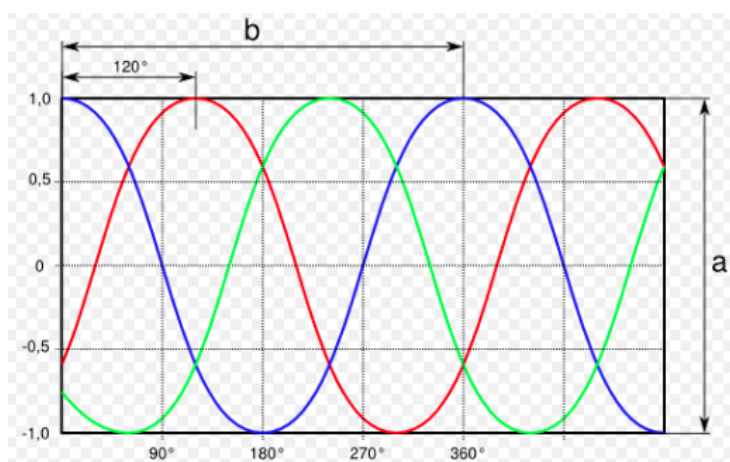


Figura 36. Formas de onda de tensión de alimentación de un motor trifásico

En esta figura se ven representadas las tres ondas monofásicas de tensión que alimentan al motor. El parámetro b indica el período de la onda mientras que el parámetro a muestra la amplitud de estas ondas de tensión.

✓ Frenado regenerativo

Si el motor está alimentado por un inversor de frecuencia variable, el frenado regenerativo es posible. Los motores de corriente alterna pueden ser controlados por microprocesadores. El motor de inducción puede funcionar como un alternador si es accionado por un par de torsión superior a la velocidad de sincronismo. Esto corresponde a un pequeño porcentaje de deslizamiento negativo. Esto significa que a medida que estamos girando el motor más rápido que la velocidad de sincronismo, el motor está avanzando un 1 más rápido que el campo magnético giratorio del estator. Normalmente se retrasa un 1% en el motor. Puesto que el rotor está cortando el campo magnético del estator en la dirección opuesta, el rotor induce una tensión en el estator, la alimentación de energía eléctrica de nuevo en el controlador del motor y por lo tanto las baterías.

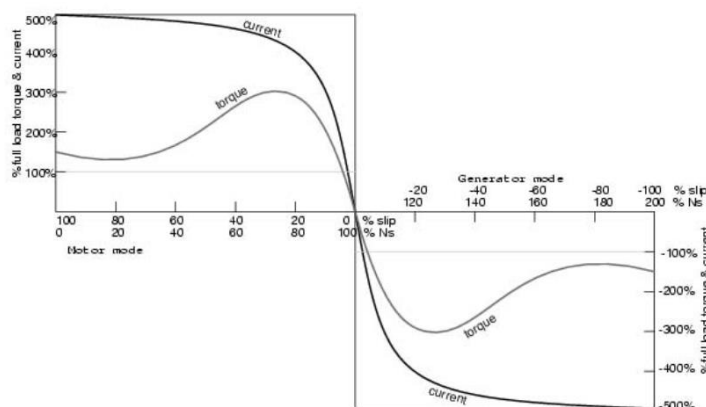


Figura 37. Curva de frenado regenerativo de un motor de CA

El motor de inducción debe de ser excitado por una fuente de energía para crear el frenado regenerativo. Ninguna potencia puede ser generada en el caso de un controlador o fallo de las baterías.

3.1.2.1.4 Ejemplo a partir de una placa de características

En el siguiente apartado se van a realizar una serie de cálculos a partir de las ecuaciones características de este tipo de motores que se pueden realizar cuando el fabricante nos da una placa de características, en este caso, un motor trifásico.

En primer lugar se muestra una imagen de la placa de características de un determinado motor.

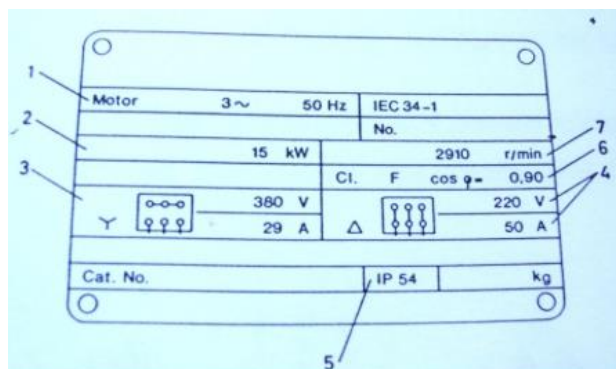


Figura 38. Placa de características de un motor trifásico

Si se comienza a estudiar dicho motor, obtenemos los siguientes datos:

1. En este recuadro se obtiene que tenemos un motor trifásico de corriente alterna a 50Hz.
2. Potencia nominal en el eje del motor es 15kW. Si la queremos obtener en CV deberemos de realizar la correspondiente conversión:

$$15kW \cdot \frac{1000W}{1kW} \cdot \frac{1CV}{736W} = 20CV$$

3. Los bobinados se pueden conectar en estrella hasta una tensión máxima de 380V, circulando una intensidad por cada línea de 29A.
4. Si la conexión es en triángulo la tensión compuesta entre fases podrá ser máximo 220V y circulará por cada línea 50A.
5. En este recuadro se observar el grado de protección de la carcasa del motor expuesto a agentes externos, siguiendo una clasificación establecida por la Comisión Electrotécnica Internacional.

IP 54 → Carcasa protegida a prueba de polvo y proyecciones de agua.

6. Cl. F indica clase de motor hablando de la temperatura máxima de funcionamiento y tipo de aislamiento. Para este caso F, puede funcionar hasta una temperatura máxima de 155°C.

En este mismo apartado se tiene el valor del factor de potencia, $\cos\varphi=0,9$. Con este valor se realizan algunos cálculos básicos que se muestran a continuación:

a) Potencia total absorbida de la red:

Se va a suponer tensión compuesta (entre fases) de la línea de alimentación es 380V, por tanto:

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 29 \cdot 0,9 = 17,18kW$$

b) Potencia reactiva absorbida:

$$\cos\varphi = 0,9 \rightarrow \varphi = 25^{\circ} 50' \rightarrow \sin\varphi = 0,44$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin\varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 29 \cdot 0,44 = 8,32KVar$$

c) A partir del triángulo de potencias, se averigua la potencia aparente demandada:

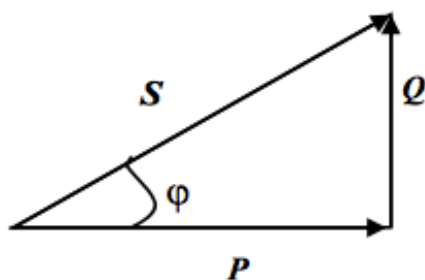


Figura 39. Triángulo de potencias

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

$$\sin\varphi = \frac{Q}{S}$$

$$\tan\varphi = \frac{Q}{P}$$

$$S = \frac{17,18 \cdot 10^3}{0,9} = 19,1kVA$$

d) El rendimiento del motor se muestra en la siguiente línea:

$$\eta = \frac{\text{Potencia en el eje}}{\text{Potencia absorbida}} = \frac{15 \cdot 10^3}{17,18 \cdot 10^3} = 0,87$$

7. Velocidad del rotor con tensión, corrientes nominales en carga de 2910rpm.
8. Frecuencia 50Hz, motor de 2 polos, por lo tanto velocidad de sincronismo 3000rpm. El deslizamiento se calcula a continuación:

$$s = 3000 - 2910 = 90rpm$$

Continuando con las ecuaciones características de los motores de corriente alterna, se va a calcular el par de salida y la relación con la velocidad y potencia del eje. Si partimos de algunos conceptos como son potencia es igual al trabajo entre el tiempo, el trabajo es el producto de la fuerza por el espacio y la velocidad lineal es espacio entre el tiempo. Por lo tanto podemos obtener:

$$P = \frac{F \cdot e}{t}; P = F \cdot v$$

El par ejercido por una fuerza es el producto de la fuerza por la distancia perpendicular al eje de giro:

$$M = F \cdot l$$

Con la ecuación que relaciona la velocidad lineal con la angular viene dada por:

$$v = \omega \cdot l$$

Combinando las ecuaciones:

$$P = M \cdot \omega$$

Pasamos la velocidad angular de rad/s a rpm:

$$\frac{1rad}{s} \cdot \frac{1 \text{ vuelta}}{2\pi rad} \cdot \frac{60seg}{1min} = 9,55rpm$$

Finalmente calculamos el par desarrollado por este motor:

$$M = \frac{P \cdot 9,55}{n} = \frac{15 \cdot 10^3 \cdot 9,55}{2910} = 49,2Nm$$

3.1.2.1.5 Curvas características

- ✓ Característica de velocidad: Representa la velocidad en función de la potencia que suministra, manteniendo la tensión y la frecuencia constantes.

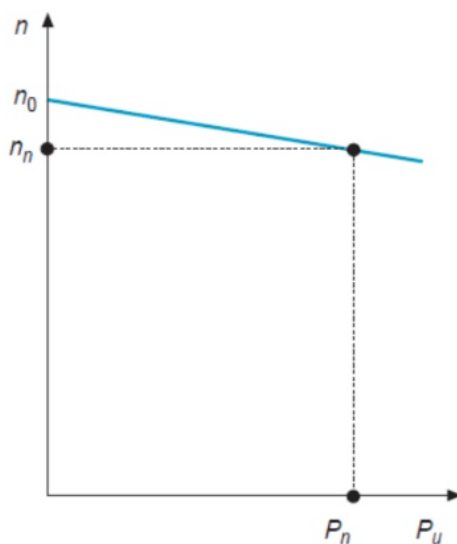


Figura 40. Característica de velocidad

- ✓ Característica de intensidad: Representa la corriente que el motor absorbe de la red en función de la potencia suministrada, manteniendo la tensión y la frecuencia constante.

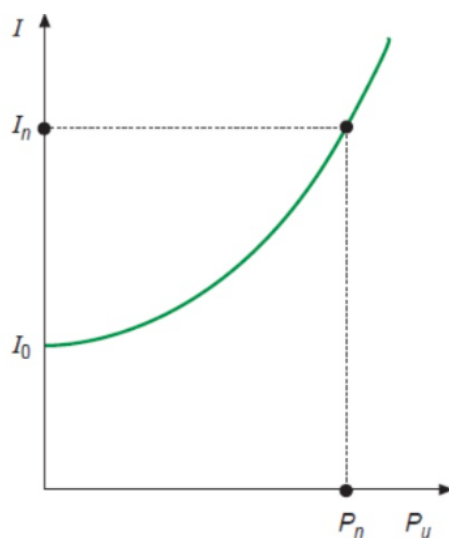


Figura 41. Característica de intensidad

- ✓ Característica de factor de potencia: Se observa como varía el factor de potencia en función de la potencia que suministra el motor, manteniendo la tensión y la frecuencia constante.

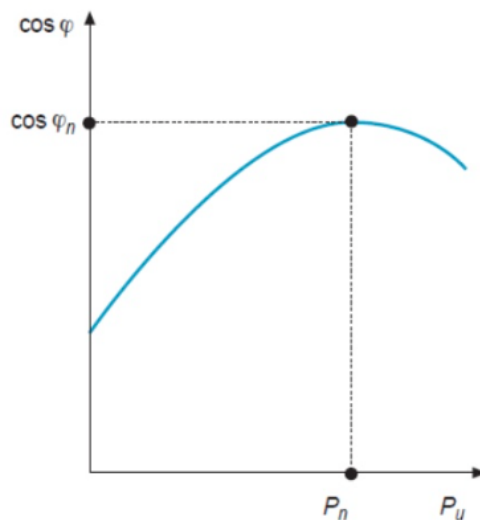


Figura 42. Característica de factor de potencia

- ✓ Característica de rendimiento: Como varía el rendimiento de la máquina en función de la potencia que suministra.

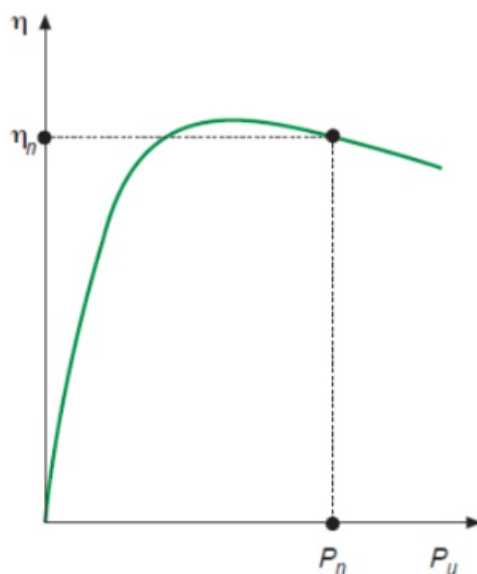


Figura 43. Característica de rendimiento

- ✓ Característica mecánica: Como varía el par en función de la velocidad del motor.

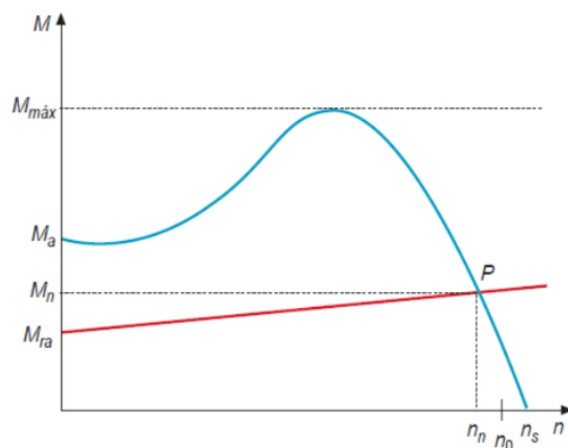


Figura 44. Característica mecánica

3.1.2.2 Motores eléctricos de corriente continua

Los criterios de clasificación de los motores de corriente continua son muy variados. Los tipos de máquinas de corriente continua se irán explicando en los siguientes puntos, pero voy a introducir unos puntos, donde ver los tipos que estudiamos.

- ✓ Excitación independiente:
 - Imanes permanente.
 - Electromagnético (excitación independiente).
- ✓ Autoexcitado:
 - Serie.
 - Shunt (paralelo).
 - Compound.

El diseño del motor de corriente continua clásico es un dispositivo que cambia la energía eléctrica en energía mecánica. Esto es válido para cualquier motor eléctrico, si el motor es de corriente continua o de corriente alterna. Un motor de corriente continua tiene una bobina que puede girar en un campo magnético. La intensidad en la bobina se suministra a través de las escobillas que hacen contacto con el anillo partido conocido como conmutador en movimiento. La bobina se encuentra en un campo magnético constante, esta forma más simple es la de imanes permanentes.

En otros tipos de motores de corriente continua, como el motor en serie, los imanes permanentes se sustituyen las bobinas se sustituyen por la propia producción del campo magnético al aplicar corriente a este motor. Las fuerzas ejercidas sobre el conductor de la intensidad generan un campo magnético creando norte y sur. Este magnetismo crea una fuerza sobre la bobina. Como se aplica corriente a la armadura, se crea un norte y un sur opuesto, haciendo que estos se repelen o atraen, creando un movimiento de rotación. Los polos opuestos se atraen y los polos iguales se repelen.

3.1.2.2.1 Ecuaciones características

Se tiene una serie de ecuaciones características de los motores de corriente continua, pero a parte existen particularidades de los distintos tipos de motores dentro de corriente continua.

- ✓ Tensión en bornes del motor:

$$U = E + I \cdot R \quad (4)$$

- ✓ Valor de la fuerza contraelectromotriz:

$$E = k \cdot n \cdot \Phi \quad (5)$$

- ✓ Velocidad o frecuencia de rotación:

$$n = \frac{E}{N \cdot \Phi} \quad (6)$$

- ✓ Potencia absorbida por el motor:

$$P_a = U \cdot I \quad (7)$$

- ✓ Potencia útil suministrada por el eje del motor:

$$P_u = E \cdot I \quad (8)$$

- ✓ Par en el eje del motor:

$$M = k \cdot I \cdot \Phi \quad (9)$$

- ✓ Potencia mecánica útil:

$$P_u = P_a - P_p \quad (10)$$

✓ Par útil:

$$M_u = \frac{P_u}{\omega} \quad (11)$$

✓ Rendimiento del motor:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (12)$$

3.1.2.2.2 Motor excitación independiente

El motor con excitación independiente posee la fuente de alimentación del devanado inductor ajena a la propia máquina. Es el más adecuado para cualquier tipo de regulación, por la independencia entre el control por el inductor y el control por el inducido.

3.1.2.2.3 Motor serie

El motor de corriente continua serie es uno de los más populares. Este tipo de motor desarrolla una gran cantidad de fuerza de rotación, llamado par, desde el punto muerto. Debido a esta característica el motor serie se puede utilizar en muchas aplicaciones de tracción; este motor funciona muy bien en el vehículo eléctrico. El nombre de motor serie es debido a que su campo de devanado está conectado en serie con el inducido. La intensidad debe fluir a través de las bobinas de campo y la propia armadura. Como resultado, la corriente de campo y la de inducido son iguales. Si el hierro del motor se mantiene a saturación moderada, el flujo será casi proporcional a dicha intensidad. Las corrientes que son pesadas circulan directamente desde la alimentación a las bobinas de campo. Para transportar una carga grande, los devanados de campo son muy gruesos y tienen pocas vueltas. Por lo general, los devanados son de cobre, este material disipa muy bien el calor producido por el fuerte flujo de corriente tan eficaz.

✓ Par

El motor serie puede desarrollar una enorme cantidad de par en el arranque. El par varía con el valor de la intensidad al cuadrado. En el arranque de un motor serie, no hay fuerza contraelectromotriz para limitar el flujo de corriente a la armadura. Los valores de par de arranque pueden superar con creces las especificaciones

indicadas del motor en la hoja de características. Cuando se utiliza un motor serie, es posible que se limite la corriente de arranque. Debido al gran par de arranque, es el atractivo para sus aplicaciones de vehículo eléctrico. A medida que aumentan las rpm del motor serie, se llegará a un punto en el que par empezará a descender. Ese punto es cerca del límite de rpm del motor.

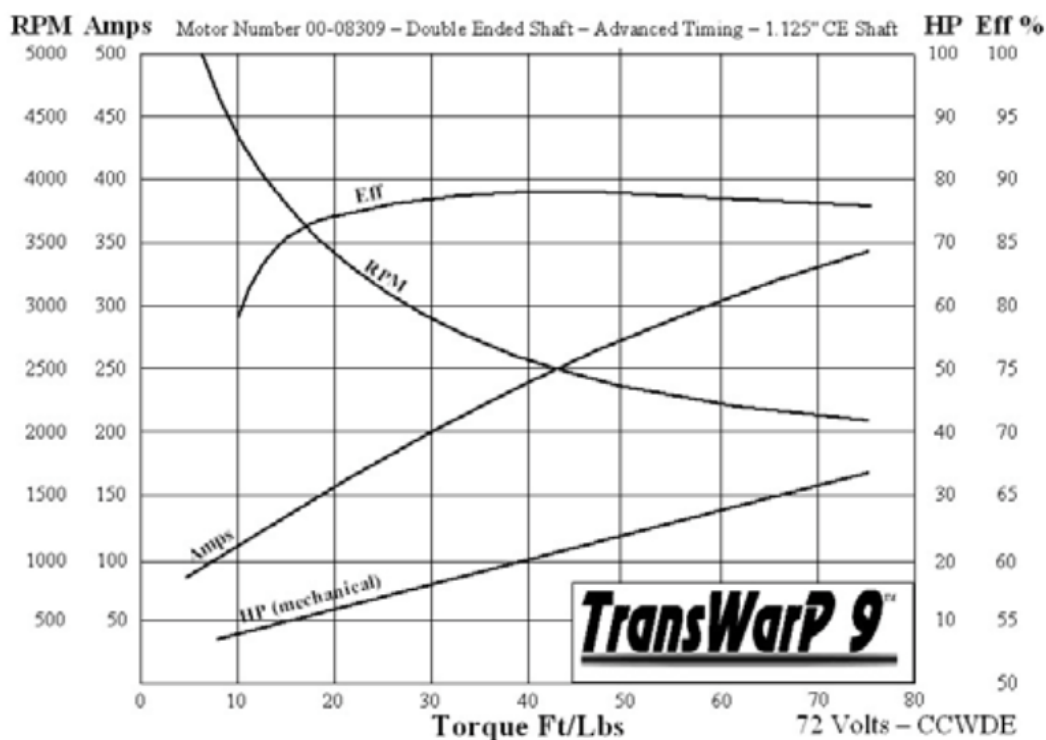


Figura 45. Curvas características de un motor excitación serie

✓ Velocidad

Una desventaja importante del motor serie está relacionada con la velocidad característica. La velocidad de un motor serie sin carga conectada a él aumenta hasta el punto donde el motor puede llegar incluso a sufrir daños, por lo general daños en los rodamientos o en los devanados fuera de la ranuras de la armadura. Igualmente, algún tipo de carga debe estar conectado a un motor serie o alguna forma de limitar la velocidad del motor debe estar controlado antes de encender el motor. Cuando se acelera el motor serie, la corriente disminuye en la armadura, la reducción es en parte a la fem para limitar la velocidad. La reducción del campo puede provocar que el motor se acelera y se rompa.

La forma más sencilla de evitar esto es siempre tener conectada una carga en el motor. Importante instalar un dispositivo de limitación de la rpm. Los controladores tienen la capacidad de cortar la alimentación al motor cuando se alcanzan los límites prefijados.

✓ Reducción del campo magnético

La reducción del campo magnético es una manera de controlar la velocidad del motor en serie. Si se coloca una resistencia en paralelo con el devanado de campo del motor serie, desvía una parte de la intensidad a través de la resistencia. Si se mantiene la intensidad de campo de un 50% o menos de la corriente total, se podrá ganar entre un 20% y un 25% de la velocidad con un par moderado. La mayoría de los controladores utilizan reducción de campo magnético entre otras capacidades.

✓ Inversión

En un motor serie, la corriente que fluye a través del campo fluye a través de la armadura invirtiendo la polaridad de la corriente; sin embargo, no se puede invertir la dirección del motor. Para invertir el motor, es necesario adaptar o cambiar la dirección del flujo de corriente al devanado de campo con respecto a la armadura o la armadura con respecto al devanado de campo.

✓ Frenado regenerativo

Todos los motores presentan la capacidad de actuar como generadores, mediante la creación de una fuerza contraelectromotriz. El frenado regenerativo es una manera de utilizar el motor eléctrico para reducir la velocidad de su vehículo sin utilizar frenos. Mediante el uso del motor eléctrico para reducir la velocidad de la motocicleta en una pendiente descendente, se almacena la energía que sino se desperdicia en modo de calor en los frenos. Una forma de almacenar la energía mecánica que de otra forma es desperdiciada. Esta energía es almacenada en las baterías. Con el frenado regenerativo, tenemos la capacidad de almacenar la energía y aprovechar la energía potencial que de otra manera sería desperdiciada colocando esta energía en las baterías para poder seguirla aprovechando.

Hace un tiempo los motores serie mostraban propiedades de generador inestable y por lo tanto había menos posibilidades de utilizarlos como generador o frenado regenerativo. Hoy, han sido mucho los avances de la tecnología y la programación de los controladores de motor. El frenado puede ser controlado bien con la maneta de la motocicleta o con el control del propio acelerador.

3.1.2.2.4 Motor shunt

El motor de corriente continua paralelo es similar al motor serie en su construcción básica, con la excepción de los devanados de campo y la conexión a la armadura. El motor de derivación o shunt está conectado en paralelo con el inducido en lugar de en serie. Puesto que el devanado de campo se coloca en paralelo con el inducido, se llama una derivación de bobinado, y el motor se llama un motor shunt. Los arrollamientos de la bobina de campo consisten en cables de pequeño diámetro con más enrollamiento que los del motor serie. Dado que esta bobina consta de más vueltas de enrollamiento, tiene la característica de producir un campo magnético excepcionalmente fuerte.

El motor shunt tiene algunas diferentes características respecto al motor serie. Desde la bobina de campo en shunt consta de enrollamiento de un diámetro menos y por lo tanto no puede manejar una gran cantidad de intensidad, lo que significa que el motor shunt desarrolla un par de arranque bajo. Al tener un bajo par de arranque, habrá que disminuir la carga del eje en el arranque.

La armadura para el motor shunt es similar a la del motor serie para producir el campo magnético, haciendo que el eje del inducido y la carga empiece a girar. Debido a la resistencia de muchas espiras de cable, la bobina de derivación mantiene un bajo flujo de corriente. Cuando la armadura empieza a girar, se producirá una fem. La fem disminuirá la corriente en el inducido a medida que aumenta la velocidad. La cantidad de corriente del inducido se dibujará en función del tamaño de la carga cuando el motor alcanza la velocidad máxima. Dado que normalmente la carga es pequeña, la corriente en la armadura será pequeña. A diferencia del motor serie, la velocidad del motor shunt se mantendrá bastante constante cuando el motor alcanza las máximas rpm. Hay que recordar que la eficiencia del motor shunt será baja cuando se opere por debajo de su tensión

nominal, también producirá un sobrecalentamiento del motor, por lo que habrá que proporcionar la refrigeración del motor.

Cuando el circuito exterior está abierto, la máquina tiene excitación máxima porque toda la corriente producida se destina a la alimentación del circuito de excitación; por lo tanto, la tensión en bornes es máxima. Cuando el circuito exterior está cortocircuitado, casi toda la corriente pasa por el circuito del inducido y la excitación es mínima, la tensión disminuye rápidamente y la carga se anula. Por lo tanto, un cortocircuito es la línea no compromete la máquina, que se des-excita automáticamente, dejando de producir corriente.

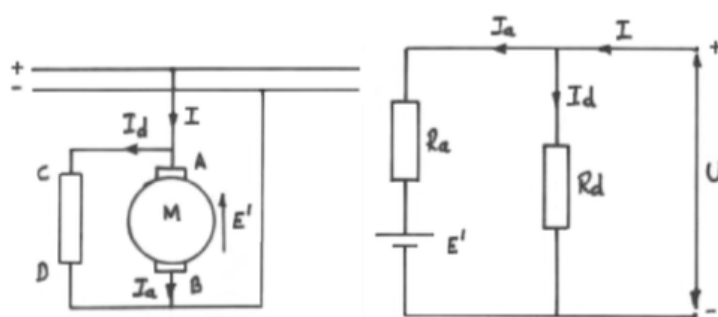


Figura 46. Esquema eléctrico de un motor shunt

Este tipo de motores, las bobinas inductoras (CD) van conectadas en paralelo derivación con las bobinas inducidas (AB). En la siguiente figura, de toda la corriente absorbida por la máquina, una parte circula por el inducido y la otra por el devanado.

✓ Par

Aumenta el par de la armadura así como las ganancias de velocidad del motor. Esto es así porque el par del motor shunt es directamente proporcional a la corriente del inducido. Cuando el motor está iniciándose y el número de rpm es muy bajo, el par es reducido. Después cuando el motor alcanza plena rpm, el par alcanza su máximo potencial. El motor shunt es una buena elección para aplicaciones donde se requiere velocidad constante. La velocidad del motor shunt se mantiene bastante constante en toda el área de distribución de la carga y cae ligeramente cuando tenemos la presencia de la corriente más grande. Para aplicaciones como es el caso

de nuestra motocicleta eléctrica, podemos necesitar una relación de transmisión más baja o una transmisión para compensar el bajo par de arranque.

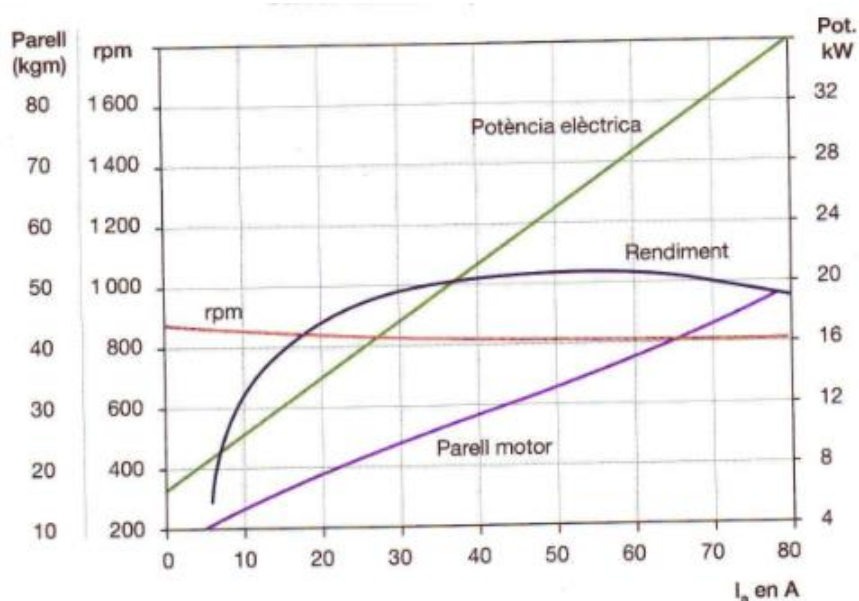


Figura 47. Curvas características de un motor shunt

✓ Velocidad

Cuando el motor shunt alcanza plena rpm, su velocidad se mantendrá razonablemente constante. La razón por la que la velocidad permanece constante es debido a la característica de carga de la bobina de la armadura y de derivación. La capacidad del motor shunt para mantener un rpm a alta velocidad cuando los cambios de carga se debe a la característica del campo de derivación y la armadura. Puesto que la armadura comienza a producir una fem tan pronto como empieza a girar, se utilizará la parte posterior de la fem para mantener su rpm a alta velocidad. Si la carga aumenta ligeramente y hace que el eje actúe como reductor de velocidad de la armadura, menos fuerza contraelectromotriz se producirá, lo que hará que circule más corriente. La corriente extra proporciona al motor con el par de torsión adicional requerido para recuperar su rpm cuando esta carga se incrementa ligeramente. La velocidad del motor puede variarse de dos maneras:

- La primera variando la velocidad de corriente suministrada al campo en derivación.
- La segunda, controlando la cantidad de corriente suministrada a la armadura.

El control de la corriente al campo en derivación permite que el número de revoluciones va a cambiar el 10% y el 20% cuando el motor está en plena rpm. Las rpm del motor shunt también puede ser controlador mediante la regulación de la tensión que se aplica a la armadura. Esto significa que si el motor funciona con menos tensión, funcionará a menos rpm que plena carga. También se tiene que tener en cuenta que el par del motor se reduce cuando se opera por debajo del nivel de tensión completo. Además, con la tensión más baja producirá más calentamiento para el motor.

✓ Reducción del campo magnético

El debilitamiento del campo magnético se logra aumentando o disminuyendo ligeramente la tensión aplicada al campo. La armadura sigue teniendo plena tensión aplicada a la misma, mientras que se regula la corriente al campo en derivación. Cuando se disminuye la corriente del campo en derivación, la rpm del motor aumentará ligeramente. Cuando se reduce la corriente del campo en derivación, la armadura debe girar más rápido para producir la misma cantidad de fuerza contraelectromotriz para mantener el giro de la carga. Si la corriente de campo en derivación se incrementa ligeramente, la armadura puede girar a rpm más lento y mantener la cantidad de fuerza contraelectromotriz para producir la corriente de armadura para conducir la carga.

✓ Inversión

El sentido de giro de un motor shunt de corriente continua puede ser invertido al cambiar la polaridad de cualquiera de las bobinas de la armadura o la bobina de campo. En esta aplicación, la bobina de la armadura generalmente se cambia, como en el caso del motor serie. En la mayoría de las aplicaciones, los cables se conectan directamente a la fuente de alimentación, por lo que su polaridad no cambia. Dado que la polaridad del campo se ha mantenido igual, la polaridad de la armadura debe de ser invertida. Una vez que la polaridad de la armadura se conecta, el motor empezará a girar en dirección contraria. Lo mismo se puede lograr cambiando la polaridad de los cables de campo.

✓ Frenado regenerativo

El motor shunt es directamente adaptable para su uso como generador. De hecho, la mayoría de los generadores se desvían de motores, conocidos como generadores de derivación. El motor shunt tiene un alto grado de estabilidad cuando se utiliza para el frenado regenerativo. La tensión y la potencia siguen siendo lineal.

3.1.2.2.5 Motor compound

El motor compound es una combinación del motor shunt y del motor serie, que combina las características de ambos. Tiene un devanado de campo serie que está conectado en serie con el inducido y un campo de derivación, que está en paralelo con el inducido. Las características pueden ser mezcladas mediante la variación de la combinación de los dos devanados. Estos motores se utilizan generalmente cuando se requieran condiciones severas de partida y se requiere una velocidad constante al mismo tiempo. Un motor compound se puede accionar con seguridad, sin carga y puede tener las características de velocidad de un motor shunt y las características de partida de par de un motor serie. El motor de corriente continua compound combina las propiedades de ambos con algunas ligeras compensaciones en el par o la velocidad.

En virtud de la existencia del devanado en serie, que ayuda al devanado en derivación, el flujo magnético por polo aumenta con la carga, de modo que el par se incrementa con mayor rapidez y la velocidad disminuye más rápidamente que si no estuviera conectado el devanado en serie; pero el motor no se puede desbocar con cargas ligeras, por la presencia de la excitación en derivación.

Existen dos líneas de este tipo de motores como se detalla a continuación.

El motor compound largo es uno de los motores de corriente continua más común, ya que proporciona un alto par en el arranque y una buena regulación de la velocidad a velocidades altas. Puesto que el campo de derivación está conectado con polaridad similar en paralelo con el campo magnético, ayudando al campo de serie y al campo inducido, se llama acumulativo. Cuando el motor está conectado de esta manera, se puede comenzar incluso con una carga grande y luego funcionar sin problemas cuando la carga varía ligeramente. Los motores compound cortos utilizan el mismo motor y devanados como el motor compound largo, pero están conectados de una manera ligeramente diferente para proporcionar ligeramente diferentes

características de velocidad y par de funcionamiento. Las características del motor compound corto se parecen menos a las del motor shunt y más parecidas a las del motor serie. Esto significa que el motor tenderá a aumentar la velocidad cuando la carga se reduce, al igual que en un motor serie. Su velocidad también se reducirá más que la de un motor compound largo cuando la carga aumenta a plena rpm. Estas dos características hacen que el motor corto sea menos deseable que el motor largo para la mayoría de aplicaciones.

✓ Par

El motor compound tiene mayor par que un motor shunt, debido a la excitación serie. Además, tiene una velocidad bastante constante debido al campo shunt del bobinado. Dependiendo de si el motor está conectado en el diferencial o en el acumulativo, se producirán diferentes valores de par.

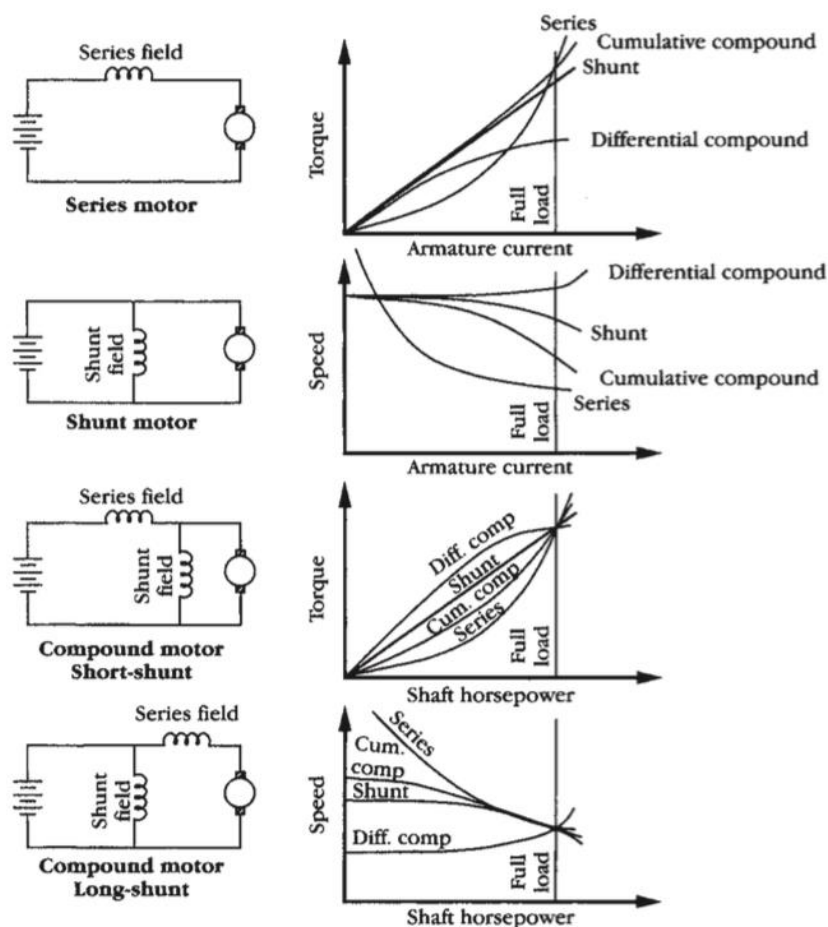


Figura 48. Curvas de los motores de CC serie y shunt

✓ Velocidad

La velocidad de un motor compound se puede cambiar muy fácilmente mediante el ajuste de la cantidad de tensión aplicada a la misma. Desde la llegada de los componentes de estado sólido y controles de microprocesador, la velocidad se controla fácilmente. Se puede ver que la velocidad de un motor compound diferencial aumenta levemente cuando el motor está atrayendo la mayor corriente a través de la armadura. El aumento de la velocidad se produce porque la corriente adicional entra en el diferencial del bobinado provocando que el campo magnético del motor se debilite ligeramente.

✓ Inversión

Cada tipo de motor compound se puede invertir cambiando la polaridad del devanado de inducido. Si el motor tiene interpolos, la polaridad del interpolo debe ser cambiado al cambiar la polaridad de la armadura. Dado que el interpolo está conectado en serie con el inducido, debe ser revertida cuando la armadura se invierte. Los interpolos ayudan a cuidar la armadura y las escobillas porque no hay formación de arcos eléctricos.

3.1.2.2.6 Motor de imanes permanentes

Los motores de corriente continua de imanes permanentes representan la simplicidad del diseño del motor de corriente continua. El diseño del imán permanente se utiliza en infinidad de aplicaciones y cada vez más en la actualidad. Las aleaciones de las que están hechos los imanes permanentes son a menudo muy difícil de manejar; muchos son mecánicamente duros y frágiles. Los polvos con los que se fabrican son aglutinantes de resina y después se comprimen y se tratan al calor. Los imanes permanente que producen el flujo magnético más grande con una masa pequeña son los imanes de tierras con base de neodimio y samario. Sus altos campos magnéticos y su peso ligero son útiles para demostrar la levitación magnética de los materiales superconductores.

