



Investigación e implementación de un sistema de carga regenerativo para elevar las prestaciones de autonomía en una motocicleta eléctrica.

Cuñas Picho, Wilmer Isaac

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz.

Ing. Erazo Laverde, Washington Germán.

17 de Enero del 2023

Latacunga

Reporte de verificación de contenido

Document Information

Analyzed document	TESIS DOCUMENTO-CUÑAS ISAAC ERAZO GERMAN.pdf (D156079914)
Submitted	1/16/2023 9:25:00 PM
Submitted by	Cristian Laverde
Submitter email	claverde@uteq.edu.ec
Similarity	0%
Analysis address	claverde.uteq@analysis.arkund.com



Firmado digitalmente por
WASHINGTON
GERMAN ERAZO
LAVERDE

Sources included in the report

W	URL: https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-una-moto-electrica/ Fetched: 1/16/2023 9:26:00 PM		1
W	URL: https://eurobalt.net/es/blog/2019/04/16/permanent-magnet/ Fetched: 1/16/2023 9:26:00 PM		1
W	URL: https://www.lifeder.com/re reluctancia-magnetica/ Fetched: 1/16/2023 9:26:00 PM		1
W	URL: https://jaramotoblogs.wordpress.com/2020/04/24/jmotoblogs-sistema-de-rectificacion-y-carga-de-... Fetched: 1/16/2023 9:26:00 PM		1

Entire Document

1 Investigación e implementación de un sistema de carga regenerativo para elevar las prestaciones de autonomía en una motocicleta eléctrica. Cuñas Picho, Wilmer Isaac Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica Carrera de Ingeniería Automotriz Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz. Ing. Erazo Laverde, Washington Germán. 17 de Enero del 2023 Latacunga

2 Reporte de verificación de contenido

3 Certificación

4 Responsabilidad de autoría

5 Autorización de publicación

6 Dedicatoria Este trabajo es dedicado a mi propia persona del futuro en donde espero que cuando revierta el tiempo a este punto sienta un alivio de encontrar una investigación que fue parte fundamental para su formación y logro de todas sus metas, con humildad deseo que mi investigación aporte al desarrollo de proyectos. Finalmente dedico este trabajo a mis padres María y Mariano que a pesar de su limitada economía siempre me ayudaron incondicionalmente y a mis hermanas que aportaron con su colaboración durante mucho tiempo así como a mi sobrino Benjamín que me compartió su tiempo de niño.

7 Agradecimiento Agradezco a mis padres y hermanas así como a mi sobrino por su apoyo de familia en cada momento de mi vida.

Agradezco a Dios y a la vida misma por cada momento difícil que ha existido en mi vida que me permiten valorar los momentos felices y entender la vida desde varios puntos. Quiero agradecer por este medio también a mis mascotas que fueron parte de momentos felices, además de ayudarme a entender el valor de toda expresión de vida fomentada en su respeto y cariño incondicional. Agradezco a cada institución que me brindó su apoyo intelectual, a la educación pública que más allá de ser un derecho es una oportunidad y más allá de tener falencias el éxito de cada persona radica en aprovechar esa oportunidad dada.

Finalmente quiero agradecer a cada docente de la Universidad de Las Fuerzas Armadas Espe, que me ayudaron y formaron intelectualmente, con especial atención agradezco al Ingeniero German Erazo por su colaboración.

Firma:

ING. Erazo Laverde, Washington Germán

C. C.: 0501432637



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Investigación e implementación de un sistema de carga regenerativo para elevar las prestaciones de autonomía en una motocicleta eléctrica”** fue realizado por el señor **Cuñas Picho, Wilmer Isaac**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 17 de Enero del 2023

Firma:

.....
ING. Erazo Laverde, Washington Germán
C. C.: 0501432637



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Cuñas Picho, Wilmer Isaac**, con cédula de ciudadanía n° 1726292822, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Investigación e implementación de un sistema de carga regenerativo para elevar las prestaciones de autonomía en una motocicleta eléctrica**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 17 de Enero del 2023

Firma

.....
Cuñas Picho, Wilmer Isaac

C.C.: 1726292822



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Autorización de Publicación

Yo **Cuñas Picho, Wilmer Isaac**, con cédula de ciudadanía n° 1726292822, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Investigación e implementación de un sistema de carga regenerativo para elevar las prestaciones de autonomía en una motocicleta eléctrica** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 17 de Enero del 2023

Firma

Cuñas Picho, Wilmer Isaac

C.C.: 1726292822

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado a mi propia persona del futuro en donde espero que cuando revierta el tiempo a este punto sienta un alivio de encontrar una investigación que fue parte fundamental para su formación y logro de todas sus metas, con humildad deseo que mi investigación aporte al desarrollo de proyectos. Finalmente dedico este trabajo a mis padres María y Mariano que a pesar de su limitada economía siempre me ayudaron incondicionalmente y a mis hermanas que aportaron con su colaboración durante mucho tiempo así como a mi sobrino Benjamín que me compartió su tiempo de niño.

Agradecimiento

Agradezco a mis padres y hermanas así como a mi sobrino por su apoyo de familia en cada momento de mi vida.

Agradezco a Dios y a la vida misma por cada momento difícil que ha existido en mi vida que me permiten valorar los momentos felices y entender la vida desde varios puntos.

Quiero agradecer por este medio también a mis mascotas que fueron parte de momentos felices, además de ayudarme a entender el valor de toda expresión de vida fomentada en su respeto y cariño incondicional.

Agradezco a cada institución que me brindó su apoyo intelectual, a la educación pública que más allá de ser un derecho es una oportunidad y más allá de tener falencias el éxito de cada persona radica en aprovechar esa oportunidad dada.

Finalmente quiero agradecer a cada docente de la Universidad de Las Fuerzas Armadas Espe, que me ayudaron y formaron intelectualmente, con especial atención agradezco al Ingeniero German Erazo por su colaboración.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula.....	1
Reporte de verificación de contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de contenido	8
Índice de figuras	16
Índice de tablas	20
Índice de ecuaciones.....	21
Resumen	24
Abstract.....	25
Capítulo I: Marco metodológico de la investigación	26
Antecedentes investigativos	26
Planteamiento del problema.....	28
Descripción resumida del proyecto	29
Justificación e importancia	30
Objetivos del proyecto	31
<i>Objetivo general</i>	<i>31</i>
<i>Objetivos específicos</i>	<i>31</i>
Meta	32

Hipótesis	32
Variables de investigación	32
<i>Variable independiente</i>	32
<i>Variable dependiente</i>	33
Metodología de desarrollo del proyecto	34
<i>Método documental bibliográfico</i>	34
<i>Método de Matemización</i>	34
<i>Método de modelación</i>	34
<i>Método experimental</i>	35
<i>Método de medición</i>	35
<i>Método inductivo</i>	35
<i>Método deductivo</i>	35
<i>Método científico</i>	35
<i>Método comparativo</i>	36
Capítulo II: Fundamento teórico	40
Movilidad eléctrica.....	40
Vehículo eléctrico	40
<i>Requisitos de los motores eléctricos para vehículos</i>	40
Partes de un vehículo eléctrico.....	41
<i>Motor eléctrico</i>	41
<i>Cargador eléctrico</i>	42
<i>Baterías utilizadas en vehículos eléctricos</i>	42
Tipos de vehículos eléctricos	43

Motocicleta eléctrica	43
<i>Autonomía de una motocicleta eléctrica.....</i>	<i>44</i>
<i>Componentes principales de una motocicleta eléctrica.....</i>	<i>44</i>
Sistema KERS (Kinetic Energy Recovery System).....	45
<i>Componentes principales de un sistema KERS</i>	<i>46</i>
Generador eléctrico.....	48
Generador de imanes permanentes	48
<i>Electroimanes.....</i>	<i>49</i>
<i>Imanes permanentes.....</i>	<i>49</i>
<i>Partes del generador de imanes permanentes.....</i>	<i>50</i>
Inducción electromagnética (Ley de Faraday).....	50
Magnetismo	52
Factores determinantes para inducir un voltaje	52
Ley de Lenz.....	53
Definición de una bobina.....	53
<i>Funcionamiento de una bobina.....</i>	<i>53</i>
<i>Inductancia de una bobina.....</i>	<i>54</i>
<i>Tipos de bobinas.....</i>	<i>54</i>
<i>Cable utilizado para bobinas</i>	<i>55</i>
Imanes permanentes	55
Características de un imán permanente	56
<i>Remanencia magnética (Br).....</i>	<i>56</i>
<i>Fuerza coercitiva (Hc).....</i>	<i>56</i>

Pérdidas de las propiedades magnéticas de un imán	57
Composición de un imán permanente	57
Consideraciones para la elección de un imán permanente	58
Numeración alfanumérica de un imán de neodimio	58
Propiedades de los sistemas magnéticos	59
<i>Campo magnético-Intensidad de campo magnético (H)</i>	59
<i>Densidad de flujo magnético</i>	60
<i>Flujo magnético</i>	60
<i>Magnetismo remanente</i>	61
<i>Permeabilidad magnética</i>	61
<i>Reluctancia magnética</i>	62
<i>Coercitividad</i>	63
Permeabilidad magnética en distintas sustancias	63
<i>Sustancias paramagnéticas</i>	63
<i>Sustancias diamagnéticas</i>	63
<i>Sustancias ferromagnéticas</i>	64
Generador síncrono de imanes de imanes permanentes	64
<i>Configuraciones de un generador de imanes permanentes</i>	65
<i>Disposición de los imanes en el rotor</i>	65
<i>Tipología de un generador de imanes permanentes</i>	66
Materiales empleados en la fabricación de un generador	66
<i>Material del núcleo del estator</i>	66
<i>Material del bastidor</i>	67

<i>Material del rotor</i>	67
<i>Imán de Neodimio</i>	67
<i>Bobinas del estator</i>	67
<i>Material de los aislantes utilizados en los bobinados</i>	67
Selección de un aislante térmico	68
<i>Propiedades eléctricas</i>	68
<i>Propiedades mecánicas</i>	68
<i>Propiedades químicas</i>	68
Pérdidas en los generadores eléctricos	69
<i>Pérdidas mecánicas</i>	70
<i>Pérdidas en el núcleo magnético</i>	70
<i>Pérdidas magnéticas por corrientes de Foucault</i>	70
<i>Pérdidas magnéticas por histéresis</i>	70
Corriente producida en un generador eléctrico	71
<i>Corriente continua</i>	71
<i>Corriente alterna</i>	71
Circuito regulador-rectificador de voltaje	72
<i>Circuito rectificador</i>	72
<i>Circuito regulador</i>	72
Acumuladores de energía	73
<i>Batería de Plomo ácido</i>	73
<i>Batería de Litio</i>	73
<i>Capacidad de una batería</i>	74

<i>Estado de carga de una batería</i>	74
<i>Etapas de carga de una batería</i>	74
Inversor de corriente (DC-AC).....	75
<i>Configuración de un inversor</i>	76
Motor eléctrico BLDC	77
Motor eléctrico QS de 2000 W	77
Ecuaciones de diseño para un generador de flujo radial	78
Significado de letras y símbolos.....	84
Capítulo III: Diseño, construcción e implementación del sistema de carga	88
Requerimientos del sistema de carga regenerativo.....	89
Diseño matemático del generador eléctrico.....	90
<i>Potencia de partida</i>	91
<i>Número de polos magnéticos</i>	93
<i>Cálculo de la abertura de ranura</i>	102
<i>Cálculo de la fracción magnética</i>	103
<i>Número de imanes</i>	104
<i>Cálculo del factor de apilamiento (kst)</i>	110
<i>Cálculo de $\Gamma(B_{max}, f)$</i>	122
<i>Cálculo de P_s (Pérdidas por a la fricción, viento y otros)</i>	124
Geometría resultante	125
Análisis magnético mediante el método de elementos finitos	126
<i>Análisis e interpretación de resultados</i>	128
<i>Cálculo de la transferencia de calor por conducción en el generador</i>	130

Refrigeración del sistema y selección del aislante térmico	133
<i>Cálculo del calibre de alambre magneto</i>	137
Fabricación de piezas y componentes del generador	138
Ensamblaje del generador eléctrico	140
Selección del inversor del sistema de carga	143
Selección del regulador de corriente del sistema de carga	144
Ensamblaje de los componentes que forman el sistema de carga	145
Etapas de potencia del sistema de carga regenerativo	146
<i>Etapa 1</i>	146
<i>Etapa 2</i>	146
<i>Etapa 3</i>	147
<i>Etapa 4</i>	147
<i>Etapa 5</i>	148
Consideraciones de descarga y elección de la batería de ácido plomo	148
Instalación del voltímetro-amperímetro para el generador eléctrico	150
<i>Instalación del medidor de voltaje</i>	151
Instalación del medidor KG-140F	151
Componentes del tablero de control	153
Esquema eléctrico y electrónico de la moto eléctrica	154
Capítulo IV: Pruebas y análisis de resultados	157
Protocolo de pruebas	157
<i>Desarrollo de la prueba de ruta</i>	160
Resultados obtenidos	162

<i>Análisis de la fase 1</i>	163
<i>Análisis de la fase 2</i>	163
<i>Análisis de la fase 3 o fase de corte</i>	164
Autonomía inicial	164
<i>Análisis de la fase 4</i>	165
<i>Análisis de la fase 5</i>	166
<i>Análisis de la fase 6 o fase de corte</i>	168
Autonomía final	168
Pruebas del generador eléctrico.....	172
Capítulo V: Marco administrativo	173
Recursos.....	173
<i>Recursos humanos</i>	173
<i>Recursos materiales</i>	173
<i>Recursos tecnológicos</i>	174
Costo neto de la investigación.....	175
Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones	176
Conclusiones	176
Recomendaciones	179
Bibliografía	181
Anexos	186

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Árbol de problemas</i>	28
Figura 2 <i>Conjunto de requisitos para un motor eléctrico</i>	41
Figura 3 <i>Tipología de motores eléctricos utilizados en vehículos</i>	41
Figura 4 <i>Tipo de baterías utilizadas en vehículos eléctricos</i>	42
Figura 5 <i>Clasificación de los vehículos eléctricos</i>	43
Figura 6 <i>Detalle y funcionamiento de cada parte de una motocicleta eléctrica</i>	44
Figura 7 <i>Generador Motor Integrado (IMG) Audi Q5 Hybrid Quattro</i>	46
Figura 8 <i>Esquema de un sistema KERS para almacenar energía</i>	47
Figura 9 <i>Tipo de generadores eléctricos</i>	48
Figura 10 <i>Motor generador BOSCH</i>	49
Figura 11 <i>Partes principales de un generador de imanes permanentes</i>	50
Figura 12 <i>Generación de un voltaje inducido</i>	51
Figura 13 <i>Constitución de una bobina</i>	51
Figura 14 <i>Campo magnético generado en un conductor</i>	52
Figura 15 <i>Factores que intervienen en el voltaje inducido</i>	52
Figura 16 <i>Campo magnético generado en una bobina</i>	53
Figura 17 <i>Clasificación de las bobinas</i>	55
Figura 18 <i>Distribución del flujo magnético para un imán permanente</i>	56
Figura 19 <i>Curvas de magnetización para materiales tradicionales de imán permanente</i> ...	58
Figura 20 <i>Denominación, numeración o nomenclatura de un imán de neodimio</i>	59
Figura 21 <i>Flujo magnético en dos imanes permanentes enfrentados</i>	60
Figura 22 <i>Flujo magnético a través de dos áreas</i>	61
Figura 23 <i>Circuito magnético-reluctancia</i>	62
Figura 24 <i>Efecto del campo magnético sobre una sustancia paramagnética</i>	63
Figura 25 <i>Efecto del campo magnético sobre una sustancia diamagnética</i>	64
Figura 26 <i>Efecto del campo magnético sobre una sustancia ferromagnética</i>	64
Figura 27 <i>Descripción de la configuración de un generador</i>	65

Figura 28	<i>Tipología de un generador de acuerdo al movimiento del rotor.....</i>	66
Figura 29	<i>Núcleo con corrientes parásitas en el núcleo ferromagnético.....</i>	70
Figura 30	<i>Ciclo de histéresis de los materiales magnéticos.....</i>	71
Figura 31	<i>Tipos de corrientes por su forma de onda.....</i>	71
Figura 32	<i>Circuito regulador-rectificador de voltaje.....</i>	72
Figura 33	<i>Pilas de batería de de litio.....</i>	74
Figura 34	<i>Gráfica de las etapas de carga de una batería.....</i>	75
Figura 35	<i>Tipología de los convertidores de corriente.....</i>	76
Figura 36	<i>Diagrama de flujo de un inversor DC-AC.....</i>	76
Figura 37	<i>Diagrama de funcionamiento de un motor BLDC.....</i>	77
Figura 38	<i>Motor eléctrico QS BLDC.....</i>	78
Figura 39	<i>Flujograma de diseño.....</i>	88
Figura 40	<i>Flujograma de requerimientos del sistema regenerativo.....</i>	89
Figura 41	<i>Flujograma de requerimientos iniciales para el diseño.....</i>	90
Figura 42	<i>Relación de transmisión.....</i>	93
Figura 43	<i>Diagrama de flujo para elegir el número de polos magnéticos.....</i>	93
Figura 44	<i>Estimación geométrica del número de ranuras.....</i>	95
Figura 45	<i>Número de ranuras por polo por fase.....</i>	98
Figura 46	<i>Longitud de cada polo.....</i>	104
Figura 47	<i>Entrehierro real.....</i>	105
Figura 48	<i>Remanencia magnética de diferentes imanes.....</i>	108
Figura 49	<i>Diferente disposición de imanes.....</i>	108
Figura 50	<i>Curva de magnetización de diferentes materiales.....</i>	110
Figura 51	<i>Cálculo del factor de apilamiento k_{st}.....</i>	111
Figura 52	<i>Geometría resultante del núcleo magnético.....</i>	125
Figura 53	<i>Geometría resultante del rotor.....</i>	126
Figura 54	<i>Descripción del análisis magnético.....</i>	126
Figura 55	<i>Comportamiento magnético.....</i>	128

Figura 56 <i>Punto con mayor saturación magnética</i>	130
Figura 57 <i>Partes del estator</i>	131
Figura 58 <i>Área del conductor</i>	132
Figura 59 <i>Aislante térmico del generador</i>	135
Figura 60 <i>Refrigeración de los componentes del sistema de carga</i>	135
Figura 61 <i>Partes del generador de imanes permanentes</i>	136
Figura 62 <i>Área del conductor</i>	137
Figura 63 <i>Selección del inversor</i>	143
Figura 64 <i>Regulador de corriente monofásico</i>	144
Figura 65 <i>Componentes principales del sistema de carga regenerativo</i>	145
Figura 66 <i>Etapas 1-2-3-4 del sistema de carga</i>	146
Figura 67 <i>Etapas 5 del sistema de carga</i>	147
Figura 68 <i>Estado de carga de la batería de ácido plomo</i>	148
Figura 69 <i>Curva de carga de una batería de ácido plomo</i>	149
Figura 70 <i>Conexión del voltímetro-amperímetro</i>	150
Figura 71 <i>Conexión del voltímetro para la batería de ácido plomo</i>	151
Figura 72 <i>Instalación del módulo electrónico de control del medidor KG-140F</i>	152
Figura 73 <i>Diagrama de conexión del medidor KG-140F</i>	152
Figura 74 <i>Indicadores de monitoreo</i>	154
Figura 75 <i>Diagrama eléctrico de la moto eléctrica</i>	155
Figura 76 <i>Diagrama de conexión del sistema de carga</i>	156
Figura 77 <i>Interfaz de la aplicación KG</i>	160
Figura 78 <i>Diagrama de prueba</i>	162
Figura 79 <i>Perfil de velocidad vs tiempo de la fase 1</i>	163
Figura 80 <i>Perfil de velocidad vs tiempo de la fase 3</i>	164
Figura 81 <i>Gráfica de autonomía inicial</i>	165
Figura 82 <i>Ciclo de conducción de la fase 4</i>	165
Figura 83 <i>Gráfica de voltaje vs tiempo de la batería de litio</i>	166

Figura 84 <i>Gráfica de voltaje vs tiempo de la batería de ácido plomo.....</i>	167
Figura 85 <i>Capacidad recuperada en la batería de litio</i>	167
Figura 86 <i>Ciclo de conducción de la fase 6</i>	168
Figura 87 <i>Gráfica de la autonomía final de la moto eléctrica.....</i>	169
Figura 88 <i>Gráfica característica de arranque.....</i>	170
Figura 89 <i>Comportamiento del consumo eléctrico en velocidad I.....</i>	170
Figura 90 <i>Comportamiento del consumo eléctrico en velocidad II.....</i>	171
Figura 91 <i>Comportamiento del consumo eléctrico en velocidad III.....</i>	171

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de la variable independiente.....	32
Tabla 2 Operacionalización de la variable dependiente.....	33
Tabla 3 Metodología de la investigación.....	36
Tabla 4 Calibres de cable magneto para bobinas.....	55
Tabla 5 Clasificación de los aislantes utilizados en máquinas eléctricas.....	69
Tabla 6 Ecuaciones de diseño de un generador de flujo radial de imanes permanentes.....	78
Tabla 7 Nomenclatura de diseño de un generador de flujo radial de imanes permanentes.....	84
Tabla 8 Valores de diseño.....	90
Tabla 9 Número de polos y cantidad de imanes que lo forman.....	94
Tabla 10 Parámetros iniciales del generador eléctrico.....	97
Tabla 11 Proceso de manufactura de los componentes del generador eléctrico.....	138
Tabla 12 Ensamblaje del generador de imanes permanentes.....	141
Tabla 13 Características técnicas del inversor.....	143
Tabla 14 Características del regulador del sistema de carga.....	145
Tabla 15 Protocolo de pruebas.....	157
Tabla 16 Especificaciones de la prueba de ruta.....	161
Tabla 17 Velocidades de la fase 1.....	163
Tabla 18 Velocidades de la fase 4.....	166
Tabla 19 Pruebas de funcionalidad del generador eléctrico.....	172

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Ley de Faraday.....	51
Ecuación 2 Inductancia	54
Ecuación 3 Densidad de flujo.....	60
Ecuación 4 Permeabilidad relativa.....	61
Ecuación 5 Permeabilidad de vacío.....	62
Ecuación 6 Reluctancia	62
Ecuación 7 Cálculo de la potencia requerida (Watts).....	91
Ecuación 8 Relación entre velocidad, frecuencia y número de polos.....	92
Ecuación 9 Cálculo del mecanismo de transmisión por banda.....	92
Ecuación 10 Velocidad mecánica (rad/s).....	96
Ecuación 11 Velocidad eléctrica (rad/s).....	96
Ecuación 12 Frecuencia eléctrica (Hz)	96
Ecuación 13 Torque en caballos de fuerza (Nm-Newton metro)	97
Ecuación 14 Número de ranuras (Ns).....	98
Ecuación 15 Número de ranuras por polo por fase (Nspp).....	98
Ecuación 16 Número de ranuras por polo magnético (Nsm)	99
Ecuación 17 Fracción bobina-polo (α_p)	99
Ecuación 18 Paso angular del polo magnético (θ_p)	99
Ecuación 19 Paso angular de la ranura (θ_s).....	100
Ecuación 20 Paso de ranura (radianes eléctricos, θ_{se})	100
Ecuación 21 Radio interior del estator (m).....	100
Ecuación 22 Paso del polo magnético en metros (τ_p)	101
Ecuación 23 Paso de la bobina (τ_c).....	101
Ecuación 24 Paso de la ranura en el entrehierro (τ_s).....	101
Ecuación 25 Ancho del diente en el espacio de aire (w_t).....	102
Ecuación 26 Factor de distribución	102
Ecuación 27 Factor de paso (k_p)	103

Ecuación 28 Factor de concentración de flujo ($C\phi$).....	103
Ecuación 29 Coeficiente de permeabilidad.....	104
Ecuación 30 Factor de fuga del imán (kml)	105
Ecuación 31 Entrehierro efectivo para el coeficiente de Carter	106
Ecuación 32 Coeficiente de Carter	106
Ecuación 33 Área del entrehierro.....	107
Ecuación 34 Densidad de flujo en el entrehierro (Bg).....	107
Ecuación 35 Flujo magnético en el entrehierro	109
Ecuación 36 Ancho del hierro trasero	109
Ecuación 37 Ancho del diente.....	112
Ecuación 38 Radio del hierro trasero del estator (Rsb).....	112
Ecuación 39 Radio interno del rotor (Rri).....	112
Ecuación 40 Ancho inferior de la ranura (Wsb).....	113
Ecuación 41 Ancho interior de la zapata de la ranura (Wsi)	113
Ecuación 42 Fracción de ranura dentro de la zapata (αs)	114
Ecuación 43 Profundidad total de la ranura (ds)	114
Ecuación 44 Profundidad de la ranura del conductor ($d3$).....	114
Ecuación 45 Profundidad del zapato dividida entre $d1$ y $d2$	115
Ecuación 46 Área del conductor (As).....	115
Ecuación 47 Número de vueltas por ranura (ns).....	115
Ecuación 48 Pico de fuerza contra electromotriz (e_{max}).....	116
Ecuación 49 Corriente máxima que soporta por ranura (I_s , en amperios)	117
Ecuación 50 Corriente de fase (I_{ph})	117
Ecuación 51 Densidad de corriente máxima en el conductor (J_c)	117
Ecuación 52 Densidad de flujo máximo en la ranura ($B_s \max$).....	118
Ecuación 53 Resistencia de la ranura (R_s).....	118
Ecuación 54 Resistencia en la vuelta final (R_e).....	119
Ecuación 55 Resistencia de fase (R_{ph}).....	119

Ecuación 56 <i>Inductancia en el entrehierro (L_g)</i>	119
Ecuación 57 <i>Inductancia de fuga en la ranura (L_s)</i>	120
Ecuación 58 <i>Inductancia del final de vuelta (L_e)</i>	120
Ecuación 59 <i>Inductancia de fase (L_{ph})</i>	120
Ecuación 60 <i>Volumen de acero del estator (V_{st})</i>	121
Ecuación 61 <i>Pérdida de potencia óhmica (P_r)</i>	121
Ecuación 62 <i>Pérdidas en el núcleo (P_{cl})</i>	122
Ecuación 63 <i>Ecuación de Steinmetz</i>	123
Ecuación 64 <i>Eficiencia (η)</i>	123
Ecuación 65 <i>Densidad de calor en la ranura (q_s)</i>	124
Ecuación 66 <i>Densidad de calor en el estator (q_{st})</i>	125
Ecuación 67 <i>Tasa de flujo de calor</i>	131
Ecuación 68 <i>Ecuación de Stefan Boltzmann</i>	133
Ecuación 69 <i>Factor de llenado</i>	137

Resumen

La investigación abarca el estudio e implementación de un sistema de carga regenerativo, para solventar la problemática de autonomía presente en una moto eléctrica y fortalecer este medio de movilidad con el fin de reducir la contaminación ambiental generada por los vehículos con motor de combustión. Basado en el principio de funcionamiento de un KERS (Kinetic Energy Recovery System) se aprovecha el giro de la rueda delantera para generar electricidad. De este modo, se diseña un generador eléctrico de imanes permanentes de acuerdo al espacio disponible en la moto eléctrica. Otro punto importante es la selección de un regulador de voltaje, un inversor de corriente y una batería de ácido plomo que en conjunto componen el sistema de carga regenerativo. Mediante el uso del software FEMM (Finite Element Method Magnetics) se analiza el comportamiento magnético del generador eléctrico que determina el valor de la densidad de campo magnético en el entrehierro. Además se utiliza Livewire en la simulación y esquematización de los circuitos eléctricos, lo que permite comprender el funcionamiento y realizar conexiones correctas sin causar fallos o cortocircuitos. Se acondiciona un mecanismo de transmisión por banda para multiplicar las rpm de entrada al rotor y alcanzar valores de carga apropiados. Se instala dispositivos de medición que monitorean los valores de corriente y voltaje del sistema. A fin de conocer la factibilidad de implementar este tipo de dispositivos y precisar la autonomía incrementada se crea un protocolo de pruebas con 6 fases que evalúan el ciclo de conducción de la moto eléctrica en el interior del campus Belisario Quevedo de la Universidad de las Fuerzas Armadas con la ayuda de aplicaciones GPS. Finalmente se interpreta y tabulan los datos obtenidos en la prueba de ruta mediante gráficas.

Palabras clave: imán permanente, generador eléctrico, regulador eléctrico, inversor de corriente.

Abstract

The research covers the study and implementation of a regenerative charging system, to solve the problem of autonomy present in an electric motorcycle and strengthen this means of mobility in order to reduce environmental pollution generated by vehicles with combustion engines. Based on the operating principle of a KERS (Kinetic Energy Recovery System), the rotation of the front wheel is used to generate electricity. In this way, a permanent magnet electric generator is designed according to the space available on the electric motorcycle. Another important point is the selection of a voltage regulator, a current inverter and a lead acid battery that together make up the regenerative charging system. By using the FEMM (Finite Element Method Magnetics) software, the magnetic behavior of the electric generator is analyzed, which determines the value of the magnetic field density in the air gap. In addition, Livewire is used in the simulation and schematization of electrical circuits, which allows understanding the operation and making correct connections without causing failures or short circuits. A band transmission mechanism is conditioned to multiply the input rpm to the rotor and reach appropriate load values. Measuring devices are installed that monitor the current and voltage values of the system. In order to determine the feasibility of implementing this type of device and specify the increased autonomy, a test protocol is created with 6 phases that evaluate the driving cycle of the electric motorcycle inside the Belisario Quevedo campus of the University of the Armed Forces with the help of GPS applications. Finally, the data obtained in the road test is interpreted and tabulated using graphs.

Keywords: permanent magnet, electric generator, electric regulator, current inverter.

Capítulo I

Marco metodológico de la investigación

Antecedentes investigativos

En la actualidad el calentamiento global se refleja en condiciones climáticas variables con precipitaciones y altas temperaturas casi impredecibles. Esta problemática surge en una escala de tiempo relativa hasta la actualidad, por el uso masivo de combustibles fósiles en la movilidad y generación de energía con motores de combustión, esto produce un gran porcentaje de contaminantes en el aire.

Aunque en el último año los valores de contaminación se redujeron: “Las emisiones de CO₂ se elevan al extremo y frenar el calentamiento global a 1,5 grados Celsius hasta fines de este siglo se vuelve cada vez más difícil de alcanzar” (Niranjan, 2021, párr. 2).

La electrónica y la electricidad se unen a la nueva era del motor como respuesta a la exigencia y concientización del mundo a reducir la contaminación, debido a que: “Los vehículos no están fuera de la evolución tecnológica, sino que también evolucionan, cambiando partes móviles por módulos electrónicos y computadoras que realizan todo el trabajo de control y ajuste mediante sensores y actuadores” (Aranda, 2013, p. 4).

La innovación tecnológica comienza con un cambio permanente hacia fuentes de energía más limpias y renovables, el avance de la electrónica y la electricidad es aplicada en los automóviles como una alternativa que fortaleció la transición de los motores de combustión a eléctricos.

La actualidad vehicular ha llevado a desarrollar nuevas formas de movilidad, es así que: “Los altos costos económicos y ambientales asociados con la proliferación de vehículos con motores de combustión interna, han hecho que muchas personas voltearan la mirada hacia los autos eléctricos” (Cárdenas, 2019, párr. 1).

(Varus, 2021), plantea que el Ecuador es un país ideal para la movilidad eléctrica, porque su capacidad de generación de energía a través de su red de hidroeléctricas es de

un 90% y su expansión territorial requiere de pocas electrolineras para abastecer los vehículos eléctricos en sus recorridos. (párr. 18)

La elección de un vehículo eléctrico va de la mano con la necesidad del consumidor es por esto que:

De los vehículos eléctricos, uno de los más vendidos y rentables son las motocicletas, ya que son muy cómodas a la hora de realizar trayectos en ciudades y no necesitan tanta energía debido a un peso mucho menor. (Torrecilla, 2014, p. 9)

La principal problemática de un vehículo eléctrico es la duración de su batería para recorrer distintos trayectos con una sola carga, debido a la variación de la energía utilizada para cada tipo de carretera y el tiempo empleado en recorrerla.

Según (Varela, 2020) menciona que la principal limitación de los vehículos eléctricos es su dependencia de conectarse a la red eléctrica domiciliaria o electrolinera, de oferta limitada; condicionando la autonomía. Es necesario estudiar alternativas de recarga o regeneración de energía; la energía cinética es una opción. (p. 117)

Según (Martinez, 2014) menciona que: “Las diferentes formas de almacenaje pueden ser mediante energía potencial, gravitacional, química, elástica o energía cinética” (p. 1).

Con el fin de fortalecer la movilidad eléctrica en el país, se plantea investigar un sistema de recuperación de energía similar a un KERS (Kinetic Energy Recovery System), para (Ros & Barrera, 2017), este sistema: “Transforma la energía de movimiento del vehículo en otro tipo de energía que después se pueda volver a utilizar. Para eso utilizan motores-generadores eléctricos, que producen una corriente eléctrica alterna que se almacena en una batería” (p. 44).

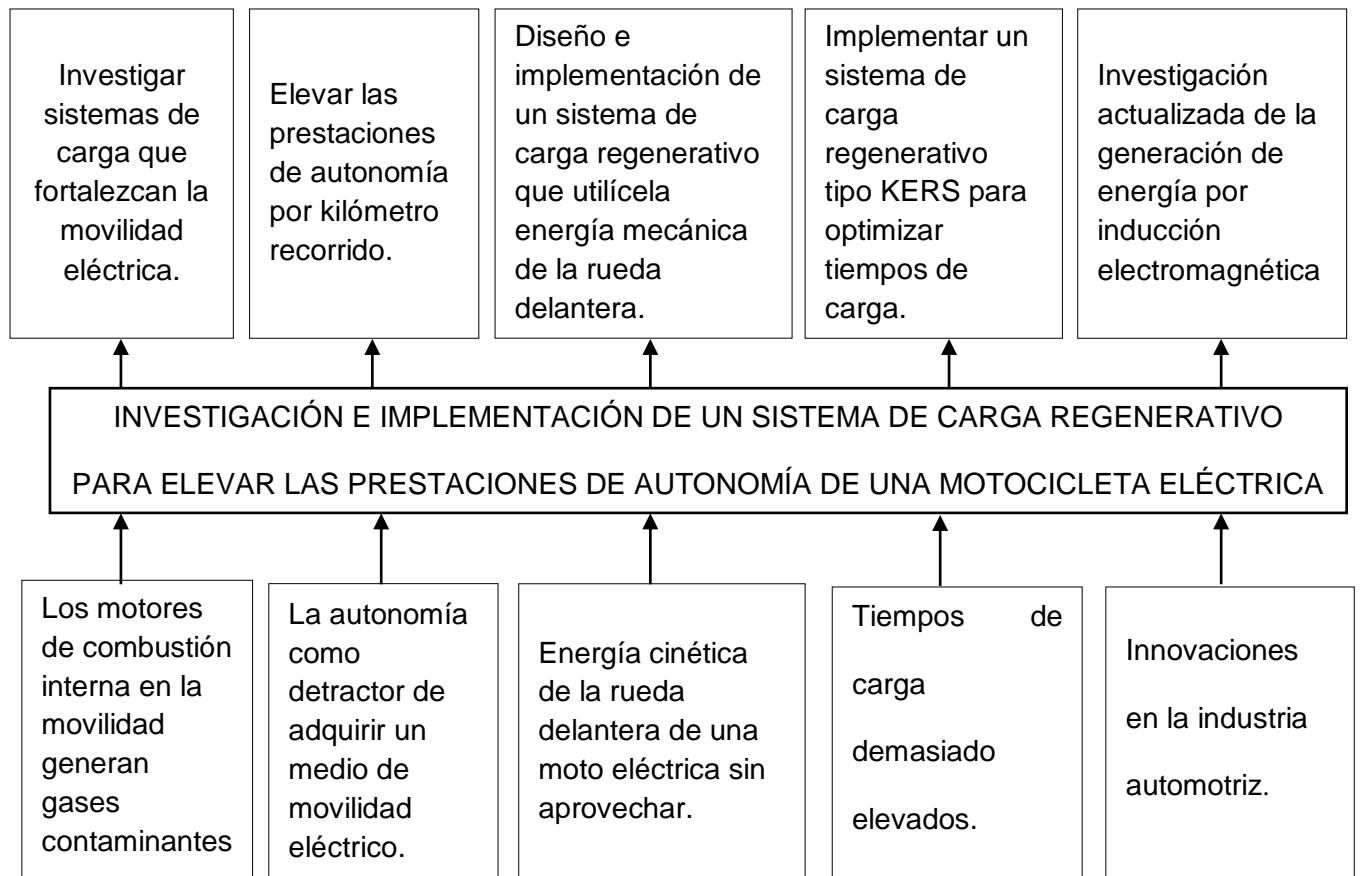
Según (Manzano, 2008) un generador de corriente alterna consta de un imán central o un electroimán, que gira por la acción de un agente externo. Un núcleo magnético se presenta frente a los polos de este imán. En este núcleo se enrollan varias espiras de alambre magneto que al girar el imán central quedan expuestas a un flujo variable y se crea en ellas una fuerza electromotriz inducida. (p. 57)

Para aprovechar este tipo de energía se hace necesario el uso de generadores eléctricos: “El principal objetivo como se menciona, es proporcionar una opción portátil de generación de electricidad a través de la conversión de energía mecánica en energía eléctrica” (México Patente nº WO2016076699A1, 2016).

Planteamiento del problema

Figura 1

Árbol de problemas



Nota. Se presenta el árbol de problemas de la investigación.

El uso exponencial de motores de combustión en la movilidad ha generado altos niveles de contaminación ambiental, esto reduce la calidad del aire. Los nuevos reglamentos, subsidios y precios del combustible fósil en el país y la poca tecnología invertida en sitios de carga inteligentes para medios de transporte eléctrico, han incrementado la necesidad de investigar nuevos sistemas de carga que permitan fortalecer la movilidad eléctrica, desarrollando dispositivos mecánicos-eléctricos-electrónicos capaces

de aprovechar la energía cinética generada por el vehículo en movimiento para almacenarla y posteriormente utilizarla; basado en el principio de funcionamiento de un KERS, se pretende elevar las prestaciones de autonomía por kilómetro recorrido y optimizar los tiempos de carga en una motocicleta eléctrica.

Por tal motivo se plantea investigar el diseño e implementación de un sistema de carga regenerativo, mediante un generador monofásico que aprovecha la energía mecánica del giro en la rueda delantera y produce energía eléctrica, lo que permite recorrer más kilómetros.

Descripción resumida del proyecto

A continuación se detallan los principales aspectos en el desarrollo de la investigación e implementación de un sistema de carga regenerativo para elevar las prestaciones de autonomía de una moto eléctrica, para lo cual se realizaron los siguientes pasos:

- Se realizó una búsqueda pertinente de información en fuentes confiables como: libros, tesis, patentes, artículos y sitios web académicos para clasificar la información útil que se empleó.
- Se levantó requerimientos para el diseño e implementación del sistema de carga regenerativo que permitió establecer limitaciones en sus dimensiones.
- Se realizó el diseño y simulación de la geometría resultante del generador eléctrico mediante el uso de software especializado para comprender y analizar el comportamiento magnético.
- Se simuló cada circuito eléctrico y electrónico mediante el uso de software especializado lo que permitió comprender el funcionamiento y realizar conexiones seguras.
- Se seleccionaron los elementos eléctricos, electrónicos y mecánicos, del sistema de carga regenerativo.

- Se fabricó cada uno de los elementos que conforman el generador eléctrico con el material y las dimensiones calculadas.
- Se calculó un mecanismo de transmisión por banda para incrementar las rpm del rotor que permita generar valores de carga apropiados.
- Se instaló, conectó y calibró dispositivos de medición para monitorear valores de corriente y voltaje en el sistema.
- Se realizó pruebas de autonomía iniciales y finales bajo un protocolo de prueba específico para obtener un ciclo de conducción que permita evaluar la autonomía de la moto eléctrica.
- Se interpretó y analizó los datos obtenidos en la prueba de ruta para determinar la factibilidad de usar este tipo de sistemas.
- Se implementó un circuito de aviso que indica el correcto funcionamiento del generador eléctrico para evitar pérdidas de energía por circuitos abiertos o cortocircuitos.

Justificación e importancia

El incremento de la movilidad eléctrica reduce agentes nocivos del ambiente, lo que se refleja en una contaminación mucho menor y una mejor calidad del aire, primordial para la salud de las personas.