Los motores de imanes permanentes se han convertido cada vez más populares debido a las nuevas tecnologías y los avances de los materiales magnéticos. Los diseños del motor son más pequeños, más ligeros y más potentes. Los motores de imanes permanentes tienen similitudes con los motores de derivación como velocidad similar, el par, macha atrás y capacidad de frenado

regenerativo. Con el avance de la tecnología de los materiales los imanes permanentes han aumentado en la fuerza magnética. Con todos estos avances, el motor de imán permanente ha superado las curvas más conocidas de velocidad del motor shunt y par motor en arrancada. Estos motores son capaces de generar varias veces más par de arranque que los motores shunt.

3.1.2.2.7 Motor universal

El motor de corriente continua universal es similar a un motor de corriente continua regular pero está diseñado para funcionar ya sea de corriente continua o de corriente alterna monofásica. El estator y el rotor del motor están conectados en serie a través del colector del rotor. Por lo tanto, el motor universal es también conocido como un motor serie de corriente alterna o un motor de corriente alterna conmutador. El motor universal se puede controlar ya sea como unidad de fase de ángulo o conducción chopper. En la aplicación fase de ángulo, la técnica del control de ángulo se utiliza para ajustar la tensión aplicada al motor. Un desplazamiento de la fase son impulsos para variar la tensión eficaz del motor. Requiere un uso de un triac, un interruptor electrónico bidireccional que puede conducir la corriente en cualquiera de las direcciones. Con la aplicación de un chopper, la técnica de modulación de ancho de pulso (PWM) se utiliza para ajustar la tensión aplicada al motor. La modulación del ciclo de trabajo PWM permite que la tensión eficaz varíe. Si comparamos con el método de fase de ángulo, con el chopper requiere una etapa de potencia más complicada con un rectificador de entrada, un interruptor de encendido y un diodo de potencia rápido. Las ventajas son una mayor eficiencia, menos ruido acústico y una mejor compatibilidad electromagnética, comportamiento EMC.

3.1.2.3 Funcionamiento de los motores con escobillas

Estos motores están formados por dos partes fundamentales, una parte móvil y otra estática. La parte que no se mueve en la carcasa del motor, en cuyo interior y unidos a ella están situados dos imanes permanentes. Esta parte es el estator.

En el interior de esa carcasa está la parte móvil (rotor) que también se denomina inducido. Está formado por un eje metálico con tres polos que sobresalen, y en cada polo está enrollado en forma de bobina el hilo conductor. Cuando la corriente eléctrica pase por la bobina, se producirá un campo magnético que

interaccionará con el campo magnético que producen los imanes del estator. La consecuencia es una fuerza que hará que gire el inducido, y por tanto el eje del motor. De esta forma se transforma la energía eléctrica, que llega al motor, en energía mecánica.

La corriente llega al inducido a través de tres delgas que están situadas en su parte superior y forman lo que se denomina el conmutador o colector. A su vez las delgas reciben la electricidad de dos escobillas, que son unos contactos deslizantes que rozan las delgas mientras el rotor gira. Como una escobilla está conectada al polo positivo de la corriente y otra al negativo, la corriente que transmiten a las tres delgas hace que el inducido gire. Son necesarias las tres delgas para garantizar que el rotor se mueva, ya que si solo hubiera dos, el rotor podría no iniciar el giro al quedar en posición perpendicular a las fuerzas magnéticas de los imanes. También hemos de saber que las escobillas se mantienen pegadas a las delgas mediante la presión de sendos muelles. El inducido gira dentro del estator sobre rodamientos.

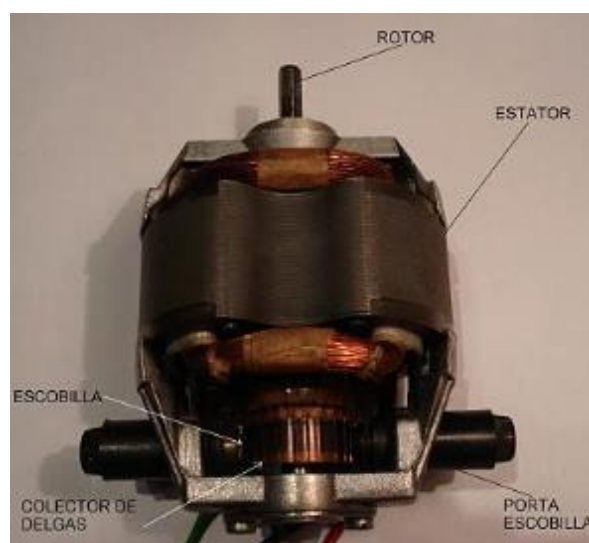


Figura 49. Esquema de un motor CC con escobillas

3.1.2.4 Funcionamiento de los motores sin escobillas

En los motores sin escobillas o Brushless el rotor es la parte móvil que está compuesto por el eje y los imanes permanentes y en la carcasa o estator es donde se encuentra el bobinado del hilo conductor que no se mueve.

En los motores sin escobillas, la corriente eléctrica pasa por el hilo conductor que está bobinado en la carcasa y produce el campo electromagnético que hace

girar a los imanes permanentes y por tanto al eje al que están unidos. Por ello ni las escobillas ni el conmutador son necesarios, ya que la corriente va al estator. Además, en los motores sin escobillas no existen las tres delgas que eran las que obligaban al rotor a moverse cualquiera que fuera su posición. Por ello en los motores sin escobillas es el variador electrónico el que controla en qué posición se encuentra el rotor para darle la corriente temporizada adecuada. Esto se realiza mediante sensores instalados en el motor o a través de la respuesta que obtiene cuando envía una corriente lineal al motor. Debido a esto los variadores electrónicos de los motores sin escobillas han de ser mucho más complejos que los usados en motores con escobillas, ya que han de procesar la información del funcionamiento del motor a tiempo real.

La mayoría de los fabricantes hoy en día coinciden en que el motor más adecuado para llevarlo a cabo al montaje en una motocicleta eléctrica es un motor Brushless (sin escobillas). Esto es debido a que mejora las características con respecto al motor c.c. con colector. Los motores Brushless requieren de un mantenimiento mínimo al no tener escobillas, son más compactos y se puede acceder a los bobinados para cambiar su configuración en caso de que tengamos que cambiar su configuración.

3.1.2.4.1 Ventajas de un motor Brushless con respecto a uno de escobillas

✓ Potencia.

La ventaja que proporciona una mayor potencia en la gran cantidad de aire que circula a través de los discos del motor y evita grandes calentamientos, los devanados son de hierro, que permiten un alto par y un motor de gran alcance con una alta eficiencia. Esto proporciona un amplio rango de operación en un dispositivo compacto. Podemos obtener rpm más elevadas, debido a que no tendríamos problemas de que las escobillas reboten. Obtenemos mucho más par y a la vez ahorro de energía de un 30%.

✓ Mantenimiento reducido y duradero.

Evitamos la conmutación entre el contacto del inducido y las escobillas. La conmutación se realiza por medio de controladores electrónicos mediante el variador de velocidad, por lo que no se produce rozamiento mecánico ni pérdidas de energía y se consigue que los motores sin escobillas tengan una eficiencia muy superior, se habla de un 90%, frente a un 60% de los motores con escobillas. El ciclo de vida del motor solo está limitado por los cojinetes y estos permiten hasta 20000 horas de funcionamiento. Estos motores están diseñados para operar en diversas situaciones.

✓ Dinámico.

Con sus imanes autosuficientes los motores que llevan dos estator, tienen un bajo par de inercia, lo cuál tiene un gran abanico de aplicaciones dinámicas. Además, tiene un par de rotación mínimo dentado. Esto permite un control preciso y sencillo de los accionamientos dinámico. La masa que gira es menor, casi la mitad, por lo que aceleran más rápidamente. Los imanes son menos pesados, el funcionamiento es más suave al reducirse vibraciones.

✓ Plano.

Los motores se construyen muy planos si la variante que montamos es solo con un estator. Esto ahorra espacio de montaje en la dirección axial y reduce el peso considerablemente.

Los motores sin escobillas son más sencillos y por ello más fiables.

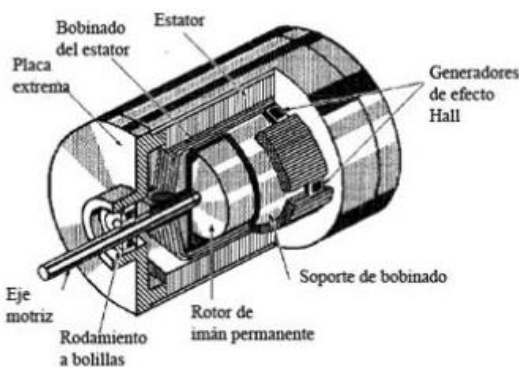


Figura 50. Esquema de un motor Brushless

3.1.2.4.2 Principio de funcionamiento

En el motor Brushless de corriente continua la conmutación se realiza en lazo cerrado. El circuito de control es el que determina el instante en el que hay que alimentar cada bobina; a este modo se le llama autopilotado.

Para que el motor gire de forma autónoma es preciso alimentar los devanados del estator de forma alternativa.

3.1.2.4.3 Potencia específica

En la actualidad, y día a día se está constantemente investigando sobre nuevos avances y nuevas tecnologías, con el objetivo de conseguir una serie de fines. Uno de los fines que intentan conseguir es el aumento de la potencia específica de los accionamientos eléctricos.

Este parámetro resulta esencial en muchos casos, como es el caso del coche eléctrico, un campo de investigación de presente y de futuro, y que actualmente se anuncian cosas relacionadas con el tema del coche eléctrico.

Para obtener más vatios por kilogramo se combinan las nuevas técnicas con procedimientos más enérgicos de refrigeración, agua o aceite.

A la hora de evaluar la potencia específica en el peso, habrá que tener en cuenta debido a la importancia que tiene el sistema de refrigeración en un motor dentro de los elementos auxiliares.

Siempre hay que tener cuidado a la hora de trabajar con un motor con los datos que nos facilitan los suministradores, en los que siempre ellos los presentan de forma muy positiva, claro está.

En un motor de corriente continua, en temas de refrigeración, si está refrigerado por agua, la potencia específica, oscila entre 0,1-0,2 kW/kg, para motores de unas decenas de kW. En cambio si se refrigeran por agua, la potencia en este caso puede subir a 0,6 e incluso 0,9.

3.1.2.4.4 Configuraciones del rotor

Permite además diferentes configuraciones del rotor. (rotor externo, rotor interno y motor de disco).

En el caso externo, del rotor los devanados controlados por interruptores están en el interior de forma fija, mientras que los imanes están en el exterior y giran.

De la elección de la combinación se obtienen unos beneficios dependiente de que configuración elegir.

El motor de rotor interno se beneficia de la disipación externa del calor, dado que los devanados están en el exterior y el calor generado en los mismos se disipa más fácilmente. Así mismo, el rotor está más protegido debido a estar encapsulado dentro del motor

El motor de rotor externo es ideal para aplicaciones en que se requiera una consideración extra para el ruido producido por el motor, dado que es más silencioso.

El motor de disco es ideal para aplicaciones en la que la altura del motor sea crítica y se requiera de un motor compacto.

Otra característica importante a la hora de elegir el motor adecuado a la aplicación es el número de polos del mismo. Los polos son los imanes que dispone el rotor del motor. Así, a más número de polos, mayor control de la posición y de la velocidad del motor.

Las características eléctricas son básicamente la potencia eléctrica, el par motor, la corriente de alimentación de los devanados y la tensión del motor.

3.1.2.4.5 Motores Brushless de CA

Para tratar el tema de los motores brushless de corriente alterna, se habla de motores síncronos polifásicos de imanes permanentes. No tienen la característica de deslizamiento como se ha enunciado en las ecuaciones de los motores de inducción.

Este tipo de motor tiene una alta inercia del rotor y por lo tanto se ha de reducir de alguna manera, para ello se lleva a cabo la realización de agujeros. Se puede llegar a reducir en 10 veces menos.

Este tipo de motores Brushless trabaja a partir de varios sensores que se encargan de controlar el motor y la posición del eje para el correcto funcionamiento.

Al tener una gran capacidad para obtener la correcta posición del motor y de la velocidad de rotación, se traduce en que el motor es muy fácil de controlar y presenta un amplio rango de características de funcionamiento cuando se le acoplan los circuitos electrónicos de control y un sistema de impulsión. El motor de CA es muy similar al de CC, aunque el motor de CC utiliza un mayor número de sensores.

La conmutación se realiza o bien con sensores hall o sin sensores:

- ✓ Sensores Hall: Este tipo de conmutación es simple y fácil y se puede utilizar para arrancar un motor a velocidades bajas.

Los sensores de este tipo se utilizan en motores de CC debido a que presentan una desventaja que los sensores deben estar alejados del motor y incluir un hardware adicional.

- ✓ Sin sensores: La fuerza electromotriz inducida en el devanado que está en reposo se utiliza para la conmutación. Esta conmutación hace más simple el diseño por no tener sensores, pero hace que el algoritmo sea más complejo.

3.1.3 PARTES BÁSICAS QUE COMPONEN LOS MOTORES

A continuación vamos a realizar la descripción física de una máquina de corriente continua genérica de dos polos, que puede actuar como motor y como generador.

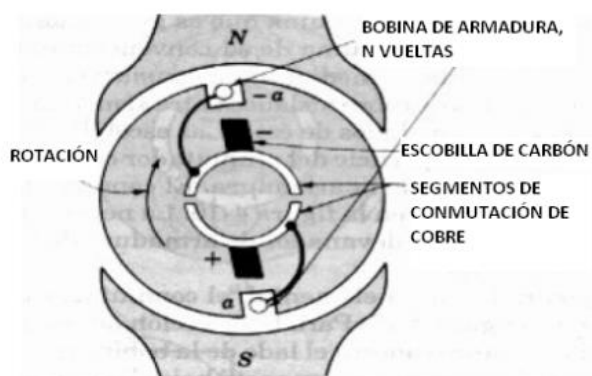


Figura 51. Máquina de CC elemental con conmutador

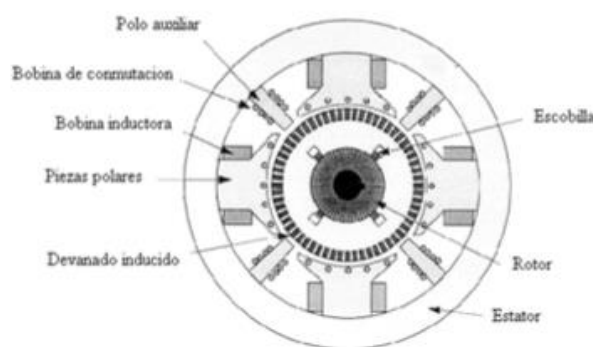


Figura 52. Partes de un motor de CC

Estas partes que se explican son similares en algunos diseños de motores de corriente continua y de corriente alterna.

3.1.3.1 Armadura

La armadura es la parte principal del motor eléctrico que normalmente gira sobre dos rodamientos, creando el par. La rotación se produce por la intensidad que circula por los devanados de la bobina. La armadura normalmente consiste en un eje rodeado de piezas de acero laminado llamado núcleo del inducido. El núcleo de la armadura se divide en secciones con espiras de cobre recubierto. Cuando se aplica intensidad a uno de los devanados, se crea un campo magnético, lo que produce el movimiento. La armadura tiene un doble papel. Por un lado para llevar la intensidad

que atraviesa el campo, creando el par del eje (en máquinas rotativas) o la fuerza (en una máquina lineal) y por otro lado generar una fuerza electromotriz (fem).

La carcasa o la armadura exterior del motor se construye de aluminio, normalmente el mismo material que el seleccionado para las tapas del rotor.

3.1.3.2 Estator

Mediante el devanado inductor o de excitación es el encargado de generar y conducir el campo magnético de excitación. El estator está formado por una corona de material ferromagnético, denominada culata, en cuyo interior se encuentran dispuestos, en número par, unos salientes provistos de expansiones en los extremos, denominados polos. En torno a los polos se arrollan los devanados de excitación que generan un campo magnético cuando circula por ellos una corriente continua.

3.1.3.3 Rotor

El rotor está constituido por una pieza cilíndrica ranurada, formada por chapas de material ferromagnético para disminuir las pérdidas en el circuito magnético. En las ranuras del rotor se aloja el devanado inducido de la máquina, constituido por bobinas de hilo o de pletina de cobre; este devanado está cerrado sobre sí mismo, pues el final de la última bobina se encuentra conectado con el comienzo de la primera.

Si se trata de construir tanto el rotor como el estator, debemos de saber que dichos elementos han de ser contruidos con un material magnético, para facilitar el paso del campo magnético. Por lo tanto para la construcción del estator se podría seleccionar una chapa magnética de acero de silicio con aislamiento de la chapa magnética y con un acabado superficial determinado.

La construcción del rotor está compuesta de más piezas, pero como ya hemos dicho debe de tener material magnético. El material seleccionado para la construcción del estator es ideal para la construcción de las piezas polares que componen el rotor.

Si el rotor está formado por imanes de ferritas, el material en concreto proporciona una conductividad eléctrica baja, ya que la formación de dichos imanes

corresponde a un 80% de óxido de hierro con hematita o magnetita junto con otros óxidos como puede ser el óxido de bario u óxido de estroncio. Otra de las características de la ferrita es que son duras y frágiles.

Y por último, la partes que cierran el rotor, que son las tapa del rotor, que se puede elegir como material el aluminio ya que se adecua bien a las condiciones de trabajo que exige un motor. Las tuercas que son parte del rotor se escogen de acero inoxidable.

3.1.3.4 Colector de delgas

El colector de delgas es un conjunto de láminas de cobre, llamadas delgas, aisladas entre sí por una capa de mica y que giran solidariamente con el rotor. Las delgas están conectadas eléctricamente a las bobinas del devanado inducido y por medio de ellas dicho devanado se puede conectar con el exterior. Cada delga está unida eléctricamente al punto de conexión de dos bobinas del devanado inducido, de tal forma que habrá tantas delgas como bobinas simples posea el devanado.



Figura 53. Esquema de un colector de delgas de un motor de CC

3.1.3.5 Conmutador

El conmutador normalmente consiste en un conjunto de segmentos de cobre fijos alrededor de la circunferencia de la armadura. Cada segmento del colector está separado. Las escobillas se encuentran fijadas al bastidor del motor eléctrico. Una fuente externa suministra la corriente a las escobillas. La función del conmutador es de interruptor para cada segmento de la armadura. La corriente fluye solamente a través del devanado de la armadura con la que las escobillas están en contacto. Este flujo de corriente crea un fem, la producción de un par de torsión y la rotación

del eje. A medida que el eje gira, las escobillas en contacto con el siguiente segmento del conmutador, alternando los polos magnéticos y continuando la rotación de la armadura.

3.1.3.6 Polos de campo

Los electroimanes e imanes permanentes se conocen como polos de campo. El electroimán se crea enrollando cable. Los polos normalmente están curvados para que coincida con la circunferencia de la armadura. Los polos pueden estar compuestos de un imán permanente o un electroimán. Para la mayoría de los motores eléctricos, se utiliza un electroimán; en motores más pequeños, se utilizan en ocasiones los imanes permanentes. La fuerza de un electroimán está determinada por una serie de factores:

- ✓ La fuerza es proporcional al número de vueltas de la bobina.
- ✓ La fuerza es relativa a la corriente que fluye en la bobina.
- ✓ La fuerza es inversamente proporcional a la distancia que hay en el entrehierro entre los polos.

En general, un electroimán se considera mejor que un imán permanente, ya que puede producir campos magnéticos más fuertes, y su fuerza se puede controlar variando el número de vueltas de la bobina o cambiando la intensidad que circula a través de la bobina.

3.1.3.7 Escobillas

Las escobillas están hechas de un compuesto de carbono, por lo general de forma rectangular. Normalmente, las escobillas tienen añadido cobre para ayudar a la conducción, y se suele añadir otro material para reducir el desgaste. Las escobillas se colocan en un lugar seguro del motor y suele ser al final de la caja del motor. El montaje, mientras están las escobillas en su lugar, utiliza un resorte para proporcionar la tensión adecuada para que hagan el contacto adecuado con el colector. Si la tensión es baja, las escobillas rebotan creando un arco y si la tensión es mayor a la adecuada, las escobillas se desgastarán prematuramente. Un extremo de la escobilla en contacto con el conmutador está en buena forma para una mejor transferencia de corriente. En el motor típico, la mitad de las escobillas estarán conectados a la tensión positiva y el resto a la tensión negativa. En la mayoría de los

motores, el número de escobillas será igual al número de polos de campo. Se aplica la corriente a través del cable conectado a las escobillas. Esto permite mayores cargas y flexibilidad de las escobillas. Las escobillas son de fácil reemplazo accediendo por un lado de la carcasa.

El motor de corriente continua clásico presenta algunas limitaciones debido a la presencia de las escobillas cerca del colector. La fricción es uno de los fenómenos que se observan. A velocidades altas, las escobillas tienen problemas para mantener el contacto ininterrumpido con el colector. También a velocidades altas de rotación, las escobillas pueden rebotar en las irregularidades en la superficie del colector, originando chispas. La rotura del contacto eléctrico también causa ruido y las chispas originan además interferencias de radiofrecuencia.

En el caso de que se vaya a construir un motor de escobillas, éstas se construirán de carbón debido a su alta resistencia a la fricción, la baja densidad y sobretodo a sus grandes propiedades de conmutación; desempeña un papel muy importante en el funcionamiento de los motores eléctricos. Por ello se ha de elegir una calidad apropiada en las calidades de carbón para cada caso en particular ya que dependerá en el buen rendimiento del motor además de un menos mantenimiento y conservación de los conmutadores eléctricos. Las calidades de carbón están clasificadas dentro de cuatro grupos principales: carbón grafito, electrografito, grafitos y metal grafito.

3.1.3.8 Conductores

Los conductores que componen el bobinado son de cobre; este material proporciona una baja resistencia al paso de la electricidad, pero además, tiene una alta capacidad de disipación del calor que es muy importante en un motor para así evitar una refrigeración mayor y su bajo coeficiente de dilatación.

3.1.3.9 Distribución del motor

En el motor eléctrico, el campo magnético no es perfectamente uniforme. En cambio, como la armadura gira, induce efectos de campo que arrastran y distorsionan las líneas magnéticas del estator.

Cuando más rápido gira el inducido, mayor será el grado de distorsión del campo magnético. Debido a que el motor eléctrico funciona de manera más eficiente con el campo inducido en ángulo recto con el campo del estator (polos de campo), es necesario atrasar o avanzar la posición de las escobillas para poner el campo del rotor en la posición correcta para estar en un ángulo correcto del campo distorsionado, produciendo una fuerza electromagnética mayor o un par de rotación. Como regla general, las escobillas son neutras cuando se alinean con la bobina de campo. Para avanzar en el tiempo del motor, se deben de mover las escobillas opuestas de rotación del motor una grados dependiendo de la tensión aplicada. Si la sincronización no es perfecta, se refiere a la posición de las escobillas en el motor y a la posición a las que se fijan básicamente por el fabricante. La posición a la que se establecen normalmente por el fabricante es una posición neutra. Esta posición neutra permite que el motor funcione y actúa de manera casi idéntica en sentido antihorario y sentido horario con tensiones normales. Una tensión normal para la mayoría de los motores serie en una disposición temporal neutra es por lo general de 96V. Por encima de este rango, los motores casi siempre deben avanzar en la dirección opuesta a su rotación normal con el fin de reducir la formación de arcos y proporcionar un mayor rendimiento en tensiones mayores. El frenado regenerativo no debe intentarse con motores que tienen un tiempo significativo. La ejecución de un motor avanzado de temporización en inversa a baja velocidad está bien, pero no operan en sentido inverso a altas velocidades o durante cualquier período de tiempo prolongado. Se producirá arco, lo que provocará daños en las escobillas y la armadura.

3.1.4 POTENCIA DE UN MOTOR ELÉCTRICO

Los motores eléctricos son de gran potencia, de otra manera, hay una gran entrega de energía en una fracción muy pequeña de tiempo. Los motores eléctricos tienen un rango continuo de funcionamiento y otro rango intermitente o 5 minutos. Los motores eléctricos tienen la capacidad de utilizar un potencia mayor de 2 a 4 veces la potencia del rango continuo, pero solo por unos minutos. La potencia que hemos hablado de rango intermitente o de 5 minutos es la que se usa para la aceleración de la motocicleta o en el caso de algún pendiente ascendente. Después de poner a la motocicleta en esta situación es muy importante que el vehículo vuelva a la calma del funcionamiento del motor. La potencia nominal aparece en el

motor o el fabricante los muestra en unas hojas de características y gráficas. El rendimiento del vehículo irá en función de la potencia nominal del motor.

Cuando se habla de rango continuo no quiere decir que el vehículo va a circular a velocidad constante, sino que la motocicleta puede desarrollar varias potencias con diferentes velocidades. El control de la velocidad y la carga es una función del controlador del motor que se explicará en el siguiente punto de este TFG. El funcionamiento del motor por encima de la potencia nominal durante un período largo de tiempo sobrecalentará el motor y causará graves daños. Por ejemplo, un motor que tenga definida una intensidad de 100A podrá ser capaz de llegar a circular 300A durante unos minutos, pero si persiste durante un largo de tiempo tendremos problemas de las bobinas, la armadura, las escobillas, causando daños permanentes.

Debemos de seleccionar un motor del tamaño adecuado para ponerlo en funcionamiento. Un motor de pequeño tamaño no funcionará durante mucho tiempo. Un exceso de intensidad creará mucho calor y daños. El motor nos dará un límite y a partir de ahí habrá que buscar un controlador que cumpla con las especificaciones del motor. Cuando el motor alcanza el límite térmico, el controlador se encargará de reducir la energía y el riesgo de daños.

3.1.5 SELECCIÓN DEL MOTOR

Como se puede ver, los motores existen de varios tipos y a su vez distintas variaciones, que da un gran abanico para la selección para la construcción de una motocicleta eléctrica.

3.1.5.1 Consideraciones básicas

- Coste.
- Potencia y par.
- Intensidad.
- Tensión.
- Tamaño.
- Eficiencia.
- Forma.
- Controladores disponibles para trabajar con ese motor.

Tanto los motores de corriente alterna como los de corriente continua se basan en el mismo principio de funcionamiento, el cual enuncia que si un conductor por el que circula corriente eléctrica se encuentra dentro de la acción de un campo magnético, éste tiende a desplazarse perpendicularmente a las líneas de acción del campo magnético.

El conductor tiende a funcionar como un electroimán debido a la corriente eléctrica que circula por el mismo adquiriendo de esta manera propiedades magnéticas, que provocan, debido a la interacción con los polos ubicados en el estator, el movimiento circular que se observa en el rotor del motor.

Como se ha hablado dependiendo del tipo de motocicleta que se quiera construir o aprovechar de su conducción debemos de tener en cuenta algunos parámetros para la elección de unos componentes u otros. En esta ocasión toca elegir el tipo de motor dependiendo si el uso que buscamos es urbano, turismo, campo y competición.

3.1.5.1.1 Motocicleta urbana

Cuando se habla de motocicleta urbana lo primero que se viene a la mente es la conocida scooter. Este tipo de motocicletas data de los años 40 con la conocida Vespa hasta llegar a la infinidad de modelos actuales. Esta motocicleta desarrolla su aprovechamientos en el término urbano, una forma de evitar atascos en el caso de grandes ciudades.



Figura 54. Modelo Vespa años 40

El motor de la scooter se encuentra bajo el asiento con una transmisión variable continua transfiriendo la potencia a la rueda trasera, en algunas ocasiones en una disposición de eje frontal que permite a la parte trasera del motor oscilar verticalmente en conjunción con el movimiento de la rueda trasera. Si realizamos una comparación con el resto de motocicletas, las scooter tienen una carrocería, que incluye una protección frontal para las piernas y unas carcasas que ocultan gran parte de la mecánica.

Estas motocicletas destinadas en su mayoría a ciudades debemos de saber las características a la hora de elección del motor: reducido coste de mantenimiento, gran manejabilidad de la motocicleta, dimensiones pequeñas y bajo precio el motor.

El motor que más utilizan los fabricantes para este tipo de motocicletas es el de corriente continua de imanes permanentes, colocado en la zona lateral sobre el mismo eje de la rueda trasera.

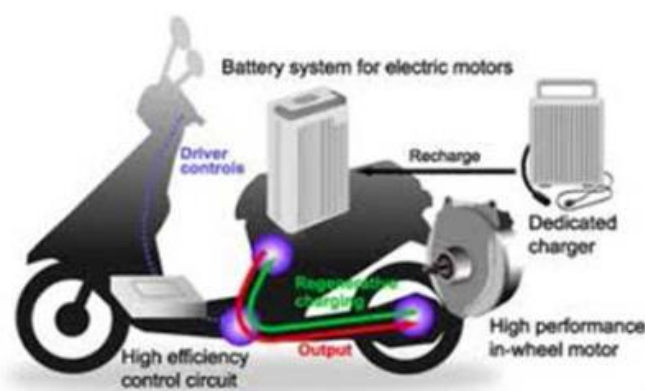


Figura 55. Esquema Scooter

Los fabricantes utilizan este tipo de motor, pero no es la elección más efectiva. Uno de los primeros errores que se comete es la colocación que se ha comentado. El motor será compacto y proporciona un alto rendimiento, pero si el motor está situado en un lateral se tiene un problema en el equilibrio del eje, ya que al inclinar la motocicleta durante la conducción, el vehículo presenta inestabilidad.

En el caso de instalar un motor asíncrono, el par de arranque se mantiene y además se gana en comportamiento frente a sobrecargas. El motor presenta una mayor robustez y la desmagnetización de los imanes permanentes no causa

problema. Si se instala un controlador robusto y compacto, el rendimiento es muy alto. El calor producido es fácilmente expulsado al exterior.

3.1.5.1.2 Motocicleta turismo

Este tipo de motocicletas se puede llegar a dividir en tres clases: turismo, sport y trail. Este tipo de motocicletas ya se utilizan para largos trayectos y distintas circunstancias dependiendo el camino por el que se circule.

Son motos ya de cilindrada grande, presentan un gran confort en sus asientos, pedales y manillar, es decir, comodidades para realizar trayectos de grandes recorridos.



Figura 56. Zero Motorcycles XU

Las características que buscan este tipo de motocicletas son motores de gran potencia, por lo tanto un mayor tamaño, por lo que es menos manejable si la queremos destinar a uso urbano. La motorización utilizada debe ser muy fiable y robusta; además debe de soportar grandes cargas, así como mantener rango de velocidades elevadas.

Para este tipo de motocicletas la instalación correcta es la de un motor de inducción trifásico. Este motor es más grande, pesado y se calienta más. para liberar la cantidad de calor generada se soloca el motor en posición longitudinal e incluso con la ayuda de un radiador de aceite. En este tipo de motocicletas el objetivo está en tratar de cargar grandes pesos y que proporcione un rendimiento constante, es decir, un rendimiento a altas velocidades.

3.1.5.1.3 Motocicleta de campo

Este tipo de motocicleta es considerado un hobby dentro de términos deportivos. Para este tipo de motocicletas existen tres modalidades: cross, enduro, trial y supermotard.

Las motocicletas de cross son vehículos que circulan por terrenos irregulares o circuitos. Este tipo de vehículos no pueden circular por carreteras debido a que no pueden obtener el permiso de circulación. En estas motocicletas se busca la mayor aceleración pero no altas velocidades ya que no es preciso para el tipo de carreteras donde se practica.



Figura 57. KTM E-Freeride

La motocicleta de enduro la podemos clasificar entre una motocicleta de cross o una de trail. De aspecto muy similar con la de cross, pero está si cumple con los requisitos para poder circular. Vehículo ideal para caminos, subir montañas y realizar rutas. Este tipo de motocicleta destaca por la gran fuerza que poseen.

La supermotard es de estructura similar a la de cross pero con neumáticos sin tacos, esta hecha para que funcione en asfalto.



Figura 58. Modelo Zero Motorcycles S

La motocicleta de trial no puede circular por carreteras y se utiliza para terrenos abruptos y salvar obstáculos, su práctica es considerada un deporte.

Las características de este motor que debe presentar es robustez debido a que están expuestos a recibir golpes, gran par a pocas revoluciones y compacto. Estos motores reciben muchas variaciones por las irregularidades del terreno.

En este tipo de motocicletas sometidos a golpes tenemos el problema de la desimantación que afecta al rendimiento a largo plazo. El uso del motor de imanes permanentes es que no tiene par de arranque y que el objetivo es realizar velocidades grandes, cuando en la motocicleta de campo no es así; se necesita gran par de arranque y velocidades pequeñas.

Al no disponer de caja de cambios es la electrónica la encargada de proporcionar al motor la potencia y par necesarios en cada momento.

Una de las soluciones y que se encuentra en estudio es la de reluctancia conmutada, pero ya en el mercado existen modelos como el ya comentado de Heinzmann con un modelo de KTM.

El motor de reluctancia síncrona de imanes permanentes, es más compacto y con menos masa ya que presenta una forma dentada. Este hecho hace que haya que instalar un encoder para corregir el comportamiento no lineal, pero debido a la electrónica avanzada que se tiene actualmente es la encargada de filtrar los problemas que se presentan en el funcionamiento.

3.1.5.1.4 Motocicleta de competición

Existen diversas pruebas de competición de motocicletas, aunque la que mayor popularidad tiene es la de velocidad, por lo tanto trataremos de centrarnos en grupo. Esta competición de velocidad se realiza en asfalto y en circuitos muy bien pavimentados. Estas motocicletas son caras de desarrollar y son destinadas solo para competir. Estas motocicleta deben de presentar estabilidad, alta velocidad, alta aceleración, gran frenada, reducido peso y una gran manejabilidad.

Los modelos de las motocicletas de competición tienen sus prototipos de modelos deportivas que pueden circular por las carreteras y con unas prestaciones menores. Tienen una conducción agresiva con respecto a las motocicletas turismo. Estas motocicletas presentan la mejor relación peso potencia. Motores de alta cilindrada y materiales muy ligeros.



Figura 59. Modelo Brammo Motorcycles

Los grandes objetivos de la motocicleta de competición es gran aceleración, altas velocidades y paso por curvas limpio y rápido. Para obtener un buen paso de curva debemos de posicionar el punto de gravedad alto y al entrar en curva el punto debe desplazarse hacia el interior de la curva. El motor de imanes permanentes asegura una aceleración en cualquier rango de uso con un controlador más sencillo.

3.1.6 EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

Cuando se produce la transformación de potencia eléctrica en mecánica, una fracción de la potencia transformada se convierte en calor y es prácticamente inutilizable, por lo que se denominan pérdidas de la máquina.

Para determinar el rendimiento del motor con la mayor precisión es necesario realizar un estudio sobre las pérdidas del motor eléctrico.

Dichas pérdidas se dividen en dos grandes grupos:

- ✓ Las cargas constantes, que son independientes de la carga.
- ✓ Las pérdidas debido a la carga conectada.

El rendimiento o eficiencia de una máquina eléctrica se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\eta(\%) = \frac{P_{cedida\ o\ útil}}{P_{absorbida}} \cdot 100 = 1 - \frac{P_{pérdidas}}{P_{absorbida}} \cdot 100$$

Aunque parezca sencillo la definición de la eficiencia de una máquina eléctrica, su determinación no parece tan sencilla. Por ello existen una serie de normas de diferentes países que abordan este problema y dan unas instrucciones o pasos particulares sobre este caso, indicando las condiciones sobre las que se deben realizar los ensayos para obtener los valores experimentales del rendimiento.

Algunas de las normas que se encargan de la realización de los ensayos de este tipo y que abordan otros campos, por ejemplo compatibilidad electromagnética, cableado, protecciones, son las siguientes:

- UNE-EN 60034-1. Máquinas eléctricas rotativas. Características asignadas y características de funcionamiento.
- UNE-EN 61000-4-13:2003/A1. Compatibilidad electromagnética. Técnicas de ensayo y medida.
- UNE-EN 61000-3-2. Compatibilidad electromagnética. Límites.
- UNE 21000-5-2 IN. Compatibilidad electromagnética. Guías de Instalación y atenuación.

- UNE 21-302-95. Vocabulario electrotécnico.
- UNE-EN 60034-5. Máquinas eléctricas rotativas. Grados de protección proporcionados por el diseño integral de las máquinas rotativas (código IP).
- UNE 26374. Vehículos de carretera. Ciclomotores. Centrales de intermitencia para corriente continua.
- UNE-EN 60349-1. Tracción eléctrica. Máquinas distintas de los motores de corriente alterna alimentados por convertidor electrónico.
- Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, Std. 112-1978, ANSI/IEEE.
- Standard Test Code for DC Machines Std. 113-1973, IEEE.
- Test Procedure for Single-Phase Induction Motors, Std. 114-1982, ANSI/IEEE.
- Test Procedure for Synchronous Machines, Std 115-1965.

3.1.6.1 Métodos de determinación de la eficiencia

Uno de estos métodos para realizar el cálculo de la eficiencia divide los procedimientos en dos métodos:

- Método directo:

Se miden potencia cedida y absorbida por la máquina directamente en la misma, utilizando instrumentos de medida.

- Método indirecto:

En este método lo que se mide son las pérdidas y como respecto a la potencia corresponde con un porcentaje tan pequeño, estos errores de medida no afectan de la misma manera al cálculo de la eficiencia.

Las pérdidas que se tienen en cuenta para finalmente realizar la suma de ellas son:

- Pérdidas $I^2 \cdot R$ en el estator.

- Pérdidas $I^2 \cdot R$ en el rotor.
- Pérdidas en el núcleo.
- Pérdidas por cargas parásitas.
- Pérdidas por fricción y acción del viento.
- Pérdidas en el contacto de las escobillas.
- Pérdidas en el excitador.
- Pérdidas por ventilación.

3.1.7 NORMATIVA SOBRE EFICIENCIA

Tenemos que tener en cuenta que los motores cada vez deben de ser más eficientes y por lo tanto recortar drásticamente las emisiones de CO₂. Los motores eléctricos utilizan el 40% de la electricidad del mundo y de esa parte el 90% corresponde a los motores de inducción.

Si realizamos la comparación con otras máquinas, los motores eléctricos son bastantes eficientes. Los motores de alta eficiencia son capaces de convertir el 95% de la energía en trabajo útil. La normativa sobre eficiencia energética es llegar a alcanzar mayor consistencia en la forma de medida a nivel global.

Según la zona en la que nos encontremos en el territorio global debemos de seguir una normativa.

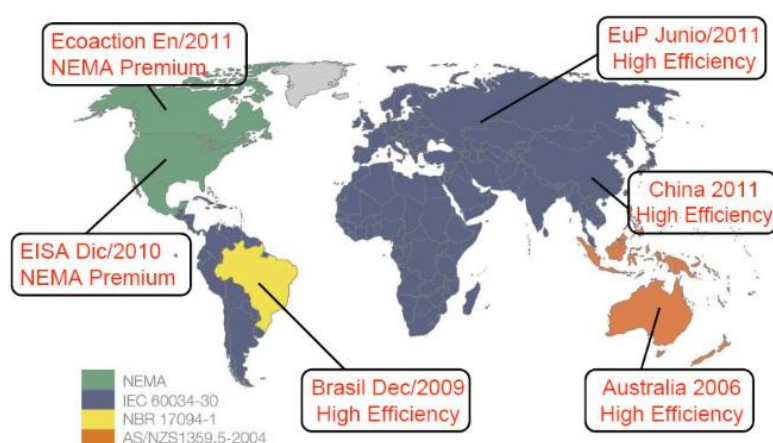


Figura 60. Normativas de eficiencia de las distintas partes del mundo

En la imagen podemos observar que las dos normativas más influyentes son IEC (International Electrotechnical Commission) y NEMA que se dedican al tema

de las máquinas eléctricas. Como vemos la IEC es la encargada de aplicación en territorio europeo.

Los fabricantes cuentan con el respaldo de la Comisión Europea ya que representaban el 80% de la producción de motores estándar y acordaron en el año 1998 establecer unas bandas de eficiencia, Ef1 → eficiencia estándar, Ef2 → alta eficiencia y Ef3 → muy alta eficiencia. Esta eficiencia se medía de acuerdo a una versión modificada de la norma EN60034-2(1996).

En abril del año 2009 entró en vigor una nueva normativa internacional para motores eléctricos. IEC60034-2-1:2007-09 con unos valores más precisos en eficiencia y que actualiza el esquema marcado en Europa.

En estas tablas aparecen las modificaciones:

Tabla 1. Comparativa entre normativas IEC sobre métodos de eficiencias

Norma anterior de medida de eficiencia EN/IEC 60034-2:1996	Norma actual de medida de eficiencia IEC 60034-2-1:2007-09
Método directo	Método directo
Método indirecto	Método indirecto
Pérdidas adicionales se estiman como el 0,5% de la potencia de entrada a carga nominal	Se determinan las pérdidas adicionales por medidas a cargas parciales
	Se estiman las cargas adicionales como el 2,5 y 0,5% de la potencia de entrada a carga nominal
	Se establecen por cálculo matemático
Pérdidas en los bobinados de rotor y estatos determinadas a 95°C	Pérdidas de los bobinados de rotor y estator determinadas a 25°C + incremento de temperatura real del motor

A partir de aquí los motores que se construyan para estar disponibles en el mercado deberán de tener una cierta eficiencia para ser aptos. A continuación se presenta una tabla para motores cuya alimentación proviene de una red trifásica a 50Hz.

Tabla 2. Niveles de eficiencia de los motores según norma IEC 60034-30

Potencia de salida (kW)	IE1 – Eficiencia estándar			IE2 – Alta eficiencia			IE3 – Muy alta eficiencia		
	Polos								
	2	4	6	2	4	6	2	4	6
0,75	72,1	72,1	70	77,4	79,6	75,9	80,7	82,5	78,9
1,1	75	75	72,9	79,6	81,4	78,1	82,7	84,1	81
1,5	77,2	77,2	75,2	81,3	82,8	79,8	84,2	85,3	82,5

2,2	79,7	79,7	77,7	83,2	84,3	81,8	85,7	86,7	84,3
3	81,5	81,5	79,7	84,6	85,5	83,3	87,1	87,7	85,6
4	83,1	83,1	81,4	85,6	86,6	84,6	88,1	88,6	86,8
5,5	84,7	84,7	83,1	87	87,7	86	89,2	89,6	88
7,5	86	86	84,7	88,1	88,7	87,2	90,1	90,4	89,1
11	87	87,6	86,4	89,4	89,8	88,7	91,2	91,4	90,3
15	88,7	88,7	87,7	90,3	90,6	89,7	91,9	92,1	91,2
18,5	89,3	89,3	88,6	90,9	91,2	90,4	92,4	92,6	91,7
22	89,9	89,9	89,2	91,3	91,6	90,8	92,7	93	92,2
30	90,7	90,7	90,2	92	92,3	91,7	93,3	93,6	92,9
37	91,2	91,2	90,8	92,5	92,7	92,2	93,7	93,9	93,3
45	92,7	91,7	91,4	92,9	93,1	92,7	94	94,2	93,7
55	92,1	92,1	91,9	93,2	93,5	93,1	94,3	94,6	94,1
75	92,7	92,7	92,6	93,2	94	93,7	94,7	95	94,6
90	93	93	92,9	94,1	94,2	94	95	95,2	94,9
110	93,3	93,3	93,3	94,3	94,5	94,3	95,2	95,4	95,1
132	93,5	93,5	93,5	94,6	94,7	94,6	95,4	95,6	95,4
160	93,8	93,8	93,8	94,8	94,8	94,8	95,6	95,8	95,6
De 200 a 375	94	94	94	95	95,1	95	95,8	96	95,8

Los valores de eficiencia van en función del número de polos y de la potencia de salida.

Hay establecidas unas normas las cuáles dicen:

- A partir del 1 de Enero de 2015 los motores con potencia nominal entre 7,5 y 375 kW no deben poseer niveles de eficiencia inferiores a IE3 o atender al nivel IE2 y ser equipados con un convertidor de frecuencia.
- A partir del 1 de Enero de 2017 todos los motores con potencia nominal entre 0,75 y 375 kW no deben poseer niveles de eficiencia inferiores a IE3 o a tender al nivel IE2 y ser equipados con un convertidor de frecuencia.

3.1.7.1 Eficiencia de los motores de CC

Para el cálculo de rendimiento de los motores de continua, hay que valorar las posibles pérdidas que vamos a tener en la máquina.

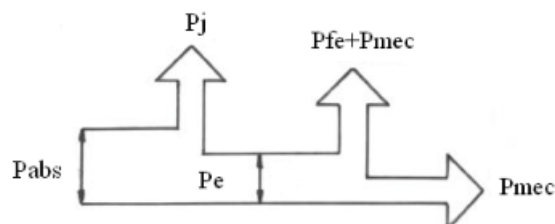


Figura 61. Pérdidas de un motor de CC

Donde

- $P_j \rightarrow$ pérdidas en el cobre.
- $P_e \rightarrow$ pérdidas en el núcleo.
- $P_{fe} + P_{mec} \rightarrow$ pérdidas en el hierro y escobillas.
- $P_{mec} \rightarrow$ pérdidas mecánicas.

Las pérdidas en el cobre son fáciles de conocer si conocemos las resistencias del rotor y del estator y la intensidad que circula por la máquina.

Para determinar el valor de la resistencia del circuito, bloqueamos el rotor para que no pueda girar y aplicando una pequeña tensión a los terminales de la armadura. Ajustamos la tensión hasta que la corriente de la armadura sea igual a la corriente nominal de la máquina. La relación de voltaje aplicado a la corriente circulante en la armadura es R_a .

Podemos decir que este valor de la resistencia no es totalmente preciso debido a que:

- No está presente el enfriamiento que ocurre normalmente cuando el motor está girando.
- Puesto que durante la operación normal hay una tensión de corriente alterna en los conductores del rotor, ellos adolecen de alguna cantidad de efecto pelicular, el cual eleva adicionalmente la resistencia de la armadura.

El método más preciso para calcular dicha resistencia se puede realizar si se requiere un dato más preciso.

Para ello buscamos obtener la resistencia de campo suministrando la tensión nominal de pleno campo a su circuito de campo y midiendo la corriente de campo resultante. La resistencia de campo R_c es justamente la relación del voltaje de campo a la corriente de campo.

Las pérdidas en el cobre pueden ser cargadas junto a las de las escobillas, pero si se tratan separadamente podemos representar una gráfica de intensidad frente a las pérdidas de las escobillas y valorar el tipo de escobillas que se está usando.

Las pérdidas en el núcleo y mecánicas usualmente se tratan juntas. Si se lleva un motor a girar libre sin carga y a la velocidad nominal, no hay potencia de salida desde la máquina. Puesto que el motor está sin carga y a la velocidad nominal, no hay potencia de salida desde la máquina. Puesto que el motor está sin carga, I_a es muy pequeña y las pérdidas en el cobre de la armadura son despreciables. Por lo cual, si las pérdidas en el cobre del campo se restan a la potencia de entrada al motor, la potencia de entrada restante consta de las pérdidas mecánicas y en el núcleo de la máquina a esa velocidad. Estas pérdidas del motor se denominan pérdidas rotacionales sin carga. En la medida que la velocidad del motor permanezca cercana a la cual fueron medidas las pérdidas rotacionales sin carga son una buena estimación de las pérdidas mecánicas y en el núcleo de la máquina bajo carga.

3.1.7.2 Eficiencia de los motores de CA

Para realizar el cálculo del rendimiento en las máquinas de corriente alterna, vamos a clasificarlas en pérdidas mecánicas y eléctricas.

Las pérdidas mecánicas se deben a la fricción de la partes móviles y a la acción del aire en la ventilación.

Las pérdidas por ventilación dependen de la velocidad de la máquina, del diseño del sistema de ventilación propio y de la turbulencia producida por las partes en movimiento. Para obtener estas pérdidas se realizan pruebas a la máquina.

Las pérdidas eléctricas tienen los siguientes componentes:

- Pérdidas en los conductores, también conocidas como pérdidas en el cobre ($I^2 \cdot R$).

Estas pérdidas se presentan en los conductores del estator y el rotor, en forma de calor, produciendo una elevación de temperatura, sobre el ambiente. A veces es preferible expresar las pérdidas en W·kg del material usado como conductor para los devanados. Las pérdidas vienen dadas como:

$$P_c = 1000 \cdot J^2 \cdot \left(\frac{\rho}{D_c} \right) \quad (13)$$

Las pérdidas eléctricas de los conductores varían con la carga del motor expresada como la corriente. Esto se explica partiendo del hecho que operando en vacío no desarrolla ninguna potencia útil y solo se presenta las llamadas pérdidas por fricción y ventilación, las pérdidas en el hierro y las pérdidas mínimas de los conductores.

- Pérdidas en el hierro.

Se producen en el circuito magnético de las máquina y se deben principalmente al efecto de histéresis y de corrientes circulantes. Las pérdidas del hierro dependen de las densidades de flujo magnético, de la velocidad de rotación del rotor, de la calidad del acero y del tamaño del rotor.

El proceso de conversión de energía, de la correspondiente energía eléctrica al motor a la energía mecánica de salida en su eje podemos observar un diagrama de flujo.

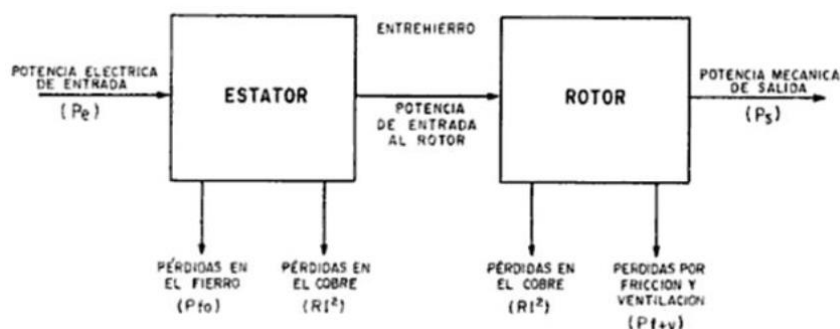


Figura 62. Diagrama de flujo de potencia activa de un motor de CA

El flujo de potencia se realiza de la siguiente forma: la potencia eléctrica de entrada a la máquina (P_e), que es tomada de la fuente de alimentación, llega al devanado del estator donde se presentan las pérdidas por efecto Joule de las cuales parte se disipa en forma de calor y parte se disipa como calor en el núcleo del estator y se denominan pérdidas en el hierro. El resto de potencia activa (P_r) se transporta a través del entrehierro (espacio entre el rotor y el estator) y se transfiere al rotor por inducción electromagnética.

La potencia (P_r) de entrada al rotor produce pérdidas por efecto Joule, aproximadamente una tercera parte se disipa como calor y el resto se encuentra finalmente disponible como potencia mecánica. Restándole una pequeña porción determinada pérdidas por fricción y ventilación se obtiene la potencia mecánica disponible en el eje, que es la que se suministra a la carga.

3.1.7.3 Factores que afectan a la eficiencia de un motor

Para analizar los factores que afectan al rendimiento de un motor, sea del tipo que sea, hay que fijarse en aquellos parámetros que hacen que las pérdidas modifiquen su valor.

En la tabla que se presenta a continuación, se observan las principales pérdidas que sufre un motor y la cuantificación en la que afecta al motor, así como los métodos para disminuirlas.

Tabla 3. Datos sobre las pérdidas en un motor de inducción

Nombre	Porcentaje del total de pérdidas	Descripción	Fijas o variables	Cómo reducirlas
Pérdidas en el	15-25%	Energía requerida para magnetizar	Fijas	Mejorando la permeabilidad del

núcleo		el núcleo		acero, usando laminaciones más delgadas o modificando la longitud del núcleo
Fricción y ventilación	5-15%	Pérdidas debidas a la fricción y a la resistencia del aire	Fijas	Mejorando el sistema de ventilación y reduciendo la fricción de los elementos
Pérdidas en el devanado del estator	25-40%	Calentamiento debido al flujo de corriente a través de la resistencia del devanado del estator	Variables	Aumentando el volumen de cobre en el devanado del estator, mejorando el diseño de las ranuras y usando aislamiento más delgado
Pérdidas en el rotor	15-25%	Calentamiento debido a las pérdidas en las barras del rotor	Variables	Aumentando el tamaño de las barras conductoras del rotor y anillos terminales
Pérdidas dispersas	10-20%	Flujo disperso inducido por las corrientes de carga y otras pérdidas menores	Variables	Mejorando detalles de diseño y manufactura

Una de las curvas características para este apartado y muy interesante en la de variación de la eficiencia en régimen normal, en función de la potencia útil. La forma general de la curva de rendimiento es muy similar para todas las máquinas eléctricas.

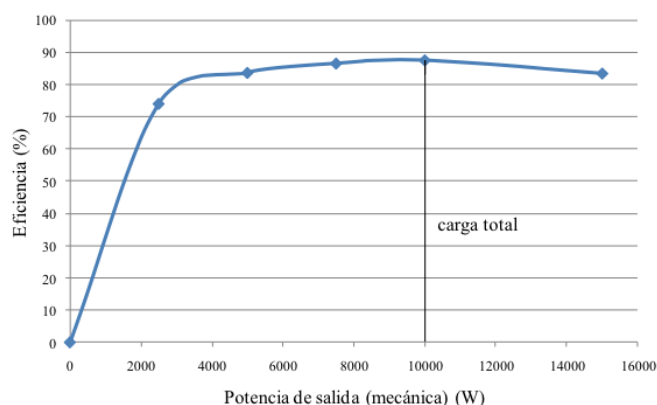


Figura 63. Eficiencia energética en función de la carga

En vacío, o sea con carga útil nula, el rendimiento es cero.

Cuando la máquina tiene que soportar cargas reducidas, el rendimiento es muy bajo debido a las pérdidas constantes. Crece rápidamente al aumentar la carga,

pasando por un máximo para descender, aunque lentamente al continuar aumentando la carga. Este pequeño descenso es debido al efecto Joule.

Cuando el rendimiento es máximo, se produce que la carga para la cual las pérdidas variables alcanzan un valor aproximadamente igual a las pérdidas fijas.

La expresión del rendimiento es:

$$\eta = \frac{P_{cedida\ o\ útil}}{P_{cedida\ o\ útil} + P_{pérdidas}} \quad (14)$$

El rendimiento es máximo cuando las pérdidas fijas igualan a las pérdidas variables.

Podemos saber que en las máquinas que tengan que trabajar permanentemente con cargas parciales conviene reducir el valor de las pérdidas constantes.

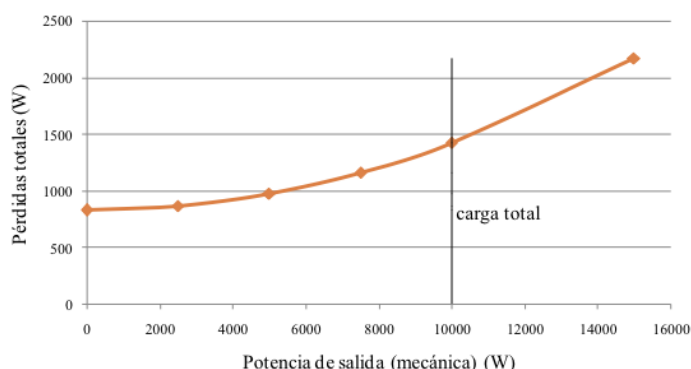


Figura 64. Pérdidas en el motor en función de la carga

Esta gráfica muestra la variación de los valores de las pérdidas en función de la carga del motor.

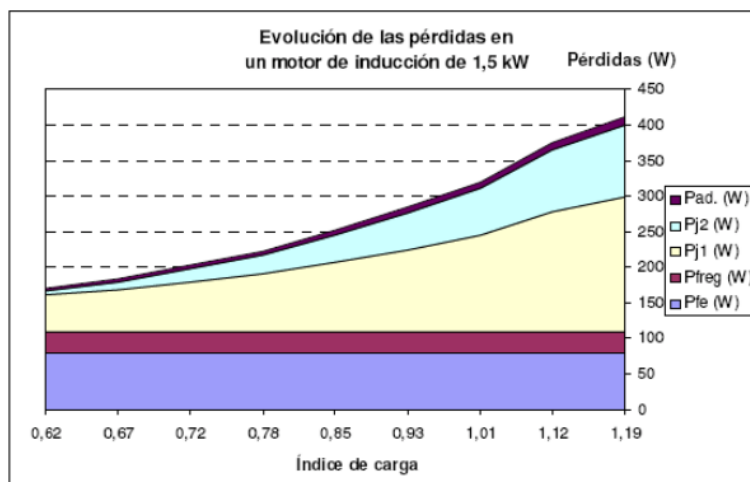


Figura 65. Resultado de la distribución de pérdidas en un motor de inducción

Ahora voy a mostrar el efecto que tiene la variación del deslizamiento en los motores asíncronos trifásicos.

Cuando el motor está en funcionamiento, el estator se alimenta de la red y absorbe una potencia:

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 \quad (15)$$

Parte de esta potencia se disipa en la resistencia R del devanado del estator ocasionando una pérdida eléctrica, así como una pérdida magnética. Ahora el balance energético queda de la siguiente manera:

$$P_{elmag} = P_1 - \Delta P_{el1} - \Delta P_{el2} \quad (16)$$

De esta potencia también se pierde potencia en cubrir las pérdidas del rotor, la siguiente expresión en la potencia resultante que va a ser convertida en mecánica:

$$P_{mec} = P_{elmag} - \Delta P_{el2} \quad (17)$$

Si queremos calcular la potencia en una máquina de anillos rozantes, debemos de añadir las pérdidas en las escobillas de contacto.

La potencia mecánica obtenida en el árbol del eje de rotor, se obtiene luego de vencer su inercia y otras pérdidas adicionales, obteniéndose una potencia:

$$P_2 = P_{mec} - \Delta P_{fric} - \Delta P_{adic} \quad (18)$$

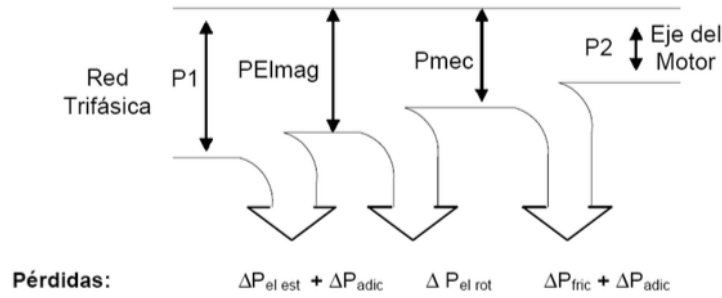


Figura 66. Diagrama de potencias de un motor asíncrono trifásico

Para definir la relación entre la eficiencia η y el deslizamiento s en los motores, se analiza la eficiencia mediante la relación:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_{elmag}}{P_1} \right) \cdot \left(\frac{P_2}{P_{elmag}} \right) = \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (19)$$

donde η_1 y η_2 son las eficiencias del estator y del rotor.

Si tenemos en cuenta:

$$\eta_2 = \frac{P_2}{P_{elmag}} = \frac{P_{elmag} - \Delta P_{el2} - \Delta P_{fric} - \Delta P_{adic}}{P_{elmag}} \quad (20)$$

la siguiente expresión es válida:

$$\eta_2 < \frac{P_{elmag} - \Delta P_{el2}}{P_{elmag}} < \frac{1 - \Delta P_{el2}}{P_{elmag}} < (1 - s) \quad (21)$$

Finalmente:

$$\eta < \eta_2 < (1 - s) \quad (22)$$

Como conclusión final respecto a este análisis, para que un motor funcione en su régimen nominal con una alta eficiencia, es necesario que en este régimen se tenga un deslizamiento s de pequeña magnitud.

Para obtener valores de eficiencia óptimos de los motores eléctricos hay que tener en cuenta que la eficiencia de cualquier tipo de motor depende estrechamente de las pérdidas que se produzcan en el mismo durante el funcionamiento.

Si se quiere actuar para eliminar las pérdidas fijas es necesario tomar medidas que modifiquen constructivamente la máquina. El fenómeno de histéresis y las corrientes parásitas o de Foucault que se desarrollan en el núcleo por efecto del flujo

alterno, consumen una cierta cantidad de energía. Las pérdidas magnéticas crecen rápidamente con la inducción, con el grosor de la chapa utilizada en la construcción de núcleo y con su peso. En cuanto a las pérdidas por fricción y ventilación de la máquina, habría que mejorar el sistema de ventilación y reducir la fricción de los distintos elementos.

Si se quiere actuar para eliminar pérdidas variables es necesario calcular bien el punto óptimo de trabajo donde el rendimiento de la máquina sea tal que se produzca la equiparación de las pérdidas fijas con las variables, y además, se deben de disminuir las resistencias, tanto del estator como del rotor.

Los valores de eficiencia energética de las máquinas eléctricas que se utilizan en la actualidad se suelen situar en un rango entre un 75% y un 90%.

3.1.8 COMPARATIVA DE LOS MOTORES BRUSHLESS DE IMANES PERMANENTES DE CC Y CA

El uso de motores brushless de imanes permanentes de corriente continua en motocicletas de competición es muy importante. En la siguiente figura se va a observar los requisitos de las aplicaciones de carga.

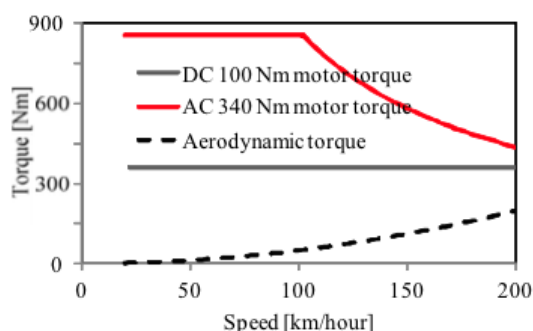


Figura 67. Características par-velocidad de los motores de CC y CA

Los convertidores que se llevan a cabo en esta aplicación suelen ser bastantes simples y la región del par es constante además de que suele trabajar a baja tensión para que el motor funcione cuidadosamente. Los propios ciclos del motor tienen una capacidad limitada de la batería por lo que se requiere disponer de un motor de alta eficiencia. Debido a que se requiere un alto par y una baja tensión se utiliza una compensación entre las constantes de tensión y par motor. Los requisitos de carga de la máquina son cruciales, pero debe de tenerse en cuenta que el ciclo de

funcionamiento es necesario para que la elevada corriente pueda utilizarse con fuerza para la aceleración. Las ruedas normalmente se moverán a 1500rpm a 200km/h que se puede considerar un poco baja. Sin embargo son pocas las unidades de motocicletas las que llevan equipadas un motor de corriente continua. Recientemente se ha pasado de los motores de corriente continua a los de corriente alterna y tienen una mayor potencia.

Si se habla de diseño electromagnético de máquinas debemos saber que se requiere un amplio rango de velocidades. En el diseño de los motores se busca la construcción de un diseño sencillo. Estos motores suelen operar hasta 25A/mm² y son refrigerados por líquido. Una de las funciones de los ciclos de trabajo es que evitan el sobrecalentamiento del vehículo. Sin embargo, si se encuentra trabajando en un entorno de competición interesa que el ciclo de trabajo tienda a ser alto.

Un posible tipo de motor que fue simulado utilizaba un estator de 18 ranuras y un rotor con 6 polos con un solo paso de ranura para el devanado; las simulaciones que se le hicieron al motor fue llevarlo a carga máxima unas 6000rpm (a una velocidad de 200km/h) y proporcionaba un par de 100Nm. Posteriormente se realizó una reducción del tamaño del motor y se evaluó el control de corriente alterna, con un estator de 9 ranuras y el rotor de 6 polos y el rendimiento fue mejorado.

A la hora de la competición, el peso estimado que se tiene entre la motocicleta y el piloto son 275kg. La motocicleta Motoczysx alcanza la velocidad que se viene comentando cuando genera un par de torsión constante de 100Nm y la velocidad es constante. Una vez que se alcanza la velocidad de 160km/h la potencia se utiliza para solventar las pérdidas aerodinámicas que equivale a unos 17,3kW. Por lo tanto con 10kW la motocicleta estará funcionando en estas condiciones durante 34,5 minutos. Por lo tanto aquí tenemos dos restricciones, que son el tiempo que debe durar una carrera y la velocidad de la que no se debe pasar.



Figura 68. Motocicleta Motoczyszx

Estas máquinas de alto rendimiento suponen más de un problema térmico que un problema electromagnético. Normalmente los imanes que se utilizan están fabricados de tierras raras. Se puede abordar la reducción del imán por el uso de un rotor de reluctancia sincrónico.

3.1.8.1 Topología del rotor en una máquina de CC y evaluación térmica

En este apartado voy a aprovechar los datos y las simulaciones de un estudio con los que se realizan las evaluaciones que fue realizado por David G. Dorrell (University of Technology Sydney) y Mircea Popescu (Motor Design Ltd) y que al artículo llamaron “Brushless permanent magnet DC and AC motor and synchronous reluctance motor design for racing motorcycles”. Estos datos aparecen en la siguiente tabla y en las siguientes figuras:

Tabla 4. Parámetros y rendimientos del motor

Ranuras	9
Polos	8
Imán (T)	1,12
Diámetro exterior (mm)	240
Pérdidas en el cobre (W)	915
Peso de los imanes (kg)	2
Peso de los enrollamientos (kg)	4,57
Peso total (kg)	22,33
Longitud del núcleo axial (mm)	85
Pérdidas del hierro (W)	141
Rendimiento (sin sesgado)	
Par (Nm)	85,3
Pico a pico de la ondulación (%)	34,2
Eficiencia (%)	98,1
Rendimiento (sesgado de una ranura)	
Par (Nm)	84,6

Pico a pico de la ondulación (%)	4,3
Eficiencia (%)	97,3

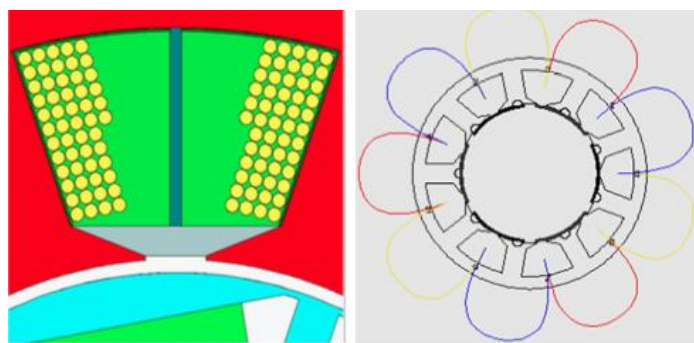


Figura 69. Ranuras y bobinas del motor utilizando un software

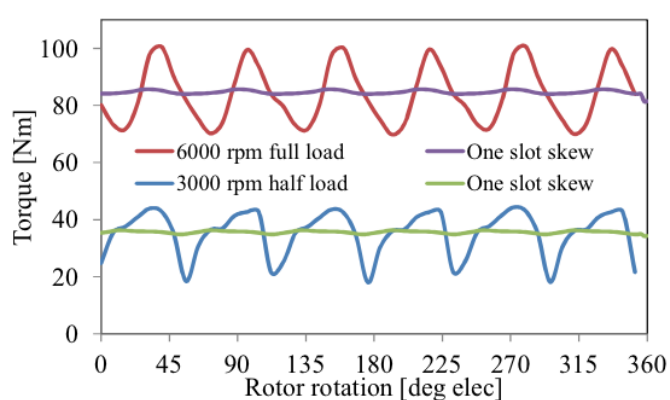


Figura 70. Par a media y plena carga

Esto se ha obtenido de diferentes software, SPEED PC-BDC y PC-FEA (para el magnetismo) y Motor-CAD (térmico). Son paquetes industriales comunes. Cuando se produce la cantidad de dentado puede ser reducida dándole un poco de inclinación. Los IPMs se utilizan para reducir las pérdidas del imán, así como para permitir el par de reluctancia. El par de rizado es importante ya que si se consigue eliminar en una motocicleta eléctrica hará que se tenga un mejor manejo de la motocicleta y un menos desgaste de los neumáticos.

La refrigeración es vital para estas máquinas y por ello en este estudio quisieron probar el rendimiento térmico. En la siguiente figura se muestra.

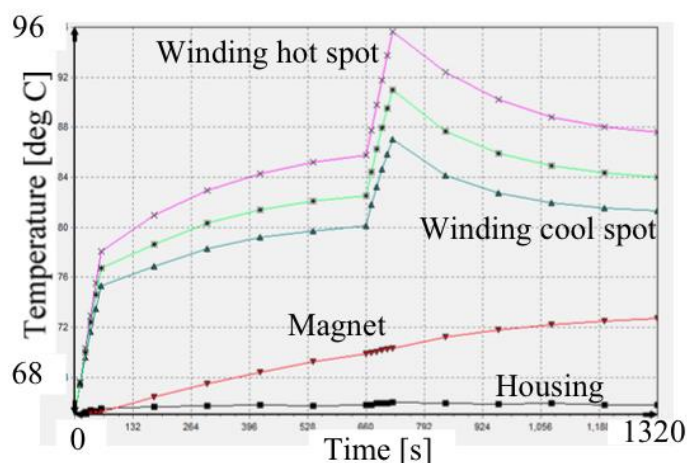


Figura 71. Rendimiento del motor en función de la temperatura y el tiempo

El rendimiento térmico es en gran medida una función del sistema de refrigeración, el encapsulamiento del bobinado y la conducción térmica en los límites de los materiales.

En una máquina de corriente continua con topología de número fraccionario de ranuras es difícil utilizar el saliente del rotor. Como se ve en la siguiente figura el par es máximo casi en el eje para una determinada corriente (par máximo).

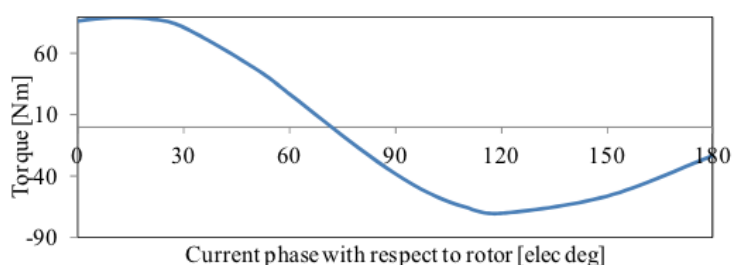


Figura 72. Variación del par con respecto al ángulo de fase

3.1.8.2 Topologías del rotor de una máquina de corriente alterna de alto rendimiento

3.1.8.2.1 Rotor de radios

La máquina de rotor de radios con ranuras fraccionadas fue diseñada para que cumpla con el requisito de tener un par elevado. Esta máquina se compone de 12 ranuras y 8 polos. El paso de bobina es de una ranura. La disposición de los radios se muestra en la siguiente figura:

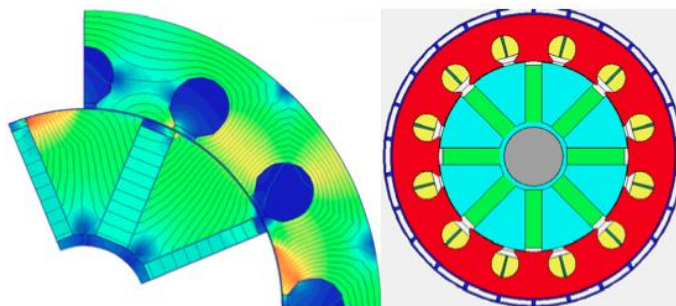


Figura 73. Simulación del par motor de CA de rotor de radios

Las propiedades de dicha máquina en estudio se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Parámetros de diseño y funcionamiento de una máquina de CA

Diámetro del rotor (mm)	160
Par (Nm)	330
Imán (T)	1,12
Diámetro exterior (mm)	240
Pérdidas en el cobre (W)	3315
Peso de los imanes (kg)	4,76
Peso de los enrollamientos (kg)	2,36
Peso total (kg)	35,17
Longitud del núcleo axial (mm)	120
Pérdidas del hierro (W)	436
Eficiencia (%)	95,1

Esta máquina produce un alto par de más de 300Nm. Se realizó el análisis de la corriente en el eje q, con los bucles de flujo de vinculación (que es la forma más exacta para calcular el par en las máquinas altamente saturadas) y parece realizar una ilustración buena de la conversión de energía.

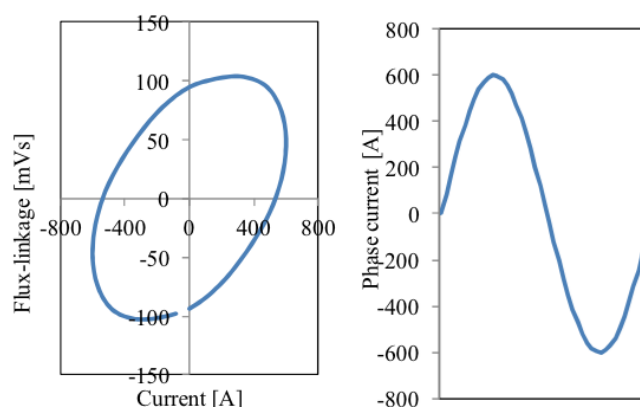


Figura 74. Simulación dinámica del flujo de corriente

En la siguiente figura la corriente en el par máximo se mantiene pero varía con respecto al eje q; se observa que hay un pequeño aumento en el par motor a un avance de fase de 20 grados eléctricos.

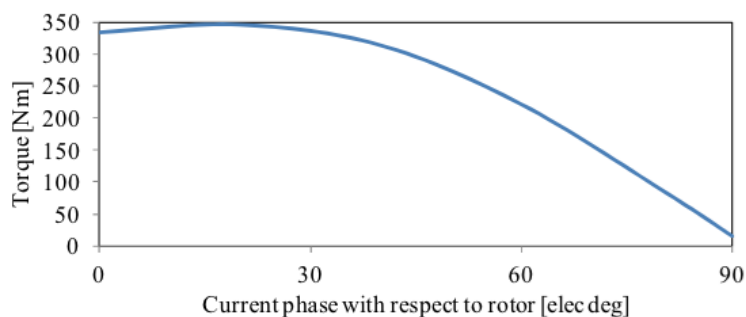


Figura 75. Par con respecto a la corriente de fase que circula por el rotor

Un IPM mostró un par significativo de refuerzo con avance de fase.

3.1.8.2.2 Diseño del rotor IPM

Par investigar el uso de un rotor IPM con este diseño de estator, se cambió el diseño del rotor como se muestra a continuación:

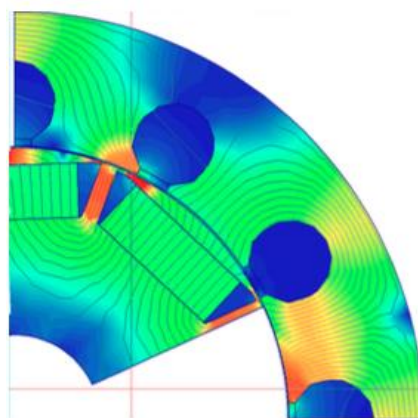


Figura 76. Simulación del par motor de CA de rotor IPM

Este contiene la misma cantidad de imán que el rotor de radios utilizado en la sección anterior. Al realizar la simulación con la misma corriente se produce un par máximo que vemos representado en la siguiente figura:

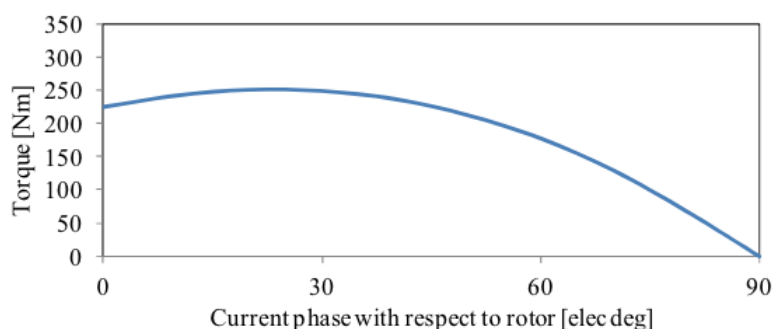


Figura 77. Par con respecto a la corriente de fase que circula por el rotor

Se puede observar que el par es menor que en el diseño de radios (aproximadamente un 30%). Se puede concluir con que se requiere un diseño muy cuidado para maximizar las pérdidas del eje q.