El principal detractor para comprar un transporte eléctrico es la autonomía y los puntos de recarga escasos o pocos confortables para el usuario, por lo que es importante investigar sistemas eléctricos-electrónicos y mecánicos que en conjunto mejoren las prestaciones en kilómetros recorridos de una moto eléctrica, evitando así frustración y desinterés por este tipo de movilidad en los usuarios.

Las motos eléctricas actuales no disponen de un sistema de carga regenerativo que utilice el movimiento relativo de la rueda delantera como fuente de energía mecánica para

recuperarla en forma de electricidad, acumular la misma y posteriormente utilizarla cuando el sistema así lo demande.

El sistema de carga regenerativo permite reducir el tiempo empleado en recargar la batería para un nuevo viaje y ampliar el margen de autonomía en kilómetros necesarios para una movilidad sostenible, evitando en varias ocasiones las inoportunas e incómodas situaciones de carga que se presentan en la actualidad al utilizar este medio de transporte.

Objetivos del proyecto

Objetivo general

Investigar e implementar un sistema de carga regenerativo para elevar las prestaciones de autonomía en una motocicleta eléctrica.

Objetivos específicos

- Realizar una búsqueda pertinente de información en fuentes confiables como: libros, tesis, patentes, artículos y sitios web académicos.
- Determinar los requerimientos para el diseño e implementación del sistema de carga regenerativo.
- Realizar el diseño, dimensionamiento y modelación del sistema de carga regenerativo mediante el uso de software especializado.
- Simular la funcionalidad de cada circuito eléctrico y electrónico del sistema de carga regenerativo mediante el uso de software especializado.
- Seleccionar los elementos eléctricos, electrónicos y mecánicos, del sistema de carga regenerativo y ensamblar cada uno en la moto eléctrica.
- Implementar un mecanismo de transmisión por banda para elevar la frecuencia del generador.
- Instalar dispositivos de medición de voltaje y corriente para monitorear el sistema de carga.

- Desarrollar un protocolo de pruebas bajo un ciclo de conducción en el interior del campus universitario con aspectos técnicos y operativos específicos.
- Evaluar y analizar los datos obtenidos en la prueba para determinar los nuevos valores de autonomía.
- Desarrollar un circuito electrónico que indique cuando el generador eléctrico comienza a producir electricidad.

Meta

- Investigar e implementar un sistema de carga regenerativo en una motocicleta eléctrica, que permita incrementar su autonomía en un 10 a 15 %.

Hipótesis

La implementación de un sistema de carga regenerativo que aprovecha la energía mecánica de la rueda delantera incrementará la autonomía de una motocicleta eléctrica.

Variables de investigación

Variable independiente

Sistema de carga regenerativo

Tabla 1

Operacionalización de la variable independiente

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Es un sistema que utiliza la energía mecánica de la rueda para hacer girar un generador síncrono de imanes permanentes y	Generador síncrono de imanes permanentes	Voltaje	V	Medición Experimental	Protocolo de pruebas
		Intensidad	A	Medición Experimental	Protocolo de pruebas
		Potencia eléctrica	KWh	Cálculo y medición	Protocolo de pruebas
		Velocidad de giro	Rpm	Medición Experimental	Protocolo de pruebas
	Imán de neodimio	Producto energético (BH)	kJ / m ³	Experimental	Ficha técnica

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos	
producir electricidad, que será almacenada en una batería auxiliar.		Remanencia magnética (Br)	T	Experimentación	Ficha técnica	
	Bobinados	Resistencia	Ω	Medición Experimentación	Protocolo de pruebas	
	Regulador eléctrico		Voltaje	A	Medición Experimentación	Protocolo de pruebas
			Amperaje	A	Medición Experimentación	Protocolo de pruebas
	Inversor eléctrico	Potencia	W	Medición Experimentación	Protocolo de pruebas	
	Batería de medio voltaje		Voltaje	A	Medición Experimentación	Protocolo de pruebas
		Capacidad	Ah	Medición Experimentación	Protocolo de pruebas	

Nota. En la tabla 1 se presenta la operacionalización de la variable independiente, misma que permite conocer la categoría, indicadores, ítem, técnicas e instrumentos.

Variable dependiente

Prestaciones de autonomía de la moto eléctrica.

Tabla 2

Operacionalización de la variable dependiente

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Distancia recorrida de una moto eléctrica con una sola carga medida en kilómetros.	Desplazamiento	Velocidad	Km/h	Medición Experimentación	Protocolo de pruebas
		Tiempo	min	Medición Experimentación	Protocolo de pruebas
		Voltaje generado	v	Medición Experimentación	Protocolo de pruebas
		Intensidad generada	A	Medición Experimentación	Protocolo de pruebas

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
		Distancia recorrida	km	Medición Experimental	Protocolo de pruebas
	Tiempo de carga y descarga	Tiempo	h	Medición Experimental	Protocolo de pruebas
		SOC	%	Cálculo y medición	Protocolo de pruebas

Nota. La tabla 2 evidencia la operacionalización de la variable dependiente, la misma que permite conocer su concepto, categoría, indicadores, ítem, técnicas e instrumentos de evaluación.

Metodología de desarrollo del proyecto

Para el desarrollo del proyecto investigativo se utilizaron los siguientes métodos de investigación:

Método documental bibliográfico

Con este método se pudo obtener y procesar fórmulas, conceptos, aplicaciones, teoría, cálculos matemáticos, materiales y consideraciones de diseño para el desarrollo del sistema de carga regenerativo a partir de fuentes académicas confiables.

Método de matematización

Este método permitió aplicar y resolver cálculos matemáticos para el diseño del generador eléctrico en función de los valores de entrada obtenidos, mediante fórmulas eléctricas que establecieron las mejores características constructivas y operativas del sistema de carga regenerativo.

Método de modelación

Al emplear este método se pudo analizar el comportamiento magnético del generador eléctrico en función de los valores geométricos resultantes del cálculo matemático, se evaluó la elección del alambre de cobre magneto y el grado de los imanes de neodimio utilizados. Además permitió comprobar el correcto funcionamiento de los circuitos eléctricos y electrónicos de cada etapa del sistema. También con la modelación se pudo conocer el resultado final de las piezas antes de su fabricación e implementación para

detectar interferencias mecánicas y realizar optimizaciones de acuerdo al espacio disponible.

Método experimental

Este método permitió conocer los valores de voltaje y corriente en el funcionamiento de la moto eléctrica, mediante pruebas en movimiento bajo el ciclo de conducción establecido donde se obtuvieron los valores iniciales de autonomía, además se evaluaron fallos y plantearon correcciones. Una vez implementado el prototipo de carga se determinó la nueva distancia recorrida y el estado de la batería de litio.

Método de medición

Al aplicar este método se consiguió monitorear los valores de voltaje y corriente de del generador y las baterías. Finalmente permitió determinar los valores de autonomía inicial y final de acuerdo al ciclo de conducción establecido.

Método inductivo

Este método permitió analizar la problemática de elevar la autonomía de una moto eléctrica utilizando el giro de la rueda delantera para generar electricidad. Con el diseño e implementación de dispositivos y componentes que en conjunto formen un sistema de carga regenerativo basado en un sistema KERS.

Método deductivo

Al aplicar este método se pudo interpretar la relación de proporcionalidad entre la velocidad angular de la rueda y el valor de voltaje generado, adaptando así un sistema de transmisión por banda a fin de suplir las bajas rpm de la rueda y de este modo alcanzar las velocidades de giro apropiadas en el rotor para generar valores de voltaje y corriente que puedan cargar una batería.

Método científico

Este método permitió diseñar un generador eléctrico acorde al espacio disponible y acoplarlo a otros elementos eléctricos y electrónicos que en conjunto formen un sistema de

carga regenerativo para una moto eléctrica y evaluar su autonomía bajo un protocolo de pruebas que contemple un ciclo de conducción específico.

Método comparativo

Este método fue útil para comparar la autonomía en cada ciclo de conducción del protocolo establecido y establecer la diferencia de kilómetros recorridos.

Tabla 3

Metodología de la investigación

Metodología	Descripción	Equipo	Laboratorio
Método documental bibliográfico	Con este método se pudo obtener y procesar fórmulas, conceptos, aplicaciones y cálculos matemáticos en el diseño del sistema de carga regenerativo a partir de fuentes académicas confiables.	<ul style="list-style-type: none"> • Computadora • Recursos bibliográficos • Libros • Patentes • Sitios web • Artículos 	Laboratorio de Autotrónica ESPE-L/Trabajo de campo.
Método de Matematización	Este método permitió aplicar y resolver cálculos matemáticos para el diseño del generador eléctrico en función de los valores de entrada obtenidos, mediante fórmulas eléctricas.	<ul style="list-style-type: none"> • Computadora • Multímetro • Recursos bibliográficos • Calculadora • Libros 	Laboratorio de Autotrónica ESPE-L/Trabajo de campo.
Método de modelación	Al emplear este método se pudo analizar el comportamiento magnético del generador eléctrico en función de los valores geométricos resultantes del cálculo matemático, se	<ul style="list-style-type: none"> • Computadora • Recursos bibliográficos • Software especializado • Libros 	Laboratorio de Autotrónica ESPE-L/Trabajo de campo.

Metodología	Descripción	Equipo	Laboratorio
	<p>evaluó la elección del alambre de cobre magneto y el grado de los imanes de neodimio utilizados. Además permitió comprobar el correcto funcionamiento de los circuitos eléctricos y electrónicos de cada etapa del sistema. También con la modelación se pudo conocer el resultado final dimensional antes de su fabricación e implementación para detectar interferencias mecánicas y realizar optimizaciones de acuerdo al espacio disponible</p>		
<p>Método experimental</p>	<p>Este método permitió conocer los valores de voltaje y corriente en el funcionamiento de la moto eléctrica, mediante pruebas en movimiento bajo el ciclo de conducción establecido donde se obtuvieron los valores iniciales de autonomía, además se evaluaron fallos y plantearon correcciones. Una vez implementado el prototipo de carga se determinó la nueva</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Computadora • Osciloscopio • Multímetro • Software especializado • KG-140F 	<p>Laboratorio de Autotrónica ESPE-L/Trabajo de campo.</p>

Metodología	Descripción	Equipo	Laboratorio
	distancia recorrida y el estado de la batería de litio.		
Método de medición	Al aplicar este método se consiguió monitorear los valores de voltaje y corriente de del generador y las baterías. Finalmente permitió determinar los valores de autonomía inicial y final de acuerdo al ciclo de conducción establecido.	<ul style="list-style-type: none"> • Computadora • Osciloscopio • Multímetro • KG-140F • Voltímetro-Amperímetro digital • Velocímetro 	Laboratorio de Autotrónica ESPE-L/Trabajo de campo.
Método inductivo	Este método permitió analizar la problemática de elevar la autonomía de una moto eléctrica utilizando el giro de la rueda delantera para generar electricidad. Con el diseño e implementación de dispositivos y componentes que en conjunto formen un sistema de carga regenerativo basado en un sistema KERS.	<ul style="list-style-type: none"> • Computadora • Recursos bibliográficos • Software especializado 	Laboratorio de Autotrónica ESPE-L/Trabajo de campo.
Método científico	Este método permitió diseñar un generador eléctrico acorde al espacio disponible y acoplarlo a otros elementos eléctricos y electrónicos que en conjunto formen un sistema de carga regenerativo para una moto eléctrica y	<ul style="list-style-type: none"> • Computadora • Osciloscopio • Multímetro • KG-140F • Voltímetro-Amperímetro digital 	Laboratorio de Autotrónica ESPE-L/Trabajo de campo.

Metodología	Descripción	Equipo	Laboratorio
	evaluar su autonomía bajo un protocolo de pruebas que contemple un ciclo de conducción específico.	<ul style="list-style-type: none"> • Velocímetro 	
Método comparativo	Este método fue útil para comparar la autonomía en cada ciclo de conducción del protocolo establecido.	<ul style="list-style-type: none"> • Computadora • Software especializado • Voltímetro-Amperímetro digital • Velocímetro 	Laboratorio de Autotrónica ESPE-L/Trabajo de campo.
Método deductivo	Al aplicar este método se pudo interpretar la relación de proporcionalidad entre la velocidad angular de la rueda y el valor de voltaje generado, adaptando así un sistema de transmisión por banda a fin de suplir las bajas rpm de la rueda y de este modo alcanzar las velocidades de giro apropiadas en el rotor para generar valores de voltaje y corriente que puedan cargar una batería.	<ul style="list-style-type: none"> • Computadora • Multímetro • Recursos bibliográficos • Software especializado 	Laboratorio de Autotrónica ESPE-L/Trabajo de campo.

Nota. En la tabla 3 se exponen cada uno de los métodos utilizados en el desarrollo de la investigación.

Capítulo II

Fundamento teórico

Movilidad eléctrica

En la búsqueda actual por crear conciencia en el cuidado del planeta a fin de recuperar la calidad del aire en las grandes ciudades, los medios de movilidad evolucionan con fuentes de energía más limpias para su tracción: “La movilidad eléctrica puede contribuir de forma efectiva a avanzar hacia una movilidad sostenible y de cero emisiones” (Ballesteros, et al., 2018).

En Ecuador la movilidad eléctrica aumentó respecto del último año tras la pandemia, de entre varias razones la concientización y ahorro económico han sido factores para optar por este medio de transporte, pero al mismo tiempo la problemática de autonomía y escasos puntos de carga son aspectos a tomar muy en cuenta al momento de adquirir un vehículo eléctrico.

Vehículo eléctrico

Según (Automoción, 2011) este tipo de vehículos utiliza como fuente de tracción un motor eléctrico que transforma la energía eléctrica en potencia mecánica, su utilización es el puntal para promover el cambio climático debido a que no emite ningún tipo de residuo al proporcionar potencia a un sistema motriz. (p. 38)

Aunque para hablar de cero emisiones también se debe estudiar la fuente energética y su forma de obtener energía eléctrica, los recursos naturales renovables deben ser los puntales que garanticen un cuidado al medio ambiente, ya que no sirve de mucho utilizar energía eléctrica generada por centrales térmicas.

Requisitos de los motores eléctricos para vehículos

El motor eléctrico que propulse un turismo debe entregar un nivel considerable de potencia sin que sus dimensiones hagan inviable acoplarlo dentro del mismo vehículo.

Figura 2

Conjunto de requisitos para un motor eléctrico



Nota. Se presentan las características de un motor eléctrico para vehículos. Tomado de (Automoción, 2011)

Partes de un vehículo eléctrico

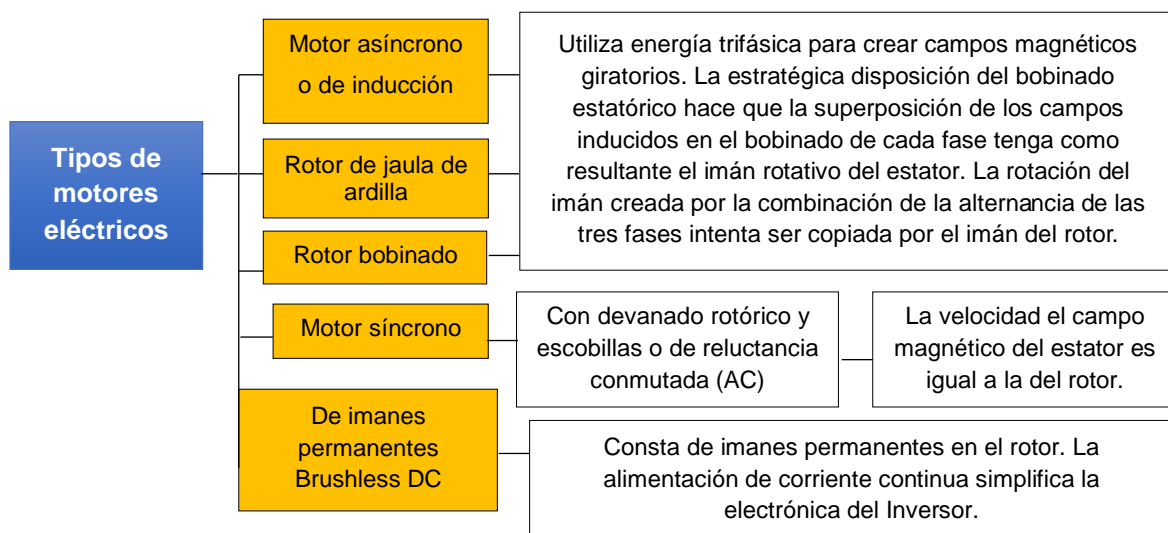
Las partes principales son: el motor eléctrico, cargador, baterías y uno o varios módulos de control electrónico para monitorear el suministro de energía.

Motor eléctrico

El motor eléctrico es el encargado de transformar la energía eléctrica en energía mecánica para el movimiento del automóvil.

Figura 3

Tipología de motores eléctricos utilizados en vehículos



Nota. El diagrama muestra la clasificación de los motores empleados en vehículos eléctricos. Tomado de (Trashorras, 2019)

Cargador eléctrico

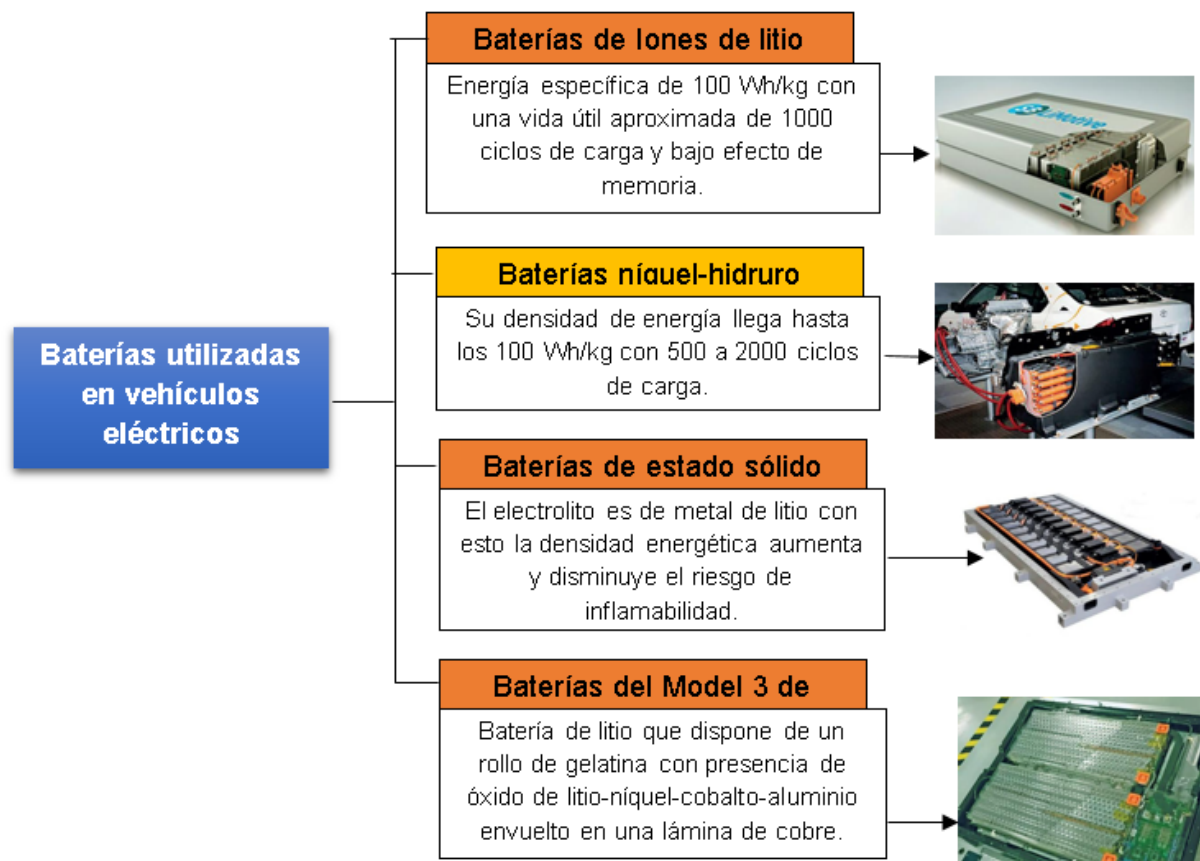
Encargado de adecuar la corriente proveniente de la fuente de energía para cargar las baterías del vehículo. En función del diseño del vehículo este cargador puede ubicarse dentro del propio vehículo o en puntos de carga.

Baterías utilizadas en vehículos eléctricos

La batería es un acumulador de energía que reciben la energía eléctrica y la almacenan en forma de energía química. De entre la variedad de baterías utilizadas en los vehículos eléctricos la que mayor densidad energética provee y por consecuencia mayor autonomía es la batería de iones de litio. A continuación se presenta un diagrama con las baterías más utilizadas.

Figura 4

Tipo de baterías utilizadas en vehículos eléctricos



Nota. Se presenta un esquema con las baterías más utilizadas en vehículos eléctricos.

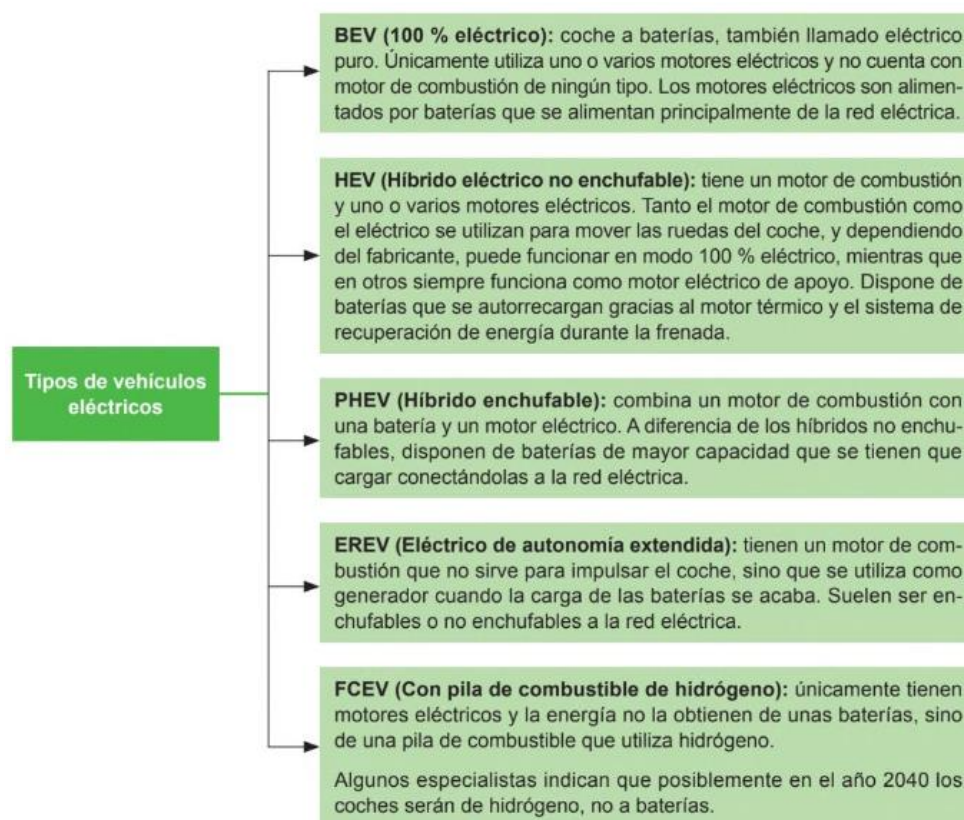
Tomado de (Trashorras, 2019)

Tipos de vehículos eléctricos

Su clasificación depende del grado de electrificación que dispongan para su tracción, así se expresa en la siguiente figura.

Figura 5

Clasificación de los vehículos eléctricos



Nota. El diagrama presenta el tipo de vehículos eléctricos de acuerdo a su grado de electrificación. Tomado de (Trashorras, 2019, p. 3)

Motocicleta eléctrica

Este medio de transporte equilibra la movilidad sostenible con el cuidado del medio ambiente es de este modo (Banco Bilbao Vizcaya Argentaria, 2021) dice que:

Las motos eléctricas han evolucionado mucho en sus dos siglos de vida, los modelos modernos que se comercializan aportan una serie de ventajas a sus usuarios, que van desde la movilidad hasta su vida útil, no producen contaminación acústica ni atmosférica, además de ser vehículos de emisiones cero solo necesitan de un motor eléctrico para moverse. (párr. 1)

“Un vehículo eléctrico es aquel que está impulsado por uno o más motores eléctricos que utilizan la energía eléctrica almacenada en baterías recargables y la transforman en energía mecánica” (Trashorras, 2019, p. 2).

Autonomía de una motocicleta eléctrica

El principal inconveniente de un vehículo eléctrico es su autonomía y tiempos de carga extensos.

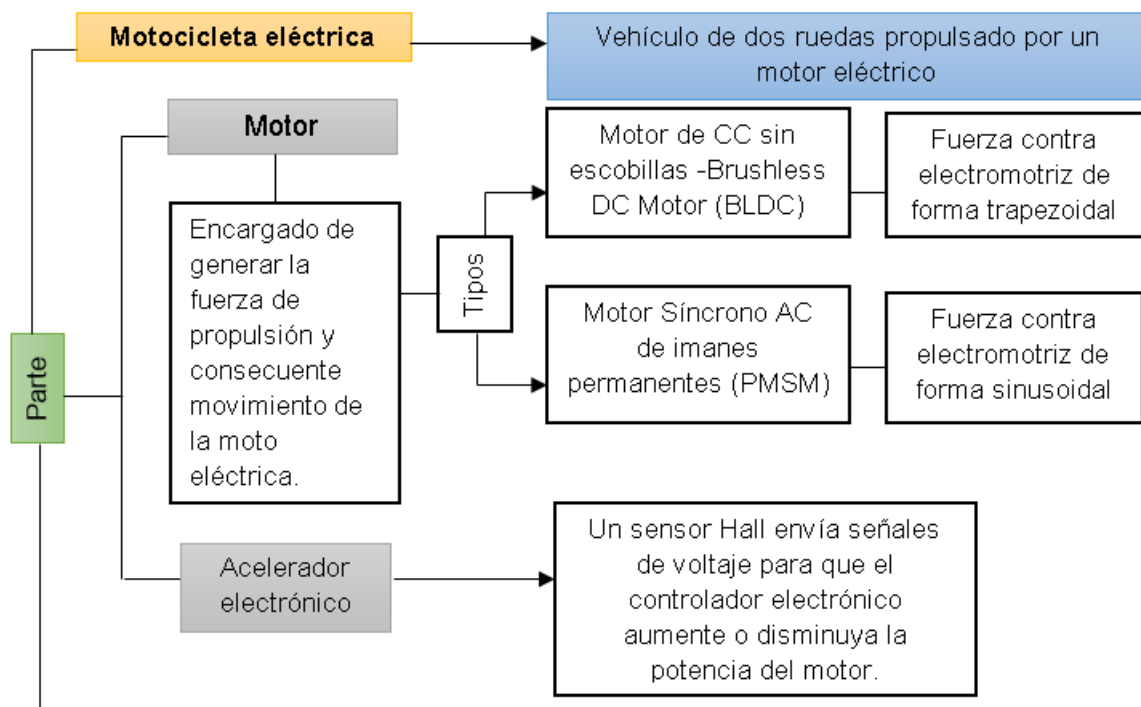
Según (Minguela, 2016), el gran obstáculo que tiene el motor eléctrico, para sustituir al térmico, es la capacidad de acumulación de energía eléctrica, debido a que es muy baja en comparación con la capacidad de acumulación de energía en forma de combustible alrededor de 1 kg de baterías puede almacenar tanta energía como unos 20 gramos de combustible, lo que supone una barrera tecnológica importante. (p. 16)

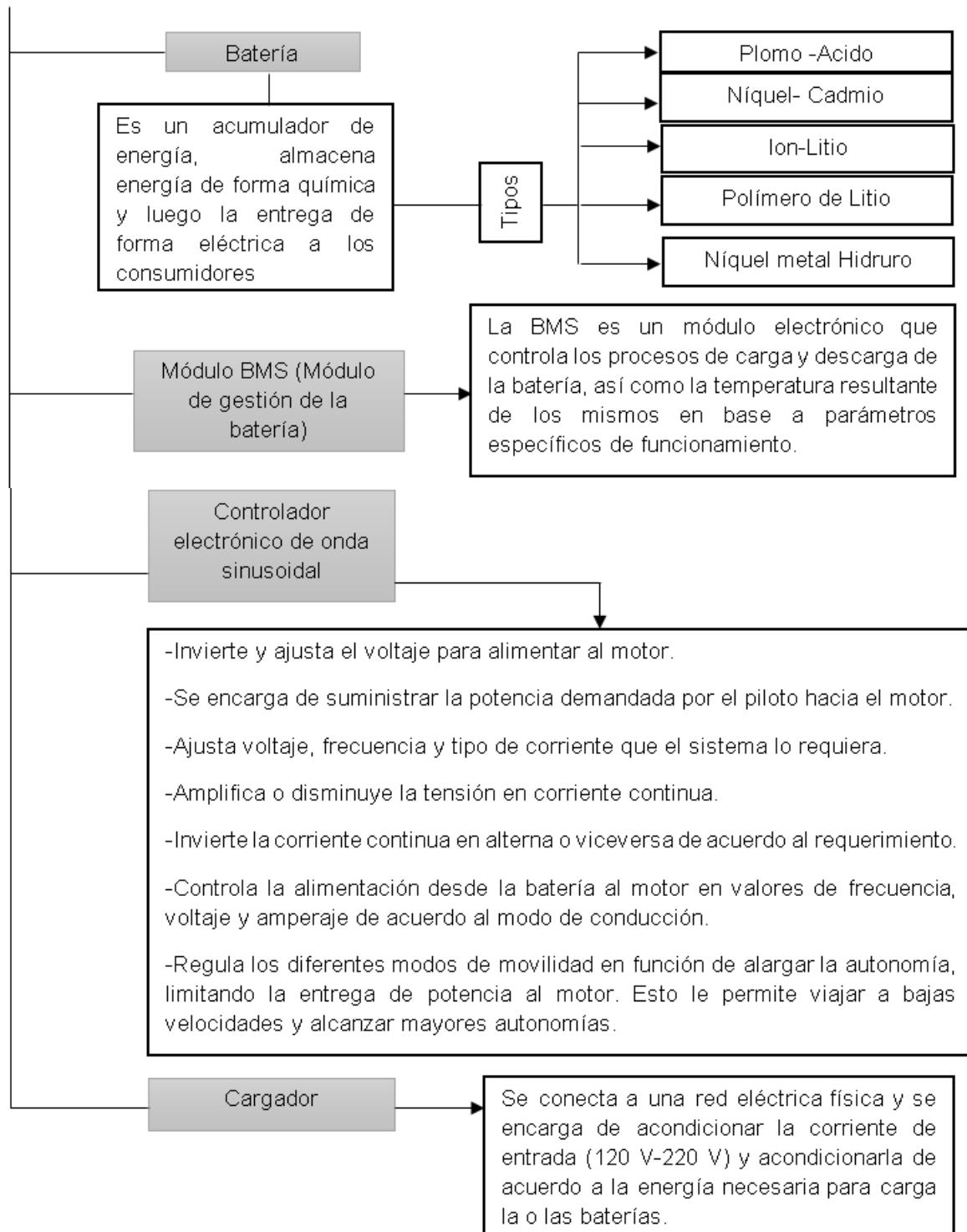
Componentes principales de una motocicleta eléctrica

A continuación se describen las partes principales de una moto eléctrica.

Figura 6

Detalle y funcionamiento de cada parte de una motocicleta eléctrica





Nota. El esquema resume las partes principales y el funcionamiento de una moto eléctrica.

Sistema KERS (Kinetic Energy Recovery System)

Sistemas que provechan la energía mecánica de algún componente en movimiento y la recuperan en forma de energía eléctrica, para (Martínez, 2014):

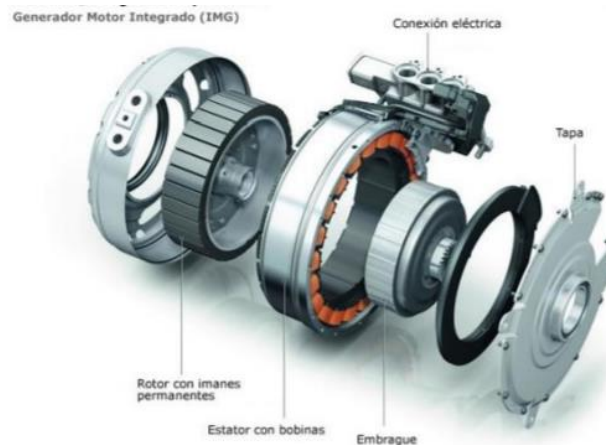
Son dispositivos diseñados para el almacenaje de cierta cantidad de energía en cualquier forma, para liberarla cuando se requiera en la misma forma en que se recolectó o en otra diferente.

Entre las diversas formas de aplicación del KERS (Kinetic Energy Recovery Systems) destacan:

- 1 Mecánico
- 2 Eléctrico
- 3 Hidráulico. (pp. 1, 26)

Figura 7

Generador Motor Integrado (IMG) Audi Q5 Hybrid Quattro



Nota. Partes de un generador motor integrado. Tomado de (Redacción, 2010)

Estos sistemas utilizan el movimiento, fuerza o giro que no es aprovechado para recibir esa energía extra y hacerla útil, es decir, ser lo más eficiente posible, aunque esto no se aplica cuando el costo de producción no satisface el objetivo de mercado.

En la actualidad el más conocido es el freno regenerativo, que utiliza el mismo motor eléctrico para acumular energía extra al momento de frenar. Los constantes avances tecnológicos permiten mejorar estos sistemas, hacerlos más novedosos y más eficientes.

Componentes principales de un sistema KERS

Para (Sáenz & Vidaller, 2010) un KERS eléctrico está formado de un motor eléctrico que funciona también como dinamo alternador, el rotor recibe el giro transmitido por el

movimiento de algún componente. El movimiento produce una variación de flujo magnético que atraviesa las espiras, lo que produce una Fuerza Electromotriz en forma de corriente alterna. (p. 7)

En su constitución siempre es imprescindible el uso de acumuladores eléctricos para gestionar el uso de la energía extra en el momento más propicio.

Para (Domínguez & Ferrer, 2018), “los sistemas de freno regenerativo recuperan parte de la energía cinética del vehículo al emplear un motor eléctrico o un alternador para crear electricidad cuando el vehículo frena o desacelera” (p. 373).

Con estos tres puntos se entiende que los componentes principales en este tipo de sistemas son:

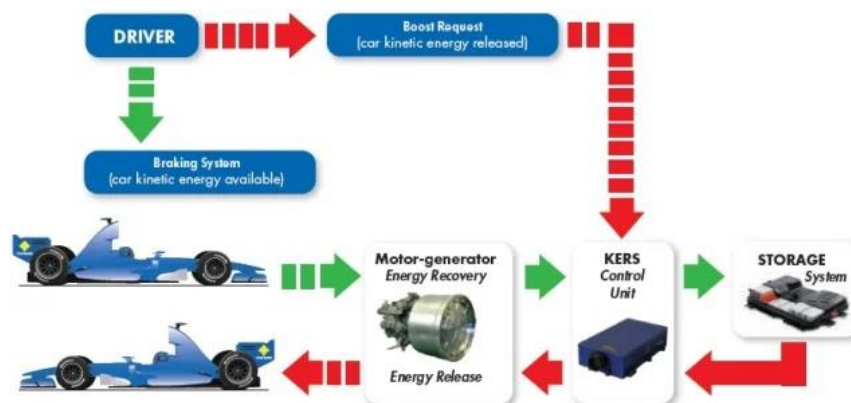
Motor generador.- Recibe la energía mecánica y la transforma en energía eléctrica, también puede utilizarse un alternador.

Acumulador eléctrico.- Este componente almacena la energía eléctrica en forma de energía química.

Unidad de control electrónico.- Monitorea el uso y suministro de la energía acumulada en las baterías. Determina la activación o desactivación del sistema, además de controlar los valores de entrada y salida en un tiempo establecido de acuerdo a su programación.

Figura 8

Esquema de un sistema KERS para almacenar energía



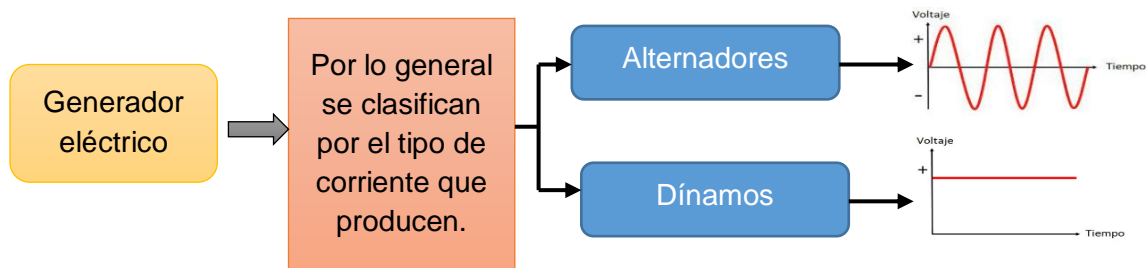
Nota. Diagrama del flujo de energía en un sistema KERS. Tomado de (Discoveries, 2020)

Generador eléctrico

Según (Gussow, 1991) “el generador es una máquina que hace uso de la inducción electromagnética para producir un voltaje por medio de bobinas de alambre que giran en un campo magnético estacionario o de un campo magnético giratorio que pasa por un devanado estacionario” (p. 7).

Figura 9

Tipo de generadores eléctricos



Nota. El esquema presenta la clasificación de un generador eléctrico por el tipo de corriente que produce.

De acuerdo a (Harper, 2004) los generadores utilizan la energía mecánica para producir energía eléctrica. El voltaje se induce en un conductor que se encuentra dentro del campo magnético. En algunos casos se mueve el alambre; en otros, se mueve el campo y aun en otros, ambos se mueven pero a distintas velocidades. (p. 1)

Generador de imanes permanentes

El campo magnético de un generador eléctrico puede crearse por electroimanes o imanes permanentes, estos últimos se caracterizan por su aplicabilidad en sistemas de baja potencia, para (Chiroque, 2010) :

Un generador de imanes permanentes como un generador de corriente alterna (AC) de bajo voltaje. La corriente es transformada a corriente continua (DC) mediante diodos rectificadores con la finalidad de que la energía pueda ser almacenada en baterías. Este generador consta de dos componentes principales: rotor y estator. (p.

11)

Según (Yupanqui, 2017), este tipo de generadores “sólo puede ser utilizado para generar energía eléctrica a bajas potencias debido a que el campo magnético que se obtiene de una bobina o un electroimán es siempre mayor a la de los imanes permanentes” (p. 20).

Figura 10

Motor generador BOSCH



Nota. Motor generador de Bosch. Tomado de (Redacción, 2010)

Electroimanes

Un electroimán se constituye principalmente de una bobina por la cual circula una corriente y como resultado produce un campo magnético con polaridad Norte y Sur respectivamente de acuerdo a la dirección de la corriente, la ventaja es su flexibilidad para trabajar con variaciones de frecuencia, es decir su campo magnético aumenta y disminuye en función de la corriente que circula por la bobina.

Imanes permanentes

Para (EUROBALT, 2022) un imán permanente es un objeto capaz de mantener el estado de magnetización durante un largo periodo de tiempo. El producto está hecho de ferromagnetos, que pueden consistir en hierro, acero, hierro fundido, níquel, cobalto, aleaciones individuales de metales de tierras raras. Existen minerales naturales (magnéticas), que también se utilizan como materia prima para la producción de imanes permanentes, todo esto difiere de acuerdo a la aplicación para la que se necesite.

Partes del generador de imanes permanentes

Entre las partes principales que componen un generador de imanes permanentes se encuentran:

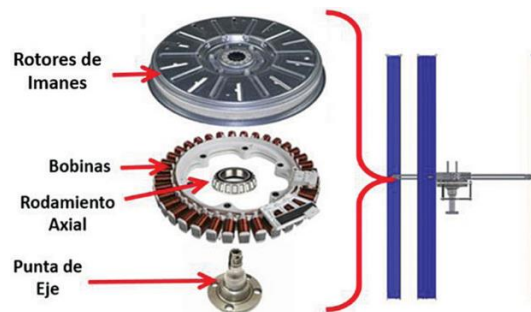
a) Rotor.- Es la parte móvil que gira gracias al movimiento transmitido por una fuente de energía mecánica. Esta parte aloja al conjunto de imanes.

b) Estator.- Describe a la parte fija, se encuentra sujeto a la carcasa y aloja al conjunto de bobinas.

c) Armazón o carcasa.- Fija a todos los componentes en su lugar, protege al generador de agentes externos y permite la evacuación del calor generado en el mismo.