3.1.8.2.3 Rotor IPM multicapa

Es posible utilizar rotores IPM multicapa. Estos pueden tener efectos sustanciales de par y sobresalientes. El rotor se cambió a un conjunto de 6 capas por polo cada imán como se muestra en la siguiente figura:

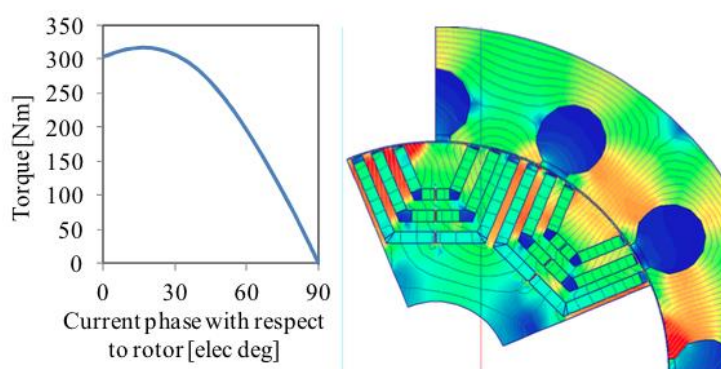


Figura 78. Simulación del alto par del rotor multicapa y el par motor respecto a la corriente de fase que circula por el rotor

Se tiene el mismo estator y la misma cantidad de material de imán en el rotor. Se tienen 12 polos magnéticos. Se sigue observando que el rotor de múltiples capas tiene cierto sobresaliente pero todavía está dominado por el par de excitación. El perfil de par es muy parecido al de rotor de radios, pero más difícil desde el punto de vista constructivo. Pero también puede jugar la ventaja del uso de imanes más pequeños. Para un diseño de estator particular y de carga, el par está fuertemente influenciado por la cantidad de imán en el rotor y una variedad de topologías del rotor puede ser utilizada para variar este par.

3.1.8.2.4 4 polos alternativos

Un diseño de 4 polos se puede probar en lugar de uno de 8 polos. El estator continuaba siendo el mismo, pero esta vez las bobinas se regulaban totalmente y se disponen en un bobinado de manera que no se aumentarían las pérdidas de cobre de 4 polos. Se mantiene la misma cantidad de material de imán. Utilizando la misma carga de corriente se observa que se reduce con respecto a los anteriores casos y muestra una distribución de flujo cuando se carga y pasa la corriente por el eje q.

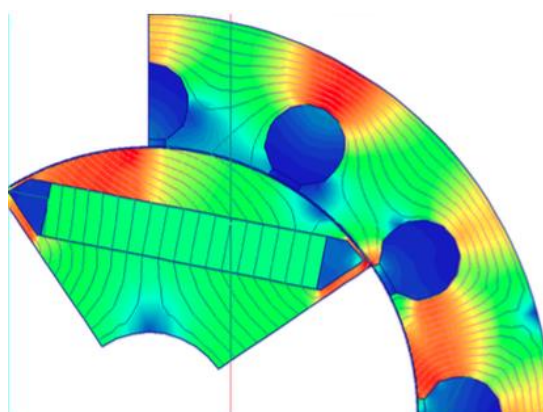


Figura 79. Simulación del alto par motor con 4 polos y un rotor IPM

Esto no es considerado un diseño correcto. El yugo del estator y los dientes están muy saturados. Con el fin de proporcionar el mismo desarrollo el diámetro del rotor tiene que ser reducido para que pueda coger bien el yugo del estator. En la siguiente figura se ve como se realiza esta operación. Las ranuras también hay que ajustarlas para que sigan teniendo el mismo área.

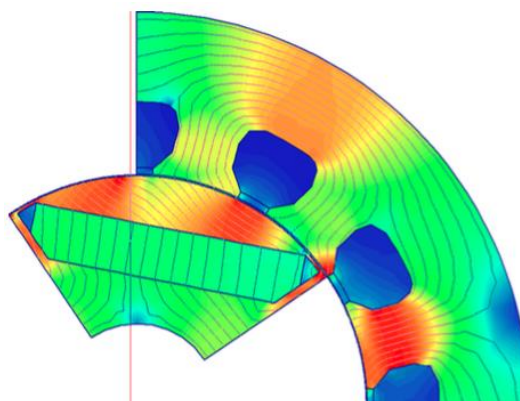


Figura 80. Simulación del alto par motor con 4 polos y un rotor IPM con diámetro reducido

El diámetro del rotor es reducido desde 160 a 140 mm. A tener un rotor más pequeño, entonces la cantidad de material de imán se reduce alrededor de 4,75kg a

4,1kg. La comparación de los dos casos explicados se muestra en la siguiente gráfica:

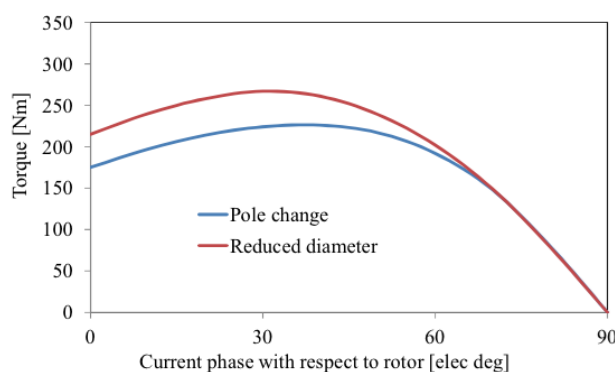


Figura 81. Comparación de par para los dos diseños de 4 polos

La máquina de rotor de diámetro reducido da un mejor rendimiento. El rendimiento es aún por debajo de la máquina de más polos, aunque la pérdida de hierro debe de evaluarse porque la frecuencia de flujo es la mitad a una velocidad determinada.

Como conclusión a esta pequeña comparación, se puede decir que el diseño de un imán permanente de rotor de radios produce los mejores resultados. Esto no puede ser generalizado; la variación de par en comparación con la máquina IPM si se realiza un mejor diseño se puede mejorar el rendimiento y que el par de torsión está relacionado con la cantidad de material de imán permanente utilizado en lugar del diseño del rotor ya que como se observó el rotor de múltiples capas mostró buenos resultados.

3.1.9 MOTOR HEINZMANN

Heinzmann desarrolla y fabrica desde hace décadas accionamientos eléctricos robustos y potentes hasta de 60kW, que se han utilizado en numerosas aplicaciones y sobre todo en entornos industriales. Heinzmann tiene experiencia en motores más de 100 años. Desde el año 2006 es cuando se centran ya más en el campo de máquinas móviles. Hoy en día, son muchos los expertos que se benefician de estos equipos debido a la experiencia y a la fiabilidad de la empresa con una larga tradición global con una red de ventas y servicio global flexible e innovador. La tecnología de dicha empresa se caracteriza por estar siempre por encima de la

media de rendimiento y significativas ganancias de eficiencia respecto a otras marcas.

3.1.9.1 Serie PMS

La serie PMS corresponde al motor sincrónico Brushless. Tiene un tamaño pequeño, poco peso y una gran potencia lo que proporciona una alta eficiencia. Heinzmann ofrece una amplia gama de estas unidades sin escobillas. Varían en función de la refrigeración, potencia que alcanzan de hasta 13kW y el par hasta 26Nm. La tensión del circuito intermedio es variable. Al ser unidades brushless no existe desgaste de piezas y por lo tanto estos motores alcanzan una larga vida útil y prácticamente libre de mantenimiento. Esto conduce a una reducción considerable de mantenimiento requerido total, el servicio y los costes de piezas de repuesto.

Las ventajas que proporcionan esta serie de motores se presentan a continuación:

- ✓ Potencia

Las ventajas de la gran superficie de espacio de aire del motor, junto con el devanado alojado en el núcleo del hierro, permite un alto par motor y un motor potente con una alta eficiencia. La variante de esta máquina es el uso de dos estatores. El resultado es un motor de gran alcance en un espacio de instalación reducido.

- ✓ Mantenimiento reducido y fiable

La conmutación electrónica de los motores PMS reemplaza al conmutador mecánico, por lo tanto los motores PMS no requieren mantenimiento. El tiempo de vida puede estar limitado sólo por los cojinetes y puede llegar a durar hasta 20000 horas de funcionamiento con un diseño apropiado.

- ✓ Dinámico

Los motores PMS se componen de dos estatores y por lo tanto tienen un pequeño momento de inercia; también tienen un par de detención inferior. Están predestinados para aplicaciones dinámicas.

✓ Plano

Los motores PMS están diseñados para que se construyan muy superficial, especialmente con un estator unilateral. Lo que significa ahorro de espacio en la dirección axial y un peso considerablemente menor.

✓ Flexibilidad

Se construyen también como motores de baja velocidad con un par elevado en diferentes variantes. La serie es producida con una alta protección, con refrigeración de aire o líquida. Los modelos están disponibles con eje macizo o huecos o como un kit para integración en otras máquinas.

Si miramos el catálogo que nos proporciona el fabricante vemos dos gráficas de la potencia y del par nominal de los diferentes modelos de la serie PMS y dependiendo del modo de refrigeración que se elija.

Las variantes del motor PMS por ejemplo es la refrigeración, por aire, por líquido o ventilación forzada. Los motores se pueden modificar según las especificaciones que cada uno desee.

Power range PMS Disc Motors

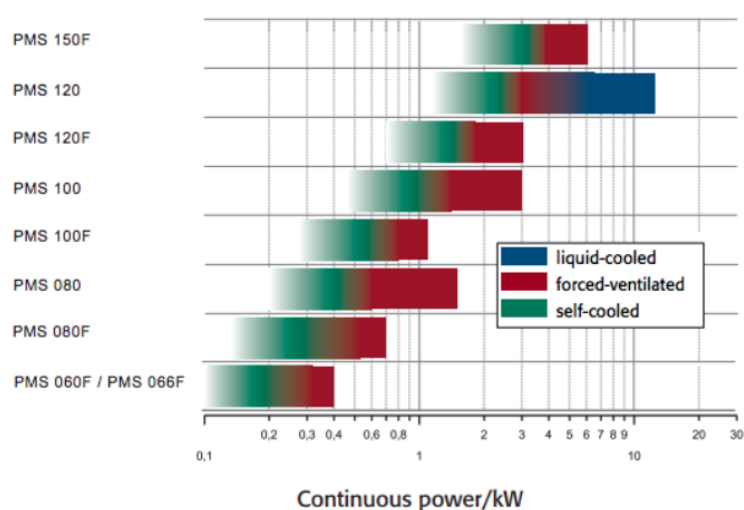


Figura 82. Rango de potencias de los distintos modelos serie PMS

Torque range PMS Disc Motors

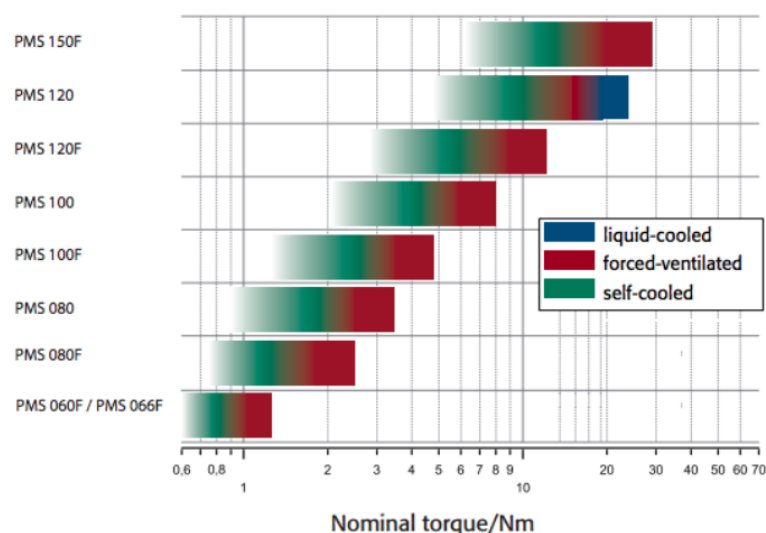


Figura 83. Rango de par nominal de los distintos modelos serie PMS

Como se observa la refrigeración realiza un papel fundamental para obtener mayores valores tanto de par como de potencia y así sacar un mayor rendimiento de cada serie del motor Heinzmann.

El líder de enduro y cross KTM presenta su motocicleta Enduro Freeride E dando un impulso en este campo. Estas motocicletas ofrecen una imagen completamente nueva; una nueva manejabilidad de conducción, sin ruido y sin emisiones de gases.

Debido a su diseño, ofrecen una alta potencia y un bajo momento de inercia con una buena ventilación.

En la siguiente figura se muestra los diferentes modelos de la serie PMS y los valores de tensiones, potencias, velocidad, par e intensidad. También aparece la relación con los controladores que se explicarán en los siguientes apartados del fabricante Sevcon.

Motor	Zwischenkreis- spannung	Leistung	Drehzahl	Nennreh- moment	Nennstrom	Kühlung	Gebersystem	Voreingestellt für Controller
		P	n	M	I			
	VDC	kW	min ⁻¹	Nm	A (AC)			
PMS 060F	24	0,23	3000	0,73	12,6	Selbstkühlung	Hall Sensor	
	560	0,35	6000	0,56	1,0	Selbstkühlung	Resolver	LTi
PMS 080F	24	0,42	4500	0,89	21,7	Selbstkühlung	8 Bit	Sevcon
	48	0,78	4500	1,66	19,2	Fremdbelüftung	8 Bit	Sevcon
PMS 080	24	1,20	6000	1,91	65,9	Fremdbelüftung	8 Bit	Sevcon
	48	0,60	3000	1,91	14,2	Selbstkühlung	8 Bit	Sevcon
	48	1,00	3000	3,18	24,5	Fremdbelüftung	8 Bit	Sevcon
PMS 100F	24	1,40	4500	2,97	70,0	Fremdbelüftung	8 Bit	Sevcon
	48	1,50	4500	3,18	36,4	Fremdbelüftung	8 Bit	Sevcon
PMS 100	24	1,50	3000	4,77	73,9	Selbstkühlung	8 Bit	Sevcon
	24	1,45	4500	3,08	71,9	Fremdbelüftung	8 Bit	Sevcon
	24	1,40	6000	2,23	71,4	Fremdbelüftung	8 Bit	Sevcon
	48	2,60	4500	5,52	65,4	Fremdbelüftung	8 Bit	Sevcon
	48	2,70	6000	4,30	66,9	Fremdbelüftung	8 Bit	Sevcon
PMS 120	24	3,00	4500	6,37	142,3	Fremdbelüftung	8 Bit	Sevcon
	48	5,50	3000	17,5	127,1	Fremdbelüftung	8 Bit	Sevcon
	80	7,50	4500	15,9	108,2	Fremdbelüftung	8 Bit	Sevcon
	80	10,0	6000	15,9	144,7	Flüssigkeitskühlung	8 Bit	Sevcon

Figura 84. Características de los motores de la serie PMS

En la siguiente figura aparecen las características de las serie PMS 150F, la gama más potente de este fabricante y que este año ha sido designado por la competición de MotoStudent para montar en las motocicletas que van a competir en el año 2016 por parte de las Universidades participantes.

PMS 150F

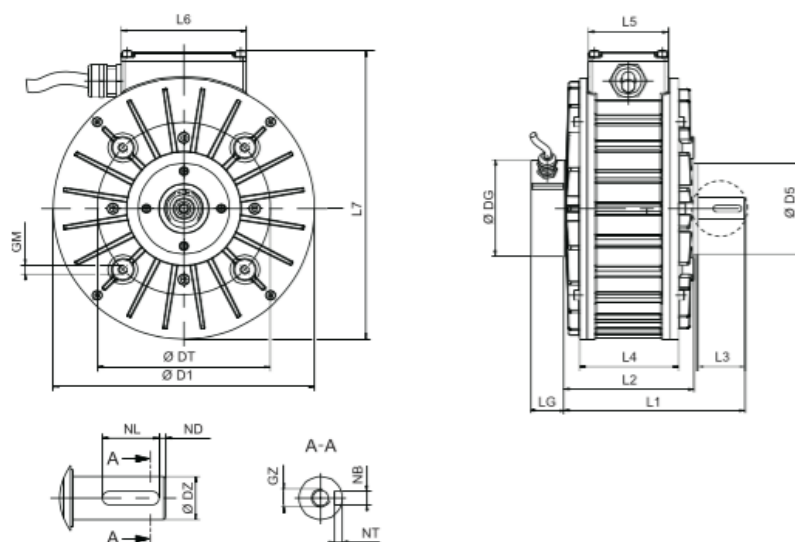
Gewicht: ca. 16 kg

Trägheitsmoment: 58,6 kg · cm²

		Leistung	Drehzahl	Nennrehmoment	Nennstrom
		P	n	M	I
		kW	min ⁻¹	Nm	A (AC)
48 VDC	Selbstkühlung (UB)	2,7	1500	17,2	62,7
		5,0	3000	15,9	112,1
		4,5	4500	9,5	102,7
	Fremdbelüftung (OB)	3,2	1500	20,4	75,2
		5,5	3000	17,5	127,2
		5,4	4500	11,5	126,6
		5,5	6000	8,8	126,5
80 VDC	Selbstkühlung (UB)	2,7	1500	17,2	37,8
		5,1	3000	16,2	68,2
		4,9	4500	10,4	67,5
	Fremdbelüftung (OB)	3,2	1500	20,4	45,3
		6,8	3000	21,6	92,1
		8,1	4500	17,2	111,6
		8,0	6000	12,7	107,0
96 VDC	Selbstkühlung (UB)	2,7	1500	17,2	29,9
		5,1	3000	16,2	54,7
		4,8	4500	10,2	52,5
	Fremdbelüftung (OB)	3,3	1500	21,0	37,4
		6,8	3000	21,6	73,6
		8,0	4500	17,0	87,5
		7,9	6000	12,6	85,0
330 VDC	Selbstkühlung (UB)	2,7	1500	17,2	9,0
		5,0	3000	15,9	16,1
		5,0	4500	10,6	16,4
	Fremdbelüftung (OB)	3,2	1500	20,4	10,9
		6,7	3000	21,3	21,8
		8,2	4500	17,4	26,9
		7,8	6000	12,4	24,7
560 VDC	Selbstkühlung (UB)	2,6	1500	16,6	5,3
		5,0	3000	15,9	9,8
		5,0	4500	10,6	9,6
	Fremdbelüftung (OB)	3,2	1500	20,4	6,6
		6,7	3000	21,3	13,3
		8,2	4500	17,4	15,8
		7,8	6000	12,4	15,0

Figura 85. Características de los motores PMS 150F

Los planos del motor y las dimensiones dependiendo del modelo elegido para montar en una motocicleta eléctrica también ha sido proporcionado por dicho fabricante.



Motortyp	Ø D1	Ø DT	Ø D5	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	GM
PMS/PGS 080	155	60	50	112	78	31	54	40	85	173,5	M6×12
PMS/PGS 100	188	73	52	146,5	102	41,5	77	62	112	211	M8×12
PMS/PGS 120	230	152	80	160	113	42	87	70	110	254	M8×12
PGS 150	274	152	65	186	142	42	106	78	126	301	M8×16

Motortyp	Ø DZ	NL	NB	NT	ND	GZ
PMS/PGS 080	14	20	5	3	2,5	M6×20, DIN332-D
PMS/PGS 100	19	25	6	3,5	2,5	M8×20, DIN332-D
PMS/PGS 120	19	25	6	3,5	3	M8×20, DIN332-D
PGS 150	24	30	8	4	5	M8×25, DIN332-D

alle Motortypen	Ø DG	LG
Gebergehäuse mit Kabelausführung (RLS)	81	20
Gebergehäuse mit Steckverbinder und/oder Resolver	93	33
Motorvarianten mit Hall-Sensoren	81	20
Ohne Geber	0	0

Maße in mm

Figura 86. Planos y dimensiones de los motores de la serie PMS

3.2 DISEÑO Y UNIDAD DE CONTROL

La parte a tener en cuenta para un buen diseño de la unidad de control de una motocicleta eléctrica es su controlador, uno de los componentes más importantes del vehículo eléctrico. El controlador podemos decir que es el cerebro, el encargado de aprovechar el máximo rendimiento de la motocicleta. En la motocicleta eléctrica la energía que se inyecta en el motor procede de la batería. La principal función por la que se instala el controlador varía según las características que se quiera obtener del motor y el uso que se va a dar a dicha moto, por ejemplo, ciudad, carretera, campo o circuito. Para tener distintos comportamientos del controlador, se hacen variar los parámetros de dicho controlador para tener distintas respuestas de la motocicleta eléctrica.

La unidad de control del motor eléctrico que tengamos en nuestra motocicleta busca obtener una determinada respuesta del sistema mecánico del que se dispone, a esto nos referimos con, una velocidad, un par o una posición, a través del control de las diferentes magnitudes que gobiernan el motor (corriente, frecuencia, factor de potencia, etc.). Con la unidad de control también hay que tener en cuenta algunas restricciones para no sobrepasar determinados valores de corriente, tensión, aceleración, etc.

Las ventajas que supone la elección de un buen sistema de control en el motor eléctrico son las siguientes:

- Disminuyen gastos por mantenimiento.
- Alargan la vida útil del motor y de las piezas mecánicas acopladas al eje del motor controlado.
- Posibilidad de ahorro de energía.
- Control del factor de potencia.
- Control de inyección de armónicos.
- Menores esfuerzos mecánicos en el motor.
- Menor calentamiento.

Hace unos años era difícil realizar los ajustes de los parámetros del controlador, pero gracias, a los grandes avances de la tecnología y la electrónica hoy en día es fácil y simple la configuración de un controlador. Con el avance de la tecnología nos referimos a términos de eficiencia, mayor abanico de parámetros, menor costo y la reducción de tamaño y peso. Dependiendo también del motor que se vaya a instalar en un vehículo eléctrico, ya sea corriente continua o corriente alterna, deberemos de buscar un sistema de control con la mayor eficiencia del motor instalado.

Hoy en día, el poder no es lo único que la gente está demandando. Las nuevas características tales como la capacidad de programación, entradas/salidas integradas, unidades tacómetro, frenado regenerativo y muchos elementos de seguridad.

Siempre que nos disponemos a elegir el controlador más adecuado debemos de tener muy en cuenta el motor, las baterías y la tensión de nuestro equipo para sacar el mayor rendimiento a nuestra motocicleta.

3.2.1 FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL CONTROLADOR

A lo largo de los últimos 100 años han ido evolucionando las funciones del controlador, el control de la velocidad y la potencia del motor eléctrico. El controlador nos permite obtener el funcionamiento ajustado de las necesidades que requiramos en dicho momento para la conducción de una motocicleta específica. Es el que controla los parámetros del motor.

Al fin y al cabo el controlador forma parte del accionamiento junto con el resto de los elementos del vehículo, como son, el motor eléctrico, la fuente de alimentación, el convertidor electrónico de potencia, la carga mecánica y el sistema de transmisión.

Cuando hablamos de los objetivos que debe de cumplir el controlador, decimos que es el encargado del control de los tiempos cortos de arranque, paro e inversión (controlado por el factor de potencia), los cambios de velocidad (controlado mediante frecuencias), la aceleración de la motocicleta, el mantenimiento de la velocidad constante, parada en posición y proporcionar un par a baja velocidad.

Cuando hablamos de los objetivos del conjunto de accionamientos son fijar, variar o mantener la velocidad, arranque o paro con suavidad, ajuste de los parámetros del proceso, sincronización de velocidad, posición y control de las aceleraciones, sincronizar la velocidad de los motores, sincronizar posición de los motores.

En estas líneas se habla de los controladores que datan de más de 100 años los cuáles no incorporan tanta tecnología.

3.2.2 CONTROL MULTISWITCHING

Multiswitching data de finales de 1890. Este tipo de control es la forma más simple y más básica de control de velocidad. Multiswitching utiliza filas de baterías separadas en paquetes que suministran diversos voltajes. Un ejemplo, si nos fijamos

en un pack con un total de 120V, que podría ser cableado en cuatro secciones cableadas. Cada sección produciría una tensión separada de 30V. Al inicio, una serie de baterías produciendo 30V se dedica limitando la tensión y la corriente. Conforme el vehículo comienza a moverse, otro bloque de la batería se enciende. Cada bloque de baterías corresponde a una velocidad del vehículo, por lo tanto con este ejemplo, nuestro vehículo tendría cuatro velocidades. Cada batería está representada por conmutación de cadenas de baterías y aumento de la tensión 30, 60, 90 y 120V.

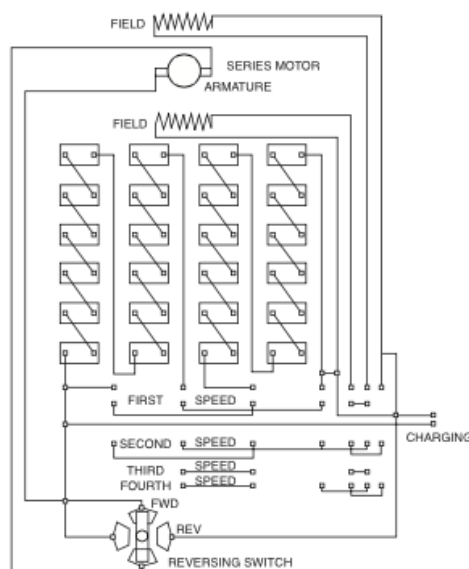


Figura 87. Dispositivo multiswitching

Los sistemas posteriores que siguieron a este tipo de control antes de llegar a la electrónica consistieron en interruptores, relés y contactos conectados a organizar las conexiones de las baterías para suministrar diferentes tensiones. Se les acompañaban con grandes resistencias. Estos sistemas en ocasiones eran ineficaces y poco fiables.

3.2.3 CONTROLADORES DE ESTADO SÓLIDO

Conforme pasó el tiempo, la tecnología de controlador fue sufriendo grandes avances. A partir del año 1960, se desarrolló un rectificador de silicio (SCR), un controlador de ancho de pulso. Este tipo de controlador se encendía y apagaba rápidamente para variar la velocidad del motor. Mediante el control del tiempo de encendido y apagado de los pulsos de energía, el controlador intentaba ofrecer la menor tensión o corriente. Los controladores SCR fueron una gran mejora con

respecto a sus antecesores controladores, que operan a baja frecuencia de conmutación, alrededor de 400Hz, lo que crean un pequeño sonido. Son reconocidos por un ruido distinto al resto de controladores.

A finales de 1970, aparecieron unos controladores más modernos de ancho de pulso (PWM), principalmente el MOSFET compuesto por un metal semiconductor. Este controlador proporcionó un control más suave y eficiente para el motor. Como diferencia respecto a los SCR, es que dichos controladores operan a frecuencias de entre 15-18kHz, muy por encima del rango auditivo humano. Este factor es el que crea el funcionamiento del motor y del control más suave. Es totalmente silencioso. Todos los controladores incluyen por lo general alguna función para la limitación de la corriente para proteger al motor frente a daños.

3.2.4 UNIDAD DE CONTROL PARA MOTORES DE CC

3.2.4.1 Ecuaciones de la máquina de cc en régimen permanente

La fuerza electromotriz (f.e.m) en bornas de la máquina en vacío es proporcional al flujo inductor y a la velocidad de giro:

$$E = k \cdot \Omega \cdot \Phi \quad (23)$$

3.2.4.2 Motor de excitación independiente

Estudiamos en primer lugar la máquina de excitación independiente, en la cuál el inductor crea una corriente I_f que genera un flujo magnético que induce un par en el motor al interaccionar con la corriente en el inducido I_a .

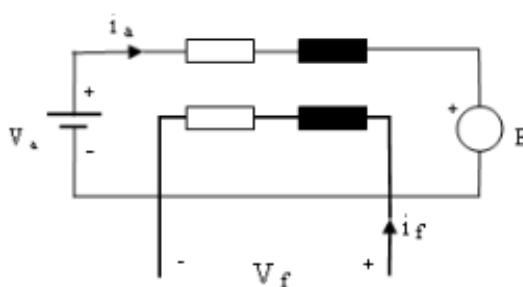


Figura 88. Motor de CC de excitación independiente

✓ Ecuación del par

En este apartado vamos a obtener las diferentes variables sobre las que vamos a poder actuar para realizar el control. Para ello partimos de las ecuaciones del funcionamiento del motor c.c.

$$V_a = R_a \cdot I_a + E = R_a \cdot I_a + M \cdot I_f \cdot \omega_m \quad (24)$$

$$V_f = I_f \cdot R_f \quad (25)$$

$$I_a = \frac{V_a - E}{R_a} = \frac{V_a}{R_a} - \frac{M \cdot I_f \cdot \omega_m}{R_a} \quad (26)$$

$$P_m = E \cdot I_a = M \cdot I_f \cdot \omega_m \cdot I_a \quad (27)$$

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_m} = M \cdot I_f \cdot I_a \quad (28)$$

$$T_e = \frac{V_a \cdot I_f \cdot M}{R_a} - \frac{(I_f \cdot M)^2}{R_a} \cdot \omega_m = \frac{V_a \cdot V_f \cdot M}{R_a \cdot R_f} - \frac{(V_f \cdot M)^2}{R_a \cdot R_f^2} \cdot \omega_m \quad (29)$$

De la ecuación final que tenemos del par podemos ver que para regular la velocidad del motor se deberá de actuar en la tensión del inducido V_a , o bien sobre la corriente del inductor i_f .

✓ Curva par-velocidad

Partiendo de las ecuaciones obtenidas podemos deducir la forma que tiene esta curva en ésta máquina:

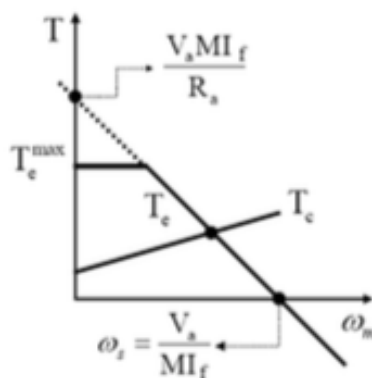


Figura 89. Curva par-velocidad de un motor de CC de excitación independiente

Para el control de motores c.c. tenemos dos zonas de control diferenciadas, ambas referidas a la velocidad nominal. En la región 1, el par es constante con

velocidades inferiores a la nominal. Sin embargo, con velocidades superiores a la nominal el par disminuye y la potencia se mantiene constante

Cuando tenemos que controlar un motor de corriente continua de excitación independiente, en la región 1; ésta cubre el intervalo de velocidad cero a velocidad nominal, la regulación se hace por control de la tensión aplicada al inducido (control de corriente de inducido, I_a). Sin embargo, en la región 2, que va desde la velocidad nominal, la regulación se hace por control de la corriente de excitación (corriente del inductor, I_f).

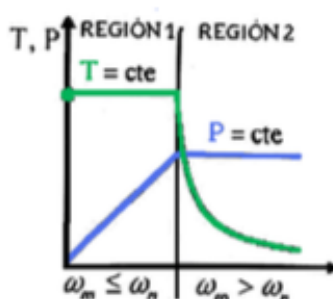


Figura 90. Regiones de control de un motor de CC con excitación independiente

Si modificamos la tensión de inducido durante la regulación de la velocidad, se obtendrán familias de curvas par-velocidad con la misma pendiente que la gráfica par-velocidad; a mayor velocidad de inducido, mayor será el par que se obtiene a velocidad de giro nula.

Si modificamos la corriente de excitación obtendremos familias de curvas con diferentes pendientes.

3.2.4.3 Motor de excitación serie

Cuando lo que tenemos que controlar es un motor de corriente continua serie, sólo tenemos la opción de controlar la tensión aplicada a la máquina o la corriente en todo el margen de velocidades, ya que la corriente de inducido y de inductor coinciden ($i_a = i_f$).

Esa corriente hace que se genere un flujo magnético en la bobina que induce un par en el motor al interaccionar con la corriente.

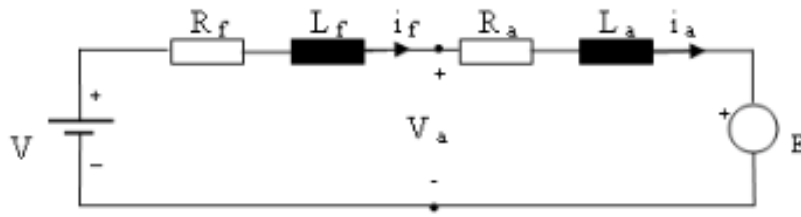


Figura 91. Motor de CC de excitación serie

Si conseguimos entender bien la regulación de una máquina de excitación independiente es posible obtener cualquier tipo de curva mecánica, por lo que esto hace que la utilización de motores serie y compuestos se ha reducido en gran medida.

✓ Ecuación del par

$$V_f = (R_a + R_f) \cdot I_a + (E \cdot V_f) = R_a + R_f + (M \cdot \omega_m) \cdot I_a \quad (30)$$

$$I_a = \frac{V_f}{R_a + R_f + (M \cdot \omega_m)} \quad (31)$$

$$P_m = E \cdot I_a = M \cdot I_a^2 \cdot \omega_m \quad (32)$$

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_m} = M \cdot I_a^2 = \frac{M \cdot V_f^2}{[R_a + R_f + (M \cdot \omega_m)]^2} \quad (33)$$

Actuando sobre V_f se hace posible la regulación de la máquina.

✓ Curva par-velocidad

De la misma manera que en la anterior máquina, partiendo de las ecuaciones del par, se representa el par frente a la velocidad:

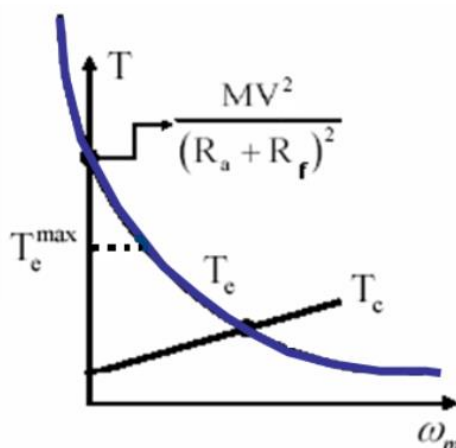


Figura 92. Curva par-velocidad de un motor de CC con excitación serie

Como se observa la forma de controlar este tipo de motores es más sencillo que el de excitación independiente ya que sólo podemos actuar sobre la tensión inyectada en el circuito.

Vamos a explicar a continuación los más populares, los controladores de corriente continua de motores en serie. Sus principales características es que son programables, producen una alta cantidad de energía y son rentables. Otro factor que los hace más populares, es la gama tan amplia que existe de motores eléctricos que se puede elegir a la vez con el controlador, para montar un buen equipo.

La velocidad de un motor c.c. es directamente proporcional a la tensión suministrada, por lo tanto, si la tensión se reduce, la velocidad lo hará en la misma proporción. Este tipo de controlador trabaja variando el valor de la tensión medio que es enviado al motor. Para realizar este ajuste, se podría realizar de alguna manera, ajustando en cada instante el valor de la tensión; esto es un método tan ineficaz que no llega ni a plantearse; sin embargo con los grandes avances de la tecnología, esto se soluciona de manera muy satisfactoria. El camino a seguir es la instalación de un dispositivo electrónico cuya función principal es la de interruptor entre la fuente de alimentación y el motor, para que durante un período de tiempo de funcionamiento le llegue el nivel de tensión deseado; cuando el interruptor se encuentra cerrado; y durante otro período de tiempo no le llegue alimentación, en este caso, el interruptor se encontraría abierto, para así poder variar la tensión media que le llega de una forma rápida y sin afectar al resto de parámetros.

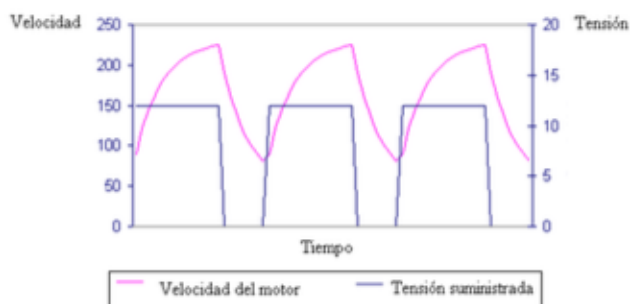


Figura 93. Velocidad-tensión suministrada de un motor de CC con control PWM

Esta gráfica muestra la variación de la velocidad del motor en función del voltaje suministrado.

Una gráfica que es bastante interpretativa de cómo funcionaría el interruptor abierto/cerrado la podemos observar en la siguiente imagen, donde se representan los pulsos que se envían al motor para obtener el valor de tensión media y por lo tanto, las velocidades de dicho motor.

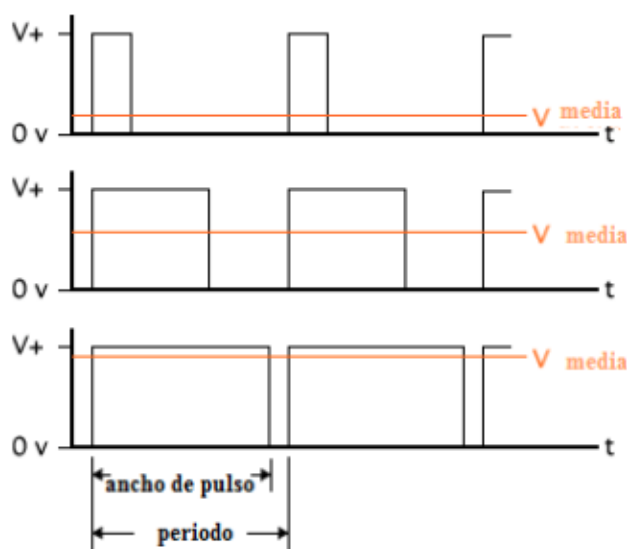


Figura 94. Variación en los anchos de pulso del control PWM para obtener mayor o menos velocidad

En la primera figura se observa la velocidad máxima que se controla con el 20% del tiempo encendido; en la segunda figura el 60% y en la tercera figura el 90% del tiempo encendido.

La modulación PWM se puede llevar a cabo mediante la utilización de varios dispositivos electrónicos y también se podría aplicar control vectorial para variar la

velocidad del motor de continua pero, aunque su control es sencillo, el mantenimiento es caro.

3.2.5 MODULACIÓN PWM

El controlador PWM es un dispositivo de estado sólido que utiliza un modulador de ancho de pulso que envía ráfagas cortas de corriente al motor. La velocidad de sus pulsos es de 15kHz. La mayoría de los controladores controlan ellos mismos en casos de sobrecorrientes o sobrecalentamientos y reducir la potencia o provocar el cierre temporal en caso de que sea necesario.

Existen dispositivos de seguridad para asegurarse de que todo está conectado correctamente, y algunos otros aspectos, como por ejemplo, los bloqueos del sistema que mantienen al vehículo parado cuando por alguna razón se activa la marcha sin quererlo. Si el controlador detecta que algo no es correcto no se encenderá.