Figura 11

Partes principales de un generador de imanes permanentes



Nota. Partes de un generador de imanes permanentes. Tomado de (Agotegara & Pinzón, 2020)

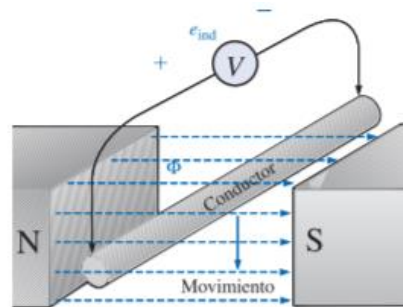
c) Bobinas.- Una bobina se describe como un arrollamiento de alambre de cobre, de acuerdo a su tipología esta puede contener un núcleo de material férrico para aumentar su inductancia.

Inducción electromagnética (Ley de Faraday)

Para (Boylestad, 2004) si un conductor se mueve a través de un campo magnético de manera que corte líneas magnéticas de flujo, se inducirá un voltaje en el conductor. Entre mayor es el número de líneas de flujo cortadas por unidad de tiempo o más intenso es el campo magnético mayor será el voltaje inducido en el conductor. Si el conductor se mantiene fijo y el campo magnético se mueve de manera que sus líneas de flujo corten el conductor, se producirá el mismo efecto. (pp. 473-474)

Figura 12

Generación de un voltaje inducido



Nota. Movimiento de un conductor a través de un campo magnético. Tomado de (Boylestad, 2004)

Si una bobina de **N** vueltas se coloca en la región de un flujo cambiante, se inducirá un voltaje de acuerdo con La Ley de Faraday descrita en la ecuación 1:

Ecuación 1

Ley de Faraday

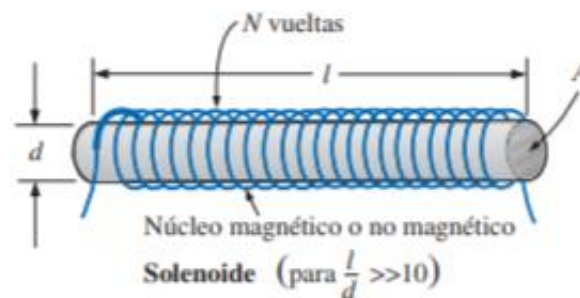
$$e = N \frac{d\phi}{dt}, \text{ (Volts, } V\text{)}$$

Donde:

- e = Diferencia de potencial o voltaje
- N = Representa el número de espiras de la bobina
- $\frac{d\phi}{dt}$ = Cambio instantáneo en flujo (en Webers) que atraviesa la bobina

Figura 13

Constitución de una bobina



Nota. Características constructivas de una bobina. Tomado de (Boylestad, 2004).

Magnetismo

Según (Gac, 2016), el magnetismo es un fenómeno por el que los objetos ejercen fuerzas de atracción o repulsión sobre otros materiales. La electricidad y el magnetismo están relacionados pues cada electrón es, por su naturaleza, un pequeño imán. La fuerza de atracción o repulsión se produce cuando se aproxima un imán a un material con un alto contenido de hierro, ya sea de forma natural o artificial.

Figura 14

Campo magnético generado en un conductor



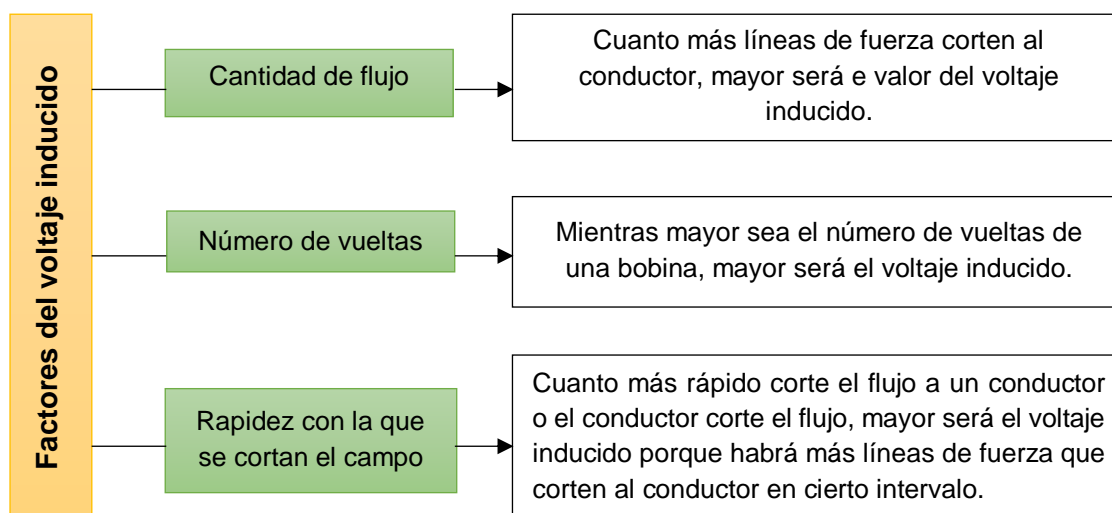
Nota. Se presenta el campo magnético B generado por el paso de corriente I a través de un conductor. Tomado de (Gac, 2016)

Factores determinantes para inducir un voltaje

A partir de la ecuación descrita anteriormente se deduce que el voltaje inducido está determinado por tres factores expuestos en la siguiente figura.

Figura 15

Factores que intervienen en el voltaje inducido



Nota. Mapa de los factores que influyen directamente en la cantidad de voltaje generado.

Ley de Lenz

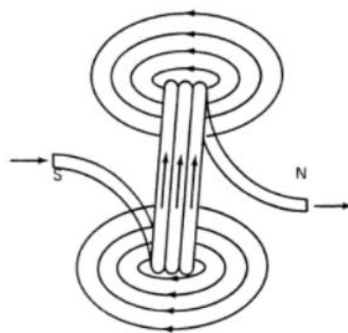
La polaridad del voltaje inducido está determinada por la ley de Lenz. El voltaje inducido tiene una polaridad que se opone al cambio que causa la inducción. Cuando fluye una corriente producida por un voltaje inducido, esta da origen a un campo magnético alrededor del conductor tal que el campo magnético alrededor de él reacciona con el campo magnético externo, esto hace que el voltaje inducido se oponga al cambio en el campo magnético externo. (Gussow, 1991, p. 173)

Definición de una bobina

Para (Fowler, 1994) el campo magnético de un conductor único, generalmente, es demasiado débil para la mayoría de aplicaciones prácticas. Sin embargo, puede crearse un campo más fuerte al combinar los campos en torno de dos o más conductores. Esto se logra enrollando un conductor, esto ocasiona que todo el flujo de las espiras individuales se combina para producir un campo magnético más intenso. (p. 127)

Figura 16

Campo magnético generado en una bobina



Nota. Se presentan los polos N y S en una bobina. Tomado de (Fowler, 1994)

Funcionamiento de una bobina

De acuerdo con (Hewitt, 2004) mientras mayor sea el número de vueltas del alambre en la espira que se mueven en un campo magnético, el voltaje inducido es mayor. Además menciona que el voltaje inducido en una bobina es igual al producto del número de vueltas de la bobina por la rapidez con la que el campo magnético cambia dentro de esas vueltas. (p. 477)

Inductancia de una bobina

Para (Mujal, 2004) la inductancia es la propiedad de un elemento del circuito que aprovecha la capacidad de la energía de almacenarse en una bobina en forma de campo magnético, se manifiesta solo cuando existe corriente alterna es decir un cambio de la corriente a través del tiempo. La inductancia es la propiedad de un circuito que relaciona la f.e.m inducida (por la variación de flujo) con la velocidad de variación de la corriente (frecuencia). (p. 55)

Mientras que (Boylestad, 2004, p. 475), manifiesta que en términos de dimensiones físicas, la inductancia de una bobina relaciona el valor de la inductancia, número de vueltas, permeabilidad del núcleo ferromagnético, área del núcleo, longitud medida del núcleo se relacionan directamente con la siguiente:

Ecuación 2

Inductancia

$$L = \frac{N^2 * u * A}{l} ; (\text{henrys}, H)$$

Donde:

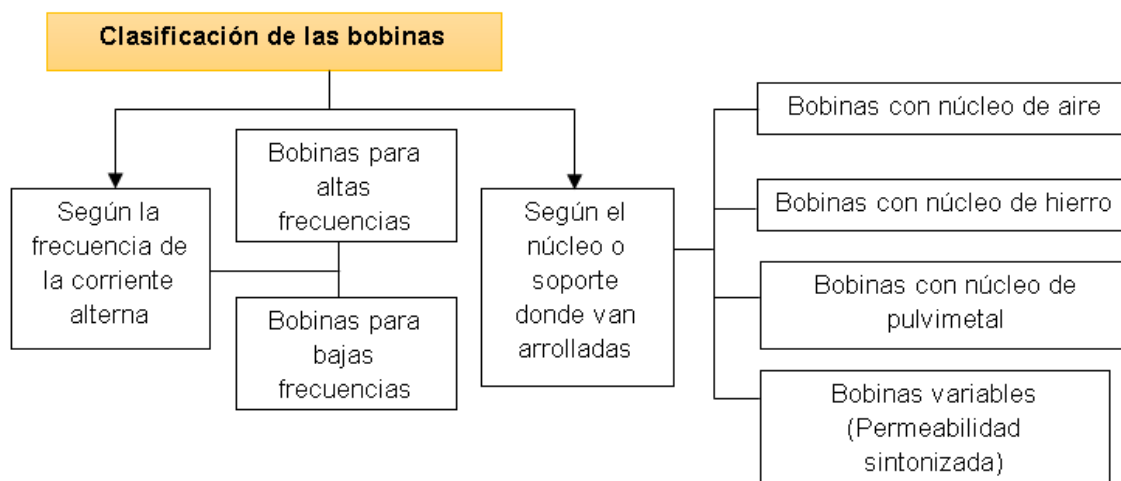
- L =Inductancia
- N = Número de vueltas
- u =Permeabilidad del núcleo (B/H)
- A =Área del núcleo (m^2)
- l =Longitud medida del núcleo (m)

Tipos de bobinas

Las bobinas se clasifican por el tipo de núcleo que poseen y por la frecuencia de funcionamiento.

Figura 17

Clasificación de las bobinas



Nota. Tipos de bobinas. Elaboración propia con información tomada de (Boylestad, 2004)

Cable utilizado para bobinas

Para elaborar una bobina se utiliza alambre de cobre esmaltado conocido como alambre magneto, de acuerdo a la aplicación y cálculos obtenidos se emplea el calibre apropiado.

Tabla 4

Calibres de cable magneto para bobinas

Calibre AWG	Diámetro de cobre			Diámetro con esmalte máximo	Rigidez dieléctrica	Termoplasticidad mínimo
	mínimo	nominal	máximo			
22	0.635	0.643	0.650	0.714	5130	300 °
23	0.569	0.574	0.579	0.643	5000	300 °
24	0.505	0.511	0.516	0.577	4870	300 °
25	0.450	0.455	0.460	0.516	4740	300 °
26	0.399	0.404	0.409	0.462	4620	300 °

Nota. Diferentes calibres de cable magneto. Tomado de (Electrocables, 2018).

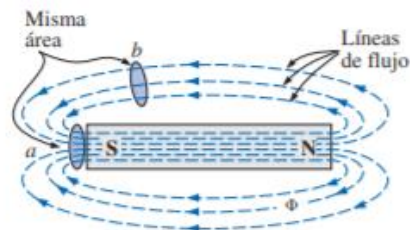
Imanes permanentes

Según (Gac, 2016) un imán es un material capaz de crear un campo magnético exterior y atraer el hierro, cobalto o el níquel. Su capacidad de atracción es mayor en sus

extremos o polos, denominados norte y sur, debido a que tienden a orientarse según los polos geográficos de la Tierra; en un imán no puede existir un solo polo, tanto es así que, si un imán se quiebra, cada parte forma otro imán por separado. (pp. 2-3)

Figura 18

Distribución del flujo magnético para un imán permanente



Nota. Se presenta el flujo magnético inmerso en un imán permanente. Tomado de (Boylestad, 2004)

Características de un imán permanente

De acuerdo al criterio del autor (Donate, 1999) cita que los imanes permanentes interesa que tengan una gran remanencia magnética B_r , y que esta no se pierda por la acción de otros campos externos; por ello, interesa también que tengan una gran fuerza coercitiva H_c (esto quiere decir que se necesite una gran intensidad magnética inversa para anular el magnetismo remanente). (p. 67)

Remanencia magnética (B_r)

Indica la capacidad de un material para mantener el magnetismo que le ha sido inducido y se mide a través de la densidad de flujo magnético expresado en Gauss o Teslas. En un imán permanente se describe como su fuerza de magnetización.

Fuerza coercitiva (H_c)

Para (Fink, Beaty, & Carroll, 1981) “una fuerza coercitiva (H_c), es la fuerza magnetomotriz a la que la inducción magnética es cero cuando el material se encuentra en una condición magnetizada simétrica cíclicamente y se mide en Amperio/metro” (p. 97).

Pérdidas de las propiedades magnéticas de un imán

Un imán puede perder sus propiedades magnéticas debido fundamentalmente a dos razones: La primera es cuando se golpea repentinamente lo que provoca un reordenamiento molecular y la segunda sucede al exponer un imán a temperaturas elevadas hasta alcanzar un valor característico conocido con el nombre de temperatura de Curie. (Pérez W. , 2000, p. 549)

Composición de un imán permanente

Los imanes pertenecen al grupo de los materiales con comportamiento ferromagnético, son aleaciones metálicas que contienen hierro en mayor o menor proporción, esto define su campo de aplicación, además de la relación que exista entre los valores del producto de la inducción magnética y el campo magnético.

De entre las diferentes clases de imanes existentes, los imanes permanentes pertenecen al grupo de imanes duros o de materiales magnéticos duros, de los que sobresalen según (Espinosa & Belenguer, 2004) son:

Alnico 5 ($AlNiCo_5$).- Aleación que presenta una densidad de flujo residual relativamente alta pero posee baja coercitividad y fragilidad mecánica.

Alnico 8 ($AlNiCo_8$).-Posee una densidad de flujo residual baja, posee una coercitividad más alta que el alnico 5 y presenta fragilidad mecánica.

Cerámico 7.- Los materiales cerámicos o denominados imán de ferrita, se elaboran a partir de óxido de hierro y material pulverizado de carbonato de estroncio o bario, presentan menor densidad de flujo residual en comparación con las aleaciones ya mencionadas, pero poseen mayor coercitividad. Poseen buenas propiedades mecánicas y su fabricación es económica

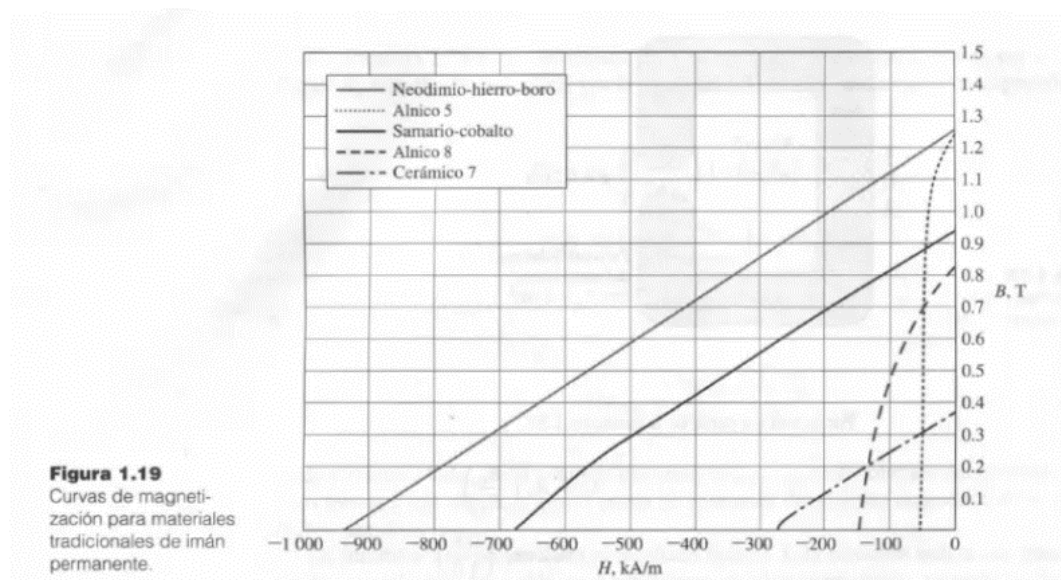
Neodimio ($Nd_2Fe_{14}B$).- Pertenecen al grupo de materiales de imán permanente de tierras raras. Presentan valores más altos de coercitividad, densidad de flujo residual y un producto energético máximo. (pp. 36-37)

Consideraciones para la elección de un imán permanente

Según (Fitzgerald, Kingsgley, & Umans, 2004) Una medida útil de la capacidad de los materiales de imán permanente se denomina producto energético, lo que corresponde a una medida útil de la capacidad de un imán permanente; elegir el material con el mayor valor disponible del producto energético podría resultar en el menor volumen de imán requerido para una aplicación específica. (p. 33)

Figura 19

Curvas de magnetización para materiales tradicionales de imán permanente



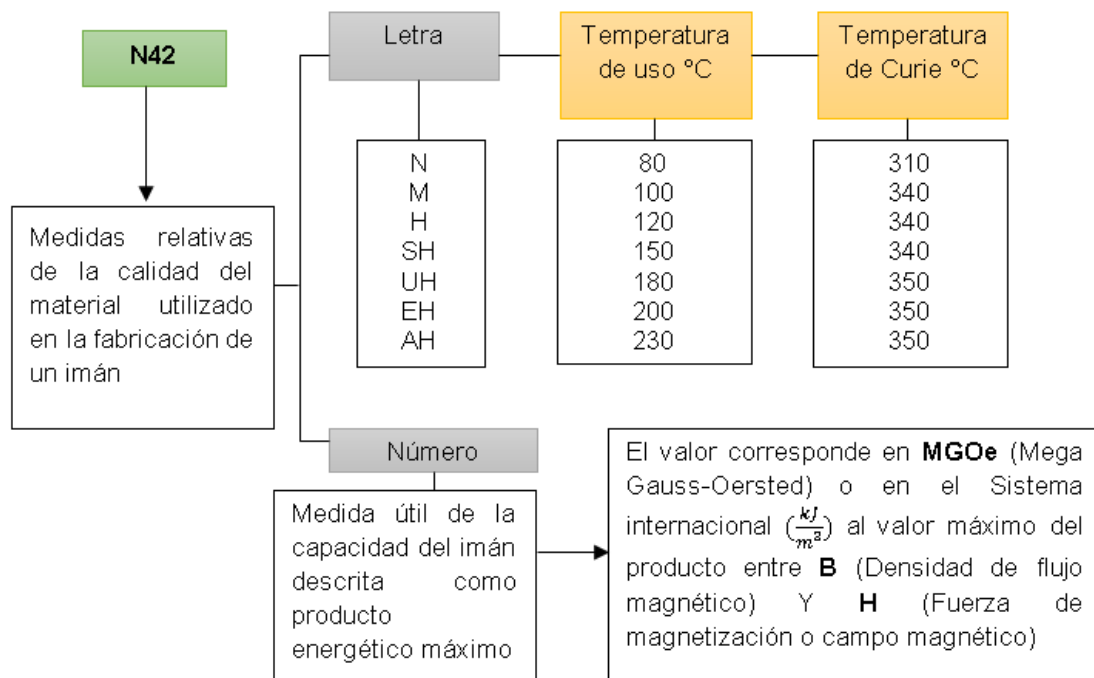
Nota. Curvas de magnetización para diferentes imanes. Tomado de (E. Fitzgerald et al., 2004)

Numeración alfanumérica de un imán de neodimio

Los imanes de neodimio se clasifican con letras que señalan su tolerancia térmica y números que indican su producto energético. Por lo general el tipo de imanes que utilizan este tipo de numeración son los imanes de neodimio.

Figura 20

Denominación, numeración o nomenclatura de un imán de neodimio.



Nota. Se describe la denominación alfanumérica de un imán permanente.

Propiedades de los sistemas magnéticos

De acuerdo a la aplicación y requerimientos en un sistema magnético se deben considerar las siguientes propiedades magnéticas.

Campo magnético-Intensidad de campo magnético (H)

Según (Bastian et al., 2001): “el espacio alrededor de un imán, en el que actúan las fuerzas magnéticas y que se concibe atravesado por las líneas del campo magnético, se llama campo magnético”, se representa con la letra H y su unidad es el amperio por metro.

(Pérez W., 2000) define este término como “una magnitud vectorial que sirve para describir el campo magnético. Su valor se define como la fuerza resultante magnética que actúa por cada unidad de masa magnética en un punto del campo magnético” (p. 551).

Densidad de flujo magnético

(Boylestad, 2004, p. 438) resume que la cantidad de líneas de flujo por unidad de área se llama densidad de flujo, se denota con la letra B y se mide en teslas. Su magnitud se determina con la siguiente ecuación:

Ecuación 3

Densidad de flujo

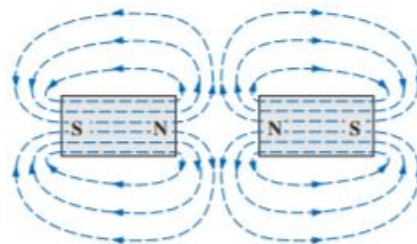
$$B = \frac{\Phi}{A}$$

Donde:

- B = Densidad de flujo (teslas, T)
- A = Área en metros cuadrados (m²)
- Φ = Cantidad de líneas de flujo (Webers, Wb)

Figura 21

Flujo magnético en dos imanes permanentes enfrentados



Nota. Se presenta la distribución del flujo para dos polos adyacentes, semejantes. Tomado de (Boylestad, 2004)

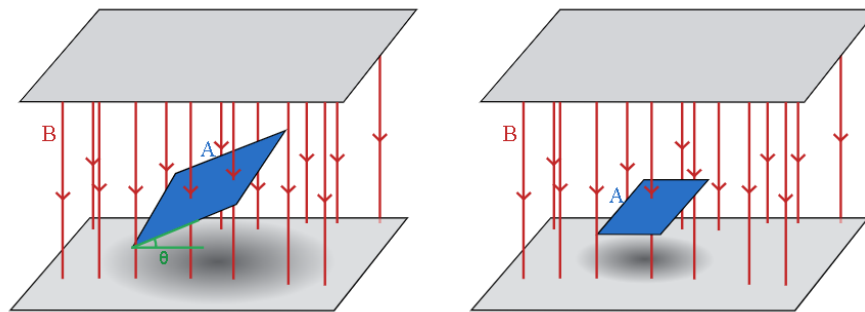
Flujo magnético

Según (Gac, 2016), el flujo magnético es una medida de la cantidad de magnetismo y se calcula a partir del campo magnético, la superficie sobre la cual actúa y el ángulo de incidencia formado por las líneas de campo y los diferentes elementos que están incluidos en dicha superficie, además menciona que es proporcional al número de líneas de campo que atraviesa un área y su unidad de medida en el sistema internacional es el Weber (Wb).

(p. 5)

Figura 22

Flujo magnético a través de dos áreas



Nota. Flujo magnético a través de dos áreas azules orientadas en un ángulo (izquierda) y normal (derecha) al campo magnético. Tomado de (Khan Academy, 2022)

Magnetismo remanente

(M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology), 1965) Menciona que: “El magnetismo remanente es la inducción magnética que queda en un material magnético después de suprimir un campo magnético aplicado” (p. 22).

Por otra parte (Fink et al., 1981) aclara que: “la inducción remanente es la inducción magnética que persiste en un circuito magnético tras haber eliminado la fmm aplicada” (p. 98).

Permeabilidad magnética

La permeabilidad para (Gussow, 1991) se refiere a la capacidad que tiene un material magnético de concentrar el flujo magnético. Cualquier material que se magnetiza fácilmente tiene una permeabilidad elevada. La medida de la permeabilidad de los materiales con referencia a la del aire o la del vacío se llama permeabilidad relativa. El símbolo de la permeabilidad relativa es μ_r , en el que el subíndice r indica relativa; y no tienen unidades porque es el cociente de dos densidades de flujo. (p. 163)

Ecuación 4

Permeabilidad relativa

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

La permeabilidad del espacio libre μ_0 (vacío) según (Boylestad, 2004), es:

Ecuación 5

Permeabilidad de vacío

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{Wb}{A \cdot m}$$

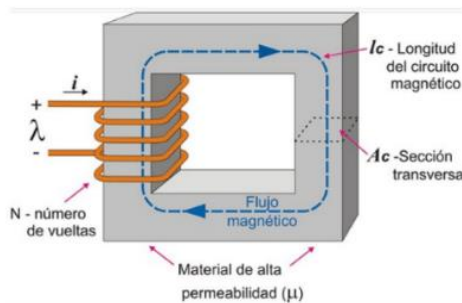
Los materiales con altas permeabilidades se llaman ferromagnéticos.

Reluctancia magnética

Bajo el criterio de (Zapata, 2020) , menciona que “la reluctancia magnética o resistencia magnética es la oposición que un medio presenta al paso del flujo magnético: a mayor reluctancia, más difícil es establecer el flujo magnético”

Figura 23

Circuito magnético-reluctancia



Nota. Se presentan los factores que influyen en el valor de reluctancia en un circuito magnético. Tomado de (Wikipedia, 2011)

La reluctancia de un material al establecimiento de líneas de flujo magnético en él, está determinada por la siguiente ecuación:

Ecuación 6

Reluctancia

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A}, (At/Wb)$$

Donde:

- \mathcal{R} = Reluctancia
- l = Longitud de la trayectoria magnética
- A = Área de la sección transversal

La t en las unidades descritas en la fórmula, refiere al número de vueltas del embobinado aplicado.

Coercitividad

Para (Espinosa & Belenguer, 2004) “Se ilustra como una medida de la magnitud de la fmm (fuerza magnetomotriz) requerida para desmagnetizar el material. Los materiales que constituyen buenos imanes permanentes se caracterizan por amplios valores de coercitividad H_c , un valor mayor a 1 KA/m ” (p. 33).

Permeabilidad magnética en distintas sustancias

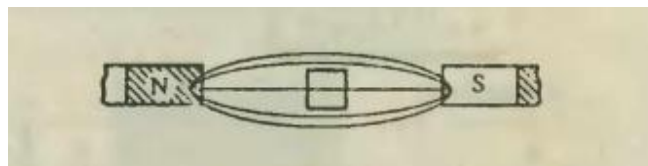
“Es una magnitud adimensional, su valor indica el comportamiento que experimenta una sustancia al encontrarse situada dentro de un campo magnético externo. La permeabilidad magnética indica si la sustancia se concentra, dispersa o simplemente no altera el campo magnético” (Pérez W. , 2000, p. 554).

Sustancias paramagnéticas

Para (Pérez, 2000) estas sustancias al encontrarse dentro de un campo magnético concentran las líneas de fuerza débilmente o simplemente no las alteran con permeabilidad magnética constante y ligeramente mayor o igual a la unidad como por ejemplo el aluminio, el platino, el oxígeno, el aire, el vacío entre otros. (p. 554)

Figura 24

Efecto del campo magnético sobre una sustancia paramagnética



Nota. Reacción de una sustancia paramagnética frente a un campo magnético. Tomado de (Pérez, 2000)

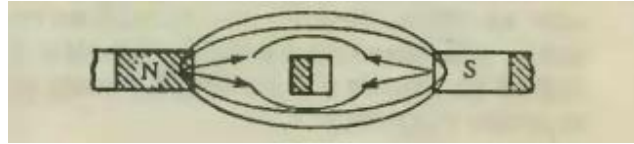
Sustancias diamagnéticas

Sustancias que al encontrarse en un campo magnético externo dispersan a las líneas de fuerza magnetizante en sentido opuesto al campo magnético inductor. Estas sustancias tienen permeabilidad magnética constante menor que la unidad. Un buen

ejemplo para este tipo de sustancias es el antimonio, el bismuto, el agua entre otras. (Pérez, 2017, p. 554)

Figura 25

Efecto del campo magnético sobre una sustancia diamagnética



Nota. Reacción de una sustancia diamagnética frente a líneas de un campo magnético.

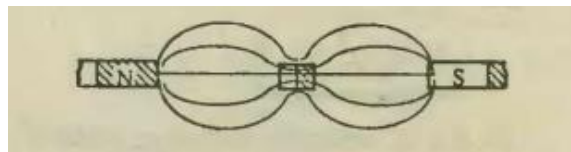
Tomado de (Pérez, 2000)

Sustancias ferromagnéticas

Todas las sustancias que al encontrarse en un campo magnético externo concentran a las líneas de fuerza, magnetizándose en favor al campo magnético inductor. Estas sustancias tienen permeabilidad magnética variable y mucho mayor que la unidad. Un buen ejemplo de estas sustancias es el hierro, el níquel, el cobalto por mencionar algunas. (Pérez W. , 2000, p. 554)

Figura 26

Efecto del campo magnético sobre una sustancia ferromagnética



Nota. Reacción de una sustancia ferromagnética frente a un campo magnético. Tomado de (Pérez, 2000)

Generador síncrono de imanes de imanes permanentes

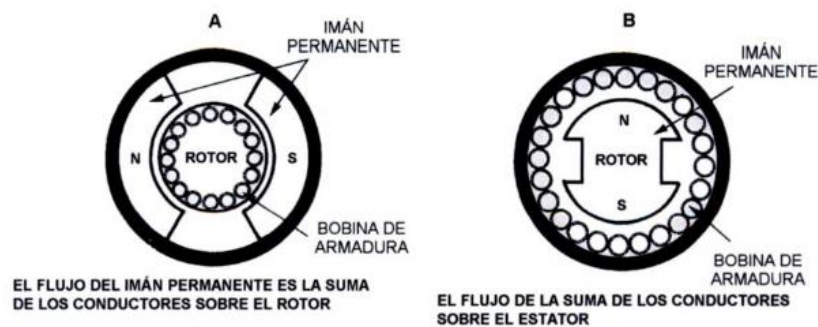
Según el criterio de (García, 2017), el término máquina síncrona de imanes permanentes (PMSM) describe todos los dispositivos de conversión de energía electromagnética en los cuales la excitación magnética, generalmente ubicada en el rotor, es sustituida por uno o varios imanes permanentes. (p. 15)

Configuraciones de un generador de imanes permanentes

“El motor/generador eléctrico (figura inferior) es síncrono, sin escobillas. Está compuesto de un rotor de imanes permanentes y un estator bobinado” (Pérez M. , 2017, p. 45).

Figura 27

Descripción de la configuración de un generador



Nota. a) Campo principal producido por un imán permanente parte del estator. b) Campo principal producido por un imán permanente parte del rotor. Tomado de (Enríquez, 2004)

Disposición de los imanes en el rotor

En el diseño de generadores síncronos se usan dos tipos de rotores, el cilíndrico y el de polos salientes.

El rotor de polos salientes se utiliza en generadores de baja y media velocidad porque la pérdida en el devanado es pequeña a esas velocidades, los imanes permanentes se fijan con un adhesivo especial, mientras que el rotor cilíndrico se emplea en aplicaciones de alta velocidad. Esta última configuración brinda los beneficios siguientes:

1. Resulta en una operación silenciosa a alta velocidad.
2. Ofrece mejor equilibrio que el rotor de polos salientes.
3. Reduce la pérdida por el viento.
4. Reduce el entrehierro y por tanto mejora la densidad de flujo magnético.

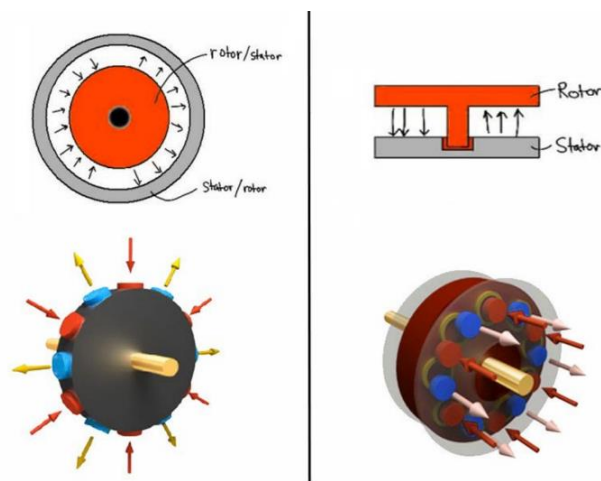
Tipología de un generador de imanes permanentes

Esta clasificación se realiza en base a la dirección de movimiento del rotor en función del estator o viceversa, es decir la disposición y configuración que adopta el generador en función del movimiento al que está sujeto.

De acuerdo a la dirección en que se corta el campo magnético entre el imán y el conductor se menciona dos tipos de generadores: de flujo axial y de flujo radial.

Figura 28

Tipología de un generador de acuerdo al movimiento del rotor



Nota. Se presenta un generador de flujo radial en el lado izquierdo y uno de flujo axial en el lado derecho. Tomado de (García, 2018)

Materiales empleados en la fabricación de un generador

De acuerdo a (Vargas & Saldarriaga, 1990) el material ferromagnético que más se utiliza en la construcción de máquinas eléctricas es el acero al silicio de diferentes calidades, el acero fundido, el hierro colado, el acero en chapas y forjado, aleaciones de acero especiales (para imanes permanentes). (p. 179)

Material del núcleo del estator

“Es la masa metálica fija, unida a la carcasa y constituida por un paquete de chapas metálicas de silicio de 0.35-0.50 mm de espesor, aisladas con barniz, este núcleo va provisto de ranuras para alojar el bobinado inducido o inductor” (Manzano, 1999, p. 116).

Las laminaciones se mantienen juntas por medio del bastidor del estator o por remaches especiales.

Material del bastidor

El bastidor, que puede ser de hierro de fundición o fabricarse con placas soldadas de acero suave, no se diseña para conducir flujo, sino para dar apoyo mecánico al generador síncrono, el material debe ser pensado en función de las condiciones del entorno, ventilación del generador y espacio disponible.

Material del rotor

El material para el rotor puede ser de laminaciones metálicas con agujeros específicos para los imanes, de materiales paramagnéticos como el aluminio en una sola pieza mecanizada o fundida con cavidades para los imanes con medidas apropiadas para fijar los imanes con pegamento especial.

Imán de Neodimio

Su fórmula química es una aleación de los siguientes componentes $Nd_2Fe_{14}B$, conocidos como imanes de tierras raras poseen un alto valor de campo coercitivo e inducción remanente.

Bobinas del estator

En la mayoría de aplicaciones se emplean arrollamientos de alambre de cobre electrolítico esmaltado denominado alambre magneto, de diámetros comprendidos entre 0.2 y 2 mm aunque se puede utilizar alambre de aluminio en la actualidad su uso no es muy común.

Material de los aislantes utilizados en los bobinados

Para realizar el bobinado de un generador se deben considerar los siguientes materiales según (Manzano, 1999) menciona tres:

Láminas de papel flexible.- Se emplean para el aislamiento entre circuitos, sometidos a diferente potencial. Las características varían en función de la temperatura que deban soportar y de la flexibilidad del papel que se necesite.

Tubos aislantes.- Empleados para aislar las conexiones. Sus diámetros oscilan entre 0.5 y 12 mm. La constitución de los mismos varía en función de la temperatura que deben soportar.

Barnices.- Empleados para dar rigidez y estanqueidad a los devanados. Pueden ser secados al aire ó al horno. Todos los aislantes se eligen en función de la temperatura y de la diferencia de potencial que hayan de aislar. (p. 23)

Selección de un aislante térmico

Para seleccionar el aislante se estima la temperatura máxima a la que puede llegar el generador y establecer la clase térmica del aislante con un margen de seguridad que garantice la protección del bobinado aún en condiciones críticas de operación.

De acuerdo al grado térmico cada aislante se clasifica en función de la temperatura que puede soportar. La elección del aislante puede considerarse bajo tres aspectos: propiedades eléctricas, mecánicas y químicas.

Propiedades eléctricas

El papel aislante debe tener una adecuada rigidez dieléctrica debido a la corriente de fuga que puede existir entre las caras del aislante al aplicarse una tensión moderada.

Propiedades mecánicas

El componente principal de un papel aislante es el Mylar que se define como una película de poliéster caracterizada por su alta resistencia a la tracción, estabilidad química, mecánica, térmica y su bajo índice de absorción de agua, es decir al utilizarla no se romperá o agrietará con facilidad además de reducir la acumulación de humedad.

Propiedades químicas

En las propiedades químicas se describen la constitución de este material, en el caso del papel aislante Isonom NMN (Nomex Mylar Nomex), contiene fibras sintéticas fabricado a base de telas de fibra de meta-arámida (fibras sintéticas), resistente al calor y

que conforma una hoja de papel. El Nomex es un polímero o macromolécula que se constituye de diversas unidades químicas conocidas como monómeros.

Tabla 5

Clasificación de los aislantes utilizados en máquinas eléctricas

Clase de aislamiento	Productos empleados	Medio aglomerante o impregnante	Temperatura máxima de empleo °C
A	Esmaltes de acetato de polivinilo, poliuretano. Aglomerado con celulosa.	Melamina con formaldehído, fenol con formaldehído	120
B	Fibras de vidrio, productos de mica, films de policarbonato.	Goma, laca, compuestos asfálticos o bituminosos, resinas de poliéster.	130
F	Fibras de vidrio, amianto, productos de mica, fibras de poliamidas aromáticas, films de poliamida-imida.	Resina epoxi Resinas de poliuretano Resinas de silicona	155
H	Fibras de vidrio, amianto, productos de mica, fibras de poliamidas aromáticas y de poliamida, politetrafluoroetileno, cauchos silicona	Resinas de silicona	180
C	Porcelana, mica, cuarzo, vidrio u otro material cerámico, politetrafluoroetileno.	Resinas de silicona	>180

Nota. Clase térmica de los aislantes. Tomado de (BUN-CA, 2011)

Pérdidas en los generadores eléctricos

El funcionamiento intermitente o continuo al que sea sometido un generador producirá pérdidas en el mismo, para lo cual el diseñador debe considerar estos efectos y reducirlos al mínimo y asegurar un correcto funcionamiento.

Pérdidas mecánicas

En este apartado se describen a las pérdidas por rozamiento en el funcionamiento del generador, este rozamiento mecánico o con el aire se producen en menor proporción en generadores de imanes permanentes, al no existir fricción solo dependerá del diseño mecánico y estructural para no tener pérdidas mecánicas o con el aire.

Pérdidas en el núcleo magnético

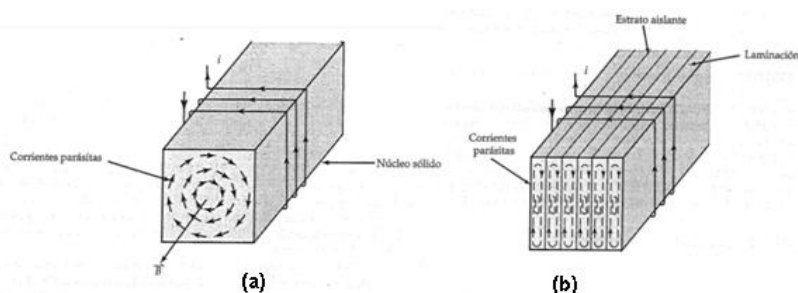
En un sistema de generación de energía un núcleo ferromagnético presenta pérdidas de energía en forma de calor al estar expuesto a variaciones de flujo magnético, estas pérdidas son: las corrientes parásitas y las pérdidas por histéresis.

Pérdidas magnéticas por corrientes de Foucault

Según el autor (Guru, 2003) los efectos de las corrientes parásitas pueden disminuir si el núcleo magnético se construye con alta resistencia esto se logra apilando piezas delgadas de materiales magnéticos. Esta laminación, está recubierta con barniz o goma laca. El resultado es la reducción de las corrientes parásitas en el material magnético y el incremento de eficiencia. (p. 110-111)

Figura 29

Núcleo con corrientes parásitas en el núcleo ferromagnético



Nota. Corrientes parásitas en el núcleo ferromagnético: (a) sólido y (b) laminado, cuando la corriente en la bobina aumenta con el tiempo. Tomado de (Guru, 2003)

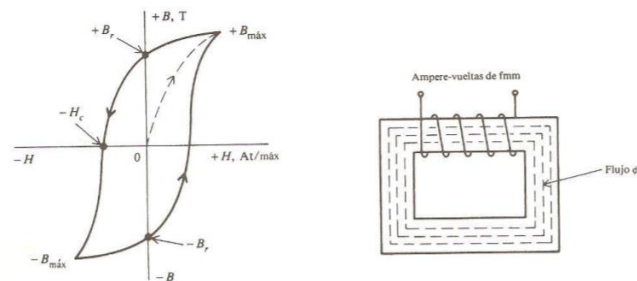
Pérdidas magnéticas por histéresis

La definición en base a (Gussow, 1991) menciona que la corriente en una bobina se invierte miles de veces por segundo, la histéresis puede ocasionar una importante pérdida de energía. Histéresis significa "retraerse" o "quedarse atrás"; es decir, el flujo magnético en

un núcleo de hierro se atrasa con respecto a los incrementos o decrementos de la fuerza magnetizadora. (p. 169)

Figura 30

Ciclo de histéresis de los materiales magnéticos



Nota. Ciclo de histéresis de los materiales magnéticos. Tomado de (Gussow, 1991)

Corriente producida en un generador eléctrico

En función del requerimiento de energía un generador puede producir corriente continua o corriente alterna descritas a continuación.