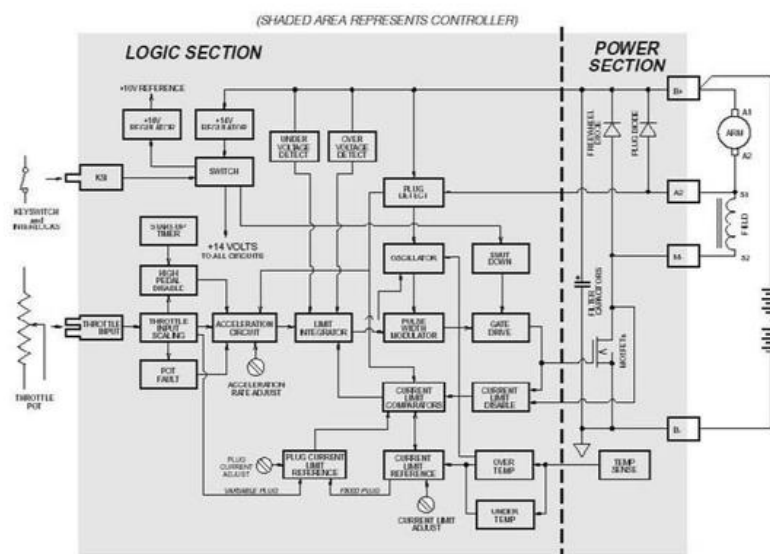


Figura 95. Lógica de control

3.2.6 UNDERVOLTAGE CUTBACK

Esta característica está incorporada en los controladores. Si se descarga una batería demasiado rápido, se acorta la vida de la batería de forma permanente. Lo que hace esta característica es monitorizar la tensión de alimentación y comenzar a minimizar la producción; esto es si la batería comienza a descargarse, el controlador deberá de actuar incluso apagando el vehículo. Los controladores se programan con

unos límites donde deben de actuar y será el momento en el que debes de parar tu vehículo tan pronto como puedas y realizar una carga de la batería. De todas formas las baterías si se dejan reposar entre 15/20 minutos ganarán algo de carga para poder llevar nuestro vehículo hasta un punto de recarga.

3.2.7 OVERTEMPERATURE CUTBACK

Esta es otra característica cuyo papel es el de seguridad que llevan los controladores para evitar que el controlador se queme o peor aún evitar un incendio eléctrico. Si el controlador se encuentra sobrecargado, cuando hay demasiada intensidad durante demasiado tiempo, o porque la refrigeración no sea la adecuada, se calentará. Por ello decimos que es una medida de protección.

Algunos controladores tienen una característica para controlar la temperatura del motor y reducirán la corriente cuando la temperatura del motor se esté elevando. La mayoría de los controladores, la forma de operar, es reducir la corriente proporcionalmente a medida que la temperatura interna del controlador está por encima de la del umbral establecido. La frecuencia de los cambios del controlador durante el sobrecalentamiento proporcionará un ruido que alertará al operador. Una vez que tengamos que parar nuestro vehículo por sobrecalentamiento deberemos de esperar a que la temperatura se reduzca hasta los límites de funcionamiento establecidos. Si una vez que hemos parado el vehículo, la temperatura sigue aumentando debido a una mala refrigeración y el controlador llega al límite extremo, se desconectará totalmente con la característica de auto-conservación. Si el corte térmico que se debe de producir en estas ocasiones se produce a menudo, es quizás, porque el controlador que hemos elegido no es el adecuado.

3.2.8 CONTROLADORES DE CA

Hasta hace unos años era difícil disponer de controladores de corriente alterna, pero hoy en día son muchos los dispositivos que disponemos de diferentes tipos y tamaños.

Los controladores de corriente alterna tienen algunas ventajas sobre los de corriente continua, incluyendo una mayor fiabilidad, mayor rango de velocidad, aumento de la eficiencia y una amplia gama de funciones. Los sistemas de corriente

alterna alcanzan hasta un 94% de eficiencia un 6% más que los de corriente continua. Los controladores CA permiten un control más preciso y la capacidad de regeneración completa.

Estos controladores son de tamaño compacto y totalmente sellados cuyas carcasas son impermeables. Dichos controladores disponen de muchas características avanzadas con controladores lógicos programables para proporcionar a los usuarios más flexibilidad y una avanzada tecnología del controlador.

Siguiendo con la comparación respecto a los controladores de CC, los controles CA exhiben frenado regenerativo natural sin hardware adicional, relés o cables.

Los controladores CA acoplados a un motor CA proporcionan un par constante para una amplia gama de rpm. Esto proporciona una aceleración constante independientemente de la velocidad y, a menudo permite al vehículo usar un relación de transmisión. El rpm máximo del eje de un motor de corriente continua es 2 veces inferior al que ofrece un motor de corriente alterna, lo que requiere el cambio de velocidad, perdiendo así par en las ruedas. Normalmente, los vehículos que utilizan los sistemas de corriente de continua tienen una relación de transmisión más alta, ganando velocidad punta pero perdiendo aceleración a bajas velocidades.

La mayoría de los controladores CA operan con tensiones elevadas, de hasta 400V CC, la gama de tensiones de funcionamiento va desde 24 hasta 450V CC. Con baterías de alta tensión, el cableado se vuelve más flexible y el tamaño del cable se reduce. Las pérdidas de potencia resistivas son menores también y aumenta la eficiencia del vehículo.

Por lo general, con una tensión pequeña, se ve obligado a utilizar un cable más grande debido a la corriente que va a circular. Pesa más, necesita conexiones de mayor tamaño, ocupa más espacio y cuesta más ya que requieren cable de soldadura pesada, relés y fusibles.

Hace unos años estos dispositivos eran caros, de gran tamaño y solo se utilizaban en excepcionales casos para vehículos de alto rendimiento. Esto ha evolucionado y mucho en los últimos años.

3.2.9 TIPOS DE CHOPPER Y CUADRANTES DE FUNCIONAMIENTO

En este epígrafe se va a detallar el funcionamiento de los chopper que se utilizan tanto para controlar motores de corriente continua de excitación independiente como de excitación serie.

Este controlador es un circuito encargado de la regulación de una fuente de corriente continua que apenas puede ser regulado. Sus características básicas son que permiten variar y controlar el valor medio de la tensión que le llega a una carga a partir de una tensión de valor fijo.

Los diferentes tipos de chopper que se dispone de ellos se presentan a continuación y difieren entre sí en función del diagrama tensión-corriente en los que son capaces trabajar.

- Chopper directo o reductor, lo usamos cuando trabajamos en el primer cuadrante.
- Chopper inverso o elevador, lo usamos para trabajar en el segundo cuadrante cuando necesitamos por su capacidad de invertir la corriente.
- Chopper de dos cuadrantes.
- Chopper de cuatro cuadrantes.

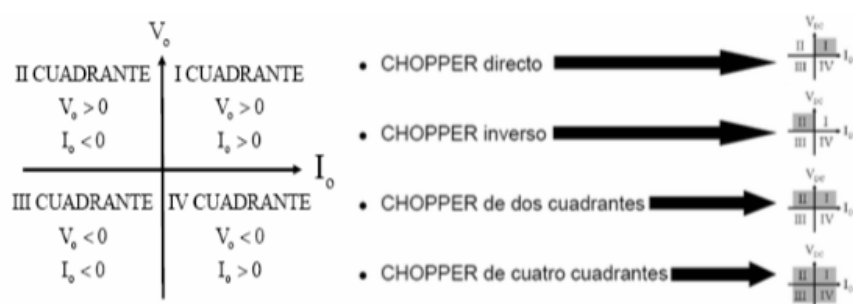


Figura 96. Tipos de chopper en función de los cuadrantes de trabajo

Se construyen a partir de diodos de potencia, interruptores estáticos, por ejemplo, GTO's, IGBT's, transistores, etc.) y soportan altas potencias proporcionando un alto rendimiento.

Como ventajas podemos remarcar la regulación continua, con menores pérdidas y posibilidad de regeneración de la tensión y un mantenimiento muy sencillo.

Como desventajas remarcar la necesidad incluir filtros de continua para evitar los problemas de rizado que vienen acompañados de armónicos que producen pérdidas, lo cual encarece el coste del controlador y el mantenimiento ha de ser realizado por personas más cualificadas.

3.2.9.1 Chopper directo o reductor

Se instala un chopper directo cuando el objetivo es pasar de una tensión en corriente continua a otra distinta también de corriente continua. El semiconductor utilizado es un GTO y un diodo.

En el chopper directo inicialmente, sin corriente de carga, si el GTO se encuentra polarizado positivo y puede ser disparado tenemos que la tensión en continua es mayor que la fuerza electromotriz (V_{DC}^F). Cuando se dispara el GTO la tensión en continua se aplica sobre la carga, pasando toda la corriente por el GTO, en ese instante se establece una corriente de subida, ya que el diodo al estar polarizado éste no conduce. La tensión de la fuente aparece sobre el diodo y lo polariza en inverso, por lo que permanece abierto.

Al apagar el GTO la corriente pasa por el diodo, dicha corriente no viene ya directamente de la fuente ya que existe una corriente que se ha establecido en la carga, y comienza un ciclo de bajada de la corriente a través del diodo. La derivada de la corriente en la inductancia es la que produce la f.e.m. necesaria para polarizar el diodo en directo.

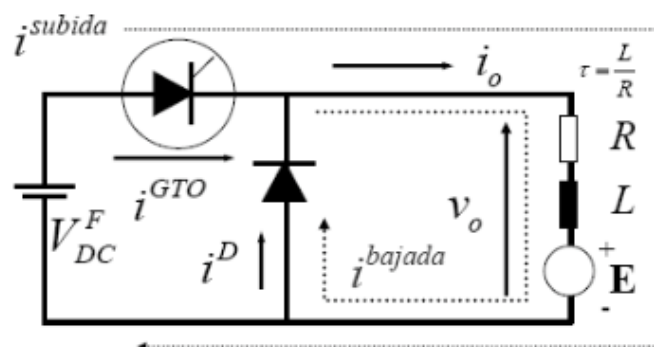


Figura 97. Esquema eléctrico de un chopper directo

En la siguiente figura vamos a observar las curvas representadas de la tensión y la corriente en la carga de un chopper en directo.

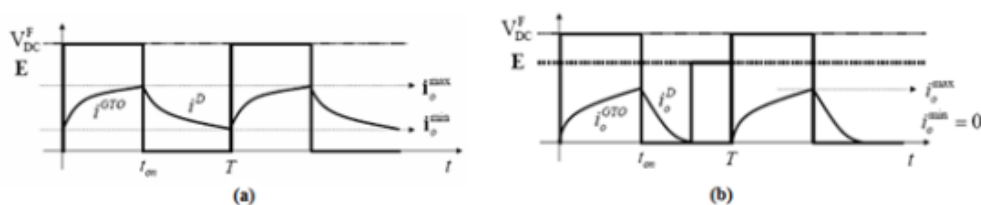


Figura 98. Modo de conducción

Vemos que tenemos dos modos de conducción; en la figura a) el modo de conducción continua que se produce cuando i_o es positiva. Cuando i_o es negativa el modo de conducción que tenemos es discontinuo.

Independientemente del modo de conducción del chopper podemos establecer distintas formas de conducción en función del tiempo de encendido o apagado del GTO:

- Modulación por ancho de pulso (PWM). Durante el tiempo que conduce el GTO, el periodo T es fijo y t_{ON} es variable.
- Modulación en frecuencia con el tiempo t_{ON} fijo y el periodo T variable.
- Modulación en frecuencia y pulso con el tiempo t_{ON} es variable y el periodo T variable.

Las ecuaciones de funcionamiento son las siguientes:

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} V_{dc}^F dt = \frac{t_{on}}{T} V_{DC}^F = \delta \cdot V_{DC}^F \quad (34)$$

siendo δ la razón de conducción con un valor, ($0 \leq \delta \leq 1$).

$$(V_o^{min} = 0) \leq V_o \leq (V_o^{max}) = V_{DC}^F \quad (35)$$

La ecuación de la corriente es la siguiente:

$$V_{DC} = \delta \cdot V_{CC} \geq 0 \quad (36)$$

$$I_{DC} = \frac{V_{DC} - E}{R} = \frac{\delta V_{CC} - E}{R} \geq 0 \rightarrow \delta \geq \frac{E}{V_{CC}} \quad (37)$$

$$\delta = \frac{t_{on}}{T} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \rightarrow \text{razón de conducción} \quad (38)$$

$t_{on} \rightarrow$ tiempo en el que conduce el GTO

$t_{off} \rightarrow$ tiempo en el que conduce DIODO

Para obtener la razón de conducción necesaria para que el valor de la tensión sobre la carga sea el necesario debemos de controlar el tiempo de conducción del GTO.

- ✓ Control de motores de CC de excitación independiente mediante Chopper directo

Para llevar a cabo este control, se colocan dos chopper directos independientes, uno controlará el devanado de excitación, siempre con flujo máximo, y otro controlará el inducido.

- ✓ Control de motores de CC de excitación serie mediante Chopper directo

Normalmente se hace con un solo chopper conectado en el devanado del motor.

3.2.9.2 Chopper inverso o elevador

El cambio que se realiza en comparación con el chopper directo es el cambio de posición entre el diodo y el GTO, por lo que ahora la zona de funcionamiento del

chopper en la zona 2. Al poder invertir la corriente, podemos usar el chopper en modo regenerativo.

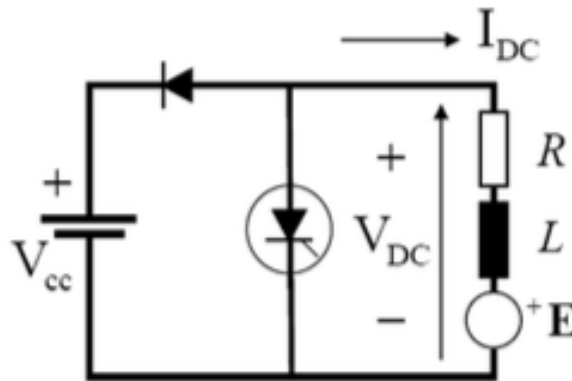


Figura 99. Chopper inverso o elevador

En la siguiente figura podemos observar que en el tiempo en el cual conduce el diodo es el t_{on} , a diferencia que en el directo. La razón de conducción o el ciclo de trabajo se calcula de la misma forma que el chopper directo ($0 \leq \delta \leq 1$).

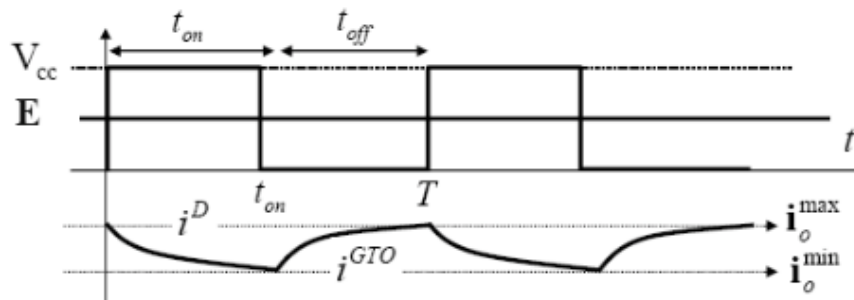


Figura 100. Modo de conducción

Las ecuaciones que representan el funcionamiento son:

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_{t_{on}}^T V_{cc} dt = \frac{T-t_{on}}{T} \cdot V_{cc} = (1 - \delta) \cdot V_{cc} \quad (39)$$

$$V_{DC} = (1 - \delta) \cdot V_{cc} \geq 0 \quad (40)$$

$$I_{DC} = \frac{V_{DC} - E}{R} = \frac{(1 - \delta) \cdot V_{cc} - E}{R} \leq 0 \rightarrow \delta \geq 1 - \frac{E}{V_{cc}} \quad (41)$$

3.2.9.3 Chopper de dos cuadrantes

La obtención de este chopper es la combinación del chopper directo y el inverso, por lo tanto conseguiremos trabajar tanto en el primer cuadrante de

funcionamiento, como en el segundo cuadrante. Por lo que este chopper es uno de los más utilizados.

En este caso los en el t_{on} conducen los GTO's y los diodos en el t_{off} . El funcionamiento sería el siguiente.

Cuando dispare el GTO_1 y trabaje D_1 , la corriente media será positiva al igual que la tensión, por lo que la potencia activa será positiva, y estará trabajando en el primer cuadrante. Durante este proceso el GTO_2 se mantendrá apagado. Cuando se dispare el GTO_2 y trabaje el D_2 , entonces estará trabajando en el segundo cuadrante con el GTO_1 apagado. Por lo tanto las ecuaciones de intensidad y corriente ya las tenemos, que son las enunciadas en los apartados de chopper directo e inverso.

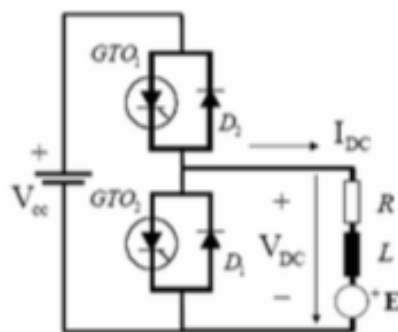


Figura 101. Chopper de dos cuadrantes

3.2.9.4 Chopper de cuatro cuadrantes

Como bien indica su nombre, este chopper funciona en los cuatro cuadrantes, pero no es muy común su uso debido a la complejidad que presenta. Se pueden obtener corrientes y tensiones de cualquier tipo.

Para explicar su funcionamiento, en primer lugar, se muestra la imagen de cómo sería su esquema eléctrico.

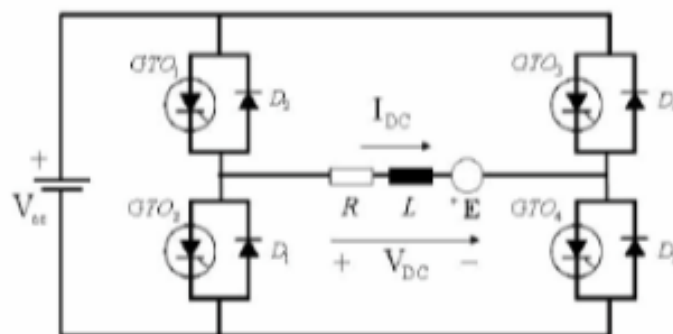


Figura 102. Chopper de cuatro cuadrantes

Si queremos trabajar en el primer cuadrante se dispararán los GTO's 1 y 4, trabajando D_1 . Si queremos trabajar en el segundo cuadrante, se dispara el GTO₂ y trabajan los diodos 2 y 3. Cuando se trabaja en el tercer cuadrante, se disparan los GTO's 2 y 3, trabajando D_2 y por último para trabajar en el cuarto cuadrante se dispara GTO₁ y trabajan los diodos 1 y 4.

El circuito es muy complejo y por lo tanto puede tomar valores de tensión y corriente de ambos signos, por lo tanto la máquina acoplada al eje podrá actuar como motor o generador en función del signo de la potencia.

Si la potencia en el eje es negativa, la máquina actuará como generador. Este caso no nos interesa y se da en el segundo y cuarto cuadrante.

Si la potencia es positiva, la máquina actuará como motor. El caso en el que se centra nuestro proyecto. Esto se produce cuando los chopper trabajan en el primer y tercer cuadrante y se consigue con la tensión y la corriente de igual signo.

3.2.10 CURTIS INSTRUMENTS

Curtis Instruments fue fundada en el año 1960 en Monte Kisko, Nueva York, USA. Esta compañía celebró su 50 aniversario en el año 2010. Nueva York, ha sido un líder en la vanguardia de desarrollo de alternativas de transportes limpios. Actualmente Curtis Instruments cuenta con cuatro grupos de Ingeniería situados a lo largo del mundo. Las sedes más importantes se encuentran en Nueva York, California, Suiza y China. Las plantas de fabricación se encuentran localizadas en Puerto Rico, China y Bulgaria. Durante los más de 50 años que la empresa lleva prestando sus servicios Curtis ha fabricado una gran variedad de productos como

son controladores c.c. y c.a., sistemas de gestión, medidores, convertidores c.c.-c.c., cargadores de baterías, etc. Por ello es líder en la industria del control de la velocidad del motor, medidas de baterías y todo lo relacionado con el vehículo eléctrico.

3.2.10.1 Controlador serie básico

A continuación se presenta el modelo utilizado para un proyecto de una motocicleta eléctrica denominada “Electric Hog”, un controlador 1231C. Ésta motocicleta fue construida en el año 2001 y se convirtió en el diseño básico para posteriores prototipos, que ahora se denomina Electra Cruiser. Este modelo es el más popular entre las conversiones de vehículos eléctricos.

Estos controladores proporcionan un control suave, silencioso y rentabilidad del motor en velocidad y par en una amplia gama de vehículos. Estos controladores utilizan tecnología MOSFET, introducida en controladores por Curtis Instruments, proporciona unos sistemas de control más rápidos.

Este modelo de Curtis son de alta potencia, controladores de velocidad de motor electrónico MOSFET de alta resistencia que son ideales para su uso de vehículos eléctricos que utilizan hasta 144V.

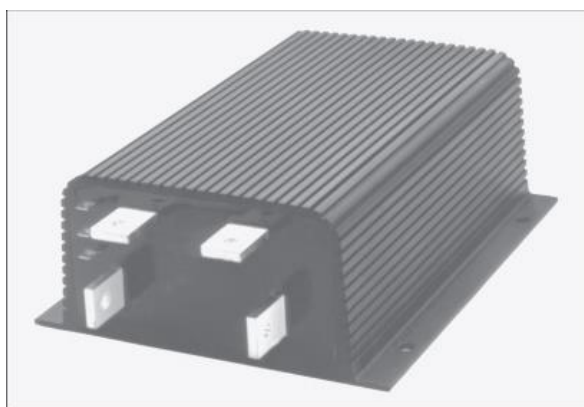


Figura 103. Modelo Curtis Instruments

Características más relevantes de estos controladores:

- Unidades variables infinitas y control de freno.
- Alta conmutación de frecuencia y una ultra baja caída de tensión proporciona muy alta eficiencia y un funcionamiento silencioso.

- Los costes, las pérdidas de calor en el motor y la batería son reducidas. Un par final, que aumenta la vida de la batería.
- Protección medioambiental por un sellado (que proviene de fábrica), reforzado, extrusionado con aluminio. Montaje sencillo y cableado con conectores de botón para el control de las señales. Buses de cobre sólido utilizados para las conexiones.
- La base de la potencia del controlador contiene dispositivos para un manejo sencillo, sin ajustes requeridos. Utiliza un potenciómetro de dos cables.
- Inhabilitación alta del pedal (HPD) función que monitoriza el estado del acelerador durante el encendido y evita la operación del acelerador hasta que ha sido devuelto a su posición inicial (característica opcional).
- Protección térmica y circuito de compensación que proporciona tanto temperatura menor como la reducción de una sobretensión, así como el límite de corriente constante a lo largo de todo el rango operativo.
- Función de corte de la tensión que protege contra la tensión baja de la batería, incluyendo la baja tensión provocada por cargas externas.
- El trazado de circuito por defecto del regulador cierra el motor en caso de que el circuito esté abierto ya sea defecto del regulador o del cableado para prevenir condiciones fuera de control.
- Función de desplazamiento de frecuencia que proporciona un mejor control del límite de corriente baja y una mejor protección del motor pasando de 15kHz a 1,5kHz.
- Disipador térmico opcional que mejora la capacidad térmica.

Tabla 6. Especificaciones modelo Curtis 1231

Frecuencia de operación	15/1,5kHz
Corriente de espera	Menos de 30mA
Rango de T^a ambiental de operación	-25°C → +50°C
Punto de corte del controlador	-25°C → +85°C

MODEL CHART

CURTIS PMC MODELS	VOLTAGE (volts)	CURRENT (amps)	2 MIN RATING (amps)	5 MIN RATING (amps)	1 HOUR RATING (amps)	VOLTAGE DROP @ 100A	UNDERVOLT CUTBACK (volts)
1231C-86XX	96-144	500	500	375	225	.30	64
1231C-77XX	72-120	550	550	375	225	.30	43
1221C-74XX	72-120	400	400	250	150	.50	43

Figura 104. Modelos de la serie 1231C

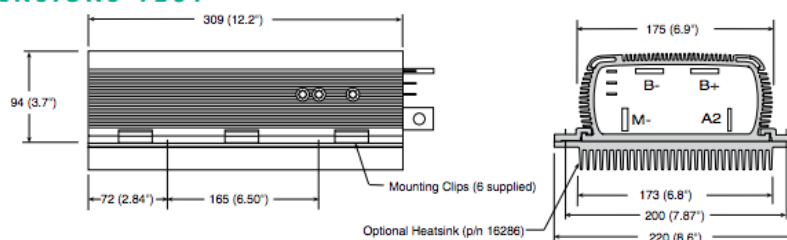
DIMENSIONS 1231

Figura 105. Dimensiones del controlador Curtis

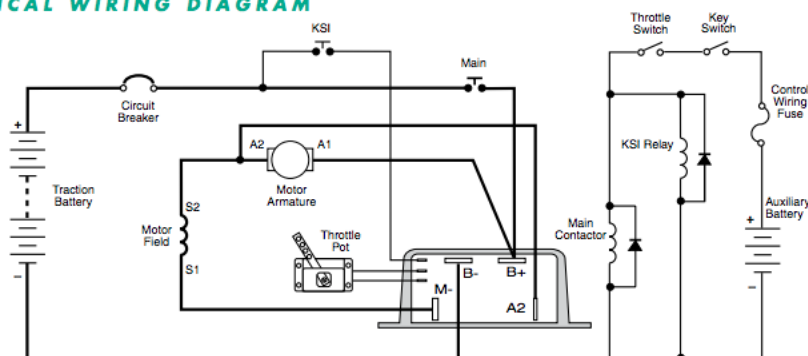
TYPICAL WIRING DIAGRAM

Figura 106. Conexión típica del controlador

✓ Operación de reducción de la velocidad

Con el ajuste de límite de corriente, la velocidad máxima de la motocicleta puede ser fácilmente limitada por seguridad o por otras razones. Con la instalación de la resistencia conectada en paralelo con el encapsulado del acelerador reducirá la velocidad máxima en función del valor de la resistencia. Si se utiliza una resistencia variable hará que el ajuste de la velocidad máxima sea más fácil. Con un interruptor, la velocidad puede estar limitada a la inversa solamente, o la disminución de la velocidad se puede desconectar.

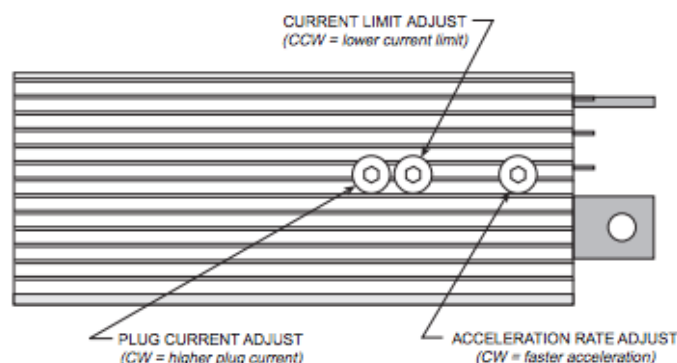


Figura 107. Localización de los ajustes básicos

✓ Formación de la rampa de regulación

Para la formación de la rampa de regulación se trabaja a partir de la salida del controlador con la posición del acelerador. Cuantos más circuitos tiene mayor es la configuración de la rampa de aceleración, mayor es el problema para controlar la motocicleta a velocidades bajas.

✓ Frenado por inversión de fases

Esta función la utiliza el motor de corriente continua para detener el vehículo cuando circula en una pendiente descendente con la diferencia respecto al frenado regenerativo de que la energía generada no es almacenada en la batería. La corriente se devuelve a la armadura creando una fuerza de frenado mayor. Este tipo de frenado nose recomienda para vehículos en carretera, por lo tanto podemos eliminar esta opción eliminando el cable que conecta en la fuente de alimentación.

✓ Circuito de distribución de los controladores básicos de un motor de CC

El control de velocidad se consigue lo que se denomina potbox de aceleración o caja de encapsulado. La potbox tiene una resistencia variable estándar de entre 0-5k Ω . El encapsulado de 5k Ω cableado con un reóstato de dos terminales. Para controladores con otras opciones, puedes utilizar otros aceleradores opcionales para el vehículo.

✓ Disposición del cableado del controlador básico de CC

Las figuras siguientes muestran el modelo más básico de distribución del cableado y el diseño de los componentes para la conversión en el vehículo eléctrico. El cableado de un vehículo depende del motor y del controlador que se haya instalado y de la función principal a la que está diseñado dicho vehículo.

Curtis Instruments tiene una gran variedad de controladores de motor en muchos tamaños y potencias para adaptarse a tus necesidades. Estos son los modelos más populares utilizados para vehículos eléctricos.

3.2.10.2 Controladores Curtis Instruments de CA

Este fabricante tiene una amplia línea de controladores de corriente alterna para diversas aplicaciones. Incluyen un software de accionamiento motorizado avanzada para proporcionar un control suave de la velocidad y el par en los diferentes modos aplicables. Los controladores de c.a. incluyen el frenado regenerativo, control de velocidad desde el inicio y control de par. Estos controladores dependiendo del modelo, tienen una tensión de funcionamiento de 24-80V c.c. y una salida de corriente de pico máxima de hasta 650A c.a. Su programador ofrece capacidad de diagnóstico y pruebas, además de una gran flexibilidad de la configuración.



Figura 108. Modelo Curtis Instruments de CA

Estos controladores muestran mejores avances de rendimiento, funcionamiento y sistema respecto a los controladores de c.c.:

- Funcionamiento silencioso con una alta frecuencia que oscila entre 0-300Hz.
- Sistemas de baterías de 24-80V con 350-650A.

- Sistema operativo de gran alcance que permite el procesamiento paralelo de las tareas de control del vehículo, las tareas de control de motores y la lógica de programación configurable por el usuario.
 - Tecnología PWM avanzada que proporciona un uso eficiente de los armónicos de motor de baja tensión de la batería, bajo rizado de par y pérdidas de conmutación minimizadas.
 - Capacidad de giro de cualquier motor de corriente alterna y una programación completa para alcanzar las características óptimas del motor.
 - En la batería se incluye el estado de la carga y las horas de trabajo.
 - El campo de programación con código descargable Flash.
- ✓ Super drive control
- El control de los vectores de actuación es controlado por unos algoritmos sintonizados por Curtis para proporcionar el par máximo y la eficiencia óptima en toda la gama de funcionamiento.
 - Rango de par/velocidad extremadamente amplio, incluyendo la capacidad de regeneración completa.
 - Modos internos de velocidad y control de par del primer bucle que permiten optimizar el rendimiento sin una caja de control adicional.
 - Tecnología de mapas de rendimiento que permite sintonizar el máximo rendimiento en conducción y frenado para algunas especificaciones específicas mediante el uso de equipos originales con parámetros programables.
 - Un modo de control de par que ofrece características únicas y ofrece una transición sin problemas y respuesta positiva en todas las condiciones.

A todo esto especificado debemos de observar otro tipo de funciones. Estos controladores incorporan circuitos de vigilancia interna y externa para garantizar un funcionamiento adecuado. Hay una interfaz de serie con una pantalla multifunción para trabajar con la pantalla Spyglass Curtis 840 que nos muestra las horas de trabajo, la gráfica de descarga de la batería y mensajes de error. Incluye una entrada

para controlar la temperatura del motor. Como conclusión podemos decir que se puede hacer mucho más con los controladores de corriente alterna que con los de corriente continua.

MODEL CHART

Model	Nominal Battery Voltage (V)	2 Min RMS Current Rating (A)	52-60 Min RMS Current Rating (A)
1236E-44XX	24-36	400	175
1236E-45XX	24-36	500	240
1236E-54XX	36-48	450	205
1236E-55XX	36-48	550	250
1236E-64XX	48-80	350 (1 min)	100

Figura 109. Modelos de la serie 1236E

DIMENSIONS mm (typical)

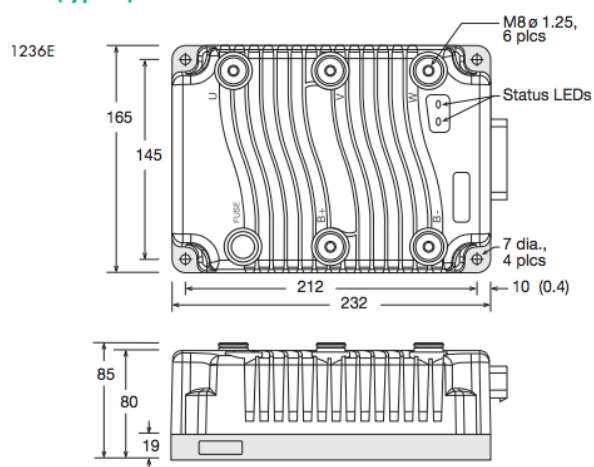


Figura 110. Dimensiones del controlador Curtis

TYPICAL WIRING

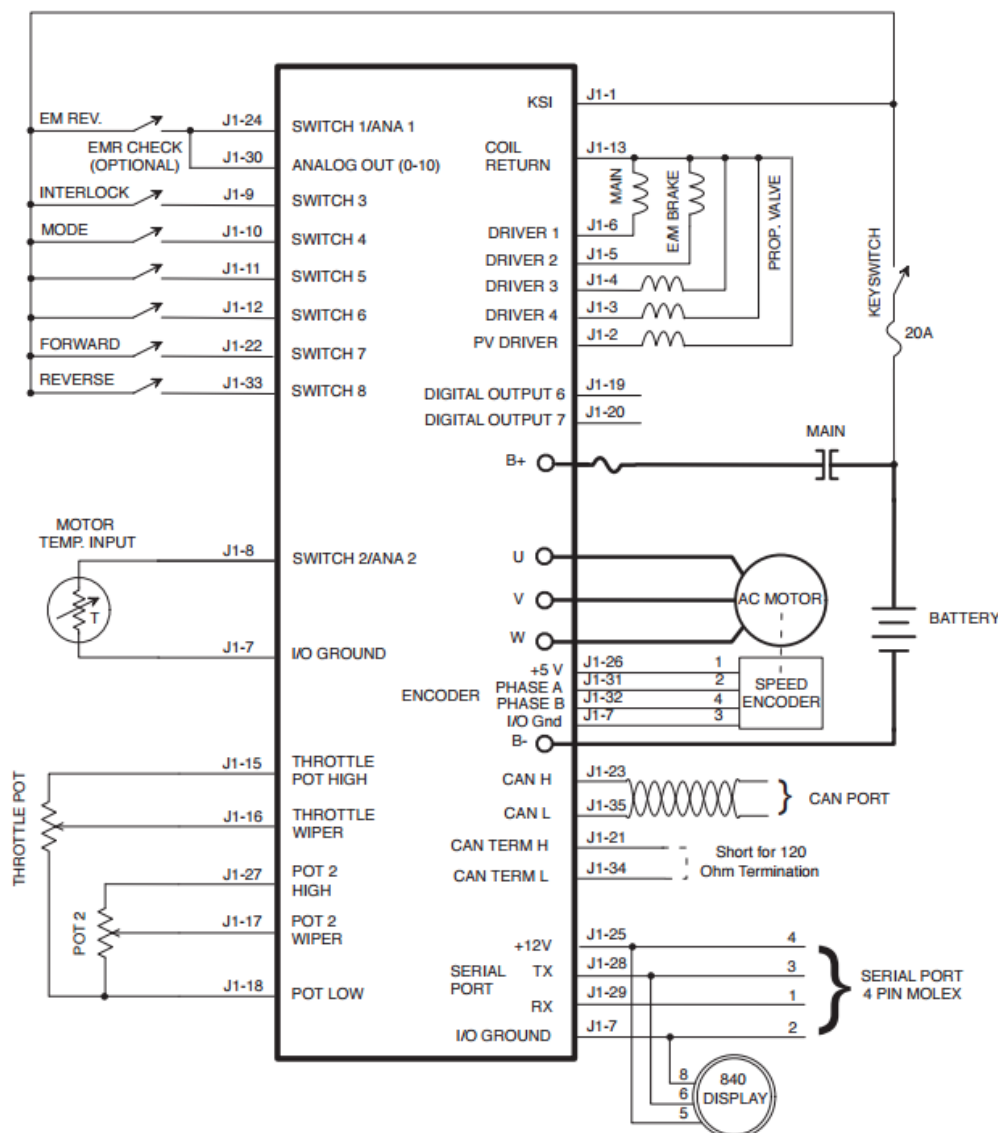


Figura 111. Conexión del controlador

3.2.11 CONTROLADORES ZAPI

ZAPI es una empresa italiana que comenzó a fabricar controladores en el año 1975. Al principio comenzó a construir controladores para motores de imanes permanentes y controladores en serie de motores de corriente continua, más tarde se centró en el diseño de controladores. En el año 1995 incluyó en su carta de ofertas una gama de controladores de corriente alterna con una gama de entre 24-96V. Actualmente ZAPI ofrece una gama amplia de productos con diferentes tipos de controladores que van desde 24V hasta 144V y mucho más.

Los objetivos que persigue la familia de ZAPI con el nombre de ZAPIMOS son los siguientes:

- Tecnología avanzada y costes económicos.
- Máxima seguridad.
- Máxima flexibilidad.
- Mente abierta ante las futuras innovaciones tecnológicas.
- Nivel óptimo de protección.

Futuras actualizaciones tecnológicas se informan al usuario. Existe un protocolo de comunicación, ofreciendo varias posibilidades para ponerse en contacto. Por ello la familia ZAPIMOS ofrece un modo de diálogo estándar con sistemas externos para facilitar la interconexión con las máquinas disponibles en el mercado.

3.2.11.1 Controlador serie básico

En este apartado vamos a hablar del controlador ZAPI H2 utilizado para motores de corriente continua y que se instaló en una motocicleta, la Electra Cruiser. El controlador probado en esta motocicleta llegó a funcionar 5 años sin intermitencias. Este controlador funciona con 120V e inyecta al motor entre 450-500. La mayoría de fabricantes que instalan este controlador es por la característica de frenado regenerativo.

Durante la conducción con el controlador ZAPI, la motocicleta en el momento que sueltas el acelerador pasa a rodar en modo libre. Una vez liberado el controlador de estrangulamiento, la motocicleta entrará en modo de regeneración similar a la de compresión en un motor de combustión interna, lo que reduce la velocidad de la motocicleta. Hasta que nose usa la maneta de frenado, la luz trasera nose iluminará, debido a que está conectada a otra entrada del controlador; se activa un segundo modo, reduciendo aún más la velocidad de manera controlada por el piloto mediante el aumento de la cantidad regenerativa en el bloque de la batería. Como ya he dicho, el frenado regenerativo fue un factor importante para la instalación en esta motocicleta. Otras razones a destacar fueron el precio, la reputación, el tamaño y el amplio abanico de funciones programables que incluye de serie el programador. En conclusión, su instalación proporcionó las siguientes

propiedades; control suave de aceleración y respuesta, fiabilidad y frenado regenerativo.



Figura 112. Modelo controlador ZAPI

Las características de este controlador son las siguientes:

- Alta frecuencia con tecnología MOSFET.
- Sensibilidad óptima a bajas velocidades.
- Control en tiempo real sobre las partes internas y externas que pueden influir en el comportamiento de la máquina, con autodiagnóstico de los circuitos propios.
- Máquina de programación almacenada (SPC), donde el hardware está completamente separado de las funciones que se configuran. El programa se utiliza variando unos parámetros ya definidos, pero por parte del usuario se pueden modificar para alguna aplicación que se desea.
- Varias configuraciones funcionales del chopper pueden ser seleccionadas sin tener que modificar el hardware.
- Las unidades de potencia y lógica se encuentran montadas en una estructura sellada (IP54) para garantizar la protección contra salpicaduras (agua, ácido, polvo, virutas, partículas pequeñas, etc.). Acceder a las unidades lógicas para comprobar o algún reemplazamiento necesario es muy fácil.
- Este modelo es el top de la familia ZAPIMOS. Es adecuado para operar a tensiones de entre 24-96V con corrientes máximas de 400-600A.

Tabla 7. Especificaciones modelo ZAPI H2

Frecuencia de operación	15/1,5kHz
Corriente de espera	Menos de 30mA
Rango de T ^a ambiental de operación	-30°C → +40°C
Punto de corte del controlador	-25°C → +85°C

SYSTEM VOLTAGE	H2 400 (SHORT)	H2 600 (LONG)	H2 601
24V	400A	600A	/
48V	400A	600A	/
80V	400A	/	500A / 600A
96V	400A	/	500A / 600A

Figura 113. Modelos de la serie H2 (1)

SYSTEM VOLTAGE	H2 400 (SHORT)	H2 600 (LONG)	H2 601
24V	250mV	200mV	/
48V	350mv	280mV	/
80V	1.00V	550mV	550mV

Figura 114. Modelos de la serie H2 (2)

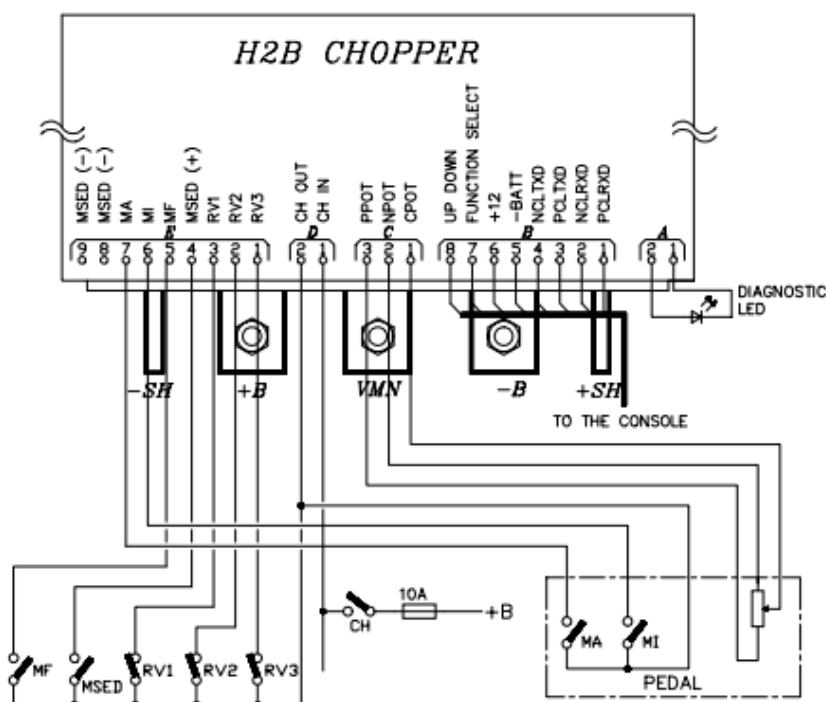


Figura 115. Conexión del controlador (Pedal)

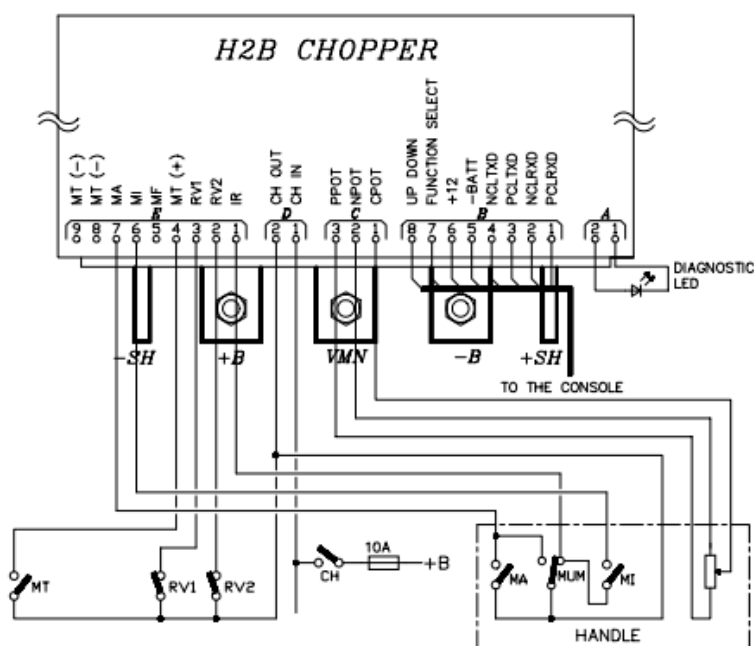


Figura 116. Conexión del controlador (Handle)

3.2.11.2 Controladores básicos Zapi de CC

Esta serie de controladores es muy similar al controlador explicado en el apartado de Curtis Instruments en funciones básicas, PWM y frecuencia de conmutación de 15kHz. La elección de este controlador es por la propiedad ya anunciada; el frenado regenerativo. El controlador básico de ZAPI trae numerosas funciones de programación, pero si se quiere aprovechar todo el campo de programación que este controlador dispone debemos de obtener una consola para poder programar el resto de funciones, dicha consola se instala en la parte frontal del controlador.

ZAPI ofrece una línea de controladores para motores de imanes permanentes, motores con excitación independiente y controladores para motores de corriente alterna, en general, ofrece una gama de consolas de programación con diversas características y precios.

3.2.11.3 Controladores básicos Zapi de CA

El fabricante Zapi fabrica controladores de corriente alterna de alta calidad para muchas aplicaciones. Los controladores Zapi se ofrecen en los voltajes que van

entre los 24-96Vc.c. en varios tamaños. Los rangos de salida de amperaje de dichos controladores van desde los 150A en unidades más pequeñas hasta los 550A en las unidades más grandes.

Representan los tipos de avance de tecnología punta como por ejemplo el módulo de potencia, IMS, memoria flash, lógica del microprocesador y el bus CAN.

3.2.12 NAVITAS TECHNOLOGIES

Navitas Technologies fábrica una serie de controladores para motores con excitación en serie, imanes permanentes y motores con excitación independiente. Estos controladores combinan el poder de los MOSFETS de alta eficiencia con tecnología de un microprocesador para proporcionar un control flexible y ajustable en un diseño compacto. Algunos de estos controladores utilizan una frecuencia de conmutación de 20kHz lo que proporciona un movimiento más suave; el resto de los controladores utilizan un rango de frecuencias 15-18kHz. La oferta que ofrece Navitas Technologies incluye controladores con frenado regenerativo y no requieren el uso de contactores direccionales. La serie TPM de controladores es configurable por el fabricante o usuario a través de una interfaz de una red local del controlador (CAN).

Una de las series más utilizadas por esta empresa es TPM400 y está diseñada para el uso de motores de imanes permanentes con una capacidad de 400A y una tensión de entre 24-48V.

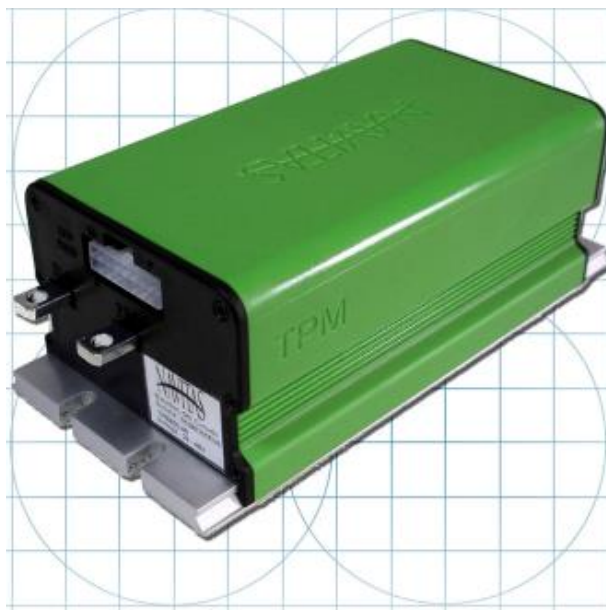


Figura 117. Modelo Navitas Technologies

Las características de este controlador son:

- Totalmente programable con el paquete Navitas PC.
- Frenado regenerativo ajustable que permite una parada suave y funciones de reducción según la velocidad.
- Variedad de velocidades ajustables tanto para el avance, retroceso y funcionamiento normal durante los bloqueos de descarga de la batería (BDI).
- Límite de corriente de 400A.
- Batería con protección de sobrecargas.
- MOSFET de alta eficiencia que proporcionan mejoras en el par, rangos de funcionamiento y duración de la batería.
- Limitación de corriente que proporciona un control de posición del acelerador durante el frenado para mejorar la capacidad de conducción.
- Diagnóstico de encendido y de seguridad que impide el funcionamiento inseguro del controlador si el indicador del interruptor se enciende mientras se acciona el acelerador.
- Protección térmica que ofrece más protección de la temperatura y garantiza ningún daño bajo cualquier condición térmica.

- Interruptor punto muerto, impide el funcionamiento del controlador si el operador no está en la posición de conducción correcta.
- LEDs integrados que parpadean códigos de información y de error para el diagnóstico del controlador básico.
- Interfaz CAN que permite el control de la programación.

Tabla 8. Especificaciones modelo TPM400

Frecuencia de operación	20kHz
Corriente de espera	Menos de 30mA
Rango de T^a ambiental de operación	-30°C --> +40°C
Punto de corte del controlador	-40°C --> +70°C

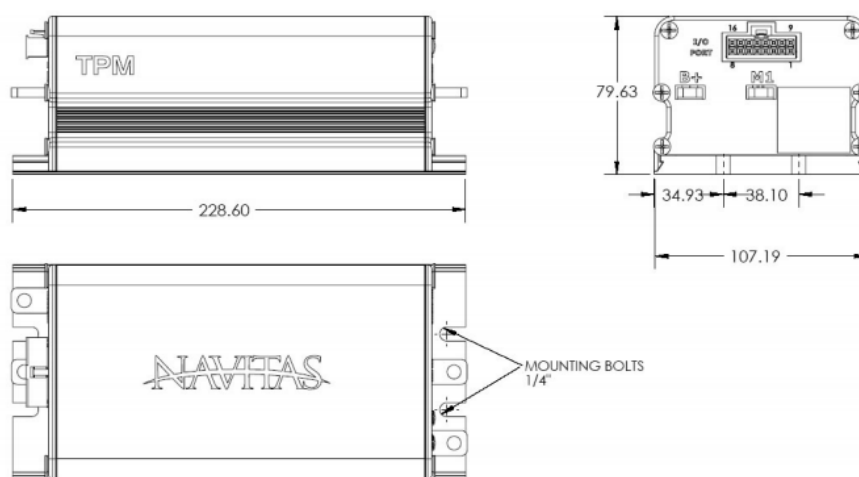


Figura 118. Dimensiones del controlador TPM400

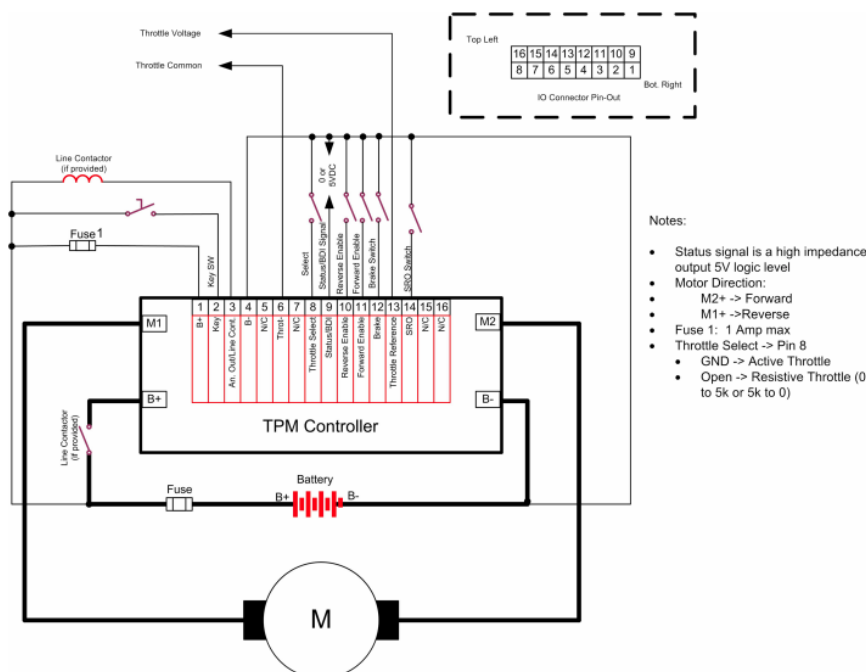


Figura 119. Conexiones del controlador TPM400

Model	System Voltage	Peak Armature Rating	Continuous Rating	Throttle Types
TPM400-48	24-48	400 amps	200 amps	0-5k/v ,5-0k/v, Bi-Directional
TPM400-48I	24-48	400 amps	200 amps	+/- 5v and +/- 10v Bi-directional

Figura 120. Características de los modelos TPM400

3.2.13 CONTROLADORES ALLTRAX PARA MOTORES DE CC

Alltrax fabrica una línea de controladores con un número impresionante de características. Estos fundadores de esta empresa son especialistas en vehículos eléctricos y en sus respectivos avances. Los fundadores de esta gran compañía son Damos Crockett, ingeniero de electrónica de potencia, y Jeff Bradley. Estos dos ingenieros han desarrollado controladores de motor de alta potencia para vehículos eléctricos de carreras y otras diversas aplicaciones.

Algunos de los coches eléctricos de gran potencia que construyeron tenían la capacidad de descarga de 750000W de potencia en dos motores durante 8 seg. en 400m.

Los controladores de Alltrax están completamente encapsulados, son impermeables, resistentes a la corrosión y algunos modelos tienen una programación bastante sencilla. La gama de valores que abarca este fabricante varía de entre 12-72V de 150-650A, dependiendo si nos encontramos ante un motor en serie, de imanes permanentes o de excitación en serie.

Una de la gama que comercializa Alltrax, la gama AXE se instala en motores de excitación serie en motores de imanes permanentes. Son ideales para instalarlos en motocicletas eléctricas debido a su diseño, su tamaño compacto y las capacidades que presentan.



Figura 121. Modelo AXE del fabricante de Alltrax

Las conexiones de este tipo de controlador son similares al resto de controladores de otros fabricantes.

Las características de este controlador son:

- Totalmente encapsulado con un diseño robusto con el medio ambiente.
- Diseño avanzado del transistor MOSFET para a proporcionar una excelente potencia y eficiencia.
- Disponible desde 300-650 A con diferentes rendimientos del amplificador.

Tabla 9. Especificaciones del modelo AXE

Frecuencia de operación	20kHz
Corriente de espera	Menos de 35mA
Rango de Tª ambiental de	-25°C --> +75°C

operación	
Punto de corte del controlador	-20°C --> +90°C

Modelo	2434	2444	4834	4844	7234	4845	4855	4865	7245
Modelo Tamaño	XXX4 6.5 "disipador de calor 					xxx5 8.5 "disipador de calor 			
Voltaje de la batería	12-24V		24-48V		24-72V	24-48V			24-72V
Límite actual	300A		400A		300A	400A		500A	650A
30 seg Clasificación	300A		400A		300A	400A		500A	650A
2 min Rating	300A		400A		300A	400A		500A	650A
5 min Rating	200A	350A	200A	300A	200A	300A	350A	400A	350A
1 Hora Clasificación	135A	200A	135A	150A	125A	175A	250A	250A	200A
Caída de Voltaje (*) @ 100Amp	<0.30V	<0.10V	<0.30V	<0.13V	<0.16V	<0.18V	<0.09V	<0.08V	<0.11V

Figura 122. Características de los diferentes modelos de la gama AXE

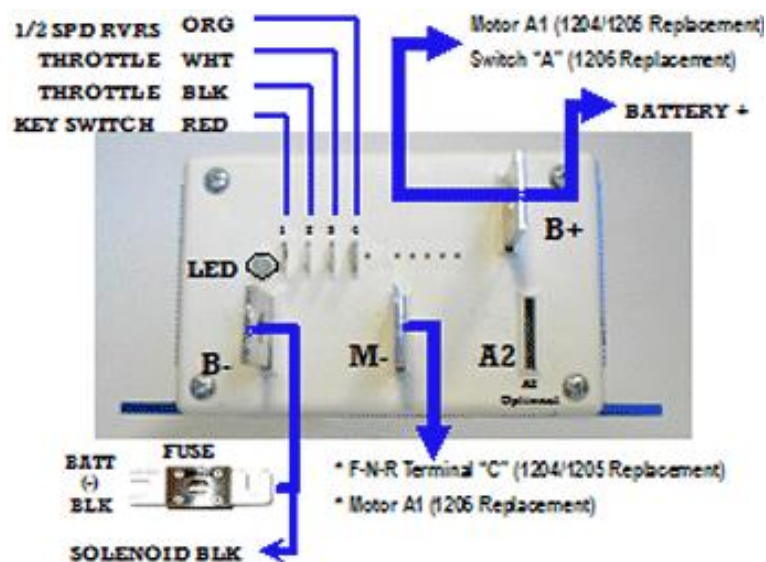


Figura 123. Conexión del controlador AXE

✓ Indicador LED de estado

El diodo emisor de luz (LED) que lleva instalado este controlador en la parte frontal nos indica el estado de las unidades en las que nos encontramos y nos avisa de los posibles problemas que podamos tener mediante el encendido de algunas luces.



Figura 124. Indicador LED del controlador AXE

3.2.14 METRIC MIND ENGINEERING

Este fabricante está especializado en controladores de corriente alterna de alta gama y motores. Estos controladores y motores son construidos en Suiza y Alemania. Son algunas de las mejores unidades en el mercado actual y sus precios reflejan la calidad. Algunas unidades son más económicas y ofrecen una alta calidad.

Muchos de los sistemas son motores de corriente alterna trifásicos síncronos y de inducción con refrigeración líquida. Estos motores tienen una potencia de hasta 82kW de potencia máxima que sólo es limitada por el inversor. Tienen un rango de rpm establecido en 11000rpm. Los sistemas de controladores del motor de corriente alterna son aún más impresionantes. Dependiendo del modelo, tienen una tensión de funcionamiento de 80-960V de corriente continua con una salida máxima de pico de potencia de 212kW (162CV). Estos sistemas son fabricados por BRUSA (en Suiza) y MES-DEA. Anteriores modelos de Metric Mind Engineering fueron fabricados por Siemens.

3.2.15 SEVCON

Sevcon fabrica controladores de motor de alta calidad y los componentes del sistema para vehículos eléctricos – impacto sobre la forma en que la gente de todo el mundo viaja, trabaja y vive.

Ofrecen una amplia gama de productos en los vehículos propulsados eléctricamente. Estos componentes se construyen para llevar a cabo de la forma más fiable las condiciones más severas.

Este fabricante centra sus productos en el diseño y el desarrollo tecnológico para así satisfacer las necesidades de los clientes. Sevcon opera en todo el mundo; las sedes más importantes están en Gateshead, Reino Unido y filiales en Francia, Japón, Corea y E.E.U.U.

En 1994 fue el año en el que obtuvieron el ISO9000, siendo identificados con una política de calidad fuerte y un sistema competente, siempre se encuentran en constante revisión de sus productos y mejorarlos. El componente clave del éxito es mantener la calidad del servicio y del producto de cara a los vendedores. Proveedor de clase mundial en la industria y el trabajo. Por último añadir, que los productos son fiables y duraderos, con una salida baja de energía y bajos costes.

3.2.15.1 Controlador básico de CA

La serie Gen4 representa el último concepto de diseño absoluta para controladores de CA compactos y fiables. Estos controladores fiables son para vehículos eléctricos tanto on-road como off-road y cuentan con el tamaño más pequeño de la industria por su capacidad de potencia. La alta eficiencia de estos controladores hace posible la integración en espacios muy reducidos sin sacrificar el rendimiento. El diseño ha sido optimizado para el menor costo posible, manteniendo una fiabilidad superior en las aplicaciones más exigentes.



Figura 125. Modelo de controlador Gen4 de CA

Las características de este controlador son:

- Sistema Autocheck de diagnóstico.
- Circuito integrado Lógica.
- Operación, periféricos y software de prueba de fallos de vigilancia.
- Soporta tanto PMAC motor y el control de infucción CA.
- Control sin sensor para aplicaciones selectas.
- Portafusibles integrado.
- Protección IP66.
- Avanzado control vectorial de flujo para el consumo mínimo de energía.
- Portafusibles integrado para cableado del vehículo simplificado.
- Tamaño compacto.
- El frenado regenerativo que permite un menor consumo de energía de la batería.
- Fiabilidad probada.
- Extremadamente competitivo.
- Un bus CANopen permite una fácil interconexión de controladores y dispositivos tales como pantallas y controles del conductor.
- El bus CAN permite a los usuarios mejorar el diseño del cableado del vehículo desde las entradas y salidas del controlador al motor correspondiente sobre la red CAN.

- El controlador Gen4 puede cambiar dinámicamente la corriente de la batería mediante el intercambio de mensajes de red CAN con un sistema de Gestión de baterías compatibles (BMS).

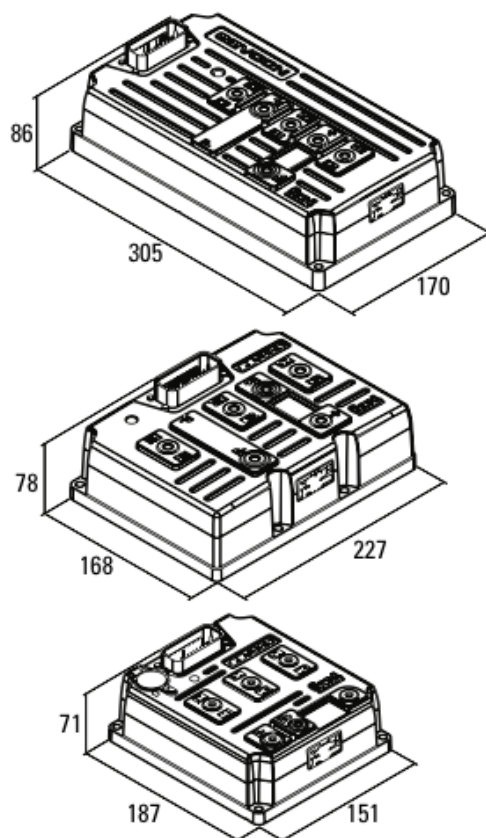


Figura 126. Dimensiones del controlador Gen4 de CA

Model	Size 2	Size 4	Size 6	Size 2	Size 4	Size 6	Size 2	Size 4	Size 6	Size 2*	Size 4	Size 6*
Nominal Battery Voltage	24 VDC	24 to 36 VDC		36 to 48 VDC			72 to 80 VDC			96 to 120 VDC		
Max operating voltage	34.8 VDC	52.2 VDC		69.6 VDC			116 VDC			150 VDC		
Min. operating voltage		12.7 VDC		19.3 VDC			39.1 VDC			48 VDC		
Peak Current (2min)	300A	450A	650A	275A	450A	650A	180A	350A	550A	150A	300A	450A
Boost Current (10 sec)	360A	540A	780A	330A	540A	780A	215A	420A	660A	180A	360A	540A
Cont. Current (60 min)	120A	180A	260A	110A	180A	260A	75A	140A	220A	60A	120A	180A

Figura 127. Características del modelo Gen4 de CA

3.2.15.2 Controlador básico de CC

El Gen4 establece un nuevo estándar en la CC en el rendimiento del controlador del motor y la fiabilidad. El Gen4 CC es compatible con una amplia gama de motores, incluyendo excitación separada del motor y de imanes permanentes. El

Gen4 inversor de CC mediante la red CAN es capaz y puede ser configurado para manejar con precisión el motor en modo de control actual, ofreciendo un verdadero y preciso control del par motor. El control de velocidad también está disponible. Todos los tipos de motores son impulsados a través del control de la armadura de cuatro cuadrantes, lo que resulta la entrega inmediata de par motor y una mayor protección ante el posible fallo del sistema. La función integrada de circuitos lógicos y control del vehículo significa que la función VCU puede configurarse dentro del a unidad Gen4 CC. La limitación de velocidad está disponible por el uso de MOSFET de conmutación complementaria y regeneración de la corriente de la batería que es posible en la mayoría de las configuraciones del motor.

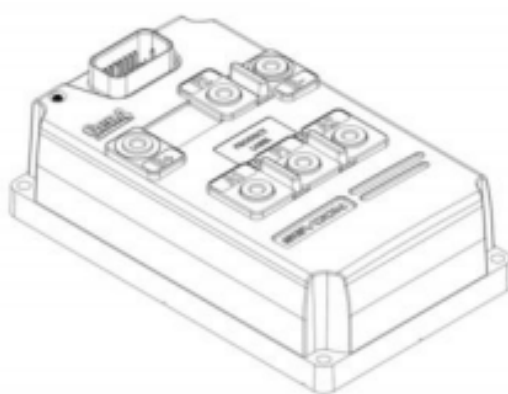


Figura 128. Modelo del controlador Gen4 de CC

Las características de este controlador son:

- Circuito lógico e integrado.
- Control de la armadura de los cuatro cuadrantes.
- Limitación de la velocidad (con sensor y sin sensor).
- Control de par.
- Operación de hardware y software en caso de fallos.
- Condensador integrado cuya función es la precarga.
- Comunicación bus CAN.
- Potencia hasta el diagnóstico posible del sistema autocheck.
- Entrada del sensor de velocidad del motor disponible.
- Protección IP66.

- Portafusibles de potencia integrado para cableado del vehículo simplificado.
- Calidad de clase mundial.
- Bajo costo.
- Tamaño compacto.
- Peso ligero.
- Un bus CANopen permite una fácil interconexión de controladores y dispositivos tales como pantallas y controles del conductor.
- El bus CAN permite a los usuarios mejorar el diseño del cableado del vehículo desde las entradas y salidas del controlador al motor correspondiente sobre la red CAN.
- El controlador Gen4 puede cambiar dinámicamente la corriente de la batería mediante el intercambio de mensajes de red CAN con un sistema de Gestión de baterías compatibles (BMS).



227mm (L) x 138mm (W) x 73mm (H)

Figura 129. Dimensiones del controlador de CC

	400A		550A	
Nominal Battery Voltage	36V/48V	60V/72V	36V/48V	60V/72V
Maximum Operating Voltage	69V	90V	69V	90V
Minimum Operating Voltage	20V	31V	20V	31V
Peak Current (Armature/Field)	400A / 50A	400A / 50A	550A / 50A	550A / 50A
Armature Boost Current (up to 10sec)	480A	480A	650A	650A
Armature Cont Current (60 min)	150A	150A	170A	170A

Figura 130. Características del Gen4 de CC

3.3 BATERÍAS

La batería se define como un acumulador o conjunto de varios acumuladores de electricidad; dispositivo cuya función es la de almacenar energía eléctrica usando procedimientos electroquímicos.

Hay que indicar que contra más avanzada sea la tecnología dispondremos de mayor potencia con un espacio más pequeño. Las baterías representan el artículo de mayor coste a la hora de reemplazarlo por uno nuevo, depende del tipo de batería que se use. Considerando una gama variada de precios, deberías de elegir una tecnología avanzada, ya que la baterías es el corazón de la motocicleta eléctrica.

3.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA BATERÍA

Hay que repasar las acciones electroquímicas que convierten la energía química en energía eléctrica. Esencialmente, las baterías son el depósito del combustible. El objetivo es alcanzar el mayor almacenamiento de energía posible en un espacio limitado, proporcionando una autonomía a tu motocicleta como sea posible. Se trata de un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga.

Por lo general todas las baterías son similares en su construcción y se componen de un determinado número de celdas electroquímicas. Cada una de las celdas está compuesta de un electrodo positivo y uno negativo. Normalmente se compone de dos electrodos sumergidos en un electrolito. La diferencia de potencial

eléctrico entre los dos electrodos origina el flujo de una corriente eléctrica en un circuito externo que implica a los dos electrodos.

Existen infinidad de tipos de baterías como se explica unas líneas más abajo en función del material del que están hechos los electrodos y electrolitos. Cada material tiene una fuerza electromotriz diferente, determinada por su capacidad para conducir la corriente eléctrica desde el interior al exterior de la celda.

Cada fabricante de baterías se ajusta a un tamaño estandarizado por la organización del BCI (Battery Council International). Esta organización proporciona un sistema estandarizado que permite a cualquier fabricante conocer el tamaño y tensión de una determinada batería. Las mejoras de la batería se han producido de manera constante a lo largo de los años, pero los principios básicos se han mantenido sin cambios.

3.3.2 PARÁMETROS A TENER EN CUENTA EN UNA BATERÍA

Los valores que debemos de conocer e informarnos a la hora de adquirir una batería se detallan a continuación para saber si se ajustarán las necesidades buscadas.

- La tensión es el primer parámetro a tener en cuenta, es proporcionada por cada celda y es el más determinante. Si no cumple con las condiciones deseadas siempre se puede combinar en serie o paralelo para obtener la potencia deseada.
- El siguiente parámetro es la capacidad de almacenamiento de dicho elemento; se denomina capacidad. Una de las características que se busca es el arranque de los motores donde se exigen elevadas corrientes. La capacidad eléctrica hace referencia a los tiempos de carga y descarga, y se mide en Culombios. A medida que la corriente de descarga aumenta, las pérdidas en el circuito se van incrementando debido a que las temperaturas son más elevadas, la tensión disminuye. Cuando apenas existe corriente de descarga la tensión de operación coincidirá prácticamente con la tensión teórica. A continuación se muestra una imagen de curvas de capacidad.

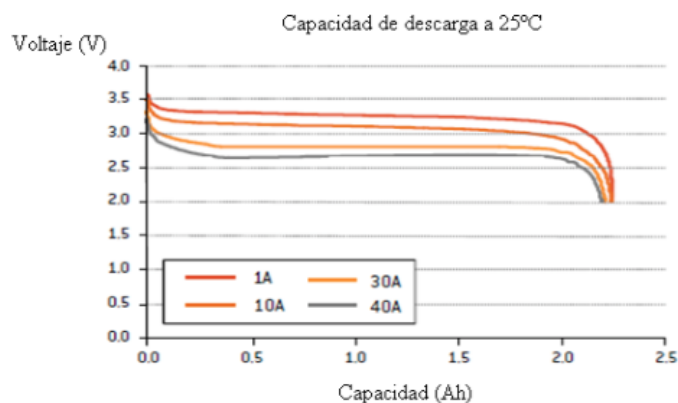


Figura 131. Curvas de una batería a diferentes intensidades de descarga con temperatura constante

- La energía específica o también denominada energía por masa, nos permite realizar la comparación entre los diferentes tipos de baterías en función de la energía que puede suministrar, en relación a su peso. Su unidad de medida es el $W \cdot h/kg$.

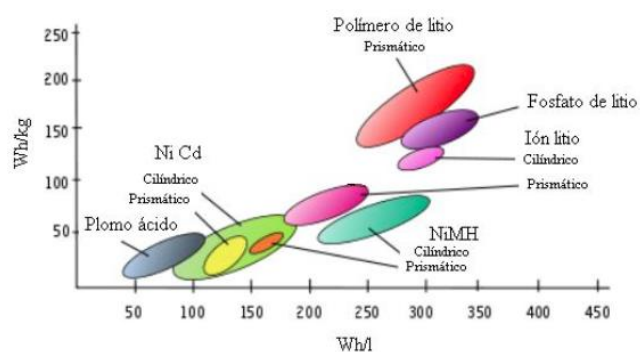


Figura 132. Densidad de energía

- La potencia eléctrica se define como la transferencia de energía por unidad de tiempo, cantidad de energía consumida en un tiempo determinado.
- Los ciclos de vida dependen de varios factores, por lo que es un parámetro difícil de calcular. Dependen de la temperatura de la batería, número de descargas, mantenimiento, entre otros. Uno de los más influyentes es el de descarga de la batería por ciclo. Cuando la cantidad de este factor es incrementada por ciclo, resulta una reducción total de los ciclos de la batería. Se sobreentiende que la capacidad de la batería disminuye a medida que se producen ciclos de carga y descarga.

- La temperatura influye en el voltaje de descarga y en la vida útil de la batería. Si la temperatura desciende, esto provoca la reducción en la capacidad de la batería y se produce un incremento en la pendiente del voltaje en función del tiempo. También cuando la temperatura desciende, la resistencia interna aumenta y la actividad interna por lo tanto se reduce.

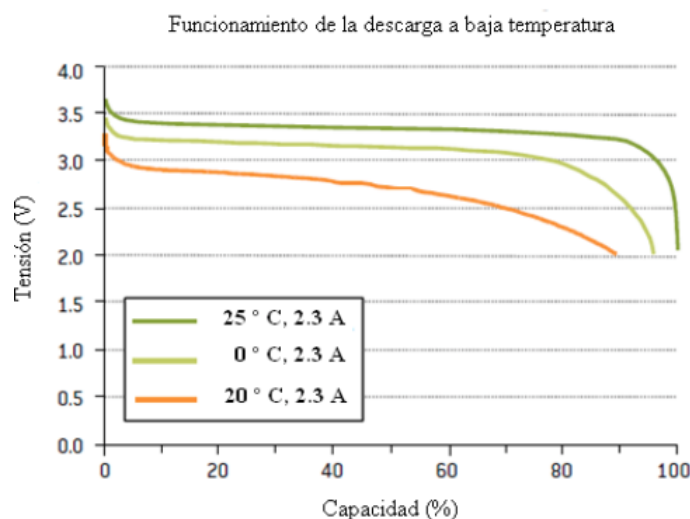


Figura 133. Influencia de la temperatura

En algunos tipos de baterías que se explican a continuación hay que tener en cuenta que sufren el denominado efecto memoria; este reduce la capacidad de las baterías. Esto es causado cuando se pone a cargar una batería que no ha sido descargada del todo, se crean unos cristales en el interior de la carcasa, a causa de la reacción química por una mala carga. Cuando vuelve a descargarse después de realizar una carga, la descarga sólo se produce hasta donde están formados los cristales, de ahí efecto memoria. Esto se puede corregir realizando de vez en cuando cargas completos.

3.3.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS BATERÍAS

La batería es un invento de los más importantes en la historia de la humanidad. Actualmente, es un tema ya asentado, pero no siempre ha sido así. No era tan fácil obtener una batería en cualquier tienda. La batería de Volta fue una curiosidad técnica, pero este nuevo fenómeno electroquímico abrió rápidamente una visión de descubrimientos, invenciones y aplicaciones. La electrónica, los ordenadores, las

comunicaciones industriales, la potencia de la ingeniería, la mayor parte de la industria química ha sido posible debido al descubrimiento de las baterías que disponemos hoy en día.

- 1800: Alessandro Volta inventó la pila voltaica y descubrió el primer método de la generación de electricidad. Éste comunicó su invento a la Royal London Society. La pila voltaica de Volta fue la primera batería que produjo una corriente fiable y estable.
- 1836: El inglés John F. Daniel inventó la pila de Daniel que usaba dos electrolitos, sulfato de cobre y sulfato de zinc. La pila de Daniel era algo más segura y menos corrosiva que la pila de Volta.
- 1839: William Robert Grove desarrolló la primera pila de combustible que produjo electricidad combinando el oxígeno y el hidrógeno.
- 1859: Gaston Planté, un físico francés, construyó el primer modelo de acumulador de plomo-ácido. Hasta finales del siglo XIX la batería de plomo-ácido no comenzaría a ser fabricada y utilizada; se hizo la primera batería recargable eléctrica comercializada para uso comercial iniciándose un intenso y continuado proceso de desarrollo para perfeccionarlo y limpiar sus deficiencias.
- 1899: Waldmar Jungner inventó la batería recargable de níquel-cadmio, en la que se utilizan ánodos de cadmio en vez de hierro.
- 1900: Thomas Alva Edison , inventó otro tipo de acumulador con electrodos de hierro-níquel. Empezaron a comercializarse en 1908.

3.3.4 TIPOS DE BATERÍAS

Las baterías que se usan para los vehículos eléctricos son recargables, tienen la ventaja de ser más baratas a largo plazo, por lo tanto son las recomendadas para aplicaciones con un consumo grande.

La variedad de las químicas de las baterías que hoy en día se encuentran en el mercado es muy extensa. Existen baterías de plomo ácido, muy usadas en la actualidad por su bajo precio y madurez tecnológica, baterías de níquel-cadmio, menos usadas actualmente por su alto poder contaminante y su gran efecto

memoria, baterías de níquel-hidruro metálico, de alta energía específica y alto efecto memoria, etc.

3.3.4.1 Baterías de plomo-ácido

Se descubrió que cuando el material de plomo se sumergía en una solución de ácido sulfúrico se producía un voltaje eléctrico el cual podía ser recargado. Este tipo de baterías es único en cuanto que utiliza plomo, material relativamente barato, tanto para la placa positiva como para la negativa. El electrolito es una solución de agua destilada y ácido sulfúrico.

✓ Ventajas

- La tecnología es fiable y bien conocida, es duradera y ofrece un servicio fiable a largo plazo.
- Es una tecnología económica.

✓ Inconvenientes

- Baja densidad de energía.
- Permite un número limitado de ciclos de descarga completa. Ciclo de vida corto.
- Contenido de plomo y ácido que daña el medio ambiente. Pueden perjudicar gravemente la salud de las personas, animales, plantas y el medio ambiente en general.
- No permite una carga rápida.

✓ Mantenimiento

- La carga de la batería debe realizarse en lugares de entre 15°C y 25°C.
- Mantener los terminales de conexión, limpios, apretados la carcasa de la batería.
- Mantener el nivel del electrolito adecuado, añadiendo agua destilada cuando sea necesario.
- Evitar la descarga completa de las baterías.

3.3.4.2 Baterías de níquel-cadmio

Las baterías de Níquel-Cadmio son otro tipo de baterías secundarias viables para vehículos eléctricos. Utilizan un cátodo de hidróxido de níquel y un ánodo de un compuesto de cadmio. El electrolito es de hidróxido de potasio.