Corriente continua

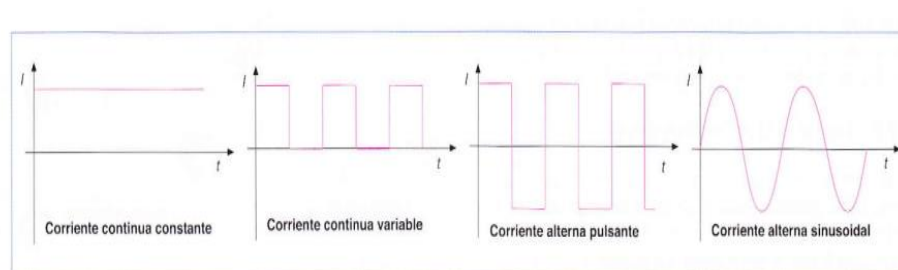
Para (Vallcorba et al., 2006) “La corriente continua constante es aquella en la que el flujo de cargas o electrones es constante en todo momento y no cambia de sentido” (p. 24).

Corriente alterna

“Si el sentido de circulación de la corriente eléctrica es alternativo, será una corriente alterna y su nombre dependerá de la forma de la señal. La más utilizada es la sinusoidal (forma de la función seno) y la pulsante” (Vallcorba et al., 2006, 24).

Figura 31

Tipos de corrientes por su forma de onda



Nota. Tipos de corriente según su onda. Tomado de (Vallcorba et al., 2006)

Circuito regulador-rectificador de voltaje

Un circuito rectificador-regulador de corriente es el encargado de estabilizar la energía que ingresa a un dispositivo electrónico, es parte fundamental en cada circuito de potencia ya que protege a los equipos eléctricos y electrónicos.

Circuito rectificador

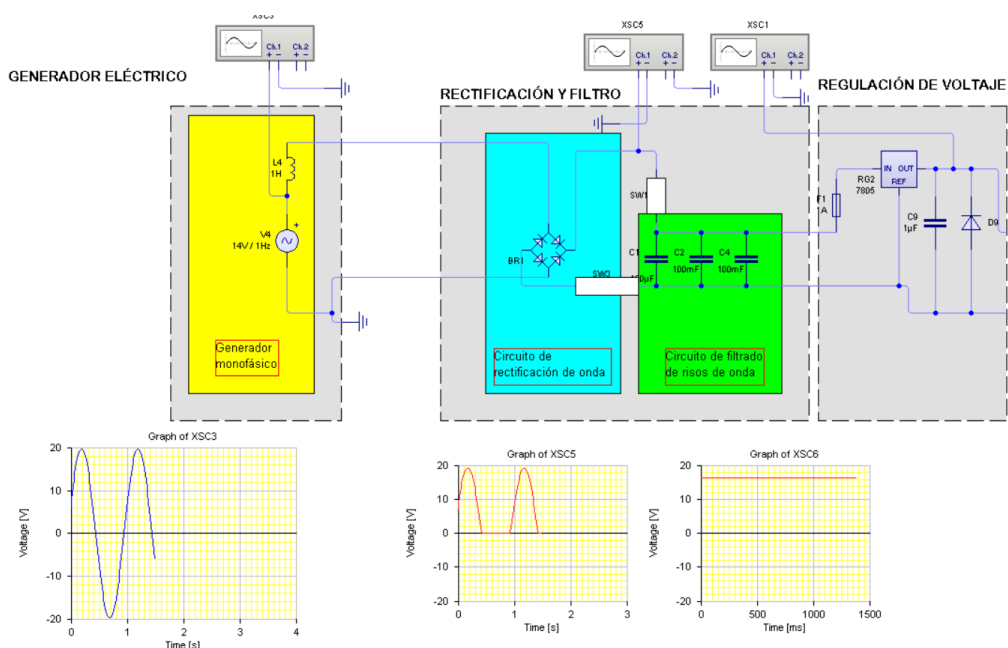
Circuito que convierte la corriente alterna en continua gracias a un arreglo de diodos, conocido como puente rectificador que puede ser de media onda o de onda completa de acuerdo al requerimiento. El rectificador de onda completa es el más utilizado por obtener la mayor eficiencia en un circuito.

Circuito regulador

Un circuito regulador estabiliza la salida de voltaje y corriente hacia los consumidores, con valores constantes en el tiempo: “Los diodos Zener se utilizan como reguladores de voltaje y como patrones de referencia de voltaje. Su función es mantener un voltaje constante en la carga, dentro los límites requeridos” (Zbar et al., 2001, p. 12).

Figura 32

Circuito regulador-rectificador de voltaje



Nota. Circuito rectificador-regulador de voltaje con un puente rectificador y un arreglo de capacitores como filtro.

Acumuladores de energía

Un acumulador de energía almacena electricidad en celdas electroquímicas capaces de convertir la energía eléctrica en energía química y luego revertir el proceso cuando así se lo requiera, a continuación se describe las dos baterías más utilizadas en la actualidad en las motocicletas eléctricas.

Batería de Plomo ácido

Es un acumulador químico de energía eléctrica, formado por celdas con placas positivas y negativas sumergidas en ácido sulfúrico o electrolito. Las magnitudes que caracterizan una batería son: la capacidad medida en Ah (amperio hora) y el valor de tensión (V) medida en voltios. Al no ser un conductor ideal posee una resistencia interna en el orden de centésimas de ohmio en función de la edad de la batería. La capacidad y la tensión de descarga se relacionan con la temperatura de su entorno debido a que estos valores crecen a medida que sube la temperatura y disminuyen cuando esta lo hace debido a que los procesos químicos se producen de forma menos efectiva a bajas temperaturas.

Batería de Litio

Para (Dietsche & Klingebiel, 2005) los sistemas de litio permiten unas densidades de energía de más de 100 Wh/kg y unas densidades de potencia que superan los 300 W/kg en baterías de tracción. En las baterías de ion de litio, los iones de litio del electrodo negativo se depositan en una rejilla de grafito que sigue un proceso eléctrico reversible. En las baterías convencionales de dispositivos eléctricos, el electrodo positivo contiene óxido de cobalto, lo que hace que el sistema sea muy costoso. Ésta es la razón para emplear un sustituto más económico conocido como el óxido de manganeso de níquel. Como electrolito se emplea materia orgánica; no se pueden utilizar electrolitos acuosos debido a la intensa reacción química del litio con el agua. (p. 724)

Las pilas de litio se conectan en diferentes arreglos paralelo o serie, la combinación debe satisfacer el valor de capacidad y voltaje final requerido en el sistema.

Figura 33

Pilas de batería de de litio



Nota. Batería de pilas de litio. Tomado de (Soloelectronicos, 2016)

Capacidad de una batería

La capacidad es el número de amperios que una batería puede suministrar por un tiempo determinado en horas, por lo general este valor se detalla en la etiqueta. Por ejemplo una batería de 47 Ah puede entregar 47 A en una hora o 10 A por 4.7 horas.

Estado de carga de una batería

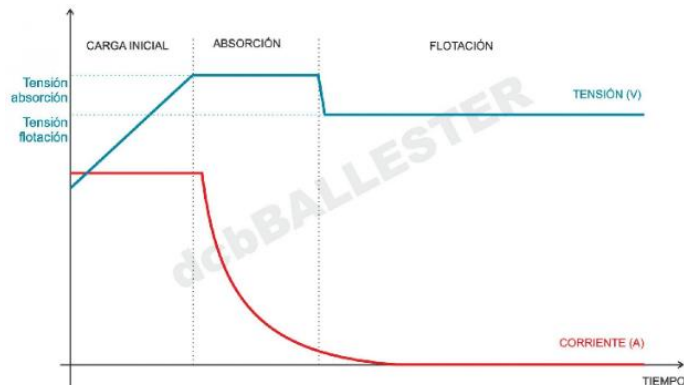
El estado de carga de una batería se expresa en porcentaje (%) y representa la relación entre la capacidad almacenada y la nominal en un tiempo dado que indica la cantidad de energía restante en la batería.

Etapas de carga de una batería

Las etapas de carga describen el comportamiento de la corriente y voltaje a través del tiempo durante la carga de una batería, dividida en 3 etapas que son: carga inicial, absorción y etapa de flotación como se muestra en la siguiente figura.

Figura 34

Gráfica de las etapas de carga de una batería



Nota. Curva de corriente y voltaje en las etapas de carga de una batería. Tomado (dcbBALLESTER, 2022)

En la primera etapa el valor de corriente inicial es constante y corresponde en la mayoría de casos al 10 o 20% de la capacidad de la batería y el voltaje debe ascender hasta el 10 a 20% de su valor nominal. Para la segunda etapa la corriente desciende progresivamente mientras el voltaje se mantiene constante. Finalmente en la etapa de flotación el suministro corresponde a una corriente de mantenimiento para que la batería mantenga su carga.

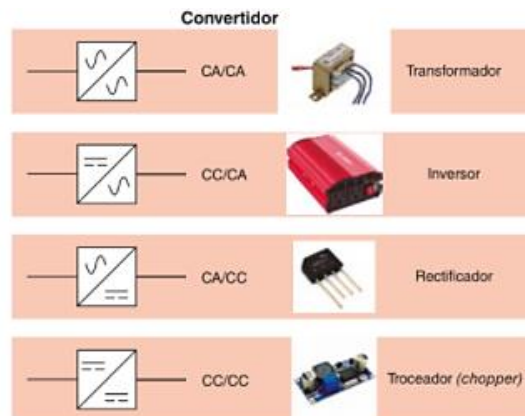
Inversor de corriente (DC-AC)

Según (Basekga, 2019) cuando la aplicación requiere valores donde la tensión del sistema de generación y el de consumo no coinciden, hay que incluir un sistema que haga coincidir las características eléctricas de las potencias generada y consumida. Los dispositivos que cumplen esta función se denominan convertidores y se clasifican en:

- **Convertidores CA/CC, o rectificadores.**- transforman una corriente alterna en corriente continua. Están constituidos por diodos.
- **Convertidores CC/CC.**- cambian los valores de una tensión continua en otra continua de distinta tensión. Pueden ser elevadores o reductores de tensión.
- **Convertidores CC/CA, o inversores.**- transforman corriente continua en corriente alterna. Se usan en la mayoría de las instalaciones solares aisladas y en todas las conectadas a red. (p. 123)

Figura 35

Tipología de los convertidores de corriente



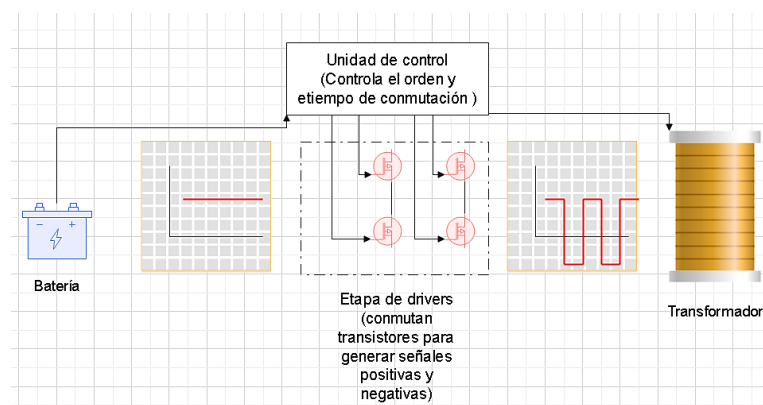
Nota. Tipos de convertidores electrónicos. Tomado de (Basekga, 2019)

Configuración de un inversor

Un inversor de CD a CA utiliza una fuente de corriente continua para convertirla en alterna mediante la activación y desactivación de drivers o transistores al activarlos y desactivarlos con el fin de generar una señal de valores positivos y negativos, de igual manera se controla el tiempo de conmutación lo que resulta en su variación de frecuencia. Entre las partes principales de un inversor se detalla el oscilador que controlan los transistores, un transformador para elevar el voltaje y un microcontrolador que ajuste todos los valores.

Figura 36

Diagrama de flujo de un inversor DC-AC



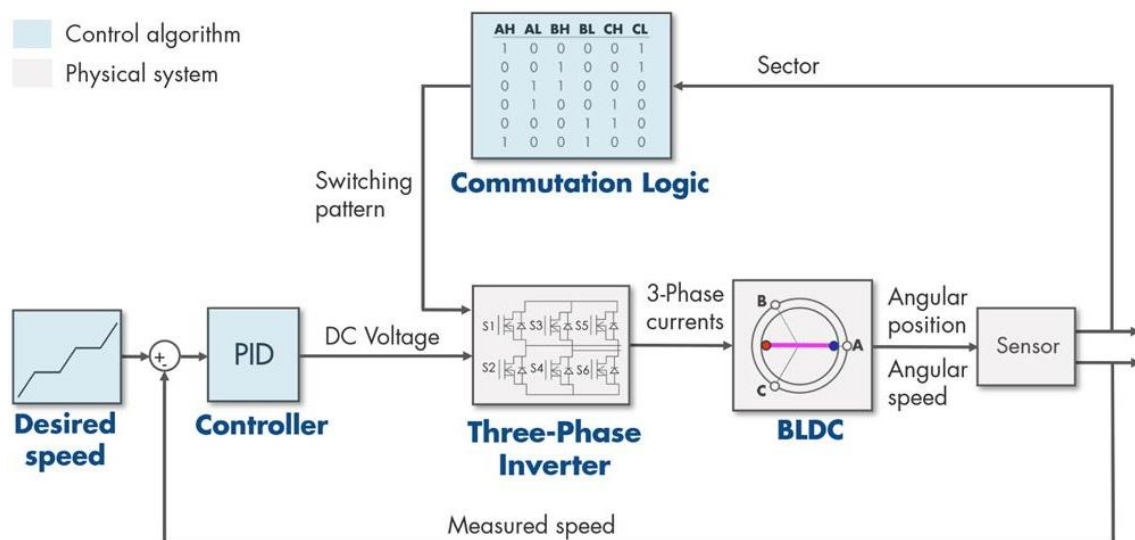
Nota. Se presenta un breve diagrama de las etapas de un inversor de corriente DC-AC.

Motor eléctrico BLDC

De las siglas Brushless Direct Current Motor que significa Motor sin escobillas de Corriente Continua. Este tipo de motores se diseñan con rotores de imanes permanentes y bobinas inductoras, la conmutación se realiza por medio de un controlador electrónico que ubica la posición del rotor a través de sensores de efecto Hall o por detección de corriente inducida en la bobina que no está energizada (una bobina al estar frente a la variación de un campo magnético genera una fuerza electromotriz (fem) que lee el controlador y detecta la posición del rotor). Luego el inversor trifásico compuesto por un arreglo de transistores permite crear las señales de activación para cada bobina o conjunto de bobinas. La dirección de la corriente o el sentido de polarización permitirán la variación del campo magnético de las bobinas, es decir un polo Norte o Sur de acuerdo a su posición respecto del rotor.

Figura 37

Diagrama de funcionamiento de un motor BLDC



Nota. Funcionamiento de un motor BLDC. Tomado de (MathWorks, 2022)

Motor eléctrico QS de 2000 W

Es un tipo de motor BLDC con de imanes permanentes. Funciona con una tensión nominal de 48 V-72 V, alcanza velocidades de hasta 55 Km/h. El motor gira a 650 rpm sin

carga con un par máximo de 98 Nm. La corriente de trabajo es de 10 A en condiciones sin carga y de 24 a 30 como amperaje máximo a diferentes cargas. La temperatura que alcanza en su funcionamiento va de 70 a 120 grados; su diseño permite acoplar el eje del motor directamente al chasis de la moto eléctrica y su constitución tipo cubo evita la contaminación interna con agentes que pueden reducir su vida útil.

Figura 38

Motor eléctrico QS BLDC



Nota. Se presenta el motor eléctrico Qs de 2000 Watts.

Ecuaciones de diseño para un generador de flujo radial

Bajo la premisa de que todo motor puede convertirse en un generador, el diseño de un generador se desarrolla utilizando las ecuaciones de diseño de un motor sin escobillas de imanes permanentes.

Tabla 6

Ecuaciones de diseño de un generador de flujo radial de imanes permanentes

N° de ecuación	Fórmula matemática	Descripción
9	$w_m = \left(\frac{\pi}{30} * Sr\right)$	Velocidad mecánica (rad/s)
10	$w_e = \left(\frac{Nm}{2} * w_m\right)$	Velocidad eléctrica (rad/s)

N° de ecuación	Fórmula matemática	Descripción
11	$f_e = \frac{w_e}{2\pi}$	Frecuencia eléctrica (Hz)
12	$T = 746 * \frac{P_{HP}}{w_m}$	Torque de caballos de fuerza (Nm-Newton metro)
13	$N_s = N_{sp} * N_{ph}$	Número de ranuras
14	$N_{spp} = \frac{N_{sp}}{N_m}$	Número de ranuras por polo por fase
15	$N_{sm} = N_{spp} * N_{ph}$	Número de ranuras por polo magnético
16	$\alpha_{cp} = \frac{int(N_{spp})}{N_{spp}}$	Fracción bobina-polo
17	$\theta_p = \frac{2\pi}{N_m}$	Paso angular del polo magnético
18	$\theta_s = \frac{2\pi}{N_s}$	Paso angular de la ranura
19	$\theta_{se} = \frac{\pi}{N_{sm}} = \frac{\pi * N_m}{N_s}$	Paso de ranura (radianes eléctricos, θ_{se})
20	$R_{si} = R_{ro} + g$	Radio interior del estator
21	$\tau_p = R_{si} * \theta_p$	Paso del polo magnético en metros (τ_p)

N° de ecuación	Fórmula matemática	Descripción
22	$\tau_c = \alpha_{cp} * \tau_p$	Paso de la bobina (τ_c)
23	$\tau_s = Rsi * \theta_s$	Paso de la ranura en el entrehierro (τ_s)
24	$\omega t = \tau_s - \omega_s$	Ancho del diente en el espacio de aire (ωt)
25	$kd = \frac{\text{sen} \left(\frac{Nspp * \theta_{se}}{2} \right)}{Nspp * \text{sen} \left(\frac{\theta_{se}}{2} \right)} = 1$	Factor de distribución
26	$kp = \alpha_{cp}$	Factor de paso (kp)
27	$ks = 1 - \frac{\theta_{se}}{2\pi}$	Factor de sesgo (ks)
28	$C_\phi = \frac{2 \alpha_m}{1 + \alpha_m}$	Factor de concentración de flujo (C_ϕ)
29	$Pc = \frac{lm}{g * C_\phi}$	Coeficiente de permeabilidad
30	$kml = 1 + \frac{4 * lm}{\pi * u_R * \alpha_m * \tau_p} * \ln \left[1 + \pi * \frac{g}{(1 - \alpha_m) * \tau_p} \right]$	Factor de fuga del imán (kml)
31	$ge = g + \frac{lm}{u_R}$	Entrehierro efectivo para el coeficiente de Carter
32	$kc = \left[1 - \frac{1}{\frac{\tau_s}{\omega_s} * \left(5 * \frac{g_e}{\omega_s} + 1 \right)} \right]^{-1}$	Coeficiente de Carter

N° de ecuación	Fórmula matemática	Descripción
33	$Ag = \frac{\tau_p * L * (1 + \alpha_m)}{2}$	Área del entrehierro
34	$Bg = \frac{C_\varphi}{1 + \frac{u_R * kc * kml}{Pc}} * Br$	Densidad de flujo en el entrehierro (Bg)
35	$Wbi = \frac{\varnothing g}{2 * B_{\text{máx.}} * Kst * L}$	Ancho del diente
36	$\varnothing g = Bg * Ag$	Flujo magnético en el entrehierro
37	$Rsb = Rso - Wbi$	Radio del hierro trasero del estator (m)
38	$Wtb = \frac{2}{Nsm} * Wbi$	Ancho del diente (m)
39	$Rri = Rro - lm - Wbi$	Radio interno del rotor (Rri)
40	$Wsb = Rsb * \theta_s - Wtb$	Ancho inferior de la ranura (Wsb)
41	$Wsi = (Rsi + \alpha_{sd} * Wtb) * \theta_s - Wtb$	Ancho interior de la zapata de la ranura (Wsi)
42	$\alpha_s = \frac{Wsi}{Wsi + Wtb}$	Fracción de ranura dentro de la zapata (α_s)

N° de ecuación	Fórmula matemática	Descripción
43	$ds = Rsb - Rro - g$	Profundidad total de la ranura (ds)
44	$d3 = ds - \alpha_{sd} * Wtb$	Profundidad de la ranura del conductor (d3)
45	$d1 + d2 = \alpha_{sd} * Wtb$	Profundidad de la zapata dividida entre d1 y d2
46	$As = d3 \left[\theta_s \left(Rsb - \frac{d3}{2} \right) - Wtb \right]$	Área del conductor (As)
47	$E_f = 4.44 * kd * ka * \Phi_{m\acute{a}x.} * N_f * f$	Número de vueltas por ranura (ns)
48	$e_{max} = Nm * kd * kp * ks * Bg * L * Rro * Nspp * n_s * W_m$	Pico de fuerza contra electromotriz (e_{max})
49	$I_s = \frac{T}{Nm * kd * kp * ks * Bg * L * Rro * Nspp}$	Corriente máxima por ranura (Is, en amperios)
50	$I_{ph} = \frac{I_s}{Nph * n_s}$	Corriente de fase (Iph)
51	$Jc = \frac{I_s}{kcp * As}$	Densidad de corriente máxima en el conductor (Jc)
52	$ B_s _{max} = \frac{u_0 * I_s}{\omega_s}$	Densidad de flujo máximo en la ranura (Bs max)

N° de ecuación	Fórmula matemática	Descripción
53	$R_s = \frac{\rho * n_s^2 * L}{kcp * As}$	Resistencia de la ranura (Rs)
54	$R_e = \frac{\rho * n_s^2 * \pi * \tau_c}{2 * kcp * As}$	Resistencia en la vuelta final (Re)
55	$R_{ph} = Nsp(R_s + R_e)$	Resistencia de fase (Rph)
56	$L_g = \frac{n_s^2 * u_R * u_o * L * \tau_c * kd}{4(lm + u_R * kc * g)}$	Inductancia en el entrehierro (Lg)
57	$L_s = n_s^2 * \left[\frac{u_o * d3^2 * L}{3 * As} + \frac{u_o * d2 * L}{\frac{ws + Wsi}{2}} + \frac{u_o * d1 * L}{ws} \right]$	Inductancia de fuga en la ranura (Ls)
58	$L_e = \frac{n_s^2 * u_o * \tau_c}{8} * \ln\left(\frac{\tau_c^2 * \pi}{4 * As}\right)$	Inductancia del final de vuelta (Le)
59	$L_{ph} = Nsp(L_g + L_s + L_e)$	Inductancia de fase (Lph)
60	$V_{st} = [\pi(R_{so}^2 - R_{si}^2) - Ns * As] * L * kst$	Volumen de acero del estator (Vst)
61	$Pr = Nph * I_{ph}^2 * R_{ph}$	Pérdida de potencia óhmica (Pr)
62	$P_{cl} = \rho_{bi} * V_{st} * \Gamma(B_{max}, f)$	Pérdidas en el núcleo (Pcl)
63	$\eta = \frac{T * \omega_m}{T * \omega_m + Pr + P_{cl} + P_s}$	Eficiencia (η)
64	$q_s = \frac{Pr}{L(2d3 + w_{sb})Ns}$	Densidad de calor en la ranura (qs)

N° de ecuación	Fórmula matemática	Descripción
65	$qst = \frac{Pr + Pcl}{2\pi * Rso * L}$	Densidad de calor en el estator (qst)

Nota. Tabla de fórmulas para el diseño de una máquina de flujo radial. Tomado de (Hanselman, 1994)

Significado de letras y símbolos

Para una mejor comprensión en el uso de las ecuaciones se recopila el significado de símbolos y letras en la siguiente tabla.

Tabla 7

Nomenclatura de diseño de un generador de flujo radial de imanes permanentes

Símbolo	Denominación	Unidades	Símbolo	Denominación	Unidades
w_m	Velocidad mecánica	$\frac{rad}{s}$	Rsi	Radio interno del estator	m
Sr	Velocidad nominal	rpm	Rro	Radio exterior del estator	m
w_e	Velocidad eléctrica	$\frac{rad}{s}$	τ_p	Paso del polo magnético	m
Nm	Número de imanes (polos magnéticos)	-	τ_c	Paso de la bobina	m
fe	Frecuencia	Hz	α_{cp}	Fracción bobina-polo	-
P_{HP}	Horsepower (Caballos de fuerza)	Hp	τ_s	Paso de la ranura en el polo	m
Nsp	Número de ranuras por polo	-	ωt	Ancho del diente del polo magnético del estator	m
Nph	Número de fases	-	ω_s	Abertura de ranura	m

Símbolo	Denominación	Unidades	Símbolo	Denominación	Unidades
N_{spp}	Número de ranuras por polo por fase	-	P	Perímetro	m
α_{cp}	Fracción bobina-polo	-	D_{si}	Diámetro interno del estator	m
θ_p	Paso angular del polo magnético	-	kd	Factor de distribución	-
θ_s	Paso angular de la ranura	-	kp	Factor de paso	-
N_s	Número de ranuras	-	ks	Factor de sesgo	-
θ_{se}	Paso de ranura (radianes eléctricos)	-	C_ϕ	Factor de concentración de flujo	-
α_m	Fracción magnética	-	τ_m	Ancho del imán	m
P_c	Coefficiente de permeabilidad	-	kml	Factor de fuga del imán	-
u_r	Permeabilidad relativa	-	lm	Longitud del imán	m
u_R	Permeabilidad de retroceso del imán	-	ge	Entrehierro efectivo para el coeficiente de Carter	-
g	Entrehierro	m	kc	Coefficiente de Carter	-
A_g	Área del entrehierro	m	L	Longitud del imán	m
B_g	Densidad de flujo en el entrehierro	T	Br	Remanencia magnética	T

Símbolo	Denominación	Unidades	Símbolo	Denominación	Unidades
$\emptyset g$	Flujo magnético en el entrehierro	Wb	Wbi	Ancho del hierro trasero	m
$B_{m\acute{a}x.}$	Densidad de flujo magnético máximo	T	$kst \acute{o} fa$	Factor de apilamiento	-
Wtb	Ancho del diente	m	Rsb	Radio del hierro trasero del estator	m
Rri	Radio interior del rotor	m	lm	Altura del imán	m
Wsb	Ancho inferior de la ranura	m	Wsi	Ancho interior de la ranura de la zapata	m
α_{sd}	Fracción de intervalo de la zapata	-	α_s	Fracción de ranura de la zapata	-
ds	Profundidad total de la ranura	m	$d3$	Profundidad de la ranura del conductor	m
As	Área del conductor	m^2	$int(x)$	Valor entero de la variable x	-
ns	Número de vueltas por ranura	-	$E. max$	Voltaje máximo generado	V
L	Profundidad del núcleo laminado	m	e_{max}	Pico de fuerza contra electromotriz	V
Is	Corriente máxima por ranura	A	I_{ph}	Corriente de fase	A
Jc	Densidad de corriente máxima en el conductor	A/m^2	kcp	Factor de empaque del conductor	-

Símbolo	Denominación	Unidades	Símbolo	Denominación	Unidades
$ B_s _{max}$	Densidad de flujo máximo en la ranura	T	R_s	Resistencia de la ranura	Ω
Re	Resistencia en la vuelta final	Ω	R_{ph}	Resistencia de fase	Ω
L_g	Inductancia en el entrehierro	H	L_s	Inductancia de fuga en la ranura	H
Le	Inductancia del final de vuelta	H	L_{ph}	Inductancia de fase	H
V_{st}	Volumen del acero del estator	m^3	Pr	Pérdida de potencia Óhmica	W
P_{cl}	Pérdidas en el núcleo	W	η	Eficiencia	%
qs	Densidad de calor en la ranura	$\frac{W}{m^2}$	q_{st}	Densidad de calor en el estator	$\frac{W}{m^2}$

Nota. Simbología electromagnética del diseño de un generador de flujo radial de imanes permanentes. Elaboración propia con datos tomados de (Hanselman, 1994)

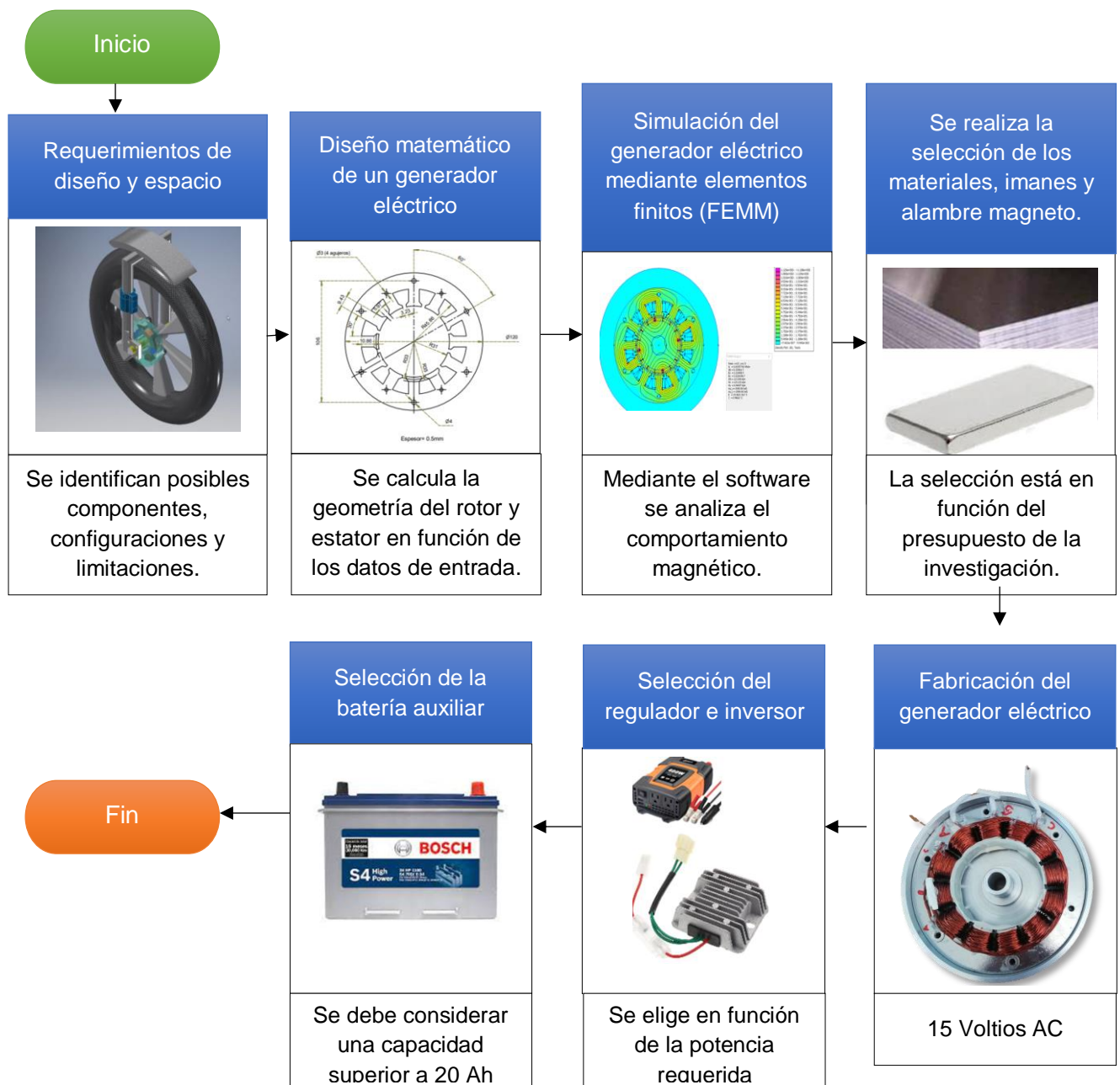
Capítulo III

Diseño, construcción e implementación de un sistema de carga regenerativo

El desarrollo de la investigación comienza con la estructuración de los pasos que se deben seguir una vez estudiada la bibliografía y haber determinado los requerimientos para obtener un sistema de carga como se muestra en el siguiente flujograma.

Figura 39

Flujograma de diseño



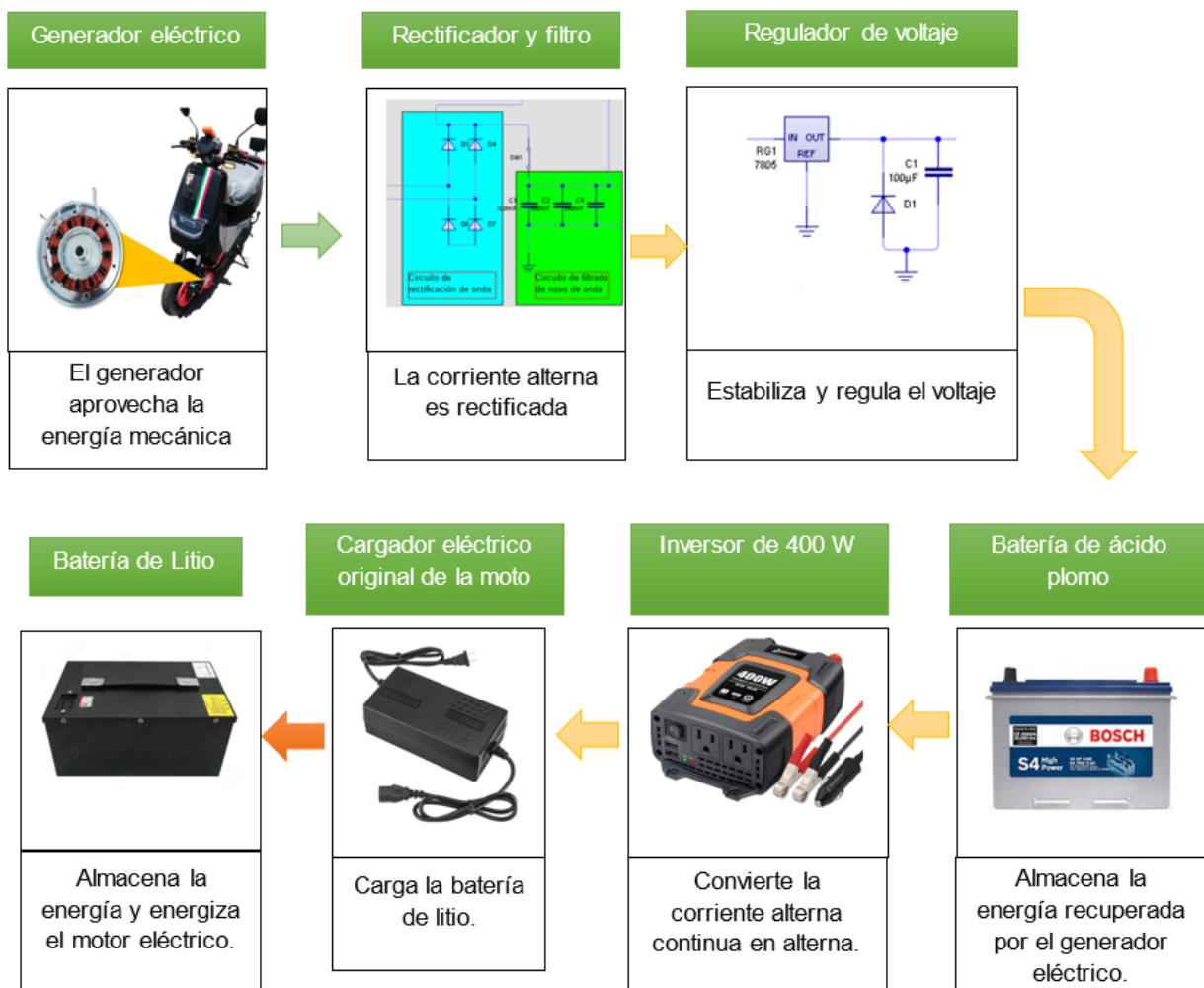
Nota. Flujograma de diseño de un sistema de carga regenerativo.

Requerimientos del sistema de carga regenerativo

Para ensamblar un sistema de carga regenerativo se debe determinar el componente que proveerá la energía mecánica y establecer el espacio necesario para acoplar un generador eléctrico en el mismo. En este caso entre la rueda delantera y la horquilla de suspensión delantera. Otro punto importante es la disponibilidad de una fuente de suministro DC de 12 – 24 voltios para el medidor KG-140F y el voltímetro-amperímetro. También se requiere de espacio en el maletero donde quepa una batería de ácido-plomo y un inversor de 750 W. Finalmente se debe tener en cuenta la disponibilidad de imanes de neodimio en el mercado local.

Figura 40

Flujograma de requerimientos del sistema regenerativo



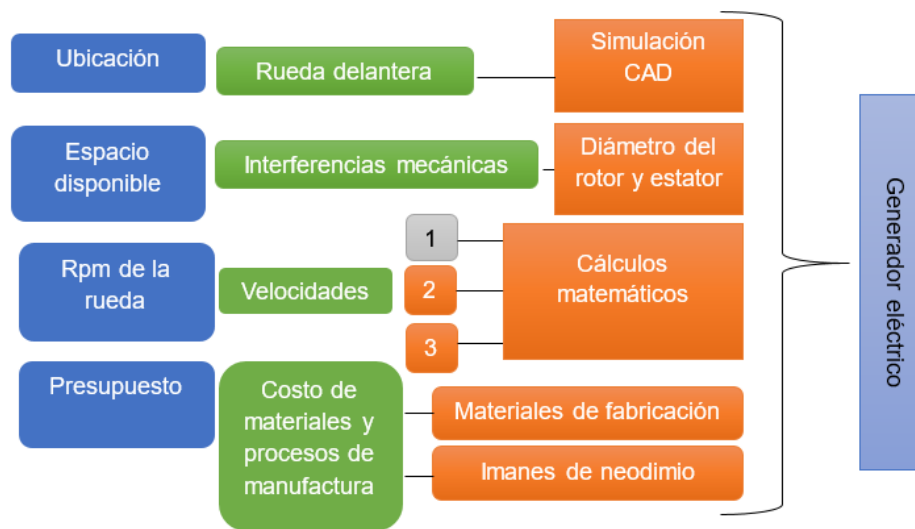
Nota. Se presenta cada etapa de energía del sistema de carga regenerativo.

Diseño matemático del generador eléctrico

Este sistema cuenta con un generador eléctrico diseñado para la geometría mecánica de la moto eléctrica presentada para el desarrollo de la investigación.

Figura 41

Flujograma de requerimientos iniciales para el diseño



Nota. Se presenta el flujograma de diseño de un generador eléctrico.

Los valores de voltaje y corriente obtenidos con el generador no serán constantes, ya que dependen de la velocidad y de las circunstancias de movilidad que intervengan en el manejo, los valores de diseño partieron en función de las revoluciones de la primera velocidad.

Tabla 8

Valores de diseño

Rpm de diseño	480 - 650 máx.
Espacio disponible	5 cm de ancho x 21 cm de diámetro
Voltaje de salida	15-20 v
Corriente de salida	0-2 A

Nota. Se presentan los valores esenciales que se consideran previo al diseño matemático.

La geometría del generador eléctrico inicia con el fundamento matemático que considera el valor de potencia necesaria que el sistema debe entregar.

Potencia de partida

La potencia de partida (W) se estima en función de la energía que se requiere para cargar el sistema extra a implementar, este sistema en su circuito de carga cuenta con una batería de ácido plomo de 12 voltios, la misma que almacena la energía, para luego suministrarla al sistema inversor.

Ecuación 7

Cálculo de la potencia requerida (Watts)

$$W = I * V$$

Donde:

- *W = Potencia en Watts*
- *I = corriente en Amperios*
- *V = voltaje en Voltios*

A continuación se describen cuatro puntos que la investigación abordó para el desarrollo del generador eléctrico:

1 Tipo de corriente de salida: Continua

2 Voltaje de salida: Este valor varía de 13 a 20 voltios

3 Corriente de salida: 0 – 2 Amperios

-El generador debe producir valores de carga en la velocidad a partir de la primera velocidad.