✓ Ventajas

- Proporcionando el doble de almacenamiento que las de plomo.
- El ciclo de vida de este tipo de baterías es de 4 a 7 veces el de las baterías de plomo, logrando entre 2500-3000 ciclos.
- Mantienen la tensión prácticamente constante durante casi el 90% del ciclo de descarga.
- Admiten un gran rango de temperaturas de funcionamiento.

✓ Inconvenientes

- Coste inicial de las baterías es costoso.
- Baja densidad de energía, lo que hace que tengan poca capacidad.
- Problema medioambiental, ya que el cadmio es un metal pesado y se ha intentado llevar a cabo la eliminación de dichas baterías por este material. Si este tipo de baterías son manejados y reciclados correctamente este problema se puede evitar.

✓ Mantenimiento

- Las baterías de níquel-cadmio requieren un régimen de carga diferente a la baterías de plomo-ácido. La primera fase de carga, se realiza con intensidad de corriente constante hasta que se alcanza un umbral de tensión compensada con la temperatura o hasta que toda la intensidad haya sido reemplazada. El cargador es el que observa cuando se reemplaza la corriente correspondiente por fase. Luego, en la segunda fase, un tanto por ciento con baja corriente constante se aplica a la intensidad de la primera fase.

3.3.4.3 Baterías de iones litio (LI-ION)

La batería de iones de litio, es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito, una sal de litio que procura los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo.

Sin embargo, su rápida degradación y sensibilidad a las elevadas temperaturas, que pueden resultar en su destrucción por inflamación o incluso explosión, requieren en su configuración como producto de consumo, la inclusión de dispositivos adicionales de seguridad.

✓ Ventajas

- Poco peso, si comparamos con el resto de baterías explicadas (plomo, Ni-Cd y las posteriores Li-Po), a igualdad de carga almacenada, a parte de ser menos pesadas, su volumen es menor.
- Carecen de efecto memoria.
- Acumulan mucha mayor carga por unidad de peso y volumen, lo que ofrecen una alta densidad de energía.
- Cada batería ofrece 3,7 V, lo que denominamos un alto voltaje por célula.
- Descarga lineal, lo que quiere decir, evitamos la necesidad de tener circuitos reguladores ya que durante la descarga el voltaje de la batería varía poco; además de que esto es positivo en cuanto es fácil saber la carga que almacena dicha batería.
- Muy baja tasa de auto-descarga, cuando guardamos una batería, ésta se descarga progresivamente aunque no la usemos. La mayoría de ellas, tras seis meses en reposo, pueden retener un 80% de su carga.

✓ Inconvenientes

- Soportan un número limitado de cargas, entre 300 y 1000, menos que una batería de Ni-Cd.

- Son costosas, aunque actualmente el precio es menor debido a su entrada en el mercado.
- Duración media, depende de la cantidad de carga que almacenan, independientemente de su uso. Tienen una vida útil de 10 años.
- Peor capacidad de trabajo en frío, ofrecen un menor rendimiento a las de Ni-Cd a bajas temperaturas.

✓ Mantenimiento

- Las baterías Li-ión al no tener efecto memoria, no es recomendable y no hace falta descargarlas por completo, porque lo único que se consigue si se descarga es acortar su vida útil.
- Recomendable que permanezcan en un sitio fresco (15°C) y evitar el calor.
- Cuando se pretendan dejar almacenadas un largo período de tiempo, se recomienda dejarlas con una carga intermedia (40%).
- Es un mito el que existe de que la primera carga es decisiva en cuanto a la duración, esto quiere decir, que la primera carga es igual a las siguientes.
- Precisan de ser cargadas con un cargador específico para dicha tecnología.

3.3.4.4 Baterías de polímero de litio (LI-PO)

Son una variación de las baterías litio-ión. Sus características son muy similares, pero permiten una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga bastante superior. El electrolito de sales de litio ya no se encuentra en una solución orgánica sino en un polímero compuesto sólido. El ánodo es de carbono y el cátodo es un óxido metálico.

✓ Ventajas

- Acumulan mucha mayor carga por unidad de peso y volumen, lo que ofrecen una alta densidad de energía, entre 5 y 12 veces las de baterías de Ni-Cd.

- Cuatro veces más ligeras que las baterías de NI-Cd comparando en igualdad de capacidad.
- Mayor tiempo de funcionamiento.
- Carecen de efecto memoria.
- Resistencia interna pequeña, lo que favorece que se pueda aprovechar casi el 100% de la energía disponible.
- Muy baja tasa de auto-descarga, cuando guardamos una batería, ésta se descarga progresivamente aunque no la usemos. La mayoría de ellas, tras seis meses en reposo, pueden retener un 80% de su carga.

✓ Inconvenientes

- Precisan de una carga más lenta que las baterías de Ni-Cd.
- Son costosas, aunque actualmente el precio es menor debido a su entrada en el mercado.
- Requieren un trato mucho más delicado, puede llegar a producir un incendio o explosión.
- Queda prohibido cortocircuitarlas, y no se llevan bien con los aumentos de temperatura ni sobrecargas.
- No es recomendable llevarlas al límite, es decir, no realizar una descarga profunda.
- Electrolito peligroso al contacto con el cuerpo humano.

✓ Mantenimiento

- Precisan de ser cargadas con un cargador específico para dicha tecnología. Bajo ningún concepto usar un cargador que no esté diseñado para dicha batería.
- Las baterías pueden cargarse a temperaturas que esté entre 0º y 50º. Es recomendable no dejar desatendidas las baterías mientras se realiza la carga.
- Son más ecológicas al no contener metales pesados, pero para deshacerse de este tipo de baterías se deben de seguir unos pasos predeterminados, es decir, descargadas completamente

sumergidas en un recipiente lleno de agua saturada con sal normal hasta medir una tensión de 0 V para, por último, ser desechada en un contenedor específico para baterías.

3.3.5 CONDENSADOR DE ALTA CAPACIDAD

Los condensadores de alta capacidad es algo muy novedoso en el mundo de la tracción y que se están realizando varios estudios acerca de su implementación, por lo que se necesita mejorar. Están desarrollados con una tecnología diferente a los ya explicados en los tipos de baterías, que como ya se ha visto, se basan en reacciones electroquímicas. Estos elementos son denominados como súper-condensadores o ultra-condensadores.

El condensador se compone de un circuito eléctrico con dos terminales formados por dos placas conductoras separadas por un aislante, donde se almacena energía eléctrica debido al paso de las corrientes de una placa a otra a través del aislante. En breves palabras, elemento pequeño con alta capacidad, lo que quiere decir, capaz de absorber una alta cantidad de energía en un tiempo breve, característica muy interesante para los vehículos eléctricos. Con respecto a los tipos de reacciones químicas, los condensadores no se produce el desgaste de los componentes y las cargas y descargas son muy rápidas, además de un ciclo de vida muy largo.

Require de que sean conectados en serie para obtener altos voltajes y su densidad de energía es baja. Uno de los inconvenientes es su elevado precio.



Figura 134. Formatos de ultracondensadores

✓ Ventajas

- Elevado número de ciclos de carga y descarga.
- Alta eficiencia (>97%)
- Alta potencia específica.
- Velocidad de carga y descarga muy elevada.
- Formato pequeño

✓ Inconvenientes

- Baja energía específica.
- Elevado coste de adquisición.

3.3.6 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS)

El sistema BMS conocido como sistema de gestión de la batería, es un sistema en el que todos los fabricantes coinciden en que es un sistema imprescindible que sea instalado para controlar el bloque de baterías, ya que evita calentamientos en las celdas para no perjudicar en el funcionamiento y evitar problemas de seguridad. Todo esto se puede originar debido a los desequilibrios eléctricos entre las temperaturas y tensiones. Si no se tiene instalado este sistema se puede reducir la eficiencia en un 25%. Para que el BMS cumpla su función de control y protección realiza varias funciones: control de estado de cada célula, cálculo de datos secundarios, presentación de informes con los datos, control del entorno y equilibrado.

El BMS puede realizar la tarea de supervisión del estado de la batería y realizar el cálculo de más datos para posteriormente informar de los datos obtenidos a un dispositivo externo.

El BMS como ya hemos dicho protege a la batería de que opere fuera de su zona de operación. Evita las sobrecorrientes, sobretensiones, bajo voltaje, exceso o bajada de temperatura y presiones elevadas.

Existen diferentes topologías de BMS:

- Gestión centralizada: Un solo controlador es el encargado de estar conectado a todas las celdas de la batería mediante multitud de cables.
- Distribuido: Un chip es instalado en cada celda; estos a su vez se unen con la batería y el controlador.
- Modular: Varios controladores, cada uno con la función de controlar un número de celdas.

Cada topología presentan unas ventajas e inconvenientes si se comparan entre sí.

- Gestión centralizada: Más económica, menos ampliable y gran cantidad de cables en el pack.
- Distribuida: Más cara y simplicidad de instalación.
- Modular: Mezcla de características de las dos topologías anteriores.

EVALUACIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DEL CABLEADO ELÉCTRICO

ÍNDICE 4

4 EVALUACIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNETICA DEL CABLEADO	
ELECTRICO DE LA MOTOCICLETA ELÉCTRICA	165
4.1 INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA.....	165
4.2 TEST DE UNA MOTOCICLETA ELÉCTRICA.....	167
4.3 MEDICIÓN DEL CAMPO CERCA DEL SISTEMA DE CABLEADO	168

4 EVALUACIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNETICA DEL CABLEADO ELECTRICO DE LA MOTOCICLETA ELÉCTRICA

En las últimas décadas, se ha venido realizando un gran esfuerzo para el desarrollo de los vehículos eléctricos por las grandes empresas que hay en todo el mundo, para la construcción y el lanzamiento de productos comerciales para ser comercializados en todo el mundo. En la primera fase de comercialización se ha promovido la búsqueda de la eficiencia energética. Cuando se han ido desarrollando los vehículos eléctricos, se han estudiado las diferentes tecnología de conducción, el control, el sistema de gestión de las baterías (BMS), entre otras cosas, sin embargo, poco se ha mirado la interferencia causada por la interferencia electromagnética no deseada y que es causada por todo el sistema eléctrico en el propio vehículo.

4.1 INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA

La interferencia electromagnética (EMI) se puede definir como la energía electromagnética no deseada en un sistema, sin embargo, aquella energía del espectro de una frecuencia puede ser creado ya sea por una fuente externa o incluso por el propio sistema. Por lo general, la trayectoria de transmisión para EMI puede ser clasificado de dos formas; una es a través del aire y el otro a través del enlace conductor que conecta la fuente de generación y el circuito en cuestión. En la industria se han producido diversos reglamentos publicados por diferentes organizaciones internacionales o institutos nacionales. Los diferentes productos se asocian a las diferentes regulaciones. La elección de la regulación EMI para un producto depende de la comercialización cuando el producto vaya a ser puesto en marcha. Hay que adaptarse a las TI (tecnologías de información) de los productos.

Es importante mencionar los avances de futuro de las tecnologías de información que llevan los vehículos, como televisión, reproducción multimedia, GPS, sistema anticolisión, monitoreo de presión de neumáticos, seguridad en la conducción. Los datos existentes de campo de radiación eléctrica es de <30dB V/m desde 30 a 230MHz y <37dB V/m desde 230 a 1000MHz.

Puesto que la potencia de conducción que está dirigido principalmente por la alta densidad de la batería, el sistema de cableado de corriente se encuentra dentro de la parte de la motocicleta eléctrica, además de las líneas eléctricas, los sensores

y señalizaciones. En una situación normal, la condición de carga constante es difícil de mantener, de manera que la radiación electromagnética es muy fácil ser causada por componentes de alta frecuencia de la corriente más fuerte. Además en todo el sistema, la estrategia de puesta a tierra debe ser planificada considerablemente para evitar desde el circuito flotante y los caminos de tierras resistivas. Todos estos problemas excitarán la radiación electromagnética de suelo.

Consecuentemente, la radiación electromagnética es una EMI (interferencia electromagnética) y que debe ser bien evaluada cuando se construye el sistema de cableado eléctrico de un vehículo eléctrico, para asegurar un ambiente seguro del vehículo. Se requiere realizar unas mediciones de las características reales de radiación.

A continuación, se van a explicar dos tipos de radiaciones que se van a llevar a cabo. En primer lugar, como un estudio preliminar, se estudia como interferencia de campo lejano con un certificado EMC que se realizó en una cámara en la Universidad de Tatung. En segundo lugar, la radiación de un campo cercano causada por la línea de alimentación para un motor, una batería y el piloto.

Según un estudio realizado en el Instituto de Comunicación de Ingeniería de la Universidad de Tatung realizado por Chu-Fang Huang y Jhih-Yuan Wang que denominaron “Measurement evaluation of electromagnetic radiation for electrical wiring in electrical vehicles”.

Se propone un método para suprimir la radiación electromagnética procedente de casos que ya han sido estudiados. La eficacia se demuestra por los resultados en el analizador de espectro.

4.2 TEST DE UNA MOTOCICLETA ELÉCTRICA

Un certificado EMC/EMI de la Universidad de Tatung, una motocicleta eléctrica se evalúa su radiación de campo lejano como se muestra en la siguiente figura:



Figura 135. Motocicleta en evaluación de interferencia del campo lejano

Se ha encontrado que la mayor parte de la interferencia está ocurriendo en la banda interior del espectro de regulación.

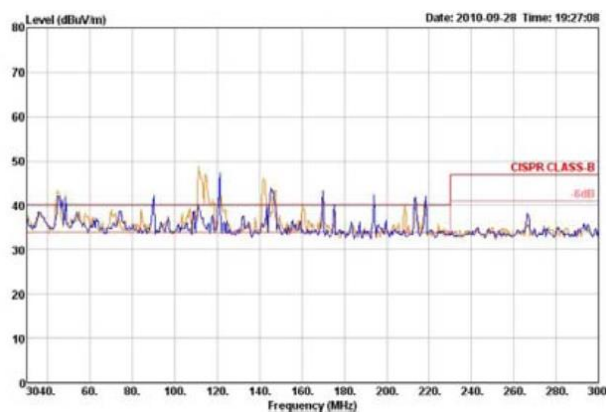


Figura 136. Interferencia electromagnética que genera una motocicleta eléctrica en punto muerto

La imagen muestra el espectro cuando la motocicleta está ajustada en la posición neutral, de todos modos, cuando se aumenta la potencia de accionamiento como se muestra a continuación:

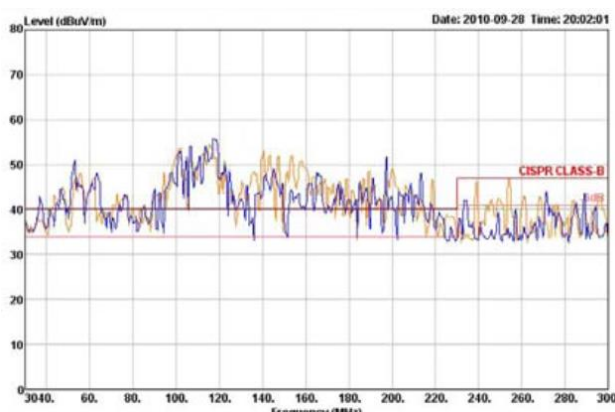


Figura 137. Interferencia electromagnética que genera una motocicleta eléctrica aumentando la potencia

Se genera un ruido en el aire y es una limitación que debe de ser regulada. Aun así se generan principalmente en la banda de 30 a 230 MHz.

Los resultados que se han mostrado en estas gráficas están relacionadas con la polarización de la onda y la altura de la antena receptora. Se muestra la polarización horizontal y las diferentes curvas con colores de diferentes alturas de la antena receptora.

4.3 MEDICIÓN DEL CAMPO CERCA DEL SISTEMA DE CABLEADO

Por otro lado, se puede llevar a cabo la medición de la radiación electromagnética de campo cercano causado por el sistema de cableado de un vehículo eléctrico. Se ha encontrado que el controlador del motor es una de las principales fuentes de generación de la interferencia. Especialmente, hace que la realización de la interferencia a lo largo de los cables conectados a él, por ejemplo, la fuente de alimentación de corriente continua de la batería y las líneas de conexión a tierra de la misma. La preocupación de que este tipo de ruido pueda interferir los sistemas informáticos y productos instalados en el vehículo, se prepara una puesta a punto para la medición de campo cercano de EMI. Por una sonda de bobina conectado a un analizador de espectro como muestra la siguiente figura, se comprueban las diferentes posiciones a lo largo de los cables de alimentación.



Figura 138. Medición de la radiación de campo cercano

Los espectros de ruido son muy diferentes en las posiciones menores de medición, se muestran en el analizador y se pueden ver las diferencias. La siguiente figura muestra como se suprime el ruido a lo largo del hilo conductor de la fuente de alimentación, la que irradia en el aire.



Figura 139. Utilización de la ferrita para reducir el ruido

Los espectros pueden ser medidos con y sin los núcleos de ferrita. La eficacia de esta técnica es bien probada. Se aplica en la motocicleta eléctrica también para la caja de control como se muestra en la siguiente imagen pero se utilizan núcleos más pequeños.

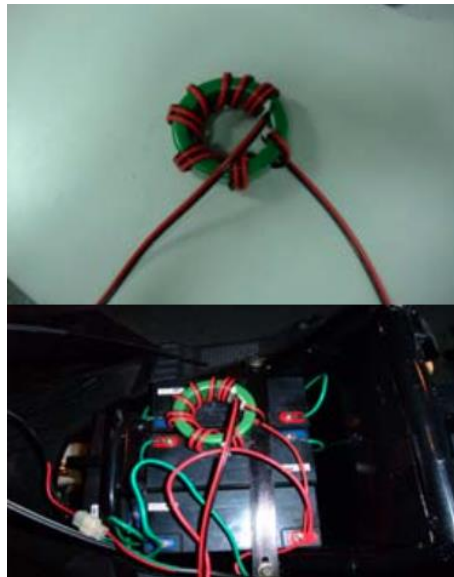


Figura 140. Aplicación de la ferrita

La siguiente figura muestra el espectro con los y sin los núcleos de ferrita. Esos núcleos funcionan bien para suprimir el ruido de conducción que generan.



Figura 141. Comparación de los espectros de ruido con y sin ferrita

Resumiendo una motocicleta se prueba en una cámara de EMC/EMI para la evaluación de interferencia del campo lejano de la caja de control. Posteriormente se ensaya la radiación de campo cercano del sistema de cableado entre la batería y el sistema de conducción. Una técnica importante es aplicar núcleos de ferrita para suprimir las EMI ya que está demostrado que funciona bien.

CIRCUITO DE PROTECCIÓN

ÍNDICE 5

5	CIRCUITO DE PROTECCIÓN.....	171
5.1	CONTRA SOBRETENSIONES	171
5.1.1	<i>DISEÑO DEL CIRCUITO DE PROTECCIÓN DE SOBRETENSIONES</i>	<i>172</i>
5.1.2	<i>REALIZACIÓN DEL CIRCUITO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES</i>	<i>176</i>

5 CIRCUITO DE PROTECCIÓN

5.1 CONTRA SOBRETENSIONES

Las aplicaciones de los vehículos eléctricos son un campo muy exigente para los controladores electrónicos debido al ambiente en el que los componentes electrónicos deben operar. Las características de las cargas determinan el riesgo de los elementos de salida de ser quemado por el poder excesivo disipado debido a la tensión de sobrecorriente o avería de los transitorios de inducción. La fuente de alimentación puede experimentar apagones o cortes de red, y, en el peor de los casos, una gran sobretensión. Las sobretensiones de suministro típicamente ocurren en pequeños ciclomotores con motor de dos tiempos y motocicletas donde la competencia industrial y la reducción de la contaminación propuesta por las leyes nacionales reclaman para la electrónica de control un alto rendimiento, pero las necesidades de gastos tan elevados no permiten el uso de alta fiabilidad de reguladores de conmutación para suministrar la baja tensión electrónica. Por otra parte, los generadores eléctricos utilizados en este tipo de vehículos, alternadores, a menudo no están regulados, su tensión depende de estado de la batería, el régimen del motor y la inserción de carga y, en casos particulares, como la desconexión de la batería, contiene pulsos de amplitud tan alto como varios cientos de voltios y la duración de 1 a 10 ms, dependiendo del número de disparos por minuto del motor.

Por estas razones económicas y técnicas, la mejor solución en el diseño de la electrónica de la motocicleta está representado por un único chip de integración de todas las funciones requeridas, con el mínimo número posible de componentes externos, capaces de sobrevivir bajo las condiciones de salida y suministro anómalos. En este caso una pérdida temporal de la funcionalidad puede ser aceptado durante la avería, siempre que el sistema sobrevive. La integración de la electrónica tanto como sea posible mediante la reducción del número de componentes discretos, son claros beneficios en términos de fiabilidad y el coste del sistema. Por lo tanto, cualquier solución que permite la integración también de las protecciones en la electrónica de a bordo es bienvenido en la aplicación de la motocicleta. La solución más sencilla para sobrevivir sobretensiones de suministro es el uso de una tecnología de circuito integrado capaz de soportar la alta tensión

prevista, alrededor de 200 V. Sin embargo, los altos costos de esta tecnología no están justificadas.

Se va tratar un enfoque que fue realizado en un artículo por P. D'Abramo, R. Roncella y R. Saletti en el Departamento de Ingeniería de Información de la Universidad de Pisa cuyo nombre recibió "Power-supply overvoltage protection circuit for motorcycle on-board electronic".

Un segundo enfoque es posible, si descartamos soluciones basadas en componentes externos, tales como un diodo Zener, es integrar un regulador shunt como se muestra en la siguiente figura:

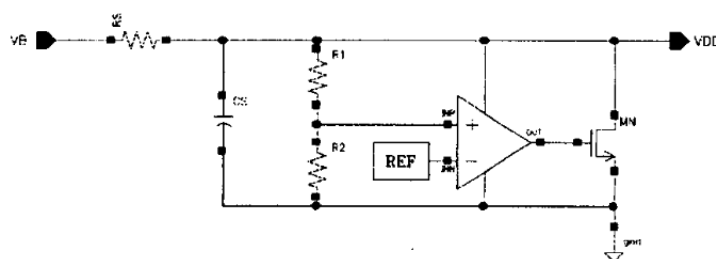


Figura 142. Circuito de protección basado en un regulador shunt

Muestra el diagrama esquemático de un regulador de derivación, donde la tensión de alimentación V_{DD} está protegido contra fuertes variaciones de la tensión inestable externa V_{Band} que se estabiliza en un valor determinado por el bucle de realimentación del regulador. La carga siempre trabaja en un valor de tensión estabilizada, incluso durante la ocurrencia de altas sobretensiones que caen en una de las series externas a proteger R_S . La resistencia de corriente superior se desvía a través de un MOS de potencia en paralelo a la carga. La desventaja de este enfoque es la cantidad considerable de la potencia del MOS que debe disipar durante la ocurrencia de sobretensiones. En una motocicleta, donde las sobretensiones transitorias pueden llegar a cientos de voltios durante varios milisegundos, la cantidad de energía puede alcanzar varios vatios y no puede ser disipado sin paquetes costosos especiales o disipadores para el regulador.

5.1.1 DISEÑO DEL CIRCUITO DE PROTECCIÓN DE SOBRETENSIONES

La idea básica que indica protección contra sobretensiones integrada presentada en este apartado es adoptar una protección de derivación no lineal de la

electrónica de a bordo. La derivación se activa cuando se detecta un valor de tensión de alimentación por encima de un umbral definido. La característica particular de la solución propuesta aquí es que la derivación no está linealmente controlada por la tensión de alimentación. En lugar de ello, el circuito de encendido y apagado es controlado, de modo que su activación protege los componentes electrónicos al conectar la tensión de la fuente de alimentación a cero. Su diagrama esquemático se presenta a continuación:

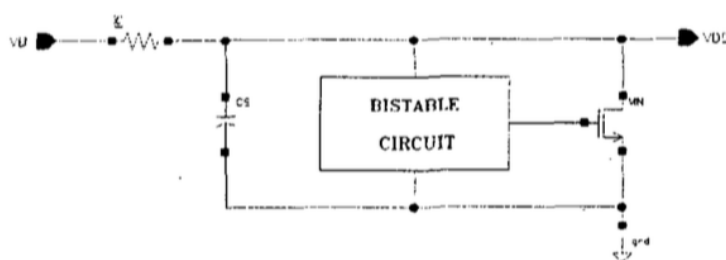


Figura 143. Circuito de protección basado en un interruptor controlado de derivación no lineal

El circuito de detección de tensión V_{DD} (generalmente un amplificador operacional) está sustituido por un circuito biestable. El biestable enciende la derivación MOS de potencia cuando, V_{DD} supera el valor umbral del propio biestable. Siendo el MOS normalmente apagado, el grupo C_{RR} proporciona un filtrado de primer orden frente a las fluctuaciones de alta frecuencia o picos de energía bajos de V_B . La gran ventaja conseguida es que el transistor MOS no es ahora el encargado en que se disipe la misma energía que en el caso lineal, debido a que es accionado como un interruptor puro. Un inconveniente evidente es que la tensión de alimentación no se estabiliza por más tiempo y que la intervención de protección determina una falta de suministro de energía.

En la aplicación de la motocicleta sin embargo, a menudo es suficiente para garantizar la seguridad de la electrónica sin respecto de su funcionamiento durante las situaciones de sobretensión que puedan ocurrir, por ejemplo, cuando la batería del vehículo se desconecta accidentalmente.

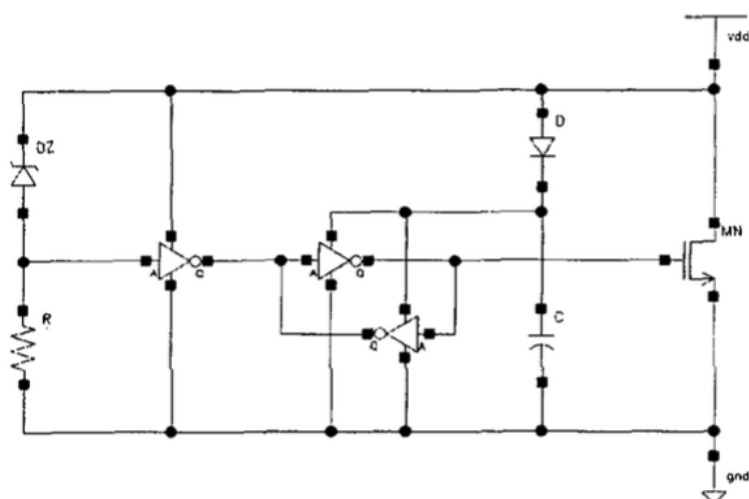


Figura 144. Esquema del circuito de protección. Circuito biestable con puerta MOS

El esquema detallado de la anterior figura es la realización del circuito de protección de sobretensión. Durante el funcionamiento normal la tensión de alimentación V_{DD} es menor que V_Z (donde V_Z es la tensión del diodo Zener) y por lo tanto impone una lógica 0 en el biestable, que consta de los dos inversores conectados en un anillo. Esta salida del circuito impulsa la puerta del MOS de potencia y lo mantiene apagado. Tan pronto como V_{DD} sufre un aumento, la entrada $V_{DD}-V_Z$ del primer inversor alcanza el umbral inversor y obliga a la puerta lógica para cambiar. Esto asegura un 1 lógico en el biestable, que a su vez cambia el MOS en la conducción. Por lo tanto, la tensión de alimentación cae a un valor muy bajo determinado por el transistor MOS.

Cabe señalar que las puertas lógicas del circuito no pueden ser suministradas por V_{DD} , porque deben operar también cuando el MOS y V_{DD} es cero. Esto se consigue por el diodo D y el condensador C, que mantienen el suministro biestable. Como el suministro biestable disminuye lentamente debido a las corrientes de fuga, su salida (la tensión de puerta MOS) le sigue. Como resultado V_{DD} aumenta y el primer inversor cambia de nuevo a 0, el estado del biestable cambia de nuevo y el MOS está apagado, girando la protección shunt apagado. El nivel de tensión de la intervención del circuito depende de la tensión de ruptura del diodo Zener y en el umbral del circuito biestable. También hay que señalar que el circuito de protección se vuelve inmediatamente de nuevo si el nivel de voltaje externo es lo suficientemente alta como para determinar una nueva intervención. La simulación

eléctrica del circuito, cuando una tensión de entrada de la rampa hasta 200 V se aplica a la misma.

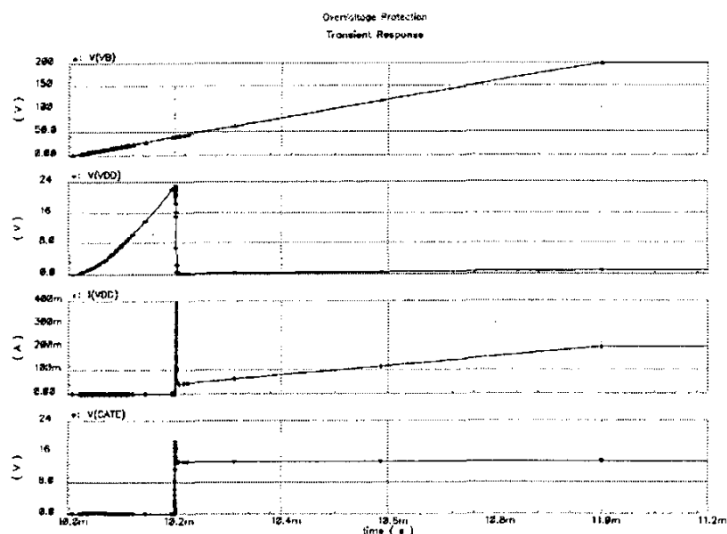


Figura 145. Simulación de la protección en el que se visualiza la actual derivación y el MOS

Se observar cómo los aumentos V_{DD} y de repente se desvía a un valor muy bajo, justo cuando el voltaje de la puerta de la potencia MOS sube y actúa sobre la protección.

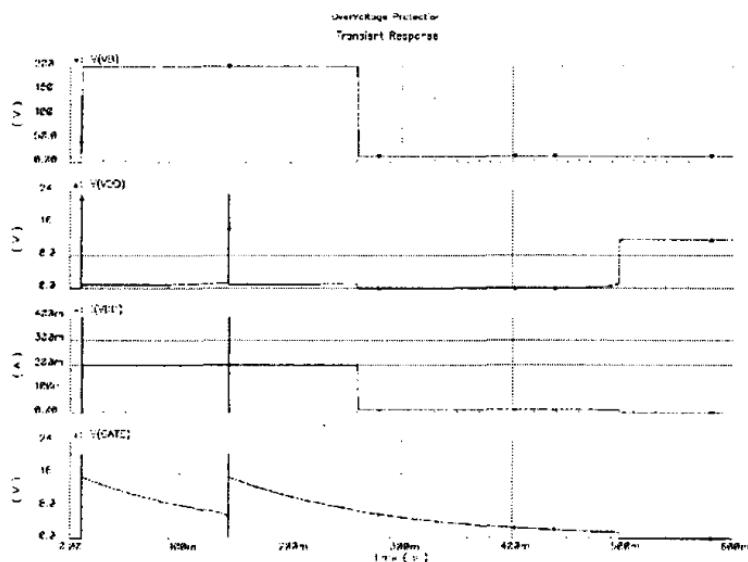


Figura 146. Simulación con un período más largo, intervención de la protección y recuperación del MOS

Esta figura muestra la respuesta a largo plazo del circuito, donde la recuperación de la tensión de puerta MOS se puede apreciar en esta escala. Esta vez la tensión externa se intensificó a 200 V y luego empezó a descender hasta un valor nominal de 12V. La protección de repente interviene una vez y de nuevo una

segunda vez tan pronto como el primer ciclo de protección está terminado, debido a que la tensión de V_8 externa todavía está excediendo el umbral de intervención. Cuando se elimina la sobretensión externa y la tensión de puerta MOS disminuye a un valor bajo, deja que el V_{DD} nominal se establezca. Cabe señalar que el efecto de circuito no lineal es útil también en el MOS apagado, porque evita en el transistor estar en la región activa para tiempos largos. La principal ventaja del circuito propuesto, en comparación con un regulador de derivación lineal, es la minimización de la disipación de potencia en el MOS y del consumo de energía de la lógica de control. Esto sucede porque la potencia MOS siempre funciona como un interruptor; de esta manera la mayor parte de la energía se desperdicia en sobretensión R_S . El consumo de lógica de control es casi insignificante, ya que sólo consta de la potencia disipada por estática un circuito totalmente digital, ya que no hay ningún dispositivo lineal (por ejemplo, amplificador operacional) que se emplea. Esta característica de bajo consumo es muy importante en la aplicación considerada, debido a que la electrónica de a bordo es a menudo alimentada continuamente, sobre todo el circuito de protección que debe estar activo en cualquier momento. Una ventaja adicional de este circuito es la utilización del área eficiente. Puesto que la potencia MOS funciona como interruptor, presenta el valor mínimo de la resistencia por unidad de área. Por último, la no linealidad de la red de control nos permite resolver los problemas de estabilidad típicas en bucles de realimentación lineales. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la solución se propone no permite la funcionalidad del circuito completo durante las sobretensiones, porque el suministro se desvía a cero y se consigue ninguna regulación.

5.1.2 REALIZACIÓN DEL CIRCUITO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

El circuito de protección CMOS descrito ha sido diseñado como un macrocelda integrado para ser empleado como la protección electrónica integrada. Esta opción de diseño permite la protección en el chip de la electrónica en diferentes diseños, simplemente cambiando de una aplicación a los parámetros de la celda, tales como la corriente nominal, el umbral de intervención, el valor máximo de tensión. Un prototipo del circuito de protección, diseñado para proteger las sobretensiones de hasta 200 V para los circuitos de drenaje con una corriente nominal de 1 mA, se fabricó con un CMOS.

Algunos experimentos se realizaron en los prototipos de circuitos, con el fin de caracterizar el propio circuito y para mostrar la intervención de protección.

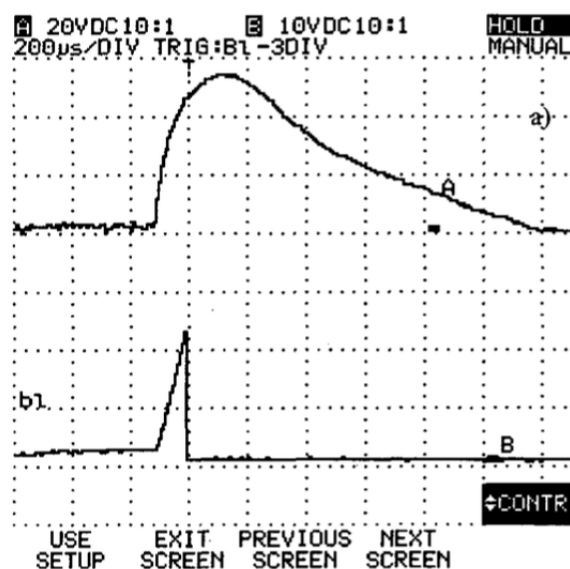


Figura 147. Resultados experimentales de la tensión externa (A) y fuente de protección protegida (B) para un valor de 60V de sobretensión

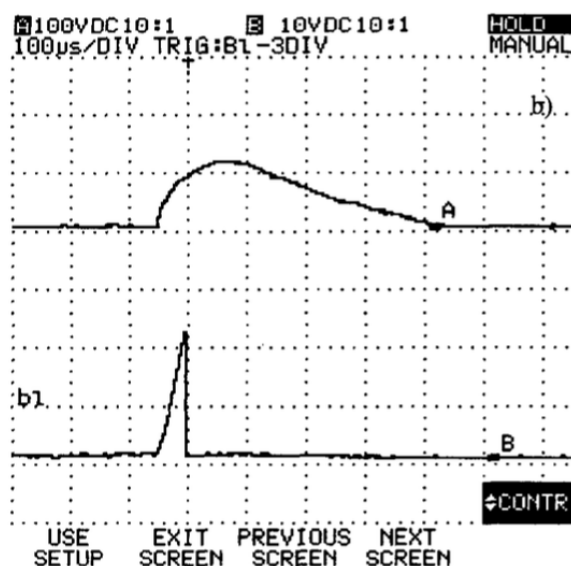


Figura 148. Resultados experimentales de la tensión externa (A) y fuente de protección protegida (B) para un valor de 140V de sobretensión

Estas dos figuras muestran la tensión medida externa de suministro de energía y el V_{DD} tensión protegida para dos casos diferentes en que el valor del pulso de sobretensión es sobre los 60 V y 140 V, respectivamente. Vale la pena señalar que

la tensión de la fuente de alimentación protegido alcanza un valor por encima de 20 V y luego de repente se desconecta en ambos casos, según lo dicho EN la simulación.

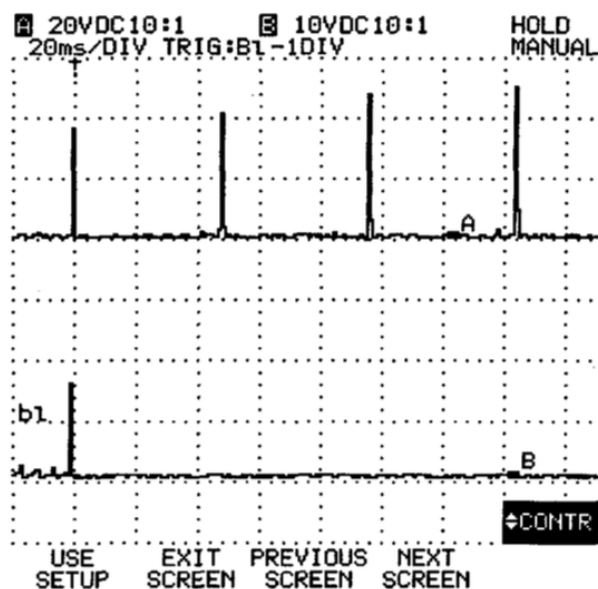


Figura 149. Respuesta de protección a largo plazo de impulsos de sobretensión

Otro resultado experimental es el de la figura anterior. En este caso, un mal funcionamiento muy peligroso para la electrónica de a bordo suelen ocurrir en motocicletas. Cuando la batería del vehículo se desconecta muy alta tensión impulsos caracterizan la tensión de alimentación. El experimento consiste en enviar un tren de impulsos de sobretensión (del orden de 40-60 V), típicamente se producen en motocicletas cuando la batería del vehículo se desconecta, y el control de la fuente de alimentación está protegido. La tensión de alimentación se eleva de nuevo a aproximadamente 20 V y luego se apaga. Los siguientes pulsos son rechazados por la protección que sigue activa, que protege adecuadamente la electrónica del tren de sobretensiones de alimentación eléctrica. Por último, el circuito ha sido sometido a una prueba de 24 horas en el que un tren continuo de pulsos de 140 V se ha aplicado a la misma. El circuito ha superado sin problemas la prueba de resistir tanto tiempo sobretensión tiempo y la disipación de potencia continua.