-El generador es síncrono.

-Radio del rotor: 30 mm=0.003 m

-Velocidad máxima de la moto= 55 – 60 km/h

-La frecuencia varía en función de las rpm

-La primera velocidad alcanza 480 rpm

El valor de rpm inicial es demasiado bajo para generar electricidad por tal motivo, se implementa un sistema de transmisión por banda que multiplique las rpm ya que la condición establece que genere 12 voltios con la primera velocidad que solo alcanza 480 rpm.

4 Potencia producida por el generador eléctrico:

$$W = 2 A (\text{Valor máximo}) * 20V (\text{Valor máximo})$$

$$W = 40 \text{ Watts}$$

Potencia del generador: 40 W

Cuando la frecuencia de trabajo es un valor conocido y se requiere calcular el número de polos se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 8

Relación entre velocidad, frecuencia y número de polos

$$N = \frac{f * 60}{p}, rpm$$

Ecuación 9

Cálculo del mecanismo de transmisión por banda

Datos iniciales:

Diámetro de la polea conducida=44 mm

Rpm de entrada=480 rpm

Rpm deseadas=2400 rpm

$$i = \frac{R2}{R1} = \frac{2400}{480} = 5$$

Donde:

- $R2 = rpm \text{ de salida}$
- $R1 = rpm \text{ de entrada}$
- $i = \text{relación de transmisión}$

$$i = \frac{D2}{D1} = 5$$

Donde:

- $D2 = \text{Diámetro de polea conducida (cm)}$
- $D1 = \text{diámetro de polea conductora (cm)}$

Polea disponible= polea conducida= 44 mm

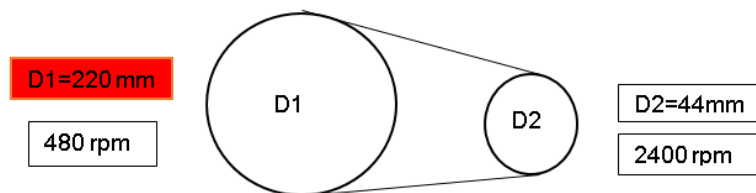
Entonces:

$$\frac{N1}{N2} = \frac{D2}{D1}$$

$$D1 = \frac{D2 * N2}{N1} = \frac{44 * 2400}{480} = 220\text{mm} = 22\text{cm}$$

Figura 42

Relación de transmisión

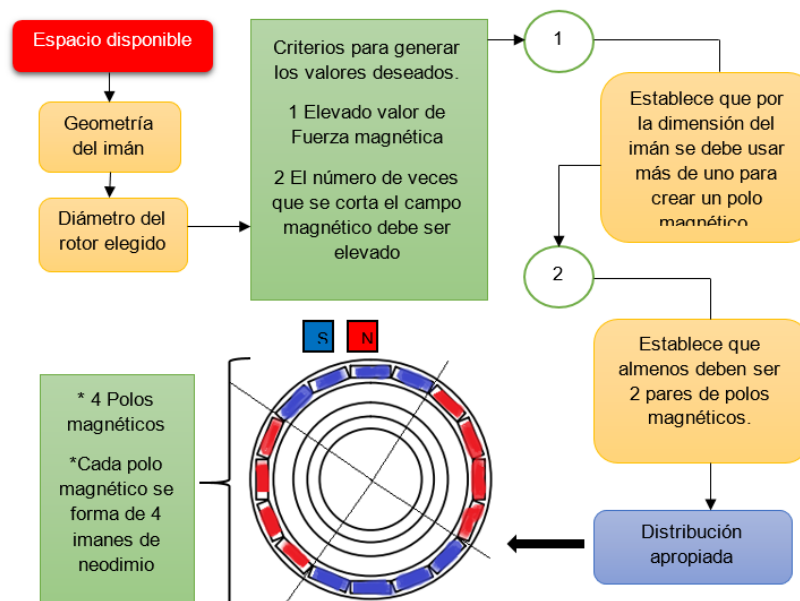


Nota. Se presenta una ilustración de los diámetros de la polea conductora y conducida.

Número de polos magnéticos

Figura 43

Diagrama de flujo para elegir el número de polos magnéticos



Nota. Se presenta el diagrama para elegir un número de polos magnéticos apropiado en función de la geometría del imán y el diámetro del rotor disponible.

Tabla 9

Número de polos y cantidad de imanes que lo forman

Número de polos N y S	4 (2 pares de polos)
Imanes que forman cada polo magnético	4

Nota. Se presenta el arreglo de imanes para formar cada polo magnético.

Luego solo resta elegir la combinación de ranuras de acuerdo a los siguientes factores como:

- Espacio disponible
- Proceso de manufactura
- Presupuesto
- Adaptaciones mecánicas
- Factor de empaquetamiento
- Proceso de bobinado

Nota: El giro del rotor parte de estos datos para los siguientes cálculos: Se asume que la rueda delantera se mueve a las mismas rpm que la rueda de tracción posterior que contiene el motor eléctrico.

El siguiente punto es elegir el número de ranuras por polo, al ser un alternador monofásico mientras más ranuras sería mejor, pero el diseñador debe considerar el espacio con el que dispone, además del diámetro exterior del rotor seleccionado, porque es una limitante a la hora de elegir un número de ranuras apropiado, finalmente este valor debe ser múltiplo para el número de polos.

Los valores apropiados y múltiplos de 4 polos son 8 -12 -16, para lo cual se realiza el cálculo geométrico de 8 y 12 para elegir un número conveniente. Entonces se analiza el perímetro del estator en base al valor del radio interno del rotor.

El valor del entrehierro es igual a 1 mm por lo que:

$$R_{si} = \text{radio interno del estator} = R_{ri}(\text{radio interno del rotor}) + 1\text{mm} = 30 + 1 = 31\text{mm}$$

Por lo que el perímetro resulta:

$$P_{str} = 2 * \pi * R_{si}$$

$$P_{str} = 2 * \pi * 31 = 194.77mm$$

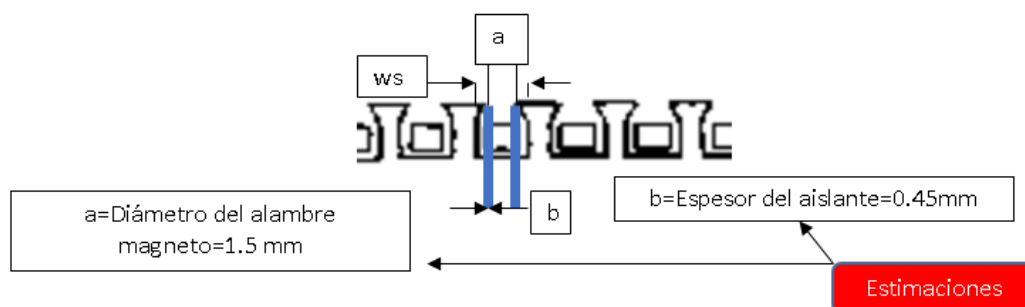
La abertura de la ranura toma en cuenta los siguientes puntos:

- Tipo de aislante a utilizar
- Proceso para realizar el bobinado (manual o por máquina)
- Tipo de bobinado a utilizar (concentrados o distribuidos)
- Factor de empaquetamiento
- Espesor del aislante

La investigación toma en cuenta un bobinado concentrado, es decir no hay devanados superpuestos o por capas y el proceso de bobinado es manual con alambre magneto calibre 24.

Figura 44

Estimación geométrica del número de ranuras



Nota. Cada estimación se realiza en función del calibre AWG que se puede utilizar.

$$\text{Ancho de la ranura } (ws) = a + 2 * b$$

$$ws = 1.5 + 2 * 0.45 = 2.4 \cong 3mm \text{ (valor adecuado)}$$

Para 12 ranuras:

$$12 * 3 = 36mm$$

$$P_{str} - 36mm = 194.77 - 36 = 158.77 \div 12 \text{ ranuras} = 13.23mm$$

Para 16 ranuras:

$$16 * 3 = 48mm$$

$$P_{str} - 48mm = 194.77 - 48 = 146.77 \div 16 \text{ ranuras} = 9.17mm$$

Ambos valores parecen oportunos pero a mayor número de ranuras el espacio para el cobre disminuye, esto se relaciona directamente con el factor de empaquetamiento que al ser manual tendrá un valor bajo, por lo que se considera oportuno elegir la siguiente combinación:

- **Ns=12** ranuras
- **Nm=4** polos magnéticos

Ecuación 10

Velocidad mecánica (rad/s)

$$w_m = \left(\frac{\pi}{30} * Sr\right)$$

Donde:

- $w_m =$ *Velocidad mecánica* ($\frac{rad}{s}$)
- $Sr =$ *Velocidad nominal* (rpm)

Desarrollo:

$$w_m = \frac{\pi}{30} * Sr = \frac{\pi}{30} * 2400 \text{ rpm} = 80\pi = 251.327 \frac{rad}{s}$$

Ecuación 11

Velocidad eléctrica (rad/s)

$$w_e = \left(\frac{Nm}{2} * w_m\right)$$

Donde:

- $Nm =$ *Número de imanes* (polos magnéticos)

Desarrollo:

$$w_e = \left(\frac{4}{2} * 251.327\right) = 160\pi = 502.654 \frac{rad}{s}$$

Ecuación 12

Frecuencia eléctrica (Hz)

$$fe = \frac{w_e}{2\pi}$$

Donde:

- $f_e = \text{frecuencia eléctrica (Hz)}$

Desarrollo:

$$f_e = \frac{\omega_e}{2\pi} = \frac{160\pi}{2\pi} = 80 \text{ Hz}$$

Tabla 10

Parámetros iniciales del generador eléctrico

Parámetros principales	
Especificación	Valor
Potencia	40 W
Velocidad de rotación del rotor	2400 rpm
Tensión de fase	20 v
Frecuencia	80 Hz
Pares de polos	2

Nota. Se presentan los valores de partida en el diseño.

Ecuación 13

Torque en caballos de fuerza (Nm-Newton metro)

$$T = 746 * \frac{P_{HP}}{\omega_m}$$

Nota: Evitar la confusión entre Nm (número de imanes) y N.m. (Newton por metro).

Donde:

- $P_{HP} = \text{Horsepower (Hp)}$
- $\omega_m = \text{Velocidad mecánica } (\frac{\text{rad}}{\text{s}})$

Desarrollo:

$$T = 746 * \frac{P_{HP}}{\omega_m} = 746 * \frac{0.05 \text{ Hp}}{80\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 0.159 \text{ Nm}$$

Nota. Este valor es bajo debido a la elevada velocidad y baja potencia del diseño (20 V y 2

A = 40 W = 0.0536 Hp).

Ecuación 14

Número de ranuras (N_s)

$$N_s = N_{sp} * N_{ph}$$

Nota. El número de ranuras siempre es múltiplo del número de núcleos magnéticos.

Donde:

- N_{sp} = Número de ranuras por polo
- N_{ph} = Número de fases

Desarrollo:

$$N_s = N_{sp} * N_{ph} \quad 12 * 1 = 12 \text{ ranuras}$$

Ecuación 15

Número de ranuras por polo por fase (N_{spp})

$$N_{spp} = \frac{N_{sp}}{N_m}$$

Donde:

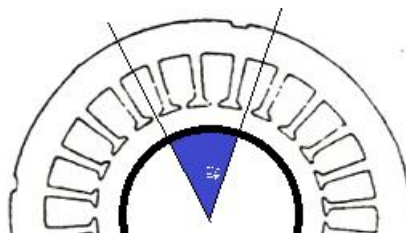
- N_{sp} = Número de ranuras por fase
- N_m = Número de imanes

Desarrollo:

$$N_{spp} = \frac{N_{sp}}{N_m} = \frac{12}{4} = 3$$

Figura 45

Número de ranuras por polo por fase



Nota. A cada polo magnético le corresponde 3 ranuras. No se debe olvidar que cada polo magnético comparte la mitad de una ranura en cada extremo.

Ecuación 16

Número de ranuras por polo magnético (N_{sm})

$$N_{sm} = N_{spp} * N_{ph}$$

Donde:

- N_{spp} = número de ranuras por polo por fase
- N_{ph} = Número de fases

Desarrollo:

$$N_{sm} = N_{spp} * N_{ph} = 3 * 1 = 3$$

Ecuación 17

Fracción bobina-polo (α_{cp})

$$\alpha_{cp} = \frac{\text{int}(N_{spp})}{N_{spp}}$$

Nota: Si la fracción bobina polo equivale a 1 entonces $\tau_c = \tau_p$

Donde:

- $\text{int}(x)$ = significa que se toma en cuenta el valor entero de x
- N_{spp} = número de ranuras por polo por fase
- τ_c y τ_p = se definen más adelante

Desarrollo:

$$\alpha_{cp} = \frac{\text{int}(N_{spp})}{N_{spp}} = \frac{\text{int}(3)}{3} = 1$$

Ecuación 18

Paso angular del polo magnético (θ_p)

$$\theta_p = \frac{2\pi}{N_m}$$

Donde:

- $Nm = \text{número de imanes}$

Desarrollo:

$$\theta_p = \frac{2\pi}{Nm} = \frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2} (90^\circ)$$

Ecuación 19

Paso angular de la ranura (θ_s)

$$\theta_s = \frac{2\pi}{Ns}$$

Donde:

- $Ns = \text{número de ranuras}$

Desarrollo:

$$\theta_s = \frac{2\pi}{Ns} = \frac{2\pi}{12} = \frac{\pi}{6} (30^\circ)$$

Ecuación 20

Paso de ranura (radianes eléctricos, θ_{se})

$$\theta_{se} = \frac{\pi}{Nsm} = \frac{\pi * Nm}{Ns}$$

Donde:

- $Nsm = \text{Número de ranuras por polo magnético}$
- $Ns = \text{Número de ranuras}$

Desarrollo:

$$\theta_{se} = \frac{\pi}{Nsm} = \frac{\pi * Nm}{Ns} = \frac{\pi * 4}{12} = \frac{\pi}{3} (60^\circ)$$

Ecuación 21

Radio interior del estator (m)

$$R_{si} = R_{ro} + g$$

Donde:

- $R_{si} = \text{radio interno del estator}$
- $R_{ro} = \text{radio externo del rotor}$

- $g = \text{entrehierro}$

Desarrollo:

$$R_{si} = R_{ro} + g = 30\text{mm} + 1\text{mm} = 31\text{mm} = 0.031\text{ (m)}$$

Ecuación 22

Paso del polo magnético en metros (τ_p)

$$\tau_p = R_{si} * \theta_p$$

Donde:

- $R_{si} = \text{radio interno del estator}$
- $\theta_p = \text{paso angular del polo}$

Desarrollo:

$$\tau_p = R_{si} * \theta_p = 0.031 * \frac{\pi}{2} = 0.04869\text{ m} = \frac{31\pi}{2000}, (\text{m}) = 48.69\text{ mm}$$

Ecuación 23

Paso de la bobina (τ_c)

$$\tau_c = \alpha_{cp} * \tau_p$$

Donde:

- $\alpha_{cp} = \text{fracción bobina - polo}$

Desarrollo:

$$\tau_c = \alpha_{cp} * \tau_p = 1 * \frac{31\pi}{2000} = \frac{31\pi}{2000} (\text{m})$$

Ecuación 24

Paso de la ranura en el entrehierro (τ_s)

$$\tau_s = R_{si} * \theta_s$$

Donde:

- $\theta_s = \text{paso angular de la ranura}$

Desarrollo:

$$\tau_s = R_{si} * \theta_s = 0.031 * \frac{\pi}{6} = \frac{31\pi}{6000}, (\text{m})$$

Ecuación 25

Ancho del diente en el espacio de aire (ωt)

$$\omega t = \tau_s - \omega_s = \frac{31\pi}{6000} - \frac{3\text{mm}(\text{estimado})}{1000} m = 0.01323 m = 13.23 \text{ mm}$$

Nota. Se debe procurar que el ancho del diente sea un valor entero, por lo cual la parte decimal se pasa al valor de la abertura de la ranura que se suma a la que más adelante se obtiene.

Donde:

- $\omega_s = \text{Abertura de ranura en metros}$

Cálculo de la abertura de ranura

La parte decimal del ancho del diente, se suma el ancho de la ranura.

$$P (\text{perímetro}) = \pi * D_{si} = \pi * 62\text{mm} = 194.7787$$

$$13\text{mm}(\text{Longitud del didente } \omega t) * 12 (\text{dientes}) = 156\text{mm}$$

$$\omega_s = P_{si} - Ed$$

$$\omega_s = 194.7787 - 156 = \frac{38.77}{12 \text{ ranuras}} = 3.23 \text{ mm}$$

Entonces ωt :

$$\omega t = \tau_s - \omega_s = \frac{31\pi}{6000} - \frac{3.23}{1000} = 0.013m = 13 \text{ mm}$$

Donde:

- $D_{si} = \text{diámetro interno del estator}$
- $P_{si} = \text{perímetro interno del estator}$
- $Ed = \text{longitud ocupada por los dientes en el perímetro del estator}$

Ecuación 26

Factor de distribución

$$k_d = \frac{\text{sen} \left(\frac{N_{spp} * \theta_{se}}{2} \right)}{N_{spp} * \text{sen} \left(\frac{\theta_{se}}{2} \right)} = 1$$

Donde:

- $\text{Sen}(x) = \text{función seno}$
- $N_{spp} = \text{número de ranuras por polo por fase}$
- $\theta_{se} = \text{Paso de ranura en radianes eléctricos}$

Desarrollo:

$$kd = \frac{\text{sen}\left(\frac{1 * \frac{\pi}{3}}{2}\right)}{1 * \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right)} = 1$$

Ecuación 27

Factor de paso (k_p)

$$k_p = \alpha_{cp}$$

$$1 = 1$$

Ecuación 28

Factor de concentración de flujo (C_ϕ)

$$C_\phi = \frac{2 \alpha_m}{1 + \alpha_m} = \frac{2 * (0.9430)}{1 + 0.9430} = 0.9707$$

Donde:

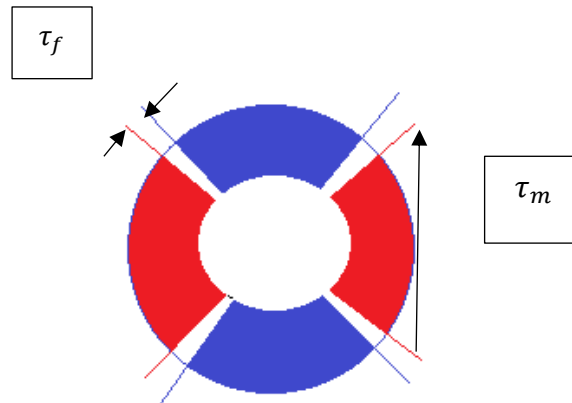
- $\alpha_m = \text{Fracción magnética}$
- $Pro = \text{Perímetro exterior del rotor}$

Cálculo de la fracción magnética

$$\tau_m = \text{ancho del imán (total del polo)} = \frac{Pro}{Nm}$$

$$\pi 2r = 2(30\text{mm})\pi = \frac{60\pi \text{ mm}}{4(\text{número de polos})} = 15\pi$$

$$\tau_m = 15\pi - (0.6 * 2) = \frac{45.9238898}{1000} = 0.04592$$

Figura 46*Longitud de cada polo*

Nota. Rotor del generador eléctrico compuesto por 4 polos.

Número de imanes

$$N^{\circ} \text{ de imanes por polo} = \frac{\tau_m}{\tau_{mi}}$$

$$N^{\circ} \text{ de imanes por polo} = \frac{15\pi}{10} = 4.7 \text{ imanes} \approx 4 \text{ imanes por polo}$$

Donde:

- τ_{mi} = Ancho de un solo imán

Nota.- En el espacio dispuesto solo ingresan 4 imanes, el 0.7 no corresponde a una dimensión de un imán en el mercado.

Entonces:

$$\alpha_m = \frac{\tau_m}{\tau_p} = \frac{0.04592}{\frac{31\pi}{2000}} = 0.9430$$

Al realizar este cálculo se toma en cuenta la disponibilidad del imán y se ajusta el diámetro del rotor para que todo encaje.

Ecuación 29*Coefficiente de permeabilidad*

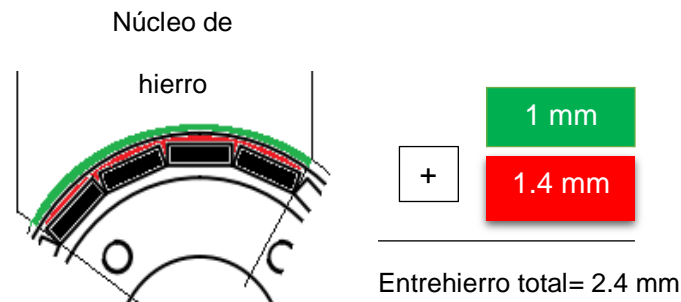
$$\text{Cálculo de } l_m = \text{alto del imán} = 3\text{mm} = 0.003\text{m}$$

$$g = \text{entrehierro} = 2\text{mm} = 0.0024\text{m}(\text{revisar geometría de diseño})$$

Entrehierro geométrico= 0.001 m

Figura 47

Entrehierro real



Nota. El valor de entrehierro real se considera desde el imán del interior hasta el diente del núcleo de hierro del estator

$$P_c = \frac{lm}{g * C_\phi} = \frac{0.003}{0.0024 * 0.9707} = 1.2877$$

Ecuación 30

Factor de fuga del imán (kml)

$$kml = 1 + \frac{4 * lm}{\pi * u_R * \alpha_m * \tau_p} * \ln \left[1 + \pi * \frac{g}{(1 - \alpha_m) * \tau_p} \right]$$

Donde:

- u_R = Permeabilidad relativa
- lm = longitud del imán
- u_R = Permeabilidad de retroceso del imán

Nota. El valor típico de u_R se encuentra entre 1.0 y 1.1; tomar en cuenta que el valor de 1 describe una operación más eficiente)

α_m = Fracción magnética

τ_p = Paso polar

Desarrollo:

$$kml = 1 + \frac{4 * 0.003}{\pi * 1 * 0.9430 * \frac{31\pi}{2000}} * \ln \left[1 + \pi * \frac{0.0024}{(1 - 0.9430) * \frac{31\pi}{2000}} \right]$$

$$kml = 1 + (0.08318367624 * 1.31277) = 1.1092$$

Ecuación 31

Entrehierro efectivo para el coeficiente de Carter

$$g_e = g + \frac{lm}{u_R}$$

Donde

- g_e = entrehierro efectivo para el coeficiente de carter en metros
- g = entrehierro
- lm = longitud del imán
- u_R = Permeabilidad de retroceso del imán

Desarrollo:

$$g_e = 0.0024 + \frac{0.003}{1} = 0.0054m = 5.4 \text{ mm}$$

Ecuación 32

Coefficiente de Carter

$$k_c = \left[1 - \frac{1}{\frac{\tau_s}{\omega_s} * \left(5 * \frac{g_e}{\omega_s} + 1 \right)} \right]^{-1}$$

Donde:

- ω_s = Abertura de ranura en metros
- τ_s = Paso de ranura en el entrehierro
- g_e = entrehierro efectivo para el coeficiente de carter

El coeficiente de Carter describe la influencia de las ranuras, su forma y geometría en el flujo magnético del generador.

Desarrollo:

$$kc = \left[1 - \frac{1}{\frac{\frac{31\pi}{6000}}{\frac{3.23}{1000}} * \left(5 * \frac{0.0054}{\frac{3.23}{1000}} + 1 \right)} \right]^{-1}$$

$$kc = 1.021724$$

Ecuación 33

Área del entrehierro

$$Ag = \frac{\tau_p * L * (1 + \alpha_m)}{2}$$

Donde:

- Ag = área del entrehierro
- τ_p = paso polar
- L = Longitud del imán en metros
- α_m = Fracción magnética

Desarrollo:

$$Ag = \frac{\frac{31\pi}{2000} * 0.015 * (1 + 0.9430)}{2} = 0.00070963931 \text{ m}^2 = 709.6393 \text{ mm}^2$$

Ecuación 34

Densidad de flujo en el entrehierro (B_g)

$$B_g = \frac{C_\phi}{1 + \frac{u_R * kc * kml}{Pc}} * Br$$

Donde:

- C_ϕ = concentración de flujo magnético
- u_R = Permeabilidad de retroceso del imán
- kPc = coeficiente de permeabilidad
- Br = remanencia magnética (en Teslas)

Desarrollo:

$$Bg = \frac{0.9707}{1 + \frac{1 * 1.028456 * 1.1092}{1.2877}} * Br$$

Valor de remanencia magnética (Br), del imán utilizado para el generador:

Figura 48

Remanencia magnética de diferentes imanes

Serie	El grado	Br		El HCB		Hci		(BH) máx.		L/D=0.7	
		T	Kg.	KA/m	KOe	KA/m	KOe	KJ/m ³	MGOe	°C.	°F
N	N35	1.17-1.24	11.7-12.4	≥860	≥10,8	≥955	≥12	263-295	33-37	80	176
	N38	1.22-1.30	12.2-13.0	≥860	≥10,8	≥955	≥12	287-318	36-40	80	176
	N40	1.26-1.32	12.6-13.2	≥860	≥10,8	≥955	≥12	302-334	38-42	80	176
	N42	1.29-1.35	12.9-13.5	≥860	≥10,8	≥955	≥12	318-350	40-44	80	176
	N45	1.32-1.38	13.2-13.8	≥860	≥10,8	≥955	≥12	334-366	42-46	80	176
	N48	1.37-1.43	13.7-14.3	≥836	≥10,5	≥876	≥11	358-390	45-49	80	176
	N50	1.40-1.45	14.0-14.5	≥836	≥10,5	≥876	≥11	374-406	47-51	80	176
	N52	1.42-1.48	14,2-14,8	≥836	≥10,5	≥876	≥11	390-422	49-53	80	176
	N54	1.45-1.51	14.5-15.1	≥836	≥10,5	≥876	≥11	398-438	50-55	80	176

Nota. Se presentan los valores del imán de Neodimio N52

$$Br_{total} = \text{número de imanes por polo} * Br_{de cada imán}$$

Esta afirmación es verídica de acuerdo a como se pilen los imanes. Es decir el valor de Br no es lo mismo en un arreglo de imanes uno sobre otro que uno alado de otro.

Figura 49

Diferente disposición de imanes



Nota. El arreglo de imanes interviene en el aumento de su remanencia y fuerza magnética.

Desarrollo:

$$Bg = \frac{0.9707}{1 + \frac{1 * 1.028456 * 1.1092}{1.2877}} * 1.42 = 0.7309 T$$

Ecuación 35

Flujo magnético en el entrehierro

$$\Phi_g = B_g * A_g$$

Donde:

- $\Phi_g =$ *flujo magnético en el entrehierro (Wb)*
- $B_g =$ *Densidad de flujo magnético en el entrehierro (T)*
- $A_g =$ *área del entrehierro(m²)*

Desarrollo:

$$\Phi_g = 0.72166 \text{ T} * 0.00070963931 \text{ m}^2 = 0.00051212131 \text{ Wb}$$

Ecuación 36

Ancho del hierro trasero

$$W_{bi} = \frac{\Phi_g}{2 * B_{\text{máx.}} * K_{st} * L}$$

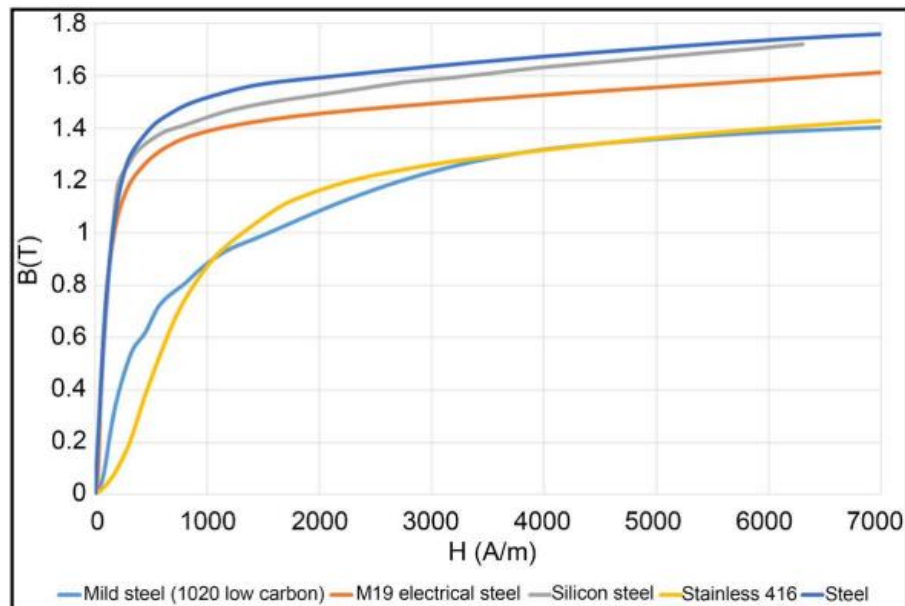
Donde:

- $W_{bi} =$ *ancho del hierro trasero (m)*
- $\Phi_g =$ *flujo magnético en el entrehierro (Wb)*
- $B_{\text{máx.}} =$ *Densidad de flujo magnético máximo (T)*
- $k_{st} =$ *Factor de apilamiento*

A continuación de la siguiente gráfica se debe estimar el valor de magnetización máxima ($B_{\text{máx.}}$), para el material seleccionado en el núcleo ferromagnético correspondiente a acero A-430:

Figura 50

Curva de magnetización de diferentes materiales



Nota. Acero al silicio (línea ploma) (1.7 T). Curva de magnetización para diferentes metales.

Tomado de (Kappatou, Zalokostas, & Spyrtos, 2016)

Los coeficientes de la fórmula mostrada describen características magnéticas del material de la chapa magnética utilizada en la laminación y constitución del núcleo.

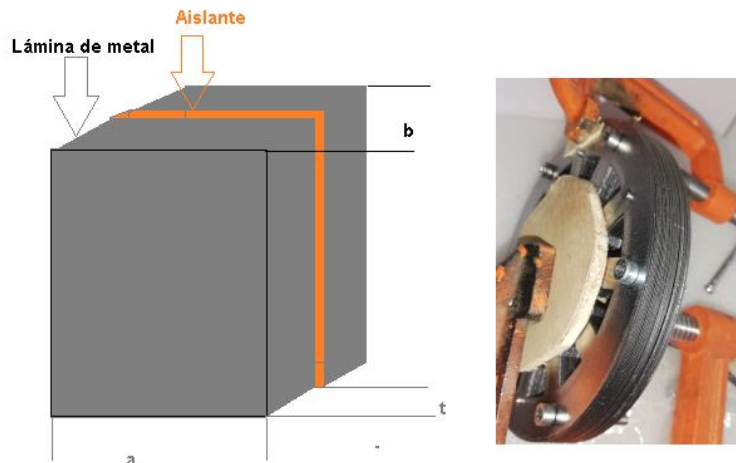
($B_{m\acute{a}x.}$), Es un valor obtenido de la curva de magnetización de un material ferromagnético, en el caso del acero escogido para la laminación, el acero en cuestión debe poseer en su composición cierto porcentaje de silicio que evite una excesiva saturación. De las características del acero escogido: Acero inoxidable A-430 con las siguientes características: (Si=1%; C=0.08%; Mn= 1%)

Cálculo del factor de apilamiento (kst)

El factor de apilamiento describe la relación que existe entre el número de láminas, su espesor y la dimensión total del núcleo. El factor de apilamiento se utiliza al calcular la densidad de flujo magnético dentro del núcleo.

Figura 51

Cálculo del factor de apilamiento kst



Nota. El factor de apilamiento determina la cantidad de hierro que se debe utilizar en el núcleo ferromagnético.

$$fa = kst = \frac{n * t}{b}$$

Donde:

n = numero de laminas en el núcleo

t = espesor de cada lamina

b = largo del núcleo una vez apiladas y barnizadas todas las láminas

De los resultados obtenidos se elige el siguiente material en un total de 21 láminas de acero inoxidable para formar el núcleo ferromagnético.

$$\text{Acero A - 430 - espesor} = 0.5 \text{ mm}$$

Es importante conocer el espesor del núcleo y el número de láminas:

$$fa = kst = \frac{21 * 0.5}{14.6} = 0.719178$$

Sustituir todos los valores calculados:

$$Wbi = \frac{0.00051868398 \text{ T} \cdot \text{m}^2}{2 * 1.7 \text{ T} * 0.719 * 0.015 \text{ m}} = 0.014145 \text{ m} = 14.14 \text{ mm}$$

Ecuación 37*Ancho del diente*

$$Wtb = \frac{2}{Nsm} * Wbi$$

Donde:

- $Wtb = \text{Ancho del diente, } m$
- $Nsm = \text{Número de ranuras por polo}$
- $Wbi = \text{ancho del hierro trasero}$

Desarrollo:

$$Wtb = \frac{2}{3} * 0.014145 = 0.00943 \text{ m} = 9.43 \text{ mm}$$

Ecuación 38*Radio del hierro trasero del estator (Rsb)*

$$Rsb = Rso - Wbi$$

Donde:

- $Rso = \text{radio exterior del estator, } m$
- $Wbi = \text{ancho del hierro trasero}$

Desarrollo:

$$Rsb = Rso - Wbi = 0.06 - 0.014145 = 0.045855 \text{ m}$$

Ecuación 39*Radio interno del rotor (Rri)*

$$Rri = Rro - lm - Wbi$$

Donde:

- $Rro = \text{Radio exterior del rotor, } m$
- $lm = \text{altura del imán, } m$
- $Wbi = \text{ancho del hierro trasero, } m$

Desarrollo:

$$Rri = 0.03 - 0.003 - 0.014145 = 0.012855 \text{ m}$$

Ecuación 40

Ancho inferior de la ranura (Wsb)

$$Wsb = Rsb * \theta_s - Wtb$$

Donde:

- $Rsb =$ radio del hierro trasero del estator, m
- $\theta_s =$ ángulo de paso de ranura
- $Wtb =$ Ancho del diente, m

Desarrollo:

$$Wsb = 0.045855 * \frac{\pi}{6} - 0.00943 = 0.0145796 \text{ m} = 14.57 \text{ 96mm}$$

Ecuación 41

Ancho interior de la zapata de la ranura (Wsi)

$$Wsi = (Rsi + \alpha_{sd} * Wtb) * \theta_s - Wtb$$

Donde:

- $Rsi =$ Radio interior del estator, m
- $\alpha_{sd} =$ Fracción de intervalo de zapata
- $Wtb =$ Ancho del diente, m
- $\theta_s =$ paso angular de la ranura

Desarrollo:

$$\alpha_{sd} = \frac{d1 + d2}{Wtb}$$

$$d1 = 2 \text{ mm}$$

$$d2 = 2 \text{ mm}$$

$$\alpha_{sd} = \frac{2 + 2}{9.43} = 0.424178$$

$$Wsi = (Rsi + \alpha_{sd} * Wtb) * \theta_s - Wtb$$

$$Wsi = (0.031 + 0.424178 * 0.00943) * \frac{\pi}{6} - 0.00943 = 0.00889595 \text{ m} = 8.89 \text{ mm}$$

Ecuación 42

Fracción de ranura dentro de la zapata (α_s)

$$\alpha_s = \frac{Wsi}{Wsi + Wtb}$$

Donde:

- Wsi = ancho interior de la zapata de la ranura
- Wtb = ancho del diente

Desarrollo:

$$\alpha_s = \frac{0.00889595}{0.00889595 + 0.00943} = 0.485429$$

Ecuación 43

Profundidad total de la ranura (ds)

$$ds = Rsb - Rro - g$$

Donde:

- Rsb = radio del hierro trasero del estator
- Rro = radio exterior del rotor
- g = entrehierro

Desarrollo:

$$ds = 0.045855 - 0.03 - 0.001 = 0.014855 \text{ m} = 14.855 \text{ mm}$$

Ecuación 44

Profundidad de la ranura del conductor ($d3$)

$$d3 = ds - \alpha_{sd} * Wtb$$

Donde:

- ds = profundidad total de la ranura

- $\alpha_{sd} = \text{fracci[on de intervalo de zapata]}$
- $Wtb = \text{ancho del diente}$

Desarrollo:

$$d3 = 0.014855 - (0.424178 * 0.00943) = 0.010855 \text{ m} = 10.855 \text{ mm}$$

Ecuación 45

Profundidad del zapato dividida entre d1 y d2

$$d1 + d2 = \alpha_{sd} * Wtb$$

$$4 = 0.424178 * 0.00943$$

$$4 = 4$$

Ecuación 46

Área del conductor (As)

$$As = d3 \left[\theta_s \left(Rsb - \frac{d3}{2} \right) - Wtb \right]$$

Donde:

- $d3 = \text{profundidad de la ranura para el conductor}$
- $\theta_s = \text{paso polar}$
- $Rsb = \text{radio del hierro trasero del estator}$
- $Wtb = \text{ancho del diente}$

Desarrollo:

$$As = 0.010855 * \left[\frac{\pi}{6} \left(0.045855 - \frac{0.010855}{2} \right) - 0.00943 \right]$$

$$As = 0.0001274137 \text{ m}^2$$

Ecuación 47

Número de vueltas por ranura (ns)

$$E_f = 4.44 * kd * ka * \Phi_{\text{máx.}} * N_f * f$$

Donde:

- $E_f =$ fuerza electromotriz engendrada (V)
- $kd =$ factor de distribución
- $ka =$ factor de acortamiento o de paso
- $\Phi_{m\acute{a}x.} =$ flujo magnético máximo que abarca una bobina
- $N_f =$ Número de espiras por fase
- $f =$ frecuencia

Para el cálculo del número de espiras en cada bobina se debe considerar lo siguiente:

Voltaje: 20 V

$$14 * 10\% = 1.4 + 14 = 15.4 \text{ (Valor apropiado)}$$

$$14 * 40\% = 5.6 + 14 = 19.6 \text{ (Valor de diseño)} \cong 20V$$

Nota.- Se esperaba un valor de 20 voltios, para este caso se debe calcular con un 40 % de sobredimensionamiento por posibles imperfectos. Al final este valor de voltaje es regulado pero el regulador necesita un valor de voltaje de entrada superior al de salida.

Desarrollo:

$$\Phi_{m\acute{a}x.} = \frac{\Phi g}{Ns} = \frac{0.00051868398 \text{ Wb}}{12} = 0.00004322 \text{ Wb}$$

$$E_f = 4.44 * kd * ka * \Phi_{m\acute{a}x.} * N_f * f$$

$$N_f = \frac{E_f}{4.44 * kd * ka * \Phi_{m\acute{a}x.} * f}$$

$$N_f = \frac{20}{4.44 * 1 * 1 * 0.00004322 * 80} = 1302.78 \text{ espiras por fase}$$

Para un sistema monofásico de 12 bobinas esto resulta:

$$\frac{\text{int}(N_f)}{12} = \frac{1302}{12} = 108.5 \cong 109 \text{ espiras por bobina}$$

Ecuación 48

Pico de fuerza contra electromotriz (e_{max})

$$e_{max} = Nm * kd * kp * Bg * L * Rro * Nspp * n_s * w_m$$

$$e_{max} = 4 * 1 * 1 * 0.7309 * 0.015 * 0.03 * 1 * 109 * 80\pi = 36.04 V$$

Ecuación 49

Corriente máxima que soporta por ranura (I_s , en amperios)

$$I_s = \frac{T}{Nm * kd * kp * Bg * L * Rro * Nspp}$$

Donde:

- $T =$ torque en N. m. (newton metro)

Desarrollo:

$$I_s = \frac{0.159}{4 * 1 * 1 * 0.7309 * 0.015 * 0.03 * 3} = 40.28 A$$

Nota. De la fórmula se suprime el factor de sesgo (ks) porque se emplea un imán cuadrado sin sesgo o inclinación.

Ecuación 50

Corriente de fase (I_{ph})

$$I_{ph} = \frac{I_s}{Nph * n_s}$$

Donde:

- $Nph =$ número de fases
- $n_s =$ número de vueltas

Desarrollo:

$$I_{ph} = \frac{40.28}{1 * 109} = 0.36 A$$

Ecuación 51

Densidad de corriente máxima en el conductor (J_c)

$$J_c = \frac{I_s}{kcp * As}$$

Donde:

- $kcp =$ Factor de empaque del conductor

Nota. Kcp por lo general es un valor inferior al 50%, el valor exacto de este parámetro se conoce a través de la experiencia (Hanselman, p. 133)

Según (Miller, p. 102), se adopta un valor del 15%,

Desarrollo:

$$Jc = \frac{40.28}{0.15 * 0.0001274137} = 2107570.327 \frac{A}{m^2} = 2.10 \frac{A}{mm^2}$$

Ecuación 52

Densidad de flujo máximo en la ranura (Bs max)

$$|B_s|_{max} = \frac{u_0 * Is}{\omega_s}$$

Donde:

- $u_0 = \text{permeabilidad de vacio } (4\pi \times 10^{-7})$
- $w_s = \text{abertura de la ranura}$

Desarrollo:

$$|B_s|_{max} = \frac{4\pi \times 10^{-7} * 40.28}{0.00323} = 0.01567T = 156.71 \text{ Gauss}$$

Ecuación 53

Resistencia de la ranura (Rs)

$$Rs = \frac{\rho * n_s^2 * L}{kcp * As}$$

Donde:

- $\rho = \text{Resistividad del conductor y coeficiente de temperatura del cobre}$
- $kcp = \text{Factor de empaque del conductor}$
- $As = \text{área del conductor}$

Desarrollo:

$$\rho = 1.7 \times 10^{-8}$$

$$Rs = \frac{1.7 \times 10^{-8} * 109^2 * 0.015}{0.15 * 0.0001274137} = 0.158 \Omega$$

Ecuación 54

Resistencia en la vuelta final (Re)

$$Re = \frac{\rho * n_s^2 * \pi * \tau_c}{2 * kcp * As}$$

Donde:

- $\tau_c =$ paso de bobina

Desarrollo:

$$Re = \frac{1.7 \times 10^{-8} * 109^2 * \pi * \frac{31\pi}{2000}}{2 * 0.15 * 0.0001274137} = 0.808 \Omega$$

Ecuación 55

Resistencia de fase (Rph)

$$Rph = Nsp(Rs + Re)$$

Donde:

- $Nsp =$ número de ranuras por fase

Desarrollo:

$$Rph = 12(0.158 + 0.808) = 11.592 \Omega$$

Ecuación 56

Inductancia en el entrehierro (Lg)

$$Lg = \frac{n_s^2 * u_R * u_o * L * \tau_c * kd}{4(lm + u_R * kc * g)}$$

Donde:

- $u_R =$ permeabilidad de retroceso del imán
- $\tau_c =$ paso de bobina
- $g =$ entrehierro

Desarrollo:

$$Lg = \frac{109^2 * 1 * 4\pi \times 10^{-7} * 0.015 * \frac{31\pi}{2000} * 1}{4(0.003 + 1 * 1.028456 * 1)} = 0.0008836 H = 0.88 mH = 883.6 \mu H$$

Ecuación 57

Inductancia de fuga en la ranura (L_s)

$$L_s = n_s^2 \left[\frac{u_0 * d3^2 * L}{3 * A_s} + \frac{u_0 * d2 * L}{\frac{ws + Wsi}{2}} + \frac{u_0 * d1 * L}{ws} \right]$$

Donde:

- Wsi = ancho de la zapata dentro de la ranura

Desarrollo:

$$L_s = 130^2 \left[\frac{4\pi \times 10^{-7} * 0.0091069936^2 * 0.015}{3 * 0.0001274137} + \frac{4\pi \times 10^{-7} * 0.003 * 0.015}{\frac{0.00323 + 0.0089245}{2}} + \frac{4\pi \times 10^{-7} * 0.002 * 0.015}{0.00323} \right]$$

$$L_s = 109^2 * (4.1 \times 10^{-9} + 9.30 \times 10^{-9} + 1.17 \times 10^{-8}) = 0.0002982131 \text{ H} = 0.298 \text{ mH}$$

Ecuación 58

Inductancia del final de vuelta (L_e)

$$L_e = \frac{n_s^2 * u_o * \tau_c}{8} * \ln\left(\frac{\tau_c^2 * \pi}{4 * A_s}\right)$$

Donde:

- τ_c = Paso de bobina

Desarrollo:

$$L_e = \frac{109^2 * 4\pi \times 10^{-7} * \frac{31\pi}{2000}}{8} * \ln\left(\frac{\frac{31\pi^2}{2000} * \pi}{4 * 0.0001274137}\right)$$

$$L_e = 0.000090877 * \ln(14.616) = 0.0002437 \text{ H} = 0.243 \text{ mH}$$

Ecuación 59

Inductancia de fase (L_{ph})

$$L_{ph} = N_{sp}(L_g + L_s + L_e)$$

Donde:

- N_{sp} = número de ranuras por fase

Desarrollo:

$$L_{ph} = 12 * (0.0008836 + 0.0002982131 + 0.0002437) = 0.017106H = 17.106 \text{ mH}$$

Ecuación 60

Volumen de acero del estator (V_{st})

$$V_{st} = [\pi(R_{so}^2 - R_{si}^2) - N_s * A_s] * L * k_{st}$$

Donde:

- k_{st} = factor de apilamiento
- N_s = número de ranuras
- A_s = Área del conductor
- R_{so} = radio exterior del estator
- R_{si} = radio interno del estator

Desarrollo:

$$V_{st} = [\pi(0.06^2 - 0.031^2) - 12 * 0.0001274137] * 0.015 * 0.7$$

$$V_{st} = 0.00007099783 \text{ m}^3 = 70.9978 \text{ cm}^3$$

Ecuación 61

Pérdida de potencia óhmica (Pr)

$$Pr = N_{ph} * I_{ph}^2 * R_{ph}$$

Donde:

- N_{ph} = número de fases
- I_{ph} = corriente de fase
- R_{ph} = resistencia de fase

Desarrollo:

$$Pr = 1 * 0.36^2 * 11.592 = 1.50 \text{ W}$$

Ecuación 62

Pérdidas en el núcleo (Pcl)

$$Pcl = \rho_{bi} * Vst * \Gamma(Bmax, f)$$

Donde:

- ρ_{bi} = densidad de masa del hierro posterior

Cálculo de $\Gamma(Bmax, f)$

Se refiere a la densidad de pérdida en el núcleo de acero frente a la densidad y frecuencia de flujo magnético. Este factor hace referencia al acero eléctrico que utiliza en el núcleo laminado. En este factor interviene la disponibilidad de materiales con las que el diseñador cuenta y el costo que significaría utilizarlo. El material debe tener un porcentaje de Silicio y bajo contenido en carbono, para el generador en cuestión se utilizó (Acero inoxidable A-430). $\Gamma(Bmax, f)$, según otros autores definen este factor como:

$$We = Ce * Bpk^2 * f^2, (W/kg)$$

Esta fórmula está dada por el coeficiente de Steinmetz, donde:

$$We = \text{densidad de pérdida en el núcleo de acero}$$

$$Bpk = \text{Densidad de flujo magnético máximo}$$

$$f = \text{frecuencia eléctrica}$$

$$Ce = \text{coeficiente de Steinmetz}$$

La ecuación de Steinmetz, a veces llamada ecuación de potencia, es una ecuación empírica (basada en la experiencia y observación de los hechos) que se utiliza para calcular la pérdida total de potencia (pérdidas en el núcleo) por unidad de volumen en materiales magnéticos cuando se somete a un flujo magnético externo que varía sinusoidalmente. El coeficiente Ce es un parámetro del material que generalmente se encuentran empíricamente a partir de la curva de histéresis BH del material mediante el ajuste de la curva. En los materiales magnéticos típicos, todos los coeficientes de Steinmetz varían con la temperatura. Para el cálculo de Ce se utiliza la siguiente fórmula del autor T. Miller:

Ecuación 63

Ecuación de Steinmetz

$$C_e = \frac{\pi^2 * t^2 * \sigma}{6 * \rho_m}$$

Donde:

- t = *espesor de la lámina de acero (m)*
- σ = *conductividad eléctrica del acero en ($\frac{\text{Siemens}}{\text{metro}}$)*
- ρ_m = *densidad de mas adel acero (7850 Kg/m³)*

Desarrollo:

$$C_e = \frac{\pi^2 * 0.0005^2 * 1.53 \times 10^7}{6 * 7850} = 0.0008015$$

Entonces:

$$W_e = C_e * B p k^2 * f^2, (W/kg)$$

$$W_e = 0.0008015 * 1.8^2 * 33.33^2 = 2.88, \left(\frac{W}{kg}\right) = \Gamma(B_{max}, f)$$

Finalmente se reemplaza para obtener las pérdidas en el núcleo:

$$P_{cl} = \rho_{bi} * V_{st} * \Gamma(B_{max}, f)$$

Donde:

$$\rho_{bi} = \textit{densidad de masa del acero}$$

Desarrollo:

$$P_{cl} = 7850 \frac{kg}{m^3} * 0.0000740754 m^3 * 2.88 \left(\frac{W}{kg}\right) = 1.674 W$$

Ecuación 64

Eficiencia (η)

$$\eta = \frac{T * \omega_m}{T * \omega_m + P_r + P_{cl} + P_s}$$

Donde:

- T = *Torque, Nm*

- $\omega_m = \text{velocidad mecánica}$
- $P_s = \text{Pérdidas por dispersión}$

Cálculo de P_s (Pérdidas por a la fricción, viento y otros)

P_s describe la pérdida de potencia debido a la fricción, viento y otros componentes menos dominantes. El valor de P_s es el resultado de la potencia que el generador necesita para vencer la inercia, y la fricción.

Según (Hendershot & Miller, 2010, p. 678) menciona que para máquinas de imanes permanentes sin escobillas de alta velocidad las pérdidas causadas por la fricción y la resistencia del viento, típicamente cuentan menos alrededor del 1 o 2 % de las pérdidas totales.

Desarrollo:

$$(P_r + P_{cl}) = 1.50 + 1.674 = 3.174 * 0.2 = 0.6348 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{0.156 * 80\pi}{(0.156 * 80\pi) + 1.50 + 1.674 + 0.6348} * 100\%$$

$$\eta = 91.03 \%$$

Ecuación 65

Densidad de calor en la ranura (q_s)

$$q_s = \frac{P_r}{L(2d_3 + w_{sb})N_s}$$

Donde:

- $L = \text{Profundidad del núcleo laminado}$
- $d_3 = \text{profundidad de la ranura}$
- $w_{sb} = \text{ancho inferior de la ranura}$
- $N_s = \text{número de ranuras}$

Desarrollo:

$$q_s = \frac{1.50}{0.015(2 * 0.010855 + 0.0145796) * 12} = 229.634 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Ecuación 66

Densidad de calor en el estator (q_{st})

$$q_{st} = \frac{Pr + Pcl}{2\pi * Rso * L}$$

Desarrollo:

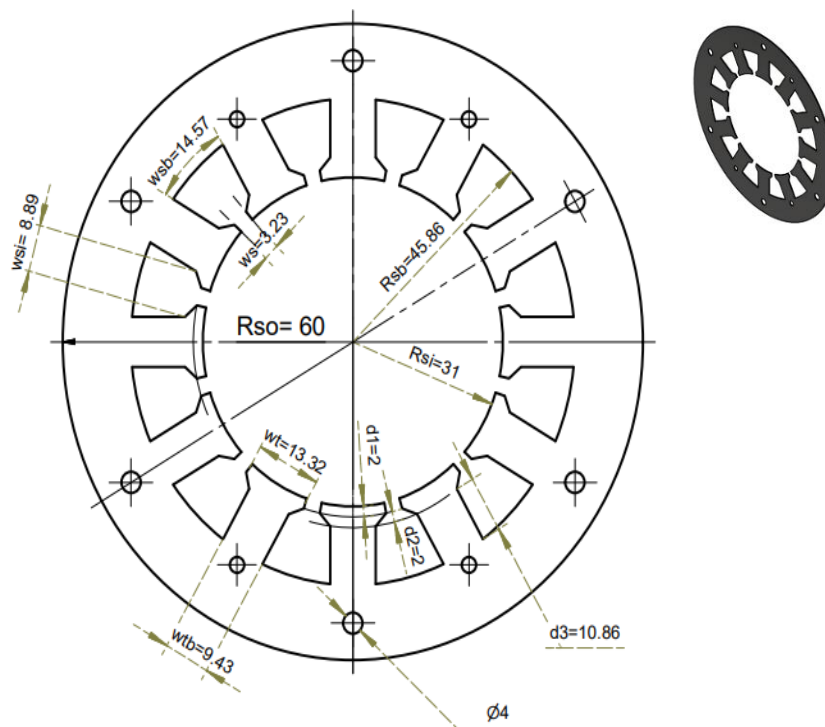
$$q_{st} = \frac{1.50 + 1.674}{2\pi * 0.060 * 0.015} = 444.042 \frac{W}{m^2}$$

Geometría resultante

Los cálculos previos permiten obtener las dimensiones geométricas de la chapa metálica mostrada en la figura 37 y 38.

Figura 52

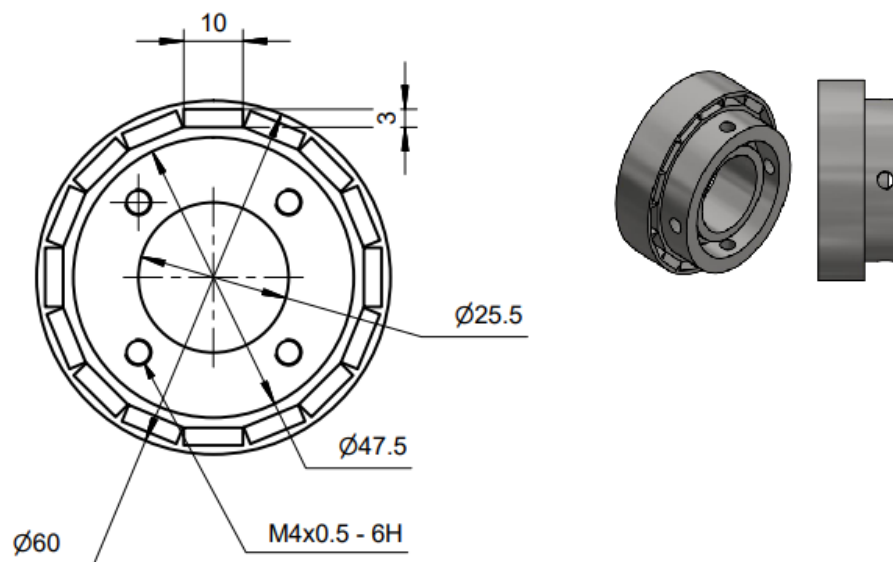
Geometría resultante del núcleo magnético



Nota. Se presenta la geometría de la chapa metálica para el núcleo de hierro.

Figura 53

Geometría resultante del rotor



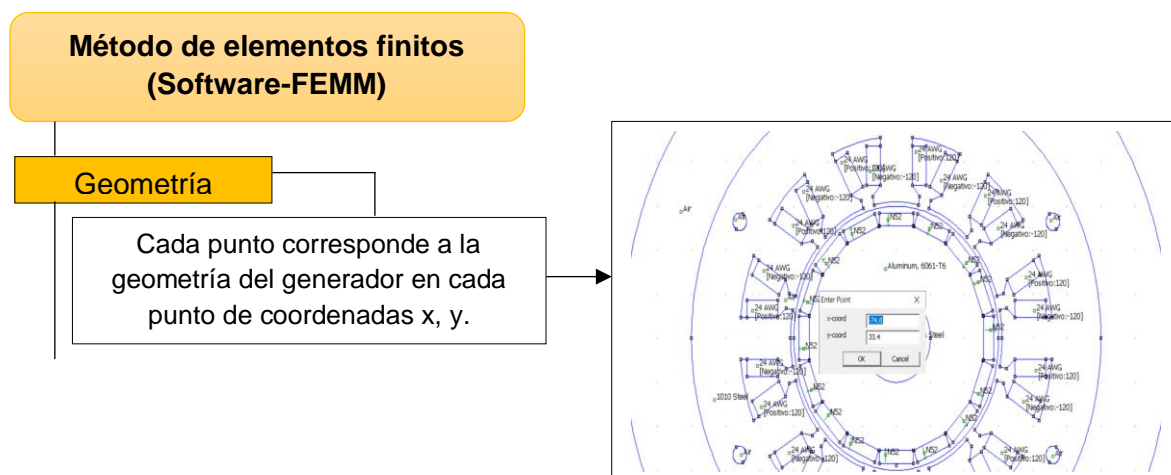
Nota. Se presenta el rotor con la distribución de cavidades para los imanes de neodimio.

Análisis magnético mediante el método de elementos finitos

El software FEMM permite observar el comportamiento magnético en la geometría del generador eléctrico, para realizar correcciones y estimar el funcionamiento final. Con el objetivo de conocer la cantidad de flujo magnético entre el rotor y estator y determinar si existe demasiada saturación es preciso utilizar un análisis por el método de elementos finitos.

Figura 54

Descripción del análisis magnético



Designación de materiales

Aire: zonas geométricas como entrehierro y campo de limitación del análisis.

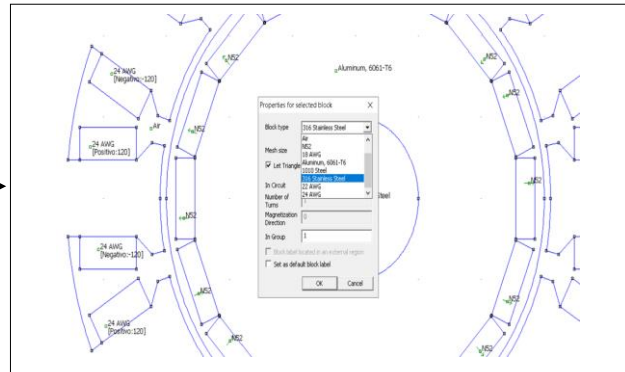
NdFeB 52: Imán de Neodimio N52.

Aluminio: Estructura del rotor donde se alojan los imanes.

AWG 24: Calibre del alambre de cobre esmaltado número 24 con diámetro de 0.577 mm^2

Stainless Steel: Eje de acero inoxidable.

Steel 1010: Representa el acero inoxidable 430 (AISI430) ferrítico, para cada lámina del núcleo magnético.



Valores de entrada

Corriente: 2 A

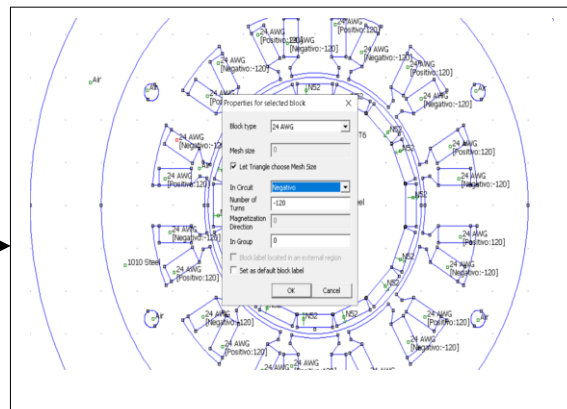
Número de vueltas de cada bobina: 109.

Calibre de alambre de cobre esmaltado: AWG 24.

Declarar circuitos positivos y negativos para cada lado de la bobina.

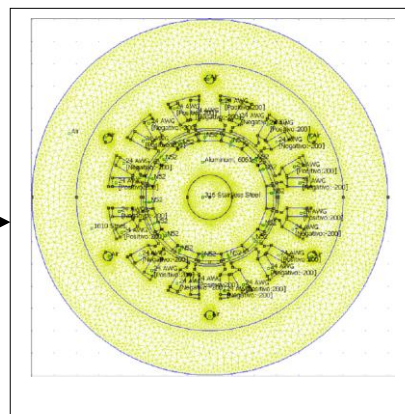
Limitación del área cálculo.

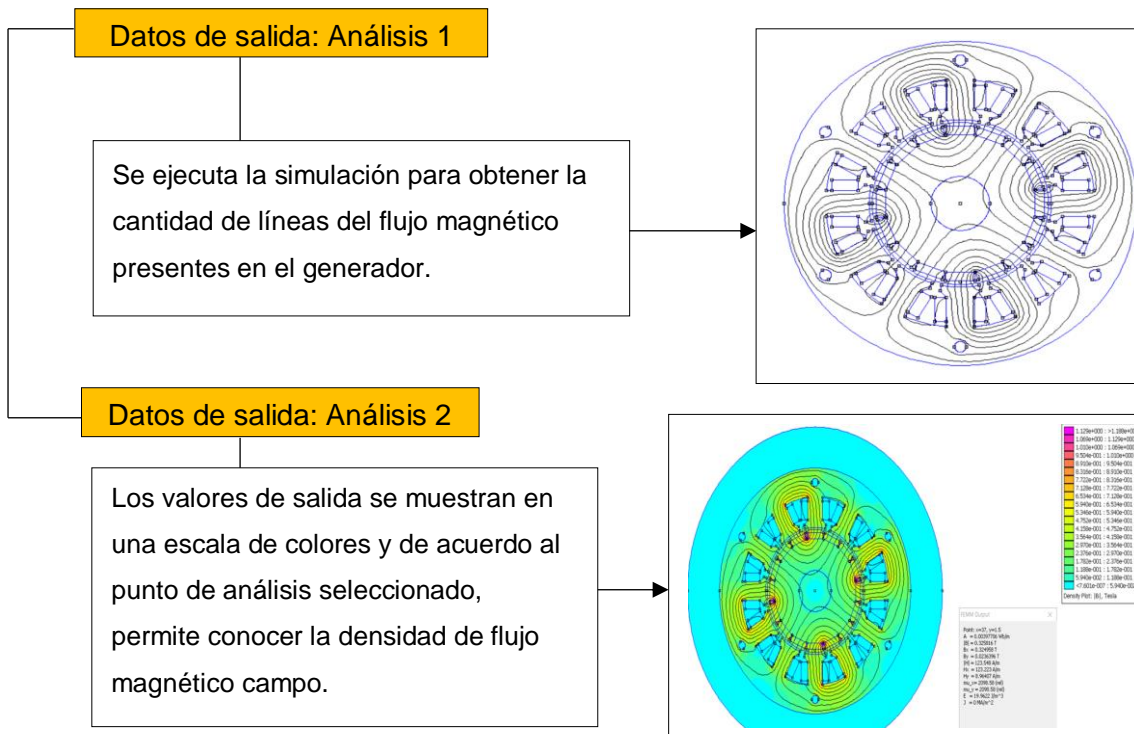
Especificación de la dirección magnética de cada imán.



Crear malla

Se genera la malla de toda la geometría con la opción Create Mesh ubicada en la cinta de opciones. En este caso el programa crea la malla con 60 381 nodos.



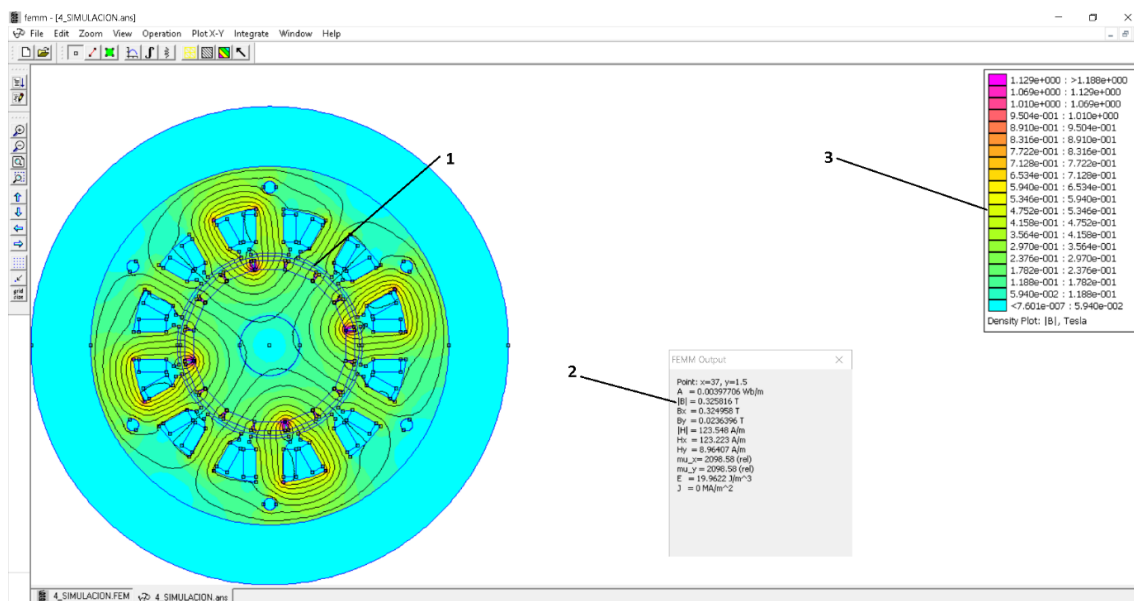


Nota. El esquema presenta el proceso para desarrollar una simulación en el software FEMM de manera comprensible.

Análisis e interpretación de resultados

Figura 55

Comportamiento magnético



Nota. Se presenta el resultado de la simulación magnética.

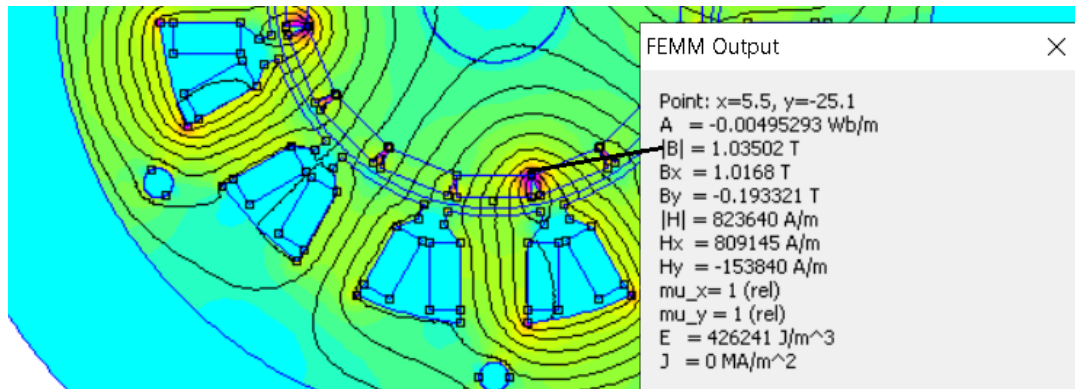
El número 1 describe el valor de la densidad de flujo magnético del entrehierro. La cantidad de líneas con patrones similares para los cuatro polos magnéticos del rotor describen la intensidad de campo magnético y la intensidad de campo magnético presentes. La cantidad de líneas magnéticas es relativamente normal y se considera una opción apropiada para fabricar, en todo caso el presupuesto es el factor que ajusta cada valor, debido a que con mayor número de espiras en las bobinas se alcanzarían valores de densidad magnética más elevados pero se debe aumentar el diámetro del núcleo ferromagnético y esto compromete toda la geometría la cantidad de cobre la cantidad de imanes y costo de los materiales.

El número 2 describe todos los valores de salida se muestran de acuerdo a las coordenadas del punto seleccionado en la geometría en donde el diseñador requiere un análisis. Si bien el panorama gráfico de las líneas de campo magnético permiten apreciar el comportamiento magnético, el programa permite conocer el valor de la densidad de flujo magnético en un punto específico y conocer en qué punto se puede mejorar, ya sea con más imanes, cambiando la forma del núcleo ferromagnético o el número de espiras.

El número 3 la tabla de densidad de flujo magnético muestra una escala de colores de acuerdo a la concentración de la mayor cantidad de líneas de flujo magnético. El análisis magnético general establece un generador de flujo magnético moderado, bajo su escala de colores describen valores medios de densidad de flujo magnético, esto quiere decir que no existirá saturación magnética excesiva en ningún punto de la estructura lo cual puede ser perjudicial para los materiales magnéticos y para la generación de excesivos valores de calor, así como pérdidas excesivas en el núcleo por corrientes parásitas. Además una consideración importante es que las pérdidas por histéresis son mínimas debido a que los dominios del material ferromagnético no estarán sometidos a grandes campos magnéticos como se muestra en la figura 40, donde la escala de colores indica que este punto alcanzará los valores más altos.

Figura 56

Punto con mayor saturación magnética



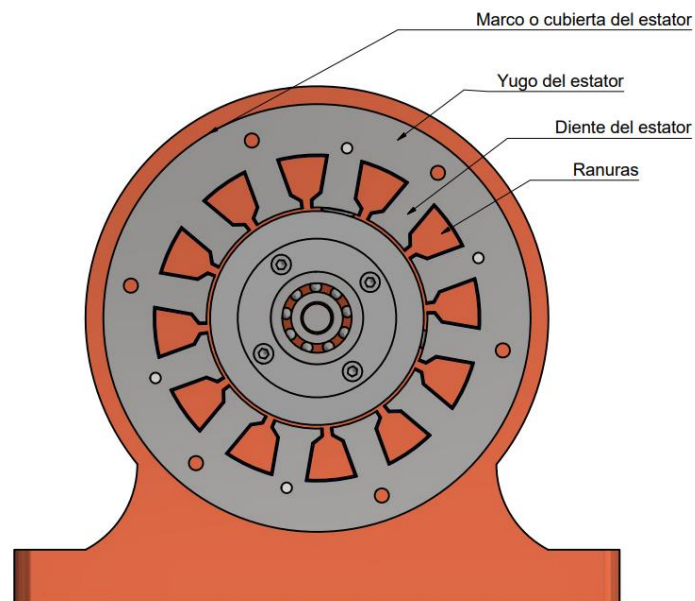
Nota. Un valor de 1.03 Teslas evidencian el flujo magnético entre cada polo debido a la fuga de imán que existe en cada cambio polar del rotor.

El cambio de temperatura es diferente en las ranuras de acero y en las bobinas de cobre, debido a que cada materia tiene sus propias características para retener el calor denominado como la capacidad de calor específico de la materia. Se debe calcular ambos valores y elegir el papel aislante en función del valor más alto y contemplar un margen de seguridad adecuado. Para lo cual es necesario analizar las formas de transferencia de calor que se producen en el generador eléctrico utilizando el valor de densidad de corriente en el conductor y el área del mismo obtenidos previamente en la parte matemática.

Las principales fuentes de calor son: el estator y su devanado, por lo cual se debe elegir un papel aislante apropiado. Para seleccionar el papel aislante o material aislante y su categoría de acuerdo a su clase térmica, se debe estimar la temperatura que se producirá en la ranura y bobinado con el siguiente cálculo.

Cálculo de la transferencia de calor por conducción en el generador

Este cálculo permite la estimación de temperatura que resulta del funcionamiento del generador eléctrico y con ello seleccionar un aislante de categoría térmica adecuado. La transferencia de calor por conducción se analiza entre el estator y el devanado.

Figura 57*Partes del estator*

Nota. Se presentan las partes principales del estator.

Para calcular el valor de la transferencia de calor por conducción para un bloque de espesor t y área A se emplea la siguiente ecuación:

Ecuación 67

Tasa de flujo de calor

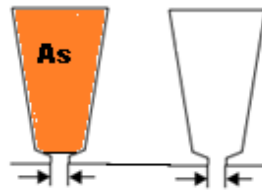
$$Q = k * A * \frac{dT}{dx}$$

Donde:

- $Q =$ Tasa de flujo de calor en W
- $k =$ coeficiente de conductividad térmica en (W/m^2)
- $A =$ área de la sección transversal del conductor
- $\Delta T =$ diferencia de temperatura a través del espesor t

Figura 58

Área del conductor



Nota. Área del conductor (A_s) que ocupa las espiras del alambre magneto en la ranura.

$$A_s = 0.0001274137 \text{ m}^2$$

$$\text{Longitud} = 22\text{mm} = 22 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Densidad de corriente máxima en el conductor} = J_c = 2.10 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Resistencia eléctrica del cobre } (\rho) = 1.7 \times 10^{-8} \text{ ohm} - \text{m}$$

Cálculo de la tasa de calor producida (**Ecuación 66**):

$$J^2 * \rho = (2.52 \times 10^6)^2 * (1.7 \times 10^{-8}) = 74\,970 \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$$

Cálculo de pérdidas en el conductor IR^2 :

$$74\,970 \frac{\text{W}}{\text{m}^3} * 0.0001274137 \text{ m}^2 * 15 \times 10^{-3} \text{ m} = 0.14328 \text{ W}$$

Cálculo del gradiente de temperatura:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{Q}{k * A}$$

Donde:

$$k = \text{Conductividad térmica del Cobre} = 387 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$$

Entonces:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{Q}{k * A} = \frac{0.14328 \text{ W}}{387 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 0.0001274137 \text{ m}^2} = 2.9058 = 3 \frac{^\circ\text{C}}{\text{m}}$$

Refrigeración del sistema y selección del aislante térmico

Para determinar un sistema de refrigeración se utiliza el valor de la densidad de calor generada en el marco del estator. Por deducción el movimiento relativo de la moto ayuda a enfriar el generador sin hacer necesario el uso de un sistema de refrigeración complementario. Además se hace necesario que la superficie de la carcasa se pinte de color negro para mejorar la transferencia de calor, esto por el estudio de la emisividad en los cuerpos negros realizado.

(Hendershot & Miller, 2010) Mencionan que la radiación se describe en la siguiente ecuación:

Ecuación 68

Ecuación de Stefan Boltzmann

$$\frac{Q}{A} = e * \sigma * (T_1^4 - T_2^4)$$

Donde:

$Q = \text{Tasa de calor transferido}$

$A = \text{Área de la superficie radiante}$

$e = \text{emisividad del material}$

$\sigma = \text{Constante de Boltzmann} = 5.67 \times 10^{-8} \frac{WK^4}{m^2}$, para un cuerpo negro

$T_1 = \text{temperatura superficial absoluta del cuerpo radiante en Kelvin}$

$T_2 = \text{temperatura absoluta del entorno en Kelvin}$

Desarrollo:

- $e = \text{emisividad de un cuerpo negro} = 0.9$

Datos:

Temperatura del entorno (ciudad de Latacunga) = $14^{\circ}\text{C} = 287.15\text{ K}$

T2=?

Desarrollo:

$$\frac{Q}{A} = 444.42 \frac{W}{m^2}$$

$$444.042 = (0.9) * (5.67 \times 10^{-8}) * (T1^4 - 287.15^4)$$

$$T1 = \sqrt[4]{\frac{444.042}{0.9 * (5.67 \times 10^{-8})} + 287.15^4}$$

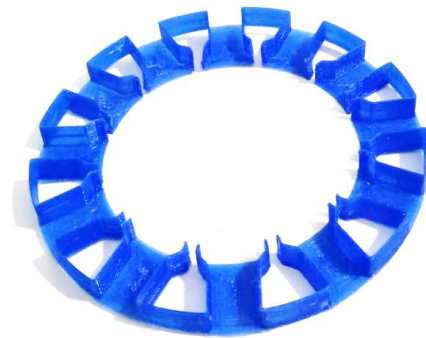
$$T1 = 352.85\text{ K} = 79.7^{\circ}\text{C}$$

La variable T1 es el resultado de la suma de la temperatura del entorno y la de la superficie del estator por lo cual:

$$T1 = T_{\text{entorno}} + T_{\text{superficie}}$$

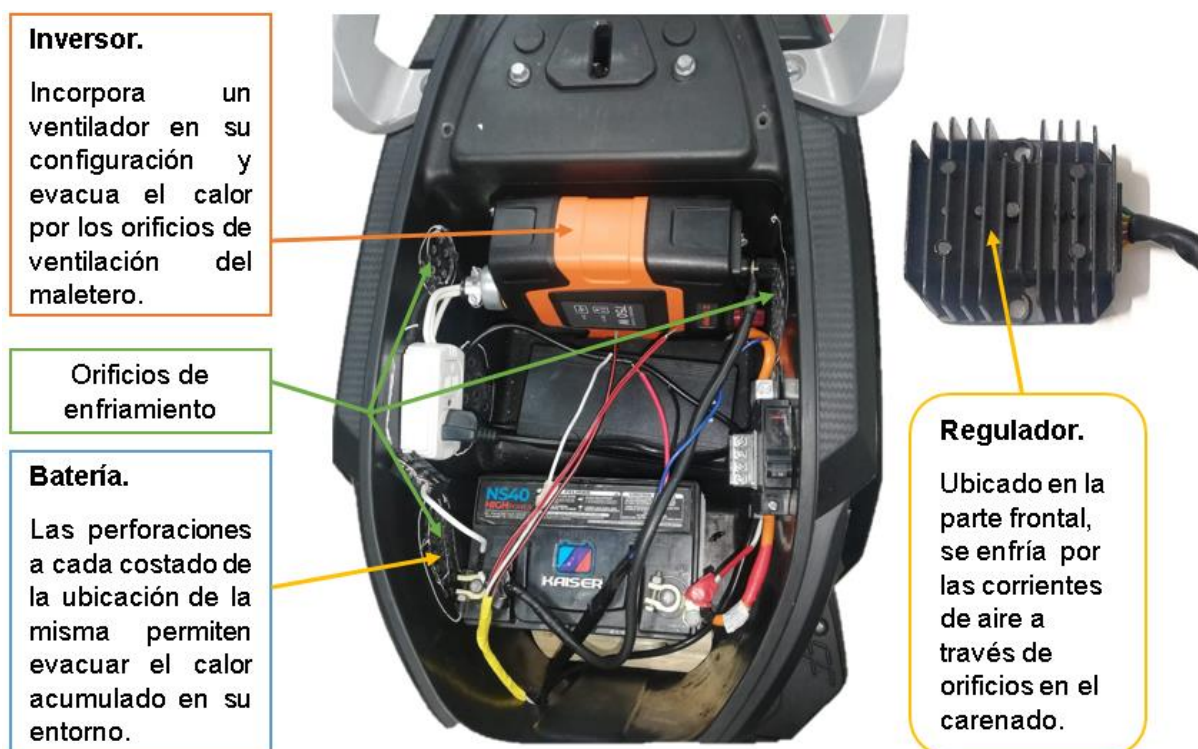
$$T_{\text{superficie del estator}} = T1 - T_{\text{entorno}} = (79.7 - 14)^{\circ}\text{C} = 65.69^{\circ}\text{C}$$

Con las condiciones de prueba y error que se realiza en el generador eléctrico para comprobar su funcionalidad, se puede asegurar que el generador no sobrepasará los 100°C y se decide fabricar un aislante a la medida por impresión 3D de material PLA que hace referencia a un tipo de poliéster termoplástico.

Figura 59*Aislante térmico del generador*

Nota. El aislante se fabrica por un proceso de impresión 3D de material plástico PETG y un espesor de 0.45 mm.

Se debe tomar en cuenta que un exceso de temperatura puede ocasionar la desmagnetización de los imanes, daño en el bobinado, vida útil reducida del aislante y en general daños severos que comprometen la funcionalidad del generador.

Figura 60*Refrigeración de los componentes del sistema de carga*

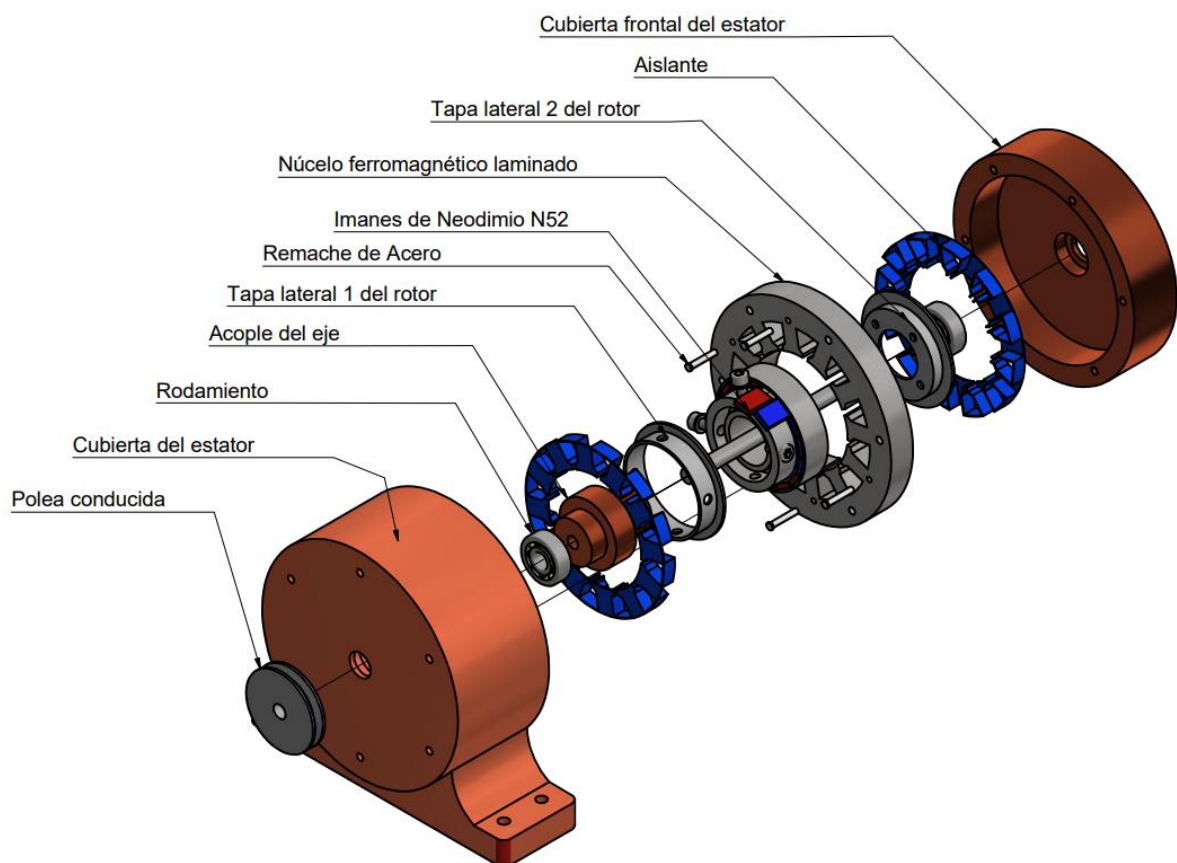
Nota. Cada componente es refrigerado por las corrientes de aire de su entorno.