El circuito tiene que estar integrado en el chip con la electrónica realizada a bordo de motocicletas y las protege de las sobretensiones de fuente de alimentación

típicos que se producen en estos vehículos. No se necesitan componentes activos externos, excepto una resistencia y un condensador, por lo tanto, esta solución permite la integración completa de todas las motocicletas de la electrónica de a bordo en un solo chip CMOS con evidentes ventajas en términos de fiabilidad y costes. El circuito de protección funciona como una derivación de forma no lineal controlada, que activa a sí mismo cuando la tensión de alimentación externa alcanza un nivel de umbral bien definido desconectando el suministro de poder. La característica más interesante del circuito, en comparación con una protección regulador de derivación lineal, es que el transistor MOS de potencia siempre está polarizado en la región óhmica y la potencia disipada en él se reduce considerablemente. Esto permite un diseño optimizado de la propia MOS y una zona de mejor ocupación. Además, el control es completamente digital y se utiliza ningún componente lineal drenaje de potencia estática. Por lo tanto, se consume energía insignificante aunque alimentado continuamente. Los experimentos muestran la funcionalidad completa del circuito de protección contra sobretensiones de alimentación propuesto y las características que lo hacen muy atractivo para una utilización en motocicleta en la electrónica.

SISTEMAS DE ESTABILIZACIÓN

ÍNDICE 6

6 SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN.....	179
6.1 FRENADO REGENERATIVO.....	179
6.1.1 ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CONTROL DE FRENADO REGENERATIVO...	180
6.1.2 ESQUEMA DE CONTROL DE FRENADO REGENERATIVO.....	188
6.2 ABS INTEGRAL.....	191
6.3 ASC (AUTOMATIC STABILITY CONTROL).....	193

6 SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN.

6.1 FRENADO REGENERATIVO

En la Expo realizada en Shanghai 2010 se promocionó con el lema “Mejor ciudad, mejor vida” al mundo mediante el desarrollo del transporte ecológico como prioridad. Las matriculaciones de motocicletas eléctricas subieron a 2,48 millones. Por lo que se empezó a ver que la motocicleta eléctrica estaba jugando un papel cada vez más importante en la vida de los ciudadanos. Para satisfacer la demanda del mercado y los niveles de consumo de energía para las motocicletas eléctricas, el esquema de conservación de la energía para motocicletas eléctricas debe ser estudiado intensamente. Hoy en día, el motor de corriente alterna brushless de imanes permanentes es utilizado como un sistema de accionamiento de las motocicletas eléctricas, debido a su gran potencia, alta eficiencia y estrategias de control simples. A medida que la inercia de la motocicleta eléctrica va aumentando, se puede producir una gran cantidad de energía cinética cuando se opera.

La información que se presenta en las siguientes líneas ha sido obtenida de un artículo que realizaron Wei Cui, Hang Zhang, Yan-li Ma y Yue-jin Zhang en la Escuela de Ingeniería de electrónica, mecánica y automatización en la Universidad de Shanghai.

Teniendo en cuenta, por ejemplo, un ciclo de conducción como muestra la siguiente figura:

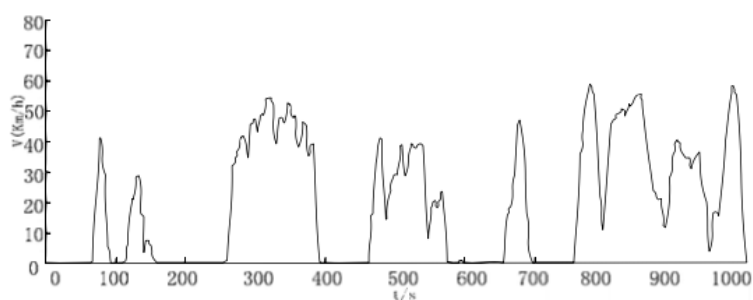


Figura 150. Ciclo de conducción

Los conductores utilizan los frenos de la motocicleta eléctrica cuando es necesario. Por lo tanto, si la energía cinética se puede regenerar mediante el frenado regenerativo, los problemas de conservación de energía importantes como

la resistencia de la batería y el campo de actuación de puede mejorar. Además la contaminación acústica del frenado mecánico y la seguridad de dicho frenado presenta más peligro que el frenado regenerativo.

El esquema óptimo tiene las propiedades de frenado regenerativo y frenado mecánico esencial para aumentar el campo de trabajo, seguridad, evita ruido y reduce el coste efectivo de la motocicleta eléctrica.

6.1.1 ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CONTROL DE FRENADO REGENERATIVO

✓ Principio de frenado regenerativo

El control de frenado regenerativo depende del convertidor buck-boost. La figura siguiente muestra la forma de onda de corriente en un período de conmutación de $t_0 - t_2$.

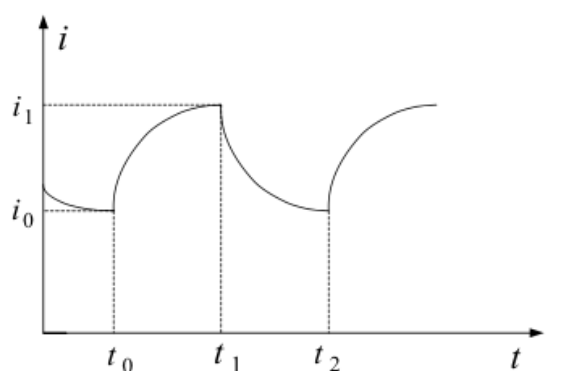


Figura 151. Forma de una onda en movimiento

En el período de $t_0 - t_2$, que se define como el estado de corriente continua, el dispositivo de alimentación está encendido, la energía del campo magnético se almacena en los inductores del devanado del estator y la armadura que aumenta la corriente en el período entre $t_1 - t_2$, definido como el estado de carga, el dispositivo de alimentación ahora apagado; la energía del campo magnético almacenada previamente en los inductores se libera y se superpone en la parte posterior EMF, lo que resulta en la carga a la batería de almacenamiento y la disminución de la armadura.

✓ Método de control de frenado regenerativo con modulación de medio puente

Basándose en el principio de funcionamiento de motor sin escobillas, la dirección del par de salida del motor se invierte cambiando la dirección de la corriente del estator en los mismos polos. Mientras se mantiene la misma dirección de rotación, el par de salida del motor se invierte cambiando la dirección de la corriente del estator para lograr el efecto de frenado. Para invertir la dirección de la corriente del estator, se cambian solamente las secuencias de conducción de los dispositivos de potencia de inversor trifásico.

Cuando un motor sin escobillas está impulsando hacia adelante en medio del puente modo de modulación, se utiliza un esquema de seis pasos 120° , es decir, un dispositivo de potencia de dos fases que pertenecen al brazo de puente alto y el bajo brazo de puente del inversor respectivamente se llevan a cabo en cualquier momento; en el dispositivo de potencia en el brazo bajo el puente es controlado por PWM de control de velocidad del motor. Como muestra la tabla la relación correspondiente de estados Hall y conductora de los dispositivos de energía cuando el motor está impulsando hacia adelante.

Tabla 10. Relación de la modulación de puente medio cuando el vehículo está en conducción

HALL states	110	010	101	100	001	011
Power states	T_1	T_1	T_3	T_3	T_5	T_5
	T_2	T_6	T_4	T_2	T_4	T_6

Cuando el motor está delante frena en el modo de modulación puente medio, sólo tres dispositivos de potencia (T_2 , T_4 , T_6) en el brazo de puente bajo se enciende y se apaga en un ciclo de trabajo controlado por 120 grados eléctricos, respectivamente, mientras que los otros tres de potencia dispositivos (T_1 , T_3 , T_5) en el brazo de puente alto están siempre apagados, y el tiempo de conducción de T_2 , T_4 , T_6 es el de T_5 , T_1 , T_3 (conducción hacia adelante), respectivamente.

La relación correspondiente de estados HALL y dispositivos eléctricos conductor cuando se realiza el frenado se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 11. Relación de la modulación de puente medio cuando el vehículo se encuentra frenando

HALL states	110	010	101	100	001	011
Power device	T_4	T_4	T_6	T_6	T_2	T_2

Como se muestra en las tablas anteriores, bajo los mismos estados Hall, la dirección de la corriente de la armadura cuando el motor es hacia adelante de frenado es opuesta a la que cuando el motor está conduciendo hacia adelante, por lo que se consigue el efecto de frenado.

- ✓ Deducción de la relación entre la media regenerativa actual en el bus de CC y ciclo de trabajo PWM

Se supone que el estado HALL es 010 ahora, y T4 es controlado por PWM. Cuando T4 está conectado, el circuito está trabajando bajo el actual estado continuo de frenado de regeneración, y los inductores de la fase A y de la fase B almacenan la energía del campo magnético. En este caso, el flujo de corriente del circuito se ilustra en la figura:

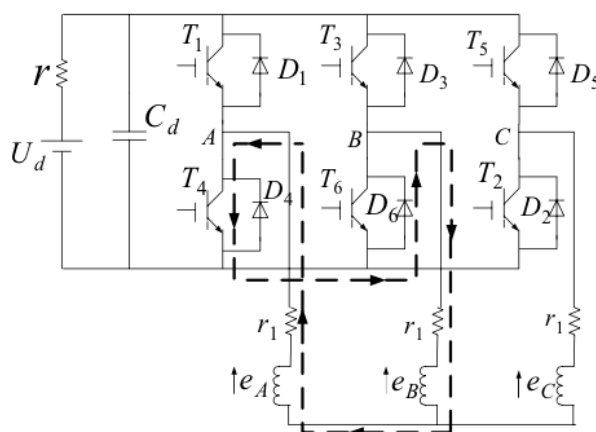


Figura 152. Circuito de CC

(Para simplificar el análisis y el cálculo, el fenómeno de que tres fases son conductoras en el período de no conmutación cuando $e_c < 0$ es ignorado). Cuando T4 está apagado, el circuito está trabajando bajo el estado de carga, y los inductores de la fase A y la fase B la liberación de la energía del campo magnético, como se ilustra en la figura:

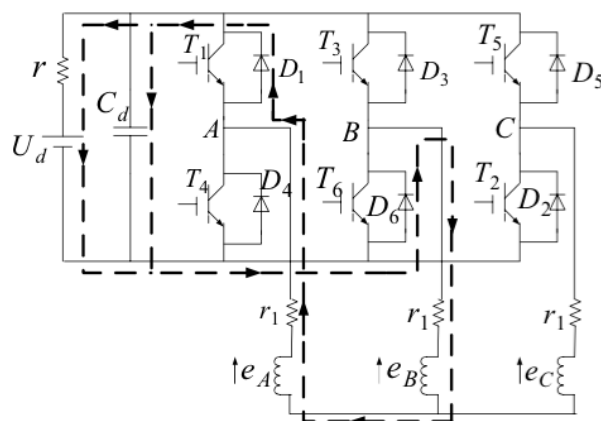


Figura 153. Estado de carga

Dado que el valor real de la inductancia L del circuito no puede ser infinita, el circuito mostrado en la figura anterior puede trabajar bajo dos tipos de modos, el inducido modo actual discreta (DCM) y el inducido modo de corriente continua (CCM), como se se muestra en la siguientes figuras respectivamente:

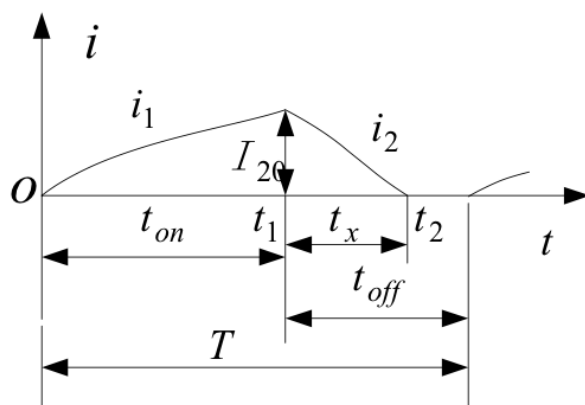


Figura 154. Corriente discreta en la armadura

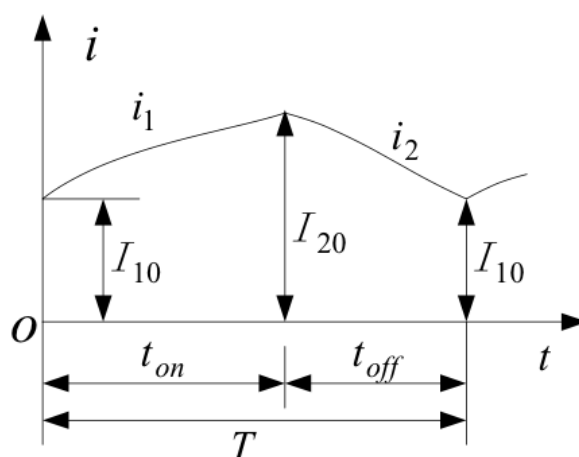


Figura 155. Corriente continua en la armadura

Para establecer el modelo matemático del sistema de frenado regenerativo, se realiza la siguiente simplificación: la fuerza contraelectromotriz inducida (EMF) y los coeficientes de inductor son considerados como una constante en un periodo PWM; en estado de caídas de tensión de los dispositivos de potencia en el inversor se ignoran; debido al efecto de un gran condensador en paralelo con la batería de almacenamiento, la resistencia interna de la batería se considera como cero.

✓ Simulación y experimentación

Para verificar la exactitud de la deducción teórica, se estableció un modelo de simulación del sistema de frenado regenerativo basado en Matlab/Simulink. Los parámetros del motor sin escobillas de imanes permanentes utilizados en la simulación se dan en la siguiente tabla:

Tabla 12. Configuración de parámetros experimentales

Resistencia del estator (Ω)	0,38
Inductancia del estator (mH)	0,3
Relación entre EMF y velocidad (V·min/rev)	0,045
Nº de parejas de polos	19
Tensión nominal (V)	24
Velocidad nominal (rev/min)	200

La forma de onda de simulación de la fase de corriente actual y la carga de la batería cuando el motor está frenado se ilustra en las siguientes figuras:

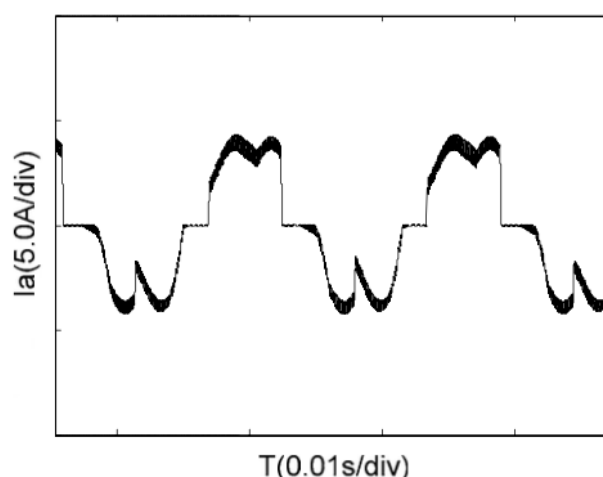


Figura 156. Forma de la onda de corriente de fase de simulación

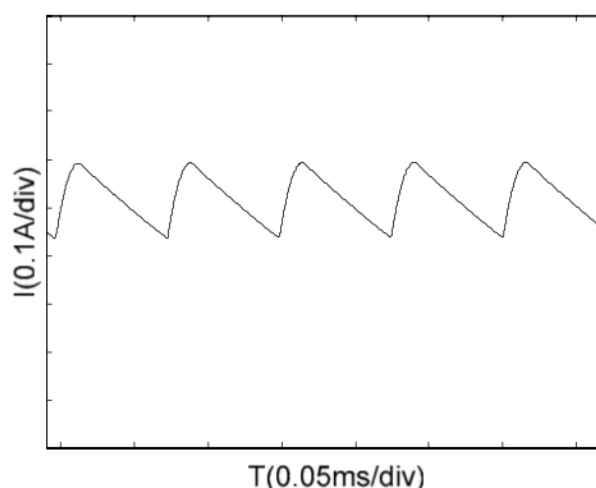


Figura 157. Forma de la onda en carga de simulación

El sistema experimental de frenado regenerativo para la motocicleta eléctrica consta de una batería de almacenamiento 24V, un inversor MOSFET de tres fases, un motor sin escobillas de imanes permanentes, circuitos de control y motor de corriente continua. Los parámetros del motor sin escobillas de imanes permanentes utilizados en el experimento son la misma que la utilizada en la simulación. En el experimento, un motor sin escobillas de imanes permanentes y un motor DC componen un sistema de accionamiento reversible para simular condiciones de frenado regenerativo de modulación de puente medio, es decir, el motor de corriente continua para la operación eléctrica y el motor sin escobillas de imanes permanentes para la operación de generación. Bajo la condición, el oscilograma de la corriente de fase y la corriente de carga cuando el motor sin escobillas de imanes permanentes está frenado se ilustra en las siguientes figuras:

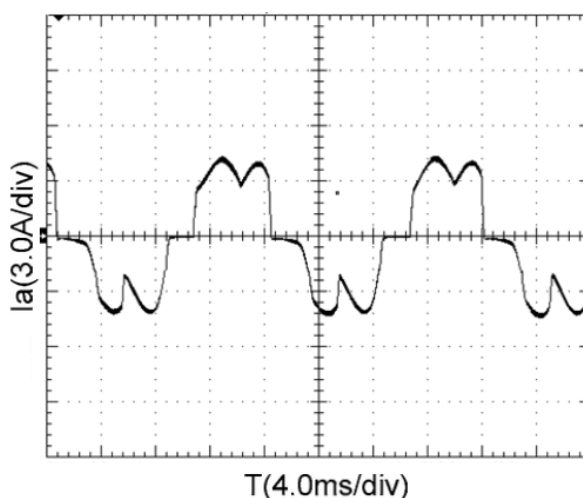


Figura 158. Forma de la onda de corriente de fase experimental

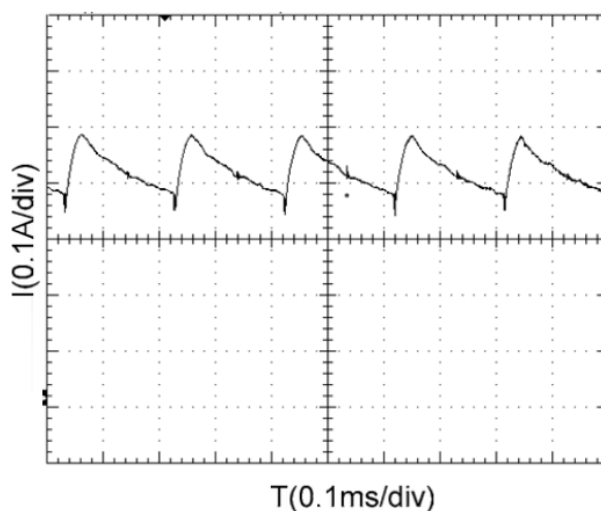


Figura 159. Forma de la onda en carga experimental

Comparando las figuras de la forma de onda en estado de carga, se puede saber que la corriente de carga está por encima de la línea que marca el valor cero, incluso el aumento de la corriente de fase continua y la caída de la carga actual muestra claramente la etapa de cada ciclo PWM. Además, las figuras de la forma de onda de corriente de fase son prácticamente las mismas. Por lo tanto, la deducción y la simulación de resultados teóricos han demostrado ser correctos.

✓ Procesado de datos y análisis

Para estudiar la relación entre la corriente regenerativa promedio en el ciclo de bus y el PWM bajo diferentes velocidades se va a observar en la siguientes gráficas:

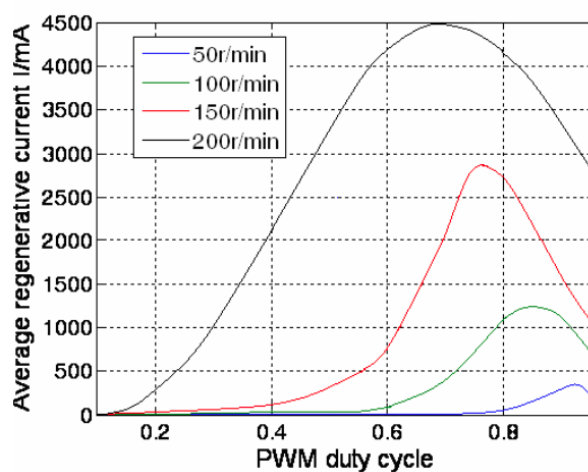


Figura 160. Ciclo de trabajo regenerativo VS PWM con cuatro velocidades de simulación

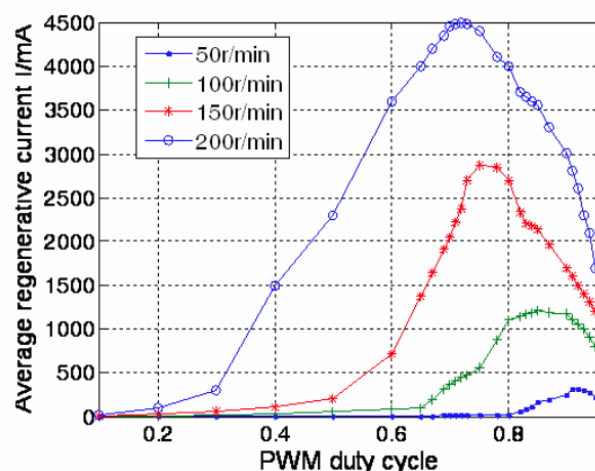


Figura 161. Ciclo de trabajo regenerativo VS PWM con cuatro velocidades experimental

Se seleccionan cuatro velocidades diferentes tanto en la simulación y experimento: 50rev/min, 100rev/min, 150rev/min y 200rev/min. Como se muestra en ambas figuras cuando el motor sin escobillas de imanes permanentes está trabajando bajo el estado de frenado regenerativo de modulación de puente medio, existe un ciclo de trabajo óptimo que hace media máxima corriente regenerativa. Además, cuanto mayor es la velocidad, mayor corriente regenerativa promedio consigue; a medida que aumenta la velocidad, el ciclo de trabajo óptimo provoca la disminución máxima corriente regenerativa promedio. Por lo tanto, la deducción de la relación entre la corriente regenerativa promedio en el ciclo de bus y el del PWM se prueba que es consistente con el experimento.

6.1.2 ESQUEMA DE CONTROL DE FRENADO REGENERATIVO

Si se lleva el frenado regenerativo a la realidad, hay cuatro obstáculos para la optimización del sistema de control de frenado regenerativo en motocicleta eléctrica que se presentan en este trabajo.

- ✓ El ciclo de trabajo PWM óptimo se selecciona para obtener el promedio máximo actual de regeneración de acuerdo con la velocidad inicial del freno.
- ✓ La corriente regenerativa promedio no puede exceder la corriente de carga limitada máximo permisible de la batería regulada por válvula. E

- ✓ El par de frenado debe ser controlado adecuadamente teniendo la sensación de conducción y seguridad, especialmente en las carreteras de descenso.
- ✓ El frenado mecánico es esencial en caso de emergencia.

En este apartado se va a definir tres modos de frenado "modo de carreteras con pendiente descendente" , "modo de carreteras en llano" y un último modo que se va a denominar como "modo de emergencia" . El "modo de carreteras con pendiente descendente" se activa mediante la activación de un interruptor de encendido y apagado cuando la motocicleta eléctrica entra en caminos cuesta abajo, el manillar está diseñado bidireccional con el fin de impulsar en la dirección de las agujas del reloj y el freno regenerativo en sentido antihorario . Hay que añadir, que el freno de mano mecánico está equipado con un sensor de presión para comprobar si la motocicleta eléctrica va a trabajar en " modo de emergencia " en el caso de que sea necesario.

- ✓ Modelo de ciclo de trabajo máximo

A medida que el voltaje de la batería es básicamente inmutable en el experimento, por lo que cuando la corriente regenerativa promedio alcanza un máximo, la potencia de realimentación regenerativa alcanza un máximo también. Por lo tanto, el ciclo de trabajo máximo se ha establecido provisionalmente para realizar el esquema de control de frenado regenerativo simple pero eficaz teniendo en cuenta la aplicación real. Se centra en el doble objetivo del proceso de frenado seguro y el almacenamiento de energía.

- ✓ Modo de frenado pendiente descendente (Downhill)

Su objetivo es el límite suave y fiable de velocidad en las carreteras cuesta abajo, con el objetivo también de recuperación de energía.

A continuación se presenta una gráfica de cómo actúa el PWM en función de la velocidad tanto en simulación como en el experimento:

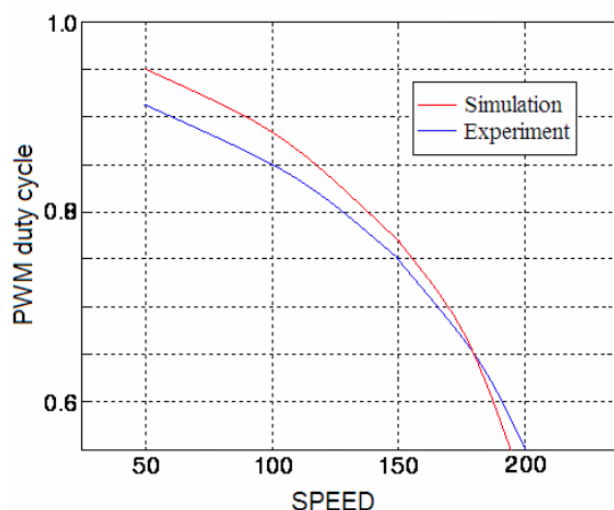


Figura 162. Actuación del PWM en función de la velocidad

En este trabajo se espera que cuando la velocidad de descenso es variada, el ciclo de trabajo PWM del próximo período de control también se varía para cosechar la potencia máxima todo el tiempo.

Al principio de los caminos de descenso, el piloto enciende el interruptor de la motocicleta para trabajar en el modo de descenso en carreteras. A partir de este modelo, el ciclo de trabajo PWM del próximo período de control siempre se selecciona para acercarse a la que es la corriente máxima media regenerativa de acuerdo a la velocidad del periodo de control actual.

✓ Modo de carreteras en llano y modo de emergencia

Los dos modos son diferentes si se compara con el modo de carreteras downhill en el que se tiene en cuenta la energía potencial gravitatoria. Cuando la motocicleta eléctrica funciona en llano, los frenos de la motocicleta eléctrica actúan girando el manillar en sentido antihorario, y el ciclo de trabajo PWM varía linealmente para realizar el frenado regenerativo.

Mientras que en modo de emergencia, el piloto debe presionar el freno de mano para detener la motocicleta eléctrica de inmediato en caso de emergencia. En este caso, la negativa de acelerar puede ser tan grande que el par de frenado demasiado grande a alta velocidad podría resultar un peligro para la actual

recuperación. Por lo tanto, el valor de salida del ciclo de trabajo en modo de emergencia es igual a cero, y la motocicleta eléctrica es detenida por frenado mecánico solamente.

✓ Esquema de control de frenado regenerativo

La siguiente figura muestra la configuración del sistema de frenado regenerativo propuesto basado en máxima recuperación y aprovechamiento de dicha característica.

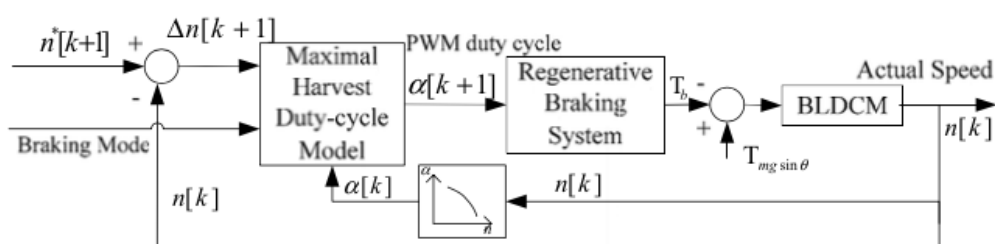


Figura 163. Esquema de control de frenado regenerativo propuesto

La señal de velocidad real del período de control de orden k $n[k]$ se realimenta y se compara con la velocidad de referencia del período de control $k + 1^\circ$ período de control de $n[k+1]$ basado en ciclo máximo. Las otras dos entradas de ciclo máximo de trabajo del modelo son el modo de frenado y el ciclo de trabajo PWM $\alpha[k]$ que hace media máxima corriente regenerativa de acuerdo a la velocidad del periodo de control actual $n[k]$. Algunos experimentos básicos de conducción sólo se han probado cualitativamente para verificar la viabilidad del esquema de control de frenado regenerativo óptimo propuesto. Cuando la motocicleta eléctrica trabajó en las carreteras de descenso largo, el proceso fue relativamente suave y la temperatura de salida del VRLA no se puede sentir obviamente. Otro experimento fue juzgado en carreteras planas, el piloto giró el manillar en la dirección de las agujas del reloj primero en llegar a una cierta velocidad, y luego se volvió en sentido antihorario para frenar. Debido al esquema óptimo control de frenado regenerativo, la sensación de pilotaje fue satisfactoria y el ruido por el frenado mecánico en general se redujo.

Se ha estudiado intensamente la relación entre la corriente de frenado regenerativo medio y ciclo de trabajo PWM en modulación de puente medio del

régimen de frenado regenerativo para la motocicleta eléctrica. El método propuesto sólo podría cambiar las señales de conmutación de controlador de motor para controlar el par inverso durante el periodo de frenado y lograr el objetivo del almacenamiento máximo de energía sin convertidor adicional o cambio de devanados del estator del motor como otros métodos existentes. La factibilidad del método propuesto se demostró por los resultados de simulación y algunos experimentos básicos. Empleando el esquema para la motocicleta eléctrica, se mejorarían los problemas como campo de prácticas, seguridad, contaminación acústica y rentable. Nuestro trabajo futuro presta atención a los efectos reales y algunos parámetros importantes para continuar con el desarrollo y seguridad en la aplicación real.

6.2 ABS INTEGRAL

El sistema ABS fue desarrollado tras los avances de la hidráulica y la electrónica, por lo que se pudo simplificar la arquitectura del sistema de frenado tradicional y ampliar nuevas funciones. Con el sistema ABS se consigue que la frenada sea más rápida, es decir, en espacios cortos y evitando que la rueda derrape en el caso de que sea una frenada urgente. Todo esto fue posible gracias al nuevo uso de válvulas reguladoras y la incorporación de un nuevo sistema de control.

El sistema ABS incluye una función parcial, es decir, el freno de la rueda trasera se activa al usar la maneta del freno delantero. En el caso de que se pise el pedal del freno trasero, solo se produce el frenado de la rueda trasera. Las ventajas del sistema ABS parcial es que se consigue una distribución óptima del frenado entre ambas ruedas. Si el sistema no actuase sobre la rueda trasera y solo frenase la rueda delantera bruscamente se podría producir el levantamiento de la rueda trasera de la calzada.

Se habla de un sistema integral, el sistema de la rueda trasera y la delantera son independientes por lo que a la regulación de presión se refiere. La presión del frenado de la rueda trasera se genera mediante una bomba hidráulica accionada electrónicamente. Esto hace que tengamos una distribución dinámica y reparto ideal

entre las dos ruedas. Otra cosa importante es que si se produce un fallo en la bomba hidráulica o en el controlador el freno funciona del modo convencional.

✓ Funcionamiento

Debido a los progresos de la hidráulica y válvulas reguladoras y los adelantos experimentados en la electrónica, provocan disponer de una conducción más confortable. El funcionamiento de este sistema es realmente sencillo. Cuando el piloto acciona la maneta que conecta con el pistón de freno principal, se transmite directamente al freno de la rueda mediante una válvula abierta. Si los sensores de la rueda y electrónica detectan que la rueda está empezando a bloquearse, se cierra la válvula a está abierta y se abre una válvula de salida, que se encuentra en paralelo al circuito del freno. A través de la válvula circula un líquido de freno que se encuentra en un depósito, este líquido hace que la presión disminuya rápidamente. A la vez que se activan las válvulas, se activa también una bomba hidráulica con el objetivo de devolver el líquido freno hacia el circuito regulador. Cuando la rueda comienza a girar libremente la válvula de salida se cierra y la de entrada se vuelve a abrir con lo que se vuelve a tener la conexión hidráulica con la maneta y el pistón principal del freno.

Tres sensores de presión, captan las presiones de modo continuo; conociendo las presiones en el sistema y combinándolas con la evaluación de ciclos anteriores, el sistema de regulación permite un ajuste específico de la presión en función de lo necesario en cada situación. Esto ayuda a que el frenado sea más confortable y que la distancia para frenar la moto sea mínima.

6.3 ASC (Automatic Stability Control)

El ASC es un sistema de reglamento que se instala en las motocicletas eléctricas de gran potencia que evita que la rueda trasera resbale y que la rueda delantera se levante al realizar una aceleración brusca, es decir, un sistema antipatinamiento que se instala en motocicletas con un par motor de arranque muy alto.

Si se acelera con fuerza hay que evitar que la rueda trasera patine y pierda la adherencia lateral. Los problemas que nos puede dar la rueda trasera derrapando o

la rueda delantera levantandose se detecta con sensores que activan el sistema ASC. Si se tienen controladas ambas funciones, la estabilidad es ideal y una conducción segura. Este sistema es opcional, por lo que si se quiere se puede desconectar en mediante el accionamiento de un botón.

El funcionamiento del sistema es sencillo. Los sensores se aprovechan para ambos sistemas de ABS y ASC. Los sensores detectan la velocidad de giro de las ruedas, si la electrónica detecta la diferencia de velocidad entre la rueda trasera y la delantera es que algo está fallando, por lo que se reduce el par motor a través de la centralita de motor y modificando el ángulo de encendido. Esta regulación se realiza de manera rápida, no es perceptible por el piloto por lo que no se pierde el confort de la conducción.

✓ Funcionamiento

Aprovechando los mismos sensores del sistema ABS detecta el giro de las ruedas y aprovecha las funciones de diagnóstico de los sensores. El resbalamiento de la rueda se realiza comparando la diferencia de giro entre ambas ruedas mediante el controlador. En el momento que el controlador detecta que la rueda está patinando, éste actúa disminuyendo el momento de tracción hasta lo admisible para que el neumático recupere su capacidad de tracción. En primer lugar se reduce el par motor mediante una modificación del ángulo de encendido.

Si con este no se recupera la tracción del neumático habría que interrumpir la inyección. La regulación es rápida y precisa, no afecta al confort de la conducción. Esta información llega al piloto a través de un chivato en el panel de control.

CONCLUSIONES

7 CONCLUSIONES

Una vez realizado el estudio del arte de la motocicleta eléctrica, vemos que la tecnología ha avanzado a pasos agigantados y que el potencial que tienen las motocicletas eléctricas está por encima de las motocicletas tradicionales.

Si nos referimos a términos de contaminación con el medio ambiente, disminución de ruido, ahorro económico a corto plazo, reducción del mantenimiento estamos ante los vehículos eléctricos con más fuerza que están entrando en el mercado.

Si nos referimos a aspectos más técnicos como velocidad, fuerza, aceleración, también las motocicletas eléctricas impresionan con muchas más opciones y mejores rendimientos que los motores de combustión y sin olvidar que la mayoría de los diseños tan innovadores que captan la atención.

Son muchas de la vieja industria las que o bien tienen ya sus prototipos en el mercado o se encuentran analizando o buscando la mejor opción para competir desde ya en este mercado de la motocicleta eléctrica.

Los avances de la electrónica y de los motores propicia que tengamos unos vehículos más ligeros y que su mantenimiento se reduzca con respecto a las motocicletas tradicionales.

Los elementos más importantes que se han analizado han sido controlador, motor y batería y que dependiendo del terreno donde se vaya a utilizar el vehículo se instalará unos u otros tipos de componentes pero siempre ofreciendo el máximo rendimiento.

En mi opinión la elección de la batería es algo a tener en cuenta debido a que dependiendo del tipo de batería vamos a saber de primera mano cual va a ser la autonomía del vehículo.

En estos momentos quizás el tema económico es lo que hace que los usuarios nose animen para apostar por este tipo de vehículos, pero bien han de saber que a corto plazo el vehículo se hace rentable.

BIBLIOGRAFÍA

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Build your own electric motorcycle. Carl Vogel. Mc Graw Hill. 2009
- [2] El vehículo eléctrico. Desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocio (1ªEd.). Sociedad Técnica de Automoción. Librooks. 2011
- [3] Historia: <http://demotosonline.com/historia-de-la-moto-electrica/>
- [4] <http://www.ree.es/es/actividades/demanda-y-produccion-en-tiempo-real>
- [5] https://www.mapfre.com/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1059224
- [6] <http://www.eleconomista.es/ecomotor/motos/noticias/3476162/10/11/Lit-Motors-C1-la-motocicleta-electrica-que-no-se-cae.html>
- [7] Motores: <http://www.heinzmann.com/en/electric-motors-and-hybrid-drives/pancake/synchronous-motor>
- [8] Electric Motors and Drives (3ªEd.). Austin Hughes. Nownos. 2006
- [9] ABS integral y ASC. BMW Motorrad. 2006.
- [10] Brushless Permanent Magnet DC and AC Motor and Synchronous Reluctance Motor Design for Racing Motorcycles. David G. Dorrell y Mircea Popescu.
- [11] Power-Supply Overvoltage Protection Circuit for Motorcycle On-Board Electronics. P. D'Abramo, R. Roncella y R. Salleti.
- [12] Regenerative Braking Control Method and Optimal Scheme for Electric Motorcycle. Wei Cui, Hang Zhang, Yan-li Ma y Yue-jin Zhang.
- [13] Measurement Evaluation of Electromagnetic Radiation from the Electrical Wiring in EVs. Chi-Fang Huang and Jhih-Yuan Wang.

- [14] <http://www.zeromotorcycles.com/motorcycles/>
- [15] <http://www.gogoro.com/smartscooter/faster>
- [16] <http://www.ktm.com/es/freeride/>
- [17] Controladores: <http://www.sevcon.com/ac-controllers/gen-4-size-8.aspx>
- [18] Controladores: <http://www.zapiinc.com/products/motor-controllers>
- [19] Analysis of Electric Machinery and Drive Systems (2ªEd.). Paul C. Krause, Oleg Wasyncuk y Scott D. Sudhoff. Wiley Inter-Science. 2002.
- [20] http://www.bmw-motorrad.es/es/es/index.html?content=http://www.bmw-motorrad.es/es/es/bike/model_overview_2012.html¬rack=1
- [21] <http://www.hibridosyelectricos.com/seccion/motocicletas-electricas>
- [22] Controladores: http://www.alltraxinc.com/Products_AXE.html
- [23] <https://endless-sphere.com>
- [24] <http://www.bultaco.es/motos>
- [25] http://platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/1eva/introduccion_motore_s_ca.pdf
- [26] http://perso.wanadoo.es/danieldiaz_borr/rotor%20bobinado.htm