Partes del Generador eléctrico

El generador eléctrico está compuesto por 15 partes. Su forma permite un ensamblaje detrás de la horquilla de la dirección sin ocasionar choques con la parte delantera de la moto cuando la suspensión se encuentra en funcionamiento. En la figura 60 se presentan todas las partes que conforman el generador eléctrico resultado de un análisis CAD en software especializado para identificar fallas, sobredimensionamientos, interferencias mecánicas y mejoras en la geometría.

Figura 61

Partes del generador de imanes permanentes



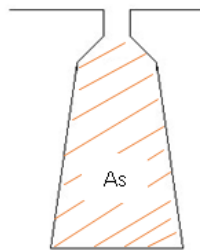
Nota. Las dimensiones de cada parte del generador están en función de la geometría, tamaño y disponibilidad de los imanes de Neodimio.

Cálculo del calibre de alambre magneto

El calibre se calcula en base al área del conductor que se refiere al área de la ranura donde se alojan las bobinas, este cálculo toma en cuenta el coeficiente de empaquetadura y la cantidad de espiras que se analizó en la parte de cálculos.

Figura 62

Área del conductor



Nota. Se presenta el área que ocupa el conductor en la ranura.

Datos:

$$Ns = \text{número de vueltas} = 109$$

$$As = \text{área del conductor} = 0.0001274137 \text{ m}^2$$

Desarrollo:

Kcp=15% pero para un factor de llenado neto "SFn" corresponde:

$$SFn = 31.4 \%$$

Ecuación 69

Factor de llenado

$$SFn = \frac{n * d^2}{As}$$

|Donde:

- $n = \text{número de vueltas por ranura}$

- $d =$ diámetro del alambre medido a través del esmlate de alambre
- $A_s =$ área del conductor en la ranura

$$SFn = \frac{n * d^2}{A_s}$$

$$\sqrt{\frac{SFn * A_s}{n}} = d$$

$n =$ número de vueltas por bobina * 2

$$n = 109 * 2 = 218$$

$$d = \sqrt{\frac{SFn * A_s}{n}} = \sqrt{\frac{0.314 * 0.0001274137}{218}} = 0.00042839 \text{ m}$$

$$d = 0.428 \text{ mm}$$


De la tabla 4 se elige el alambre magneto AWG 24.

Fabricación de piezas y componentes del generador

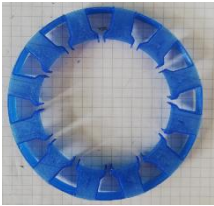


La manufactura de cada componente se realiza con distintos procesos de manufactura y con diferentes materiales descritos en la siguiente tabla.

Tabla 11

Proceso de manufactura de los componentes del generador eléctrico

Pieza	Características del Material	Procesos de fabricación	Descripción del funcionamiento
Rotor 	-Duraluminio (Al-Cu-Mg) -Densidad: 2780 $\frac{kg}{m^3}$ -Aleación no ferrosa	1 Torneado 2 Taladrado 3 Roscado	Aloja en su radio el conjunto de 16 imanes de Neodimio que se distribuyen en 4 polos alrededor de todo el perímetro. Además se

Pieza	Características del Material	Procesos de fabricación	Descripción del funcionamiento
	-Conductividad térmica: $140 \frac{W}{mK}$		acopla en conjunto con las tapas laterales para mantener fijos a los imanes. Estos últimos se fijan con pegamento industrial.
Núcleo laminado 	- Lámina de acero inoxidable 430 - 21 Láminas - Espesor de cada lámina: 0.4 mm -Se recomienda un acero eléctrico de grano no orientado.	1 Corte laser 2 Capa de barniz 3 Remachado	El núcleo laminado evita pérdidas de potencias excesivas por corrientes de Foucault o parásitas. Además el porcentaje de Silicio que es de 0.75% en su aleación permite reducir las pérdidas por histéresis.
Carcasa 	- Copolímero PETG de color rojo.	1 Impresión 3D 2 Taladrado	La carcasa es una pieza fija que se sujeta al mecanismo tensor de la banda. Consta de orificios que ayudan a evacuar el calor.
Bobinados 	-Alambre de Cobre esmaltado. -Calibre: AWG 24	1 Bobinado manual, 109 vueltas en cada bobina	El alambre de cobre esmaltado se enrolla en un número determinado de vueltas, formando así las bobinas del núcleo ferromagnético. Al final se baña cada bobina con barniz para evitar que se desacomoden.

Pieza	Características del Material	Procesos de fabricación	Descripción del funcionamiento
Aislante eléctrico 	-Copolímero PETG de color azul	1 Impresión 3D	Mantiene el bobinado aislado separado del núcleo ferromagnético y evita cortocircuitos.
Polea de transmisión 	-Copolímero PETG de color rojo	1 Impresión 3D	Multiplica las revoluciones del rotor que recibe directamente de la rueda.
Mecanismo regulador de tensión de la banda 	- Platina de hierro gris (5 mm se espesor)	1 Corte 2 Taladrado 3 Suelda SMAW	Regula la tensión de la banda mediante un perno de calibración.

Nota. La presente tabla expone los componentes principales que conforma el generador eléctrico, material, proceso de fabricación y funcionamiento.

Ensamblaje del generador eléctrico

Cada componente que forma parte de la etapa de generación de energía se acoplan con tornillos con cuello de cabeza hexagonal interna con el fin de evitar complicaciones en las pruebas de funcionalidad frente a vibraciones y distintas velocidades de giro. Se debe centrar el rotor con el estator aunque la fabricación debe asegurar este paso, una forma de verificar la medida del entrehierro es con un calibrador de láminas y ajustar el valor de tal


forma que el entrehierro se ajuste a 1 mm, omitir este paso o no considerarlo puede ocasionar ruidos extraños en el generador o daños por fricción entre el rotor y estator.

Los cables de salida del generador se conectan con terminales tipo banana que se protegen con cinta aislante para evitar que se topen. El cableado interno utiliza bloques de terminales para mayor seguridad. Para la instalación se debe desmontar la rueda completa, desmontar los amortiguadores de la horquilla y proceder a colocar la banda y volver a armar. Luego al momento de fijar el generador se debe primero colocar la banda en el canal de la polea conducida. Finalmente se comprueba la tensión de la banda con un valor de deflexión de 1 a 2 cm.

En la siguiente tabla se resume el proceso de ensamblaje del generador de acuerdo a la ubicación y consideraciones de cada componente.

Tabla 12

Ensamblaje del generador de imanes permanentes

Ensamblaje del generador eléctrico		
Componente	Ubicación	Consideraciones
		
Componente	Ubicación	Observaciones
Polea multiplicadora	En la rueda delantera, fijada al eje con 4 prisioneros.	Cada prisionero debe apretarse en cruz para evitar un mal centrado.
Rotor	Fijado al eje de la polea conducida y centrado axialmente con cojinetes. El	Las tapas laterales del rotor no deben emplear sellante o pega, debido a que se acoplan a presión.

Ensamblaje del generador eléctrico		
Componente	Ubicación	Consideraciones
	eje se fija al marco del estator con 2 rodamientos.	
Imanes de Neodimio	Se insertan en cada cuadrante externo del rotor con pegante de silicona en sus caras para evitar que vibren y no se agrieten.	Ubicar 4 imanes con la misma posición polar para cada polo magnético del generador.
Núcleo laminado	Las 21 láminas de 0.5 mm de espesor se barnizan en cada cara y se unen con 4 remaches de aluminio.	Prensar el paquete de láminas y verificar con un calibrador el ancho del núcleo, el mismo que debe ser de 15 mm.
Devanados	109 espiras en cada bobina de alambre magneto AWG 24	Cada bobina de bañarse en barniz para evitar que se desacomoden
Entrehierro	No es un componente físico pero su importancia recae en la importancia de mantener separado al rotor del estator.	1 mm de separación , el estator y el rotor deben asegurar esta medida para evitar fallos por fricción
Cubiertas laterales del rotor	Se une al rotor con 4 pernos M4 de cabeza hexagonal interna.	La agujeros roscados como en todas las piezas pequeñas requieren cuidado en el apriete
Carcasa del generador	Soporta al núcleo ferromagnético del estator con 4 pernos hexagonales de cabeza interna. El rotor se fija a éste con rodamientos y en conjunto se atornillan a la base del mecanismo tensor de la banda.	Por la separación entre la polea conducida y la rueda de la moto, la banda debe colocarse primero antes de fijar la carcasa.

Ensamblaje del generador eléctrico

Componente	Ubicación	Consideraciones
Mecanismo tensor de la banda	Tensa la banda mediante un tornillo regulable que separa o une las bases del mecanismo.	La medida correcta de tensión de la banda es desde su posición de reposo hasta la flexionada de 1 a 2 cm.

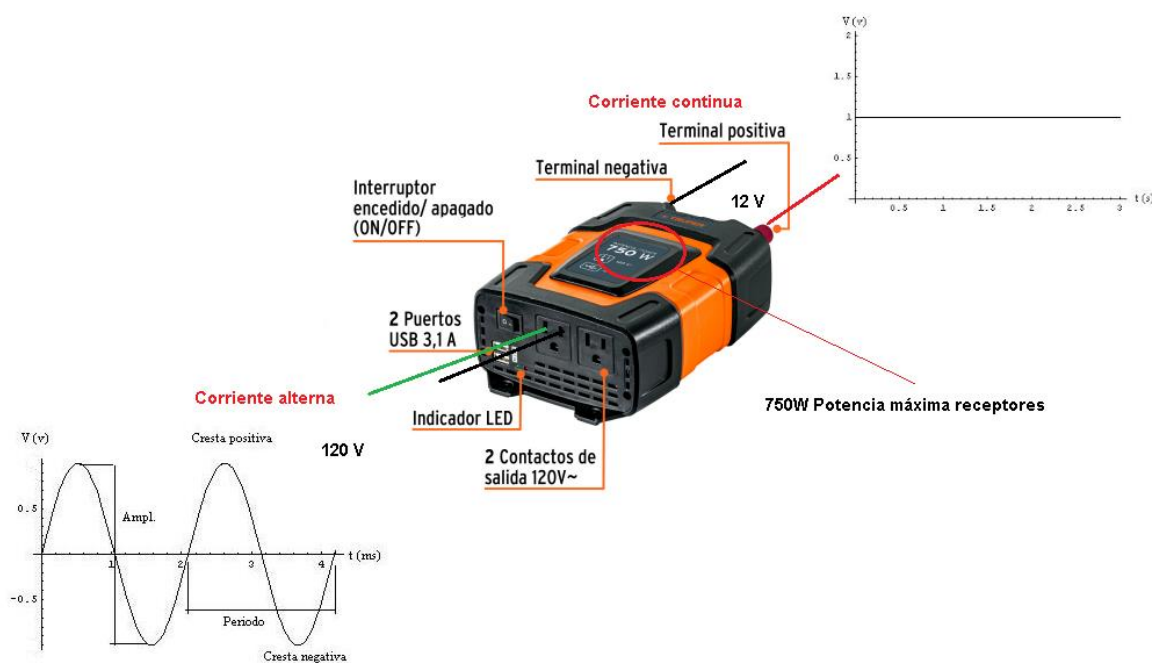
Nota. Se presenta el proceso de ensamblaje del generador eléctrico en la moto eléctrica.

Selección del inversor del sistema de carga

El inversor se elige en función de la potencia de salida necesaria, es por esto que al multiplicar el voltaje (85 V) y amperaje (5 A) que necesita el cargador de la moto eléctrica se obtiene 550 W, en este punto es recomendable elegir un inversor de igual o mayor potencia para satisfacer la carga del sistema.

Figura 63

Selección del inversor



Nota. Se presenta el inversor seleccionado con sus partes principales.

Tabla 13

Características técnicas del inversor

Características del inversor

Cálculo para elegir un inversor:

Corriente de salida: 5 A

Voltaje de salida: 110 V

Potencia requerida: (5 A)*(110 V) =550 Watt

Especificaciones del inversor 750 W:

Valores de entrada DC	Valores de salida AC
Voltaje in: 12 V	Voltaje de salida : 120 V
Capacidad de la batería: 47 Ah	Frecuencia: 58-62 Hz
Rango de corriente de entrada: 75 A	Máx. potencia de salida: 750 W
Desactivación por voltaje bajo : 10.5 V ± 0.3V	Sobrecarga de potencia: 1500 W
Desactivación por sobre-voltaje: 15.5 V ±0.5 V	Señal: Onda senoidal modificada

Nota. Se presenta las características técnicas del inversor Trupper elegido. Fuente:

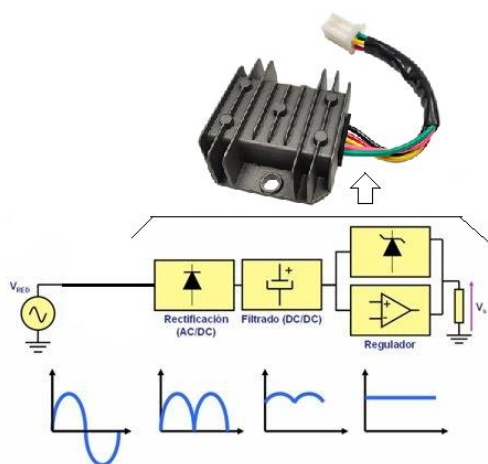
elaboración propia con datos tomados de (TRUPER, 2022).

Selección del regulador de corriente del sistema de carga

El generador de imanes permanentes es un alternador por tal razón se utiliza un regular de moto convencional para rectificar y regular la corriente alterna.

Figura 64






Regulador de corriente monofásico



Nota. Se presenta el diagrama de interno del regulador de corriente y su forma de onda resultante en cada fase de rectificación y regulación. Tomada de (Areatecnología, 2023)

Tabla 14

Características del regulador del sistema de carga

Especificaciones técnicas del regulador	
Valores de entrada	Valores de salida
Voltaje: 20 – 60 V, Corriente alterna	Voltaje: 12 – 14.5 V, Corriente directa
	Corriente de salida: 0- 4 Amperios
Designación de los cables	
Rosado 	Cable de fase, entrada AC
Amarillo 	Cable de fase, entrada AC
Verde 	Salida negativa a la batería
Rojo 	Salida positiva a la batería
Negro 	Cable de referencia (+ de la batería a través del interruptor de encendido)

Nota. Se presenta los valores de trabajo del regulador de corriente y la designación de cada cable.

Ensamblaje de los componentes que forman el sistema de carga

Figura 65

Componentes principales del sistema de carga regenerativo



Nota. Cada componente se ubica cerca de rejillas de ventilación para evacuar el calor que se genera en todo el sistema.

Etapas de potencia del sistema de carga regenerativo

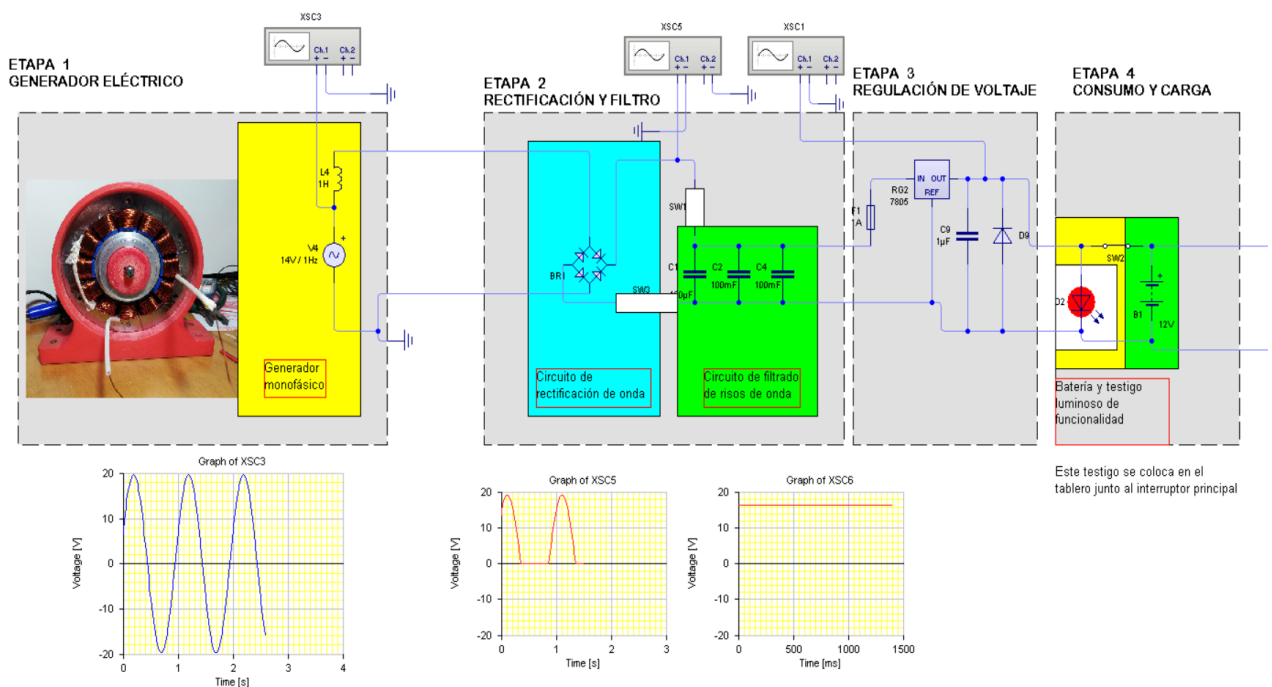
El sistema de carga regenerativo en su parte eléctrica y electrónica se constituye por 6 etapas de potencia cada una descritas a continuación.

Etapa 1

Corresponde al generador en toda su constitución y la corriente alterna que este produce, el estator en su interior consta de doce bobinas inductoras con 2 arreglos conectados en paralelo, cada arreglo formado por 6 bobinas conectadas en serie, así se obtiene una salida monofásica de 17 a 20 voltios alternos y valores de corriente de 0.5 a 1 Amperio. Cada bobina se ubica en un ángulo de 30° eléctricos respecto de otra. La frecuencia varía en función de la velocidad de la moto eléctrica.

Figura 66

Etapas 1-2-3-4 del sistema de carga



Nota. Se presenta el diagrama eléctrico del sistema de carga regenerativo.

Etapa 2

El generador produce un tipo de corriente alterna CA, por lo que es necesario emplear un rectificador-regulador monofásico. Los cables de salida del generador se conectan a los cables de entrada de fase del regulador que mediante un arreglo de diodos

rectifican la onda completa de la corriente, para obtener solo valores positivos. Esta etapa también se constituye por un filtro de onda, formado por 3 capacitores conectados en paralelo que mejora la linealidad de la corriente para producir una salida de corriente continua y constante.

Etapa 3

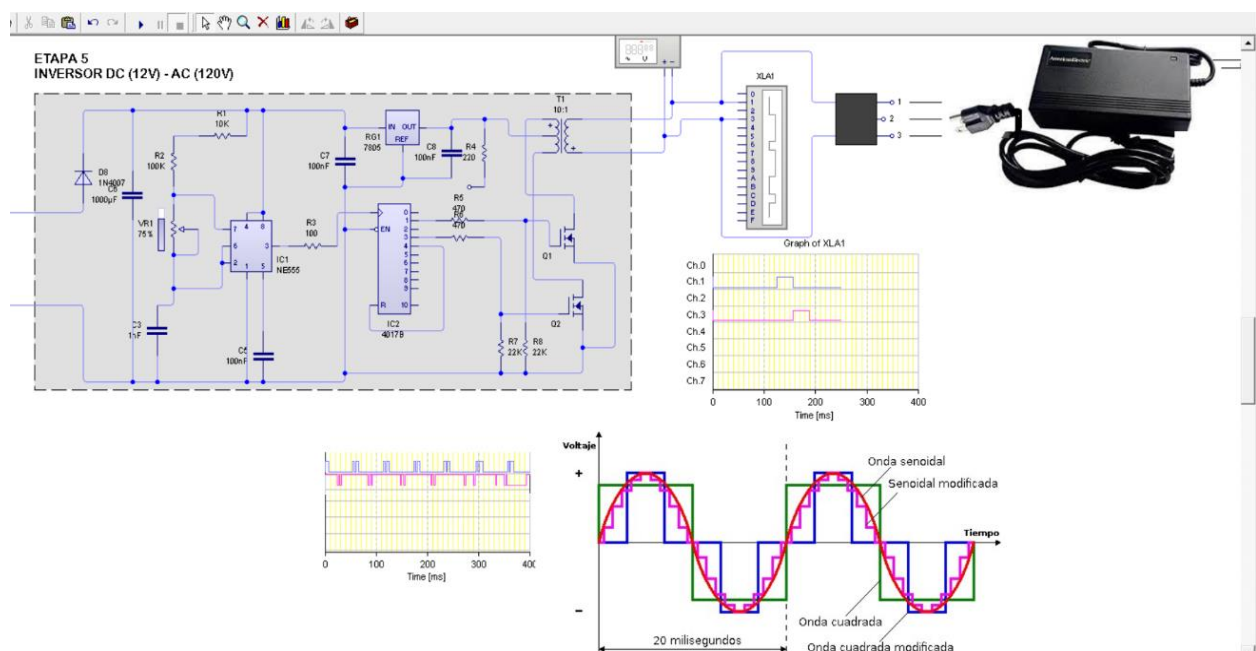
La etapa de regulación de voltaje es realizada por el regulador electrónico, este componente controla los valores de salida a la batería y estabiliza los valores en 13.5 - 14 voltios indistintamente de la velocidad de la moto eléctrica siempre con el acelerador en su máxima señal.

Etapa 4

La energía recolectada pasa a cargar la batería auxiliar con un voltaje de 13.5 - 14 voltios y una corriente de 0.5 a 1 Amperio en condiciones normales y con el acelerador a su máxima señal.

Figura 67

Etapa 5 del sistema de carga



Nota. La modulación por ancho de pulso permite activar y desactivar cada transistor por tiempos diferentes y durante periodos diferentes.

Etapa 5

El inversor de 750 W toma la energía almacenada en la batería auxiliar para transformarla en valores de 110-120 Voltios en corriente alterna, con esta etapa finaliza el circuito fuente de carga. Este tipo de inversor no dispone de una salida de onda completamente sinusoidal, debido a que la inversión se realiza por modulación de ancho de pulso PWM (modulación por ancho de pulso), la onda resultante es el conjunto de valores positivos y negativos se produce al activar y desactivar transistores con señales cuadradas en un trayecto de onda sinusoidal.

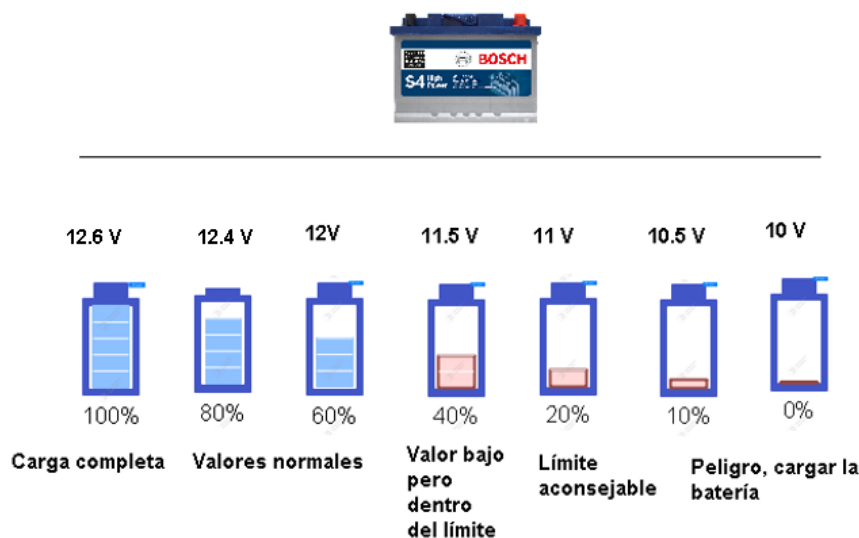
El ciclo de carga se completa cuando el cargador de la moto eléctrica se conecta al inversor y la carga de la batería de litio empieza, esto se puede verificar con el medidor KG-140F que muestra en pantalla el valor de corriente de color rojo.

Consideraciones de descarga y elección de la batería de ácido plomo

En la batería de ácido plomo se puede estimar su estado de carga en función del valor de voltaje medido como se muestra a continuación.

Figura 68

Estado de carga de la batería de ácido plomo



Nota. Se muestra los valores de voltaje que describen el estado de carga de la batería de ácido plomo del sistema.

Otro factor que se debe considerar es el valor de corriente y voltaje para la etapa de carga en la que trabaja el sistema regenerativo, debido a sus valores bajos de corriente se debe asegurar que el voltaje de la batería no disminuya a valores críticos que demanden demasiada corriente, por lo que se limita una descarga solo hasta el 60% que corresponde a un valor de tensión de 12 voltios.

La batería de ácido-plomo no debe someterse a valores de descarga tan bajos, por tal motivo se establece el valor del DOD (Profundidad de descarga), para calcular el valor de tensión mínimo de descarga en la batería.

El DOD se mide en porcentaje y se refiere a la energía extraída la batería en relación a su capacidad nominal.

$$DOD = 1 - SOC$$

$$SOC = 60\%$$

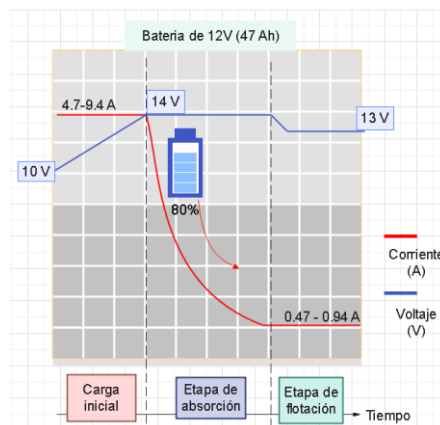
$$DOD = 1 - 0.6 = 0.4$$

$$47 \text{ Ah}(bateria) * 0.4 = 18.8 \text{ A h}$$

Esto quiere decir que se pretende utilizar 18.8 A por una hora descarga, por lo que se debe asegurar que el inversor no consuma valores de corriente superiores de la batería porque el tiempo que requiere para recuperar su capacidad o estado de carga correspondiente al 100% es muy elevado.

Figura 69

Curva de carga de una batería de ácido plomo



Nota. Se presenta las etapas de carga de la batería de ácido plomo.

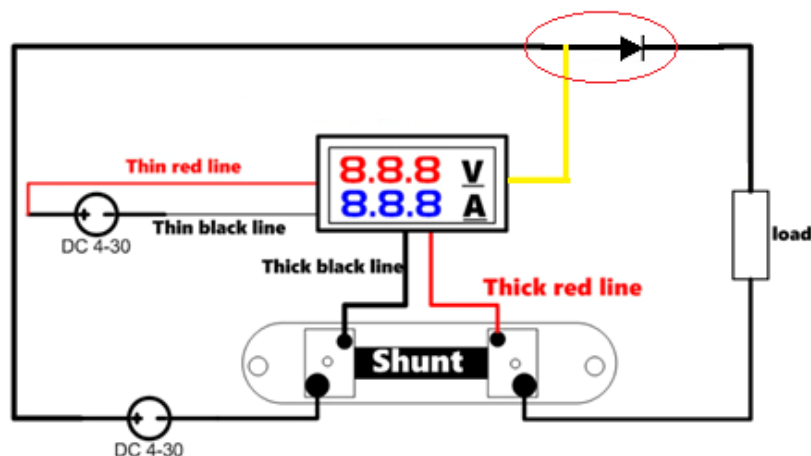
Instalación del voltímetro-amperímetro para el generador eléctrico

Se tiene que monitorear el voltaje y corriente producidos en el generador eléctrico por lo que se hace necesario instalar un voltímetro-amperímetro digital de corriente continua que optimice la obtención de datos. El suministro de energía para la pantalla se toma del convertidor DC (12 V) con el fin de que el display se encienda con la llave principal. El cable de medición (color amarillo) se conecta al cable positivo (color rojo) de la salida del regulador. Finalmente se conecta el derivador en serie con el cable negativo que sale del regulador hacia la batería de ácido plomo, como se muestra en la siguiente figura.

Como el cable amarillo mide la energía que llega a la carga, se debe tomar en cuenta que la carga es una batería, por lo que se debe emplear un diodo que separe esta conexión, sino el medidor solo mostrará el voltaje de la batería. Esto conlleva al uso de un medidor extra para monitorear la batería de ácido plomo.

Figura 70

Conexión del voltímetro-amperímetro



Nota. Conexión del voltímetro –amperímetro para una fuente de alimentación DC externa.

Tomado de (Aideepen ELEC&Lifes, 2022)

Un punto importante a tomar en cuenta es la veracidad de los datos obtenidos, por tal motivo una vez instalado se debe verificar la medición con un multímetro conectado en paralelo y en función de un valor determinado se calibra el voltímetro-amperímetro al girar los potenciómetros en la parte posterior hasta ajustar los valores.

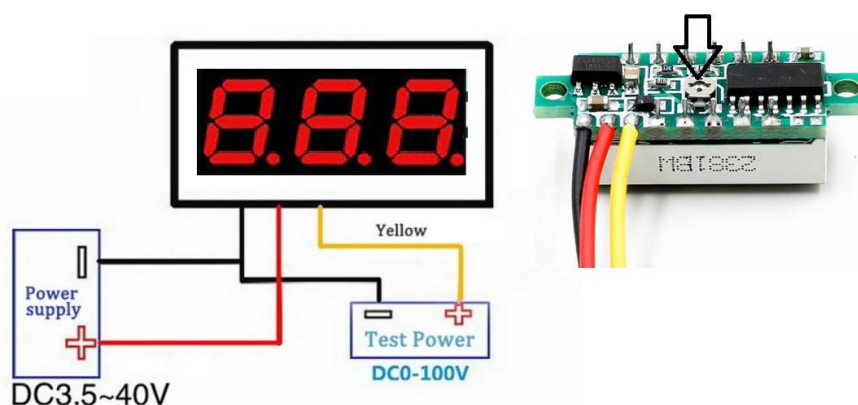
Instalación del medidor de voltaje

Este display muestra el estado de carga de la batería de ácido plomo mediante la lectura de su valor de tensión. Sus cables de alimentación (color rojo y negro) se conectan al convertidor DC (12 V) que le permite encenderse al mismo tiempo que con la llave de activación y su cable de medición o referencia (color amarillo) se conecta después del diodo lo que le permite obtener solo el valor de la batería.

A continuación se detalla la conexión del voltímetro.

Figura 71

Conexión del voltímetro para la batería de ácido plomo



Nota. Se presenta la conexión de los cables del voltímetro para la batería de ácido plomo.

Instalación del medidor KG-140F

El display principal de la moto eléctrica no muestra un valor de SOC (%) preciso, por tal motivo se hace necesario el uso de un medidor KG-140F. Este medidor permite monitorear en tiempo real los valores de trabajo característicos de la batería de litio, el valor del estado de carga SOC (%) se muestra en pantalla lo que permite llevar un control de la energía que dispone la batería para cada recorrido.

El medidor KG-140F tiene un módulo electrónico de control que se fija en la parte inferior debajo del maletero, el derivador que mide la corriente se coloca sobre una pieza de plástico previamente impresa para aislarlo de la base metálica. Para comprobar una buena conexión en el controlador se debe verificar un destello de luz verde y en la pantalla no debe aparecer una cruz roja sobre el indicador del puerto de comunicación 485.

Figura 72

Instalación del módulo electrónico de control del medidor KG-140F



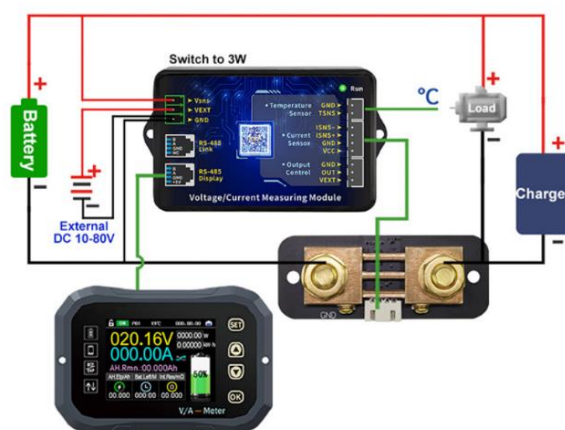
Nota. Se presenta la instalación del módulo electrónico del medidor KG-140F en la parte inferior del maletero junto a la batería de litio.

El medidor cuenta con una sonda de temperatura, la cual se comprueba al exponerla a diferentes temperaturas con el fin de que el valor en pantalla varíe de igual manera, una vez hecho esto se coloca en la pared metálica de la caja de la batería de litio con cinta adhesiva.

El tipo de conexión se realiza para una fuente de suministro independiente que se toma del convertidor DC (12 v), esto permite que el medidor se active con la llave principal. Las conexiones se realizan como se muestra en la siguiente figura.

Figura 73

Diagrama de conexión del medidor KG-140F



Nota. Diagrama de conexión para una fuente de alimentación externa. Tomado de (Hangzhou Junce Instruments Co., Ltd., 2021)

Con los botones de la derecha calibran todos los valores del medidor en función de los datos característicos de la batería de litio y se bloquea los ajustes de la pantalla al presionar la tecla ok por 3 segundos.

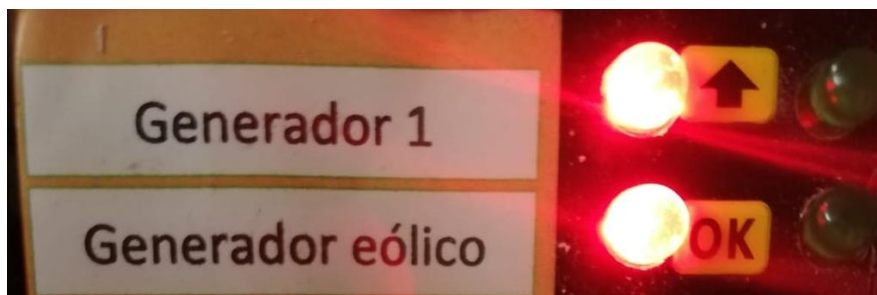
Componentes del tablero de control

Para controlar y garantizar el suministro de energía el sistema cuenta con indicadores luminosos como son:

- Un led rojo se activa cuando el generador eléctrico no suministra energía a la batería de ácido.
- Un led verde indica la activación del generador.

Figura 74

Testigo luminoso del generador eléctrico



Nota. El testigo luminoso de color rojo indica que el generador eléctrico no produce electricidad y el led verde se activa cuando éste comienza a producir electricidad.

Primero en la parte superior se ubica el indicador de funcionamiento del generador eléctrico, junto al tablero principal en la parte inferior se encuentra la pantalla del medidor JUNCTEK KG-140F que muestra en tiempo real los valores de salida (descarga) o entrada (carga) de la batería de litio y en su esquina superior izquierda se ubica el voltímetro para los valores de voltaje de la batería de ácido plomo. En la parte inferior se coloca el voltímetro-amperímetro del generador eléctrico.

Figura 75*Indicadores de monitoreo*

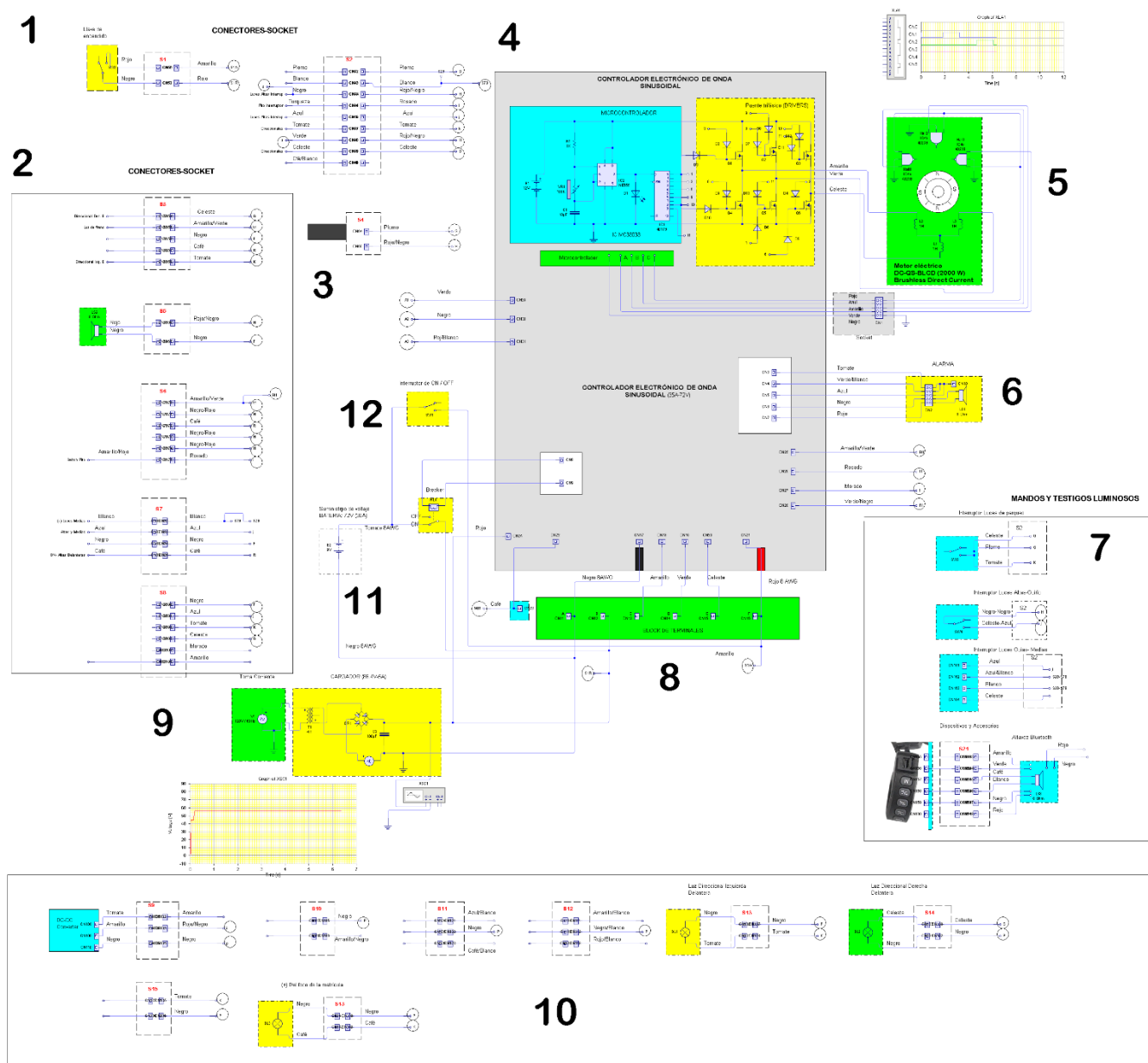
Nota. Cada indicador permite el control de todos los valores que ingresan a la batería de ácido-plomo.

Esquema eléctrico y electrónico de la moto eléctrica

El controlador sinusoidal es el componente fundamental para el funcionamiento de una moto eléctrica. Permite el paso de energía desde la batería hacia el motor, mediante un circuito electrónico de PWM gracias a un arreglo de 6 transistores que se activan y se activan con la finalidad de generar una señal sinusoidal que energiza cada fase del motor. La designación BLDC se establece porque utiliza corriente continua para crear la onda de su funcionamiento. Además recibe la señal de los sensores hall ubicados en el motor para identificar la posición del rotor y calcular la velocidad. También recibe la señal del sensor inductivo del acelerador para determinar la entrega de potencia al motor. Esto porque la energía DC es portable mientras que en los motores de movilidad AC se requiere de inversores para su funcionamiento.

Figura 76

Diagrama eléctrico de la moto eléctrica



Nota. Cada número representa un bloque del circuito al que pertenece.

1 Interruptor de la llave de señal de encendido

2 Conectores

3 Antena

4 Controlador de onda sinusoidal

5 Motor eléctrico

6 Sistema de audio

7 Interruptores y mandos en los puños del manubrio

8 Bloque de terminales

9 Cargador

10 Conectores de las luces

11 Batería de litio

12 Interruptor automático de circuito (10 A)

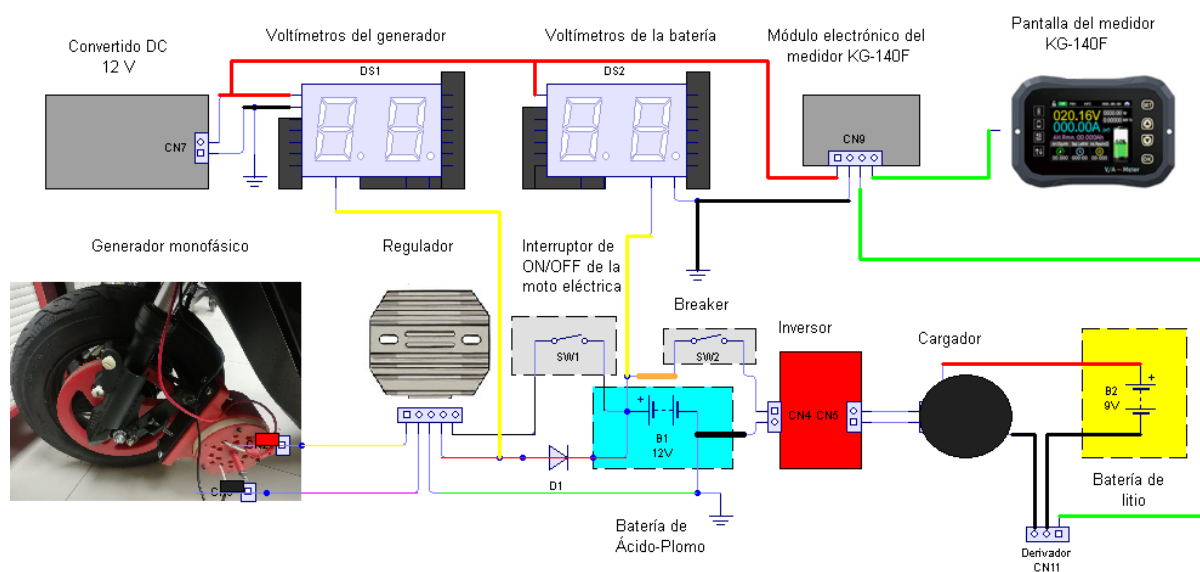
Al finalizar todas las conexiones del sistema se debe emplear aislante y ordenar cada ramal de alambres sin dejar cables cruzados o colgados que puedan interferir en una fácil comprensión del circuito o fallos en el mismo.

Conexión eléctrica del sistema de carga regenerativo

Para las conexiones entre componentes del sistema se utilizan socket o conectores de pines. Los medidores digitales toman energía del convertidor DC de 12 voltios. A continuación se presenta el esquema de conexión del sistema de carga regenerativo. Cuando se utiliza una fuente externa para alimentar el módulo electrónico del medidor KG-140F, se debe colocar el interruptor ubicado en su parte posterior en la posición 3W.

Figura 77

Diagrama de conexión del sistema de carga



Nota. Se indica el diagrama de conexión del sistema de carga con los colores que corresponden a cada cable.

Capítulo IV

Pruebas y análisis de resultados



Este capítulo abarca la ejecución de pruebas dinámicas de la motocicleta eléctrica en una ruta determinada con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del sistema de carga regenerativo y establecer las nuevas prestaciones de autonomía.

Protocolo de pruebas

El protocolo de pruebas describe los aspectos técnicos y operativos que se deben tomar en cuenta durante la ejecución de las pruebas.

Tabla 15

Protocolo de pruebas

PROTOCOLO DE PRUEBAS		
Procedimiento	Observaciones	Imagen
1 Descargar la batería de litio hasta su valor mínimo (66 - 67 Voltios); a este valor la moto eléctrica se apaga por completo.	Este valor de descarga aun permite utilizar dispositivos luminosos e indicadores en el tablero por un corto tiempo. La BMS de la batería de Litio evita una descarga fuera del rango establecido para cada celda, por lo que no se causa daños al realizar esta prueba.	
2 Encender el tablero de instrumentos y los medidores digitales.	No activar ningún consumidor de corriente.	
3 Calibrar el medidor KG-140F con la capacidad de trabajo de la batería (22	El valor de capacidad puede variar de acuerdo a la profundidad de descarga a	

PROTOCOLO DE PRUEBAS		
Procedimiento	Observaciones	Imagen
<p>Ah), activar los avisos de protección para valores anormales de corriente y voltaje.</p>	<p>la que sea sometida la batería. Con la tecla OK presionada por 3 segundos se bloquea los botones de ajuste para evitar intervenciones de terceros.</p>	
<p>4 Conectar el cargador eléctrico. Primero se conecta el cargador al puerto de carga de la moto eléctrica posteriormente se conecta a la fuente eléctrica de 110 V.</p>	<p>Se debe evitar el uso de extensiones en la medida de lo posible. No se debe apagar el switch principal o el tablero en ningún momento durante la carga.</p>	
<p>5 Bloquear el motor eléctrico e iniciar la carga de la moto eléctrica.</p>	<p>El tiempo medido de carga completa es de 5 Horas y 22 minutos.</p>	
<p>6 Una vez completa la carga, se comprueba el valor de la capacidad en el medidor KG-140F, el SOC deberá ser del 100%.</p>	<p>En caso de que el SOC no alcance el 100% pero la carga esté completa se debe calibrar el KG-140F al nuevo valor de la máxima capacidad alcanzada por la batería. El cargador encenderá un foco verde cuando la carga esté completa.</p>	

PROTOCOLO DE PRUEBAS

Procedimiento	Observaciones	Imagen
7 Analizar la autonomía inicial bajo las fases y condiciones establecidas en la tabla de prueba de ruta.	Antes de realizar las pruebas de autonomía se debe revisar la presión de las ruedas e interferencias mecánicas.	
8 Realizar la prueba de corte y establecer el kilometraje alcanzado y el estado de carga de la batería de litio.	Entre este paso y el anterior se debe dejar 60 minutos de descanso para evitar daños por temperatura en el motor eléctrico.	
9 Repetir el procedimiento del paso 1 al 6.	La prueba inicial y final deben replicarse en 2 días respectivamente para evitar pruebas nocturnas.	
10 Instalar el sistema de carga regenerativo.	Ensamblar el generador eléctrico, el regulador, la batería de ácido plomo, el inversor y el cargador de la moto eléctrica. Considerar aspectos de la tabla 12.	
7 Analizar la autonomía final bajo las fases y condiciones establecidas en la tabla 16 de prueba de ruta. Se incluye la prueba de corte para determinar la distancia extra alcanzada.	Antes de realizar las pruebas de autonomía se debe revisar la presión de las ruedas e interferencias mecánicas así como cables sueltos.	

Nota. Este proceso puede variar de acuerdo a las características de cada batería.

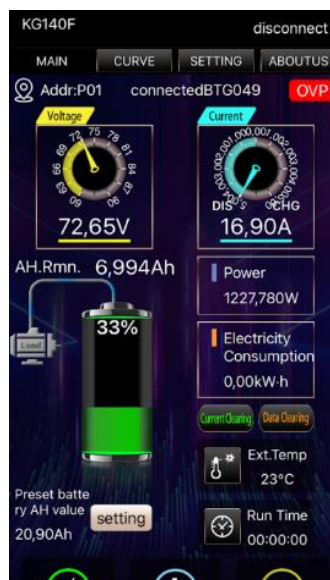
Desarrollo de la prueba de ruta

En esta prueba se debe contemplar aspectos de velocidad, kilómetros de recorrido, condiciones de la pista, fases y variables de prueba. Por conveniencia esta parte de la investigación se ejecuta en la vía interna de la universidad campus Belisario Quevedo, la misma que cuenta en su trayecto con una parte plana y otra de diferente inclinación que demanda mayor rendimiento de la motocicleta eléctrica. En la tabla 12 se detallan las variables que se deben considerar al momento de ejecutar la prueba, con el fin de obtener un perfil gráfico de velocidad vs tiempo similar en la prueba inicial y final.

Para efectuar este estudio se emplea una aplicación móvil velocímetro GPS Pro que monitorea la velocidad, ruta, altitud, trayecto y distancia recorrida, para obtener el ciclo de conducción en cada fase de la prueba. Además se utiliza la aplicación móvil del medidor KG-140F que muestra todos los valores medidos en tiempo real en el celular.

Figura 78

Interfaz de la aplicación KG



Nota. Se presenta la interfaz de datos de la aplicación móvil del medidor kg-140F.

Tabla 16

Especificaciones de la prueba de ruta

Prueba de ruta	
Mapa	Ruta
	Campus Belisario Quevedo
	Distancia: 2 088.96 m=2km
	Tipo de calzada: Asfalto
	Condición climática: Despejado
	Velocidad del viento: 4 -10 m/s
	Tiempo de prueba aprox. : 50-60 minutos
Altitud: 2820 msnm	
Número de curvas: 6	
Variables de prueba	
Velocidad I : 33-42 km/h	Temperatura del entorno: 10 °C
Velocidad II : 41-51 km/h	Porcentaje inicial de carga SOC (%): 100
Velocidad III : 41-56 km/h	Señal del acelerador : máxima señal
Velocidad de corte : 41-65 km/h	Presión de las ruedas : 35 PSI
Peso total : 75 kg	Luces y dispositivos de audio : Off
Fases de prueba	
Autonomía inicial	Autonomía final
Fase 1 = 31.2 km (15 vueltas)	Fase 4 = 31.2 km (15 vueltas)
Fase 2 = descanso de 60 minutos por seguridad térmica del motor eléctrico BLDC.	Antes de iniciar esta prueba se debe implementar el sistema de carga regenerativo.
Fase 3 = prueba de corte (n vueltas hasta que la moto eléctrica se detenga)	Fase 5 = descanso y carga por 60 minutos de toda la energía almacenada en la batería de ácido plomo.
	Fase 6 = prueba de corte (n vueltas hasta que la moto eléctrica se detenga)

Nota. Se presenta la tabla que describe los parámetros del ciclo de conducción.

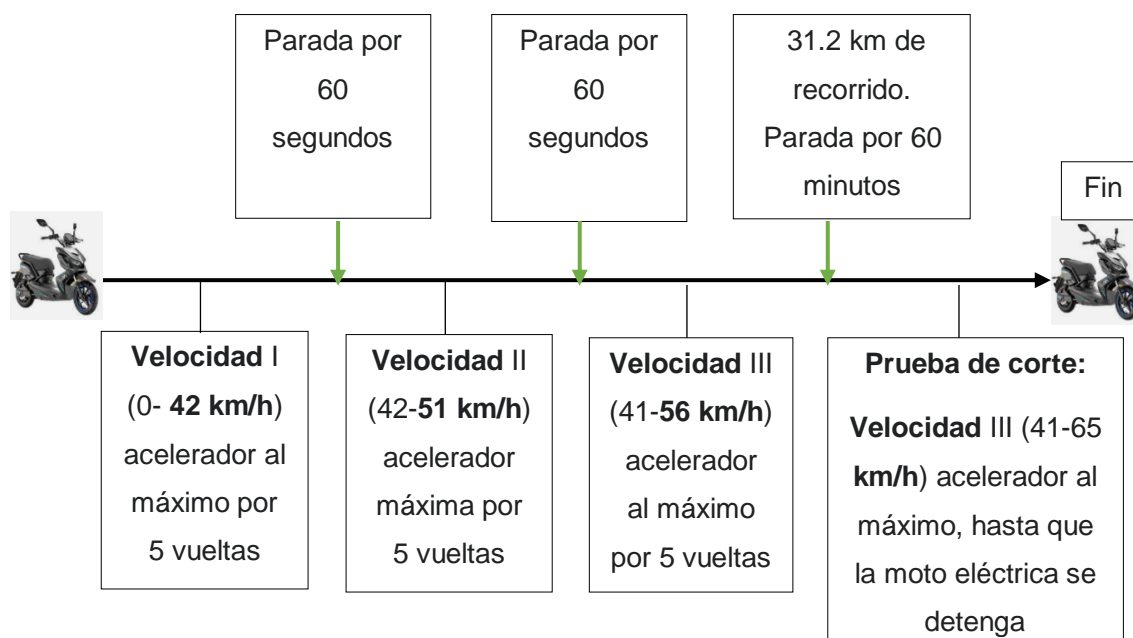
El recorrido inicia en la parte lateral del laboratorio de petroquímica al final de la vía asfaltada del parqueadero, se avanza hasta la primera rotonda cerca al sistema de tratamiento de aguas servidas, doblar a la derecha y comienza la subida hasta la segunda

rotonda cerca del parqueadero principal, luego tomar a la derecha hasta el final de la vía en la vuelta en U cerca al laboratorio de Turismo y avanza de frente al punto de la segunda rotonda donde vira a la izquierda y continua por el desnivel de nuevo hasta la primera rotonda, donde toma dirección a la izquierda y avanza hasta el final del parqueadero donde realiza un giro en U y finaliza en el mismo punto de inicio; hasta aquí se ha completado 1 vuelta, que corresponde a un recorrido de 2.08 km.

Las variables de la tabla 16 indican factores de prueba que se toman en cuenta, estas se deben emular en la prueba inicial y final. En total son 5 vueltas por velocidad (I, II y III), con esto se suma un total de 31.2 km en la fase 1, que se replica en la fase 4. Para el desarrollo de las fases 3 y 6 el trayecto es el mismo, pero la prueba de corte se realiza a máxima velocidad hasta la detención de la moto eléctrica. La siguiente figura muestra un resumen de la prueba.

Figura 79

Diagrama de prueba



Nota. En cada parada se comprueba la temperatura del motor eléctrico.

Resultados obtenidos

En la prueba de campo realizada se lograron obtener datos relevantes de autonomía, velocidad, distancia recorrida, estado de carga de la batería de litio, valores de

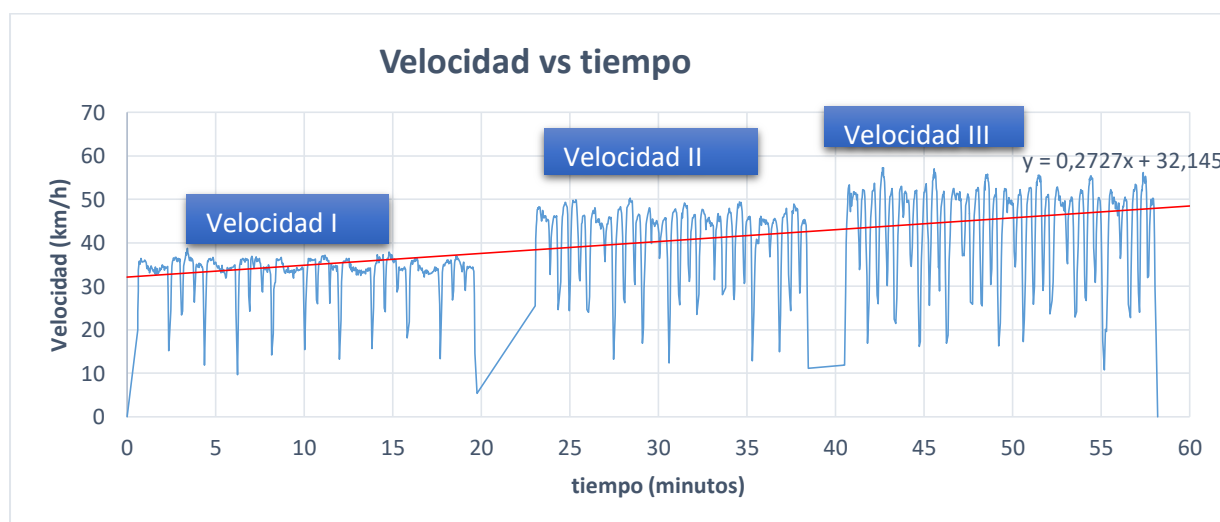
voltaje, corriente y tiempo obtenidos de la aplicación Velocímetro GPS Pro, medidor KG-140F y el voltímetro amperímetro digital ubicados en el tablero, en conjunto facilitaron el análisis comparativo y deductivo de las nuevas prestaciones de autonomía.

Análisis de la fase 1

Luego de realizar las pruebas de ruta se obtuvo el ciclo de conducción (figura 78) para la primera fase con un tiempo total de 58.2 minutos y una distancia total recorrida de 34.42 km. El estado de carga de la batería de litio al final de la fase 1 fué del 62%.

Figura 80

Perfil de velocidad vs tiempo de la fase 1



Nota. Se presenta el ciclo de conducción resultante. La velocidad media en primera velocidad es de 33 km/h, en velocidad 2 es de 40 km/h y en velocidad 3 es de 48 km/h.

Tabla 17

Velocidades de la fase 1

	Velocidad I	Velocidad II	Velocidad III
Valor máximo	38.76 km/h	50.24 km/h	57.32 km/h
Valor promedio	33.61 km/h	42.19 km/h	45.60 km/h

Nota. Se presentan las velocidades de la fase 1.

Análisis de la fase 2

La fase 2 contempla un descanso de 60 minutos pertinentes para evitar fallas por elevadas temperaturas en el motor eléctrico. Un punto importante que se debe considerar

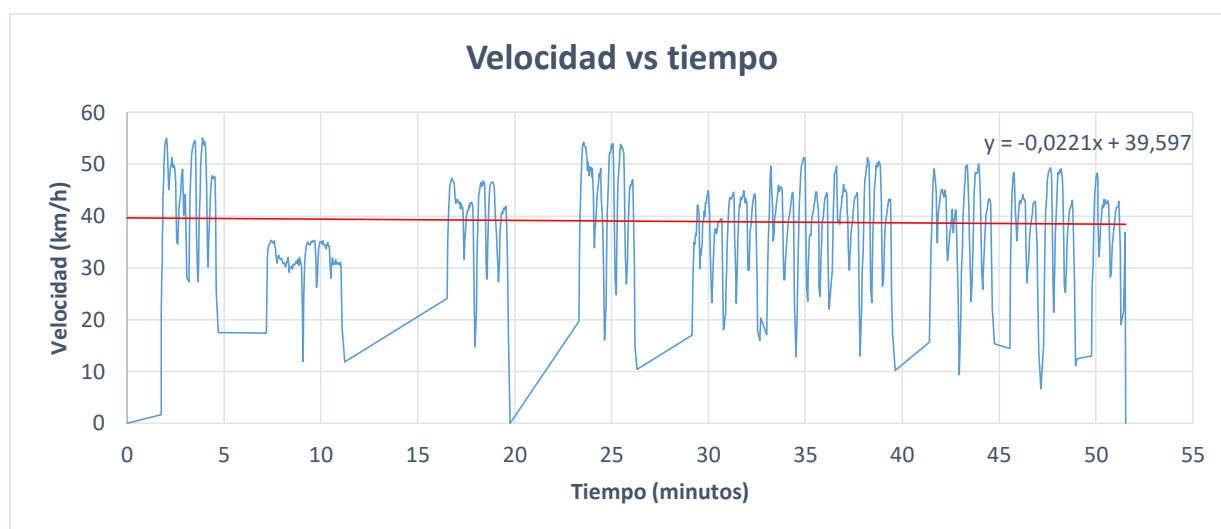
en esta fase es no apagar el tablero y dispositivos de medida porque se pierde la comunicación Bluetooth con la aplicación móvil del medidor KG-140F.

Análisis de la fase 3 o fase de corte

Luego de realizar la prueba de ruta se obtuvo el ciclo de conducción para la fase 3 (figura 79). El tiempo que tardó la moto eléctrica en detenerse es de 51.5 minutos con 20.4 km de recorrido. La velocidad máxima en esta fase fue de 55.08 km/h y un promedio de 39.02 km/h.

Figura 81

Perfil de velocidad vs tiempo de la fase 3



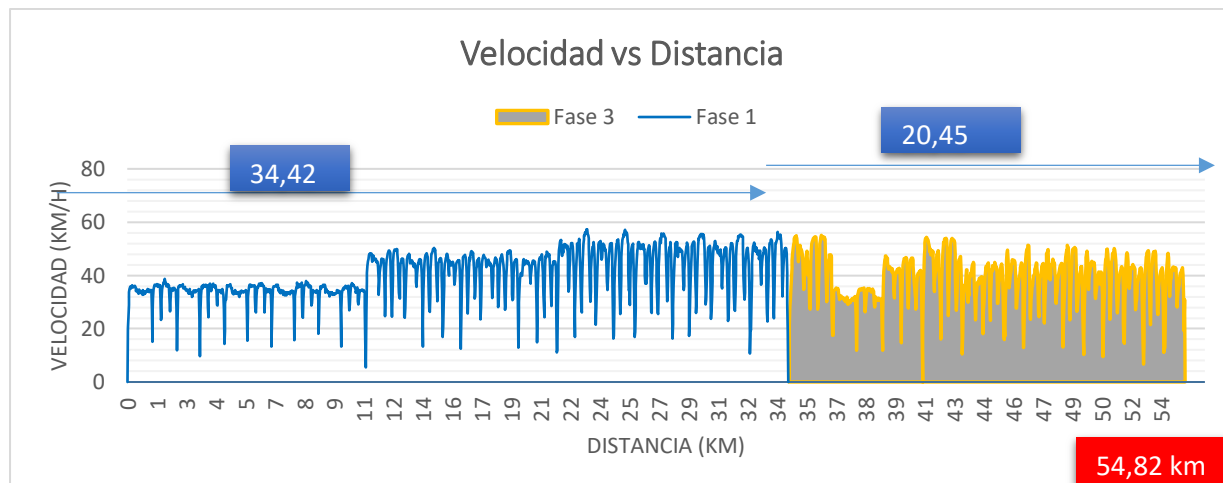
Nota. Se presenta el ciclo de conducción de la fase 3. La curva muestra valles debido a las curvas en U de la pista.

Autonomía inicial

El valor de autonomía inicial resulta de sumar la distancia recorrida en la fase 1 de 34.42 km, 58.2 minutos y la fase 3 con 20.4 km, 51.5 minutos. Se obtiene como resultado una autonomía inicial de 54.82 km de recorrido con un tiempo empleado de 1 hora con 49 minutos. En función de la fase 1 y 3 se analiza el perfil de velocidad obtenido durante todo el recorrido.

Figura 82

Gráfica de autonomía inicial



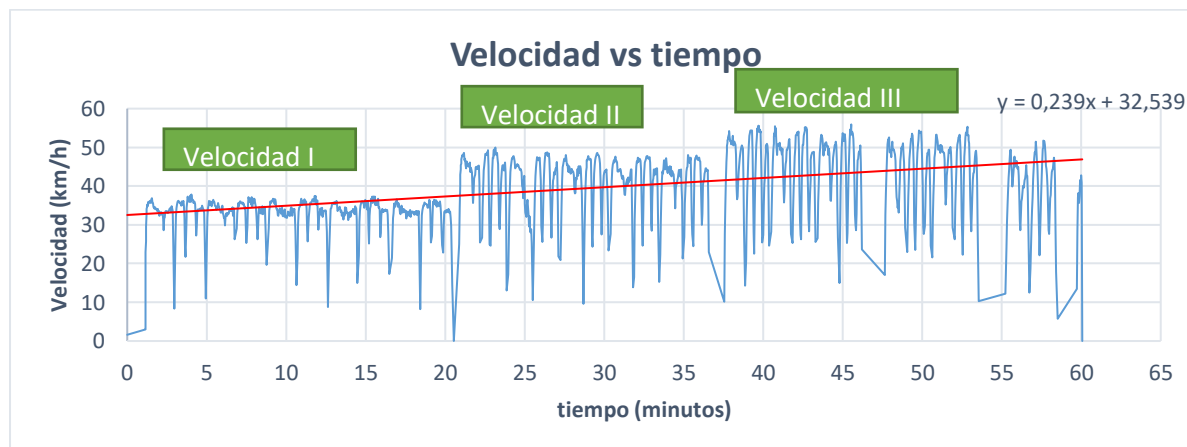
Nota. Se presenta la autonomía inicial con un valor de 54.82 km

Análisis de la fase 4

La fase 4 comprende el desarrollo de las pruebas de ruta con el sistema de carga regenerativo instalado. Se obtiene la gráfica del ciclo de conducción el cual no debe variar mucho del ya analizado en la fase 1. La fase 4 se completa con 34.47 kilómetros recorridos en un tiempo de 60 minutos. El estado de carga de la batería de litio es del 63 %. En esta fase el generador eléctrico recupera toda la energía mecánica de la rueda delantera y carga la batería de ácido plomo.

Figura 83

Ciclo de conducción de la fase 4



Nota. Se presenta el ciclo de conducción resultante de la fase 4.

Tabla 18*Velocidades de la fase 4*

	Velocidad I	Velocidad II	Velocidad III
Valor máximo	37.83 km/h	50.02 km/h	55.93 km/h
Valor promedio	33.25 km/h	41.34 km/h	44.31 km/h

Nota. Se presentan las velocidades alcanzadas en la fase 4.

Análisis de la fase 5

Se utiliza como suministro de energía el sistema de carga regenerativo para cargar la batería de litio. Se activa el interruptor de paso de corriente de la batería de ácido plomo al inversor y se enciende este último. El estado de carga de la batería de litio pasa de 62 % a 79% (Figura 80) en un lapso de 60 minutos, de igual manera el nuevo valor de voltaje es de 78.68 voltios y una capacidad de 17.383 Ah.

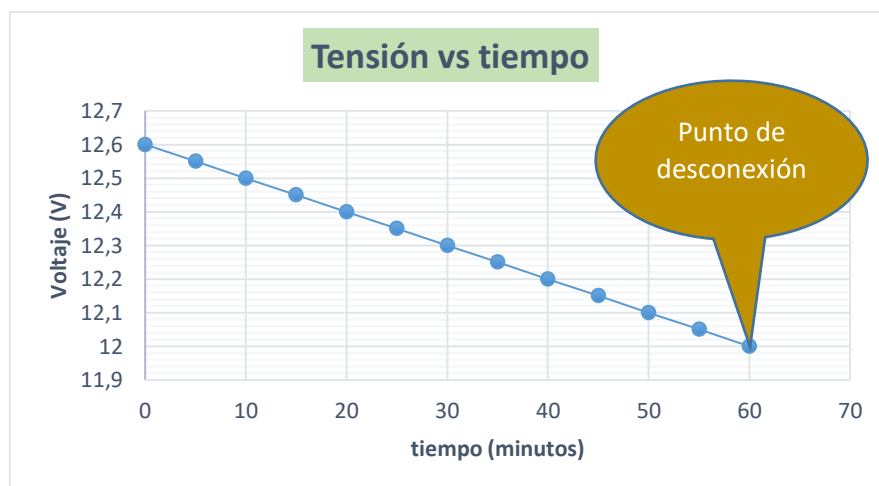
Figura 84*Gráfica de voltaje vs tiempo de la batería de litio*

Nota. Estado de carga de la batería de Litio.

Luego de realizar el proceso de carga se analiza la pérdida de energía en la batería de ácido plomo a través del tiempo para identificar su estado de carga en función del valor de tensión de la misma.

Figura 85

Gráfica de voltaje vs tiempo de la batería de ácido plomo

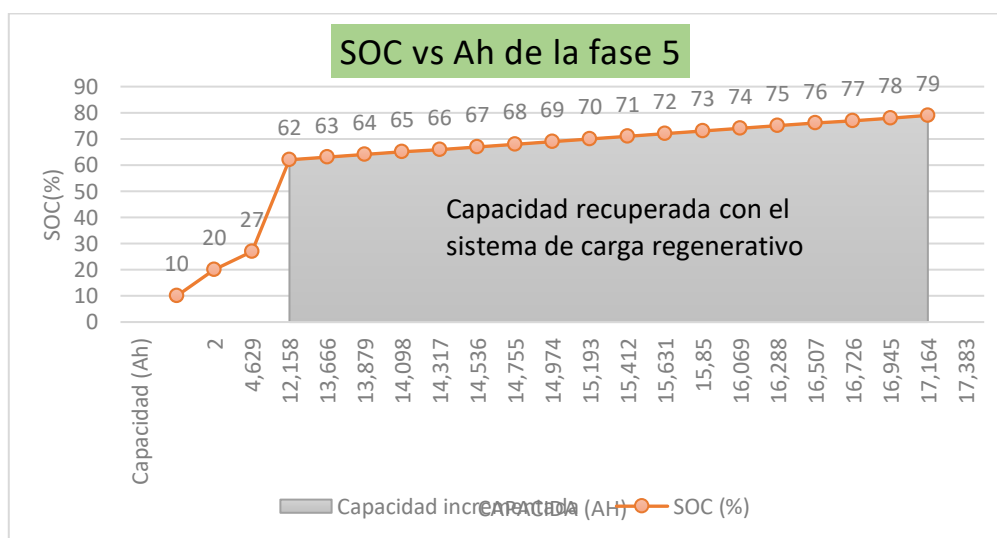


Nota. Se presenta la gráfica del nivel de descarga en valores de voltaje de la batería de ácido plomo. Su valor mínimo es de 12 voltios.

El estado de carga representado en porcentaje es la cantidad de energía almacenada en la batería de litio en relación con la capacidad en Ah (Amperios hora) nominal de la batería y representa la energía restante que puede utilizarse en un tiempo específico.

Figura 86

Capacidad recuperada en la batería de litio



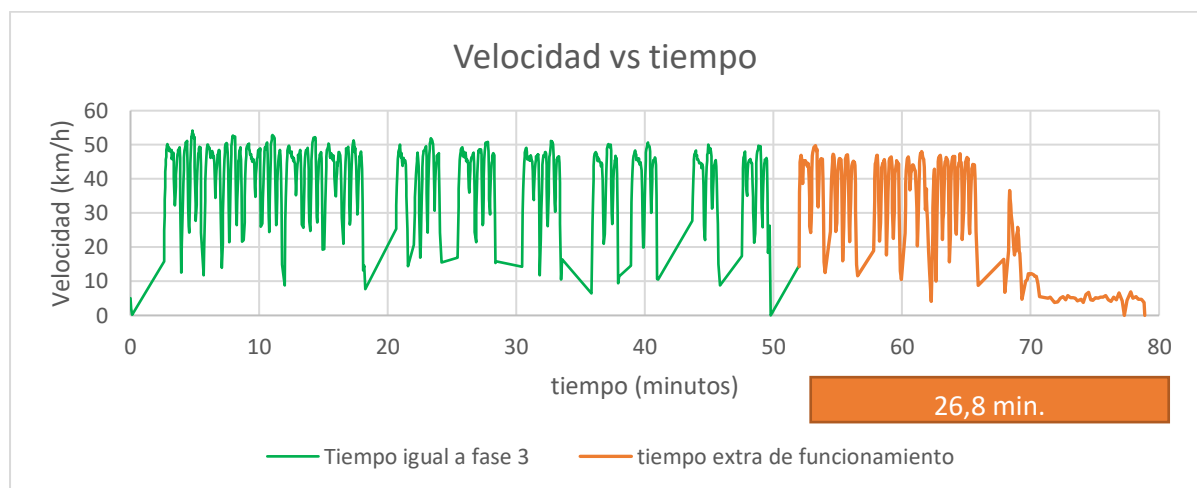
Nota. La figura muestra el estado de carga de la batería de litio una vez comienza el proceso de carga con el sistema de carga regenerativo.

Análisis de la fase 6 o fase de corte

Luego de realizar la prueba de ruta se obtuvo el ciclo de conducción para la fase 6 donde también se incluye el tiempo extra de duración de la batería de litio correspondiente a 26.8 minutos. El tiempo extra depende de las características del trayecto y el clima que se presente en el entorno, esto debido a que el consumo de potencia es mayor en cuestas y climas lluviosos o con vientos fuertes.

Figura 87

Ciclo de conducción de la fase 6



Nota. Se presenta el ciclo de conducción de la fase 6.

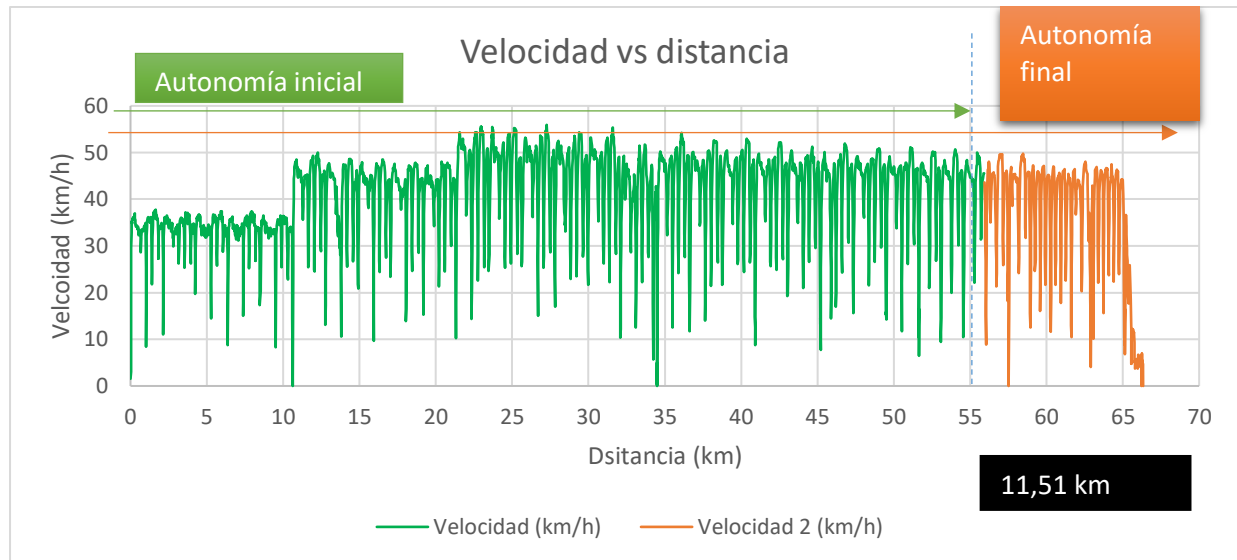
El tiempo que tardó la moto eléctrica en detenerse es de 1 hora y 18.8 minutos con 31.85 km de recorrido. La velocidad máxima en esta fase fue de 54.18 km/h y un promedio de 37.85 km/h.

Autonomía final

El valor de autonomía final resulta de sumar la distancia recorrida en la fase 4 correspondiente a 34.47 km, 60 minutos y la fase 6 equivalente a 31.85 km, 78.8 minutos. Se obtiene como resultado una autonomía final de 66.32 km de recorrido en un tiempo de 2 horas con 18 minutos como se muestra en la figura 87.

Figura 88

Gráfica de la autonomía final de la moto eléctrica



Nota. Se presenta el incremento de autonomía equivalente a 11.51 km.

Este valor es válido para trayectos planos con leves ascensos de lo contrario la autonomía varía de acuerdo a las condiciones geográficas de la pista o trayecto, es decir para lugares con pendientes pronunciadas o constantes durante el recorrido este valor disminuye debido a que se utiliza mayor energía de la batería de litio.

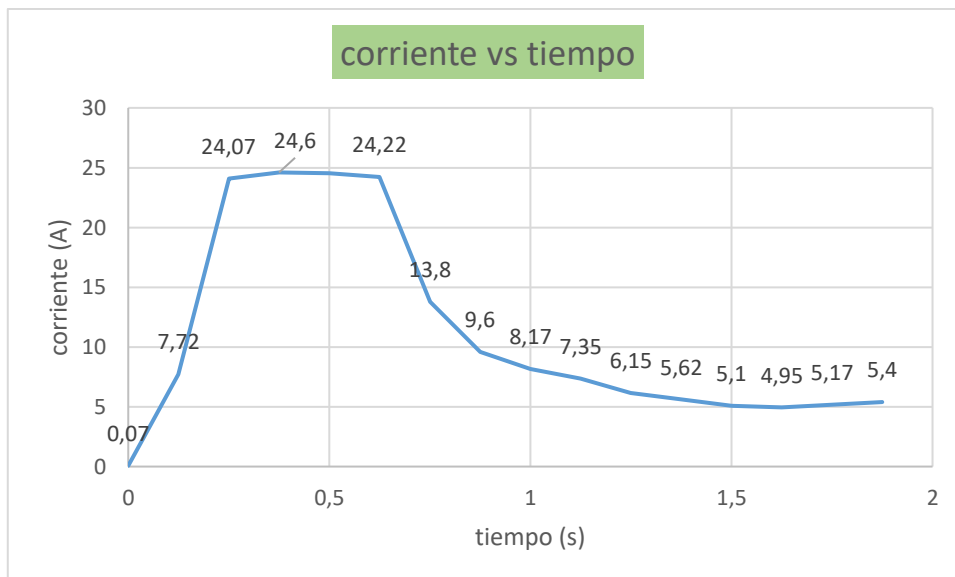
Comportamiento del voltaje y la corriente en cada marcha

La gráfica característica de arranque hace posible identificar el consumo de corriente del motor, al vencer la inercia o acelerar bruscamente con el fin de pasar de bajas a elevadas velocidades en el menor tiempo, esto depende en gran parte de la conducción característica de cada piloto. El mayor consumo de energía en la batería de litio, sucede cuando se requiere mayor potencia para mover una carga, otro punto importante a considerar es la presión de los neumáticos que corresponde a un valor de 35 PSI.

La figura 89 evidencia que en los 0.5 segundos iniciales del movimiento se necesita un consumo elevado de corriente que corresponde a 24.6 A; sin embargo, una vez que la motocicleta alcanza velocidad crucero el consumo de corriente disminuye hasta 5.4 A.

Figura 89

Gráfica característica de arranque

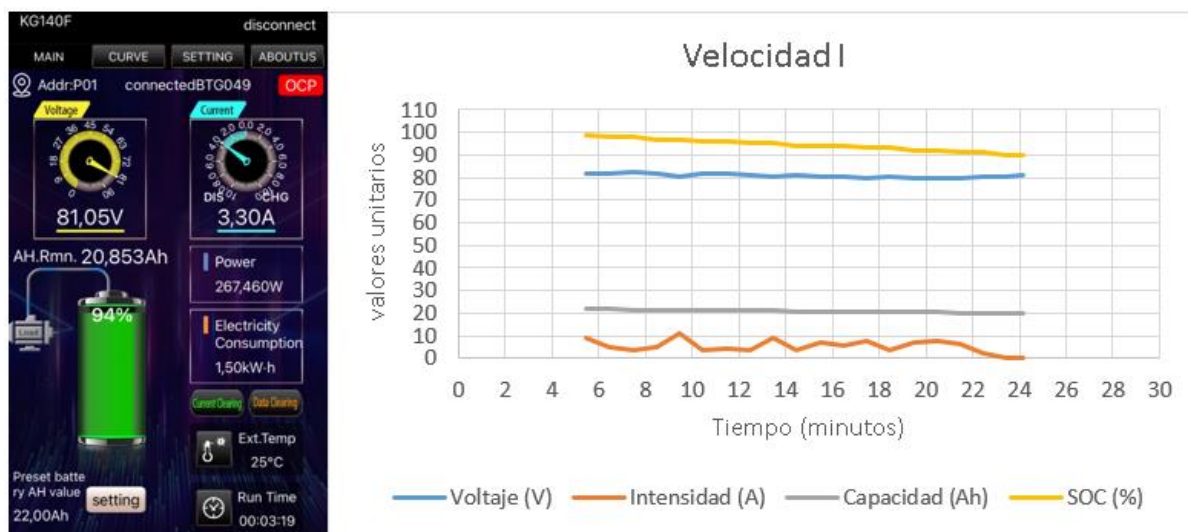


Nota. Cada vez que el motor eléctrico rompe la inercia consume la máxima corriente.

Es preciso evaluar el comportamiento de la corriente, el estado de carga y la capacidad de la batería de litio en un tiempo específico y observar la variación de estos valores durante las pruebas a diferentes velocidades.

Figura 90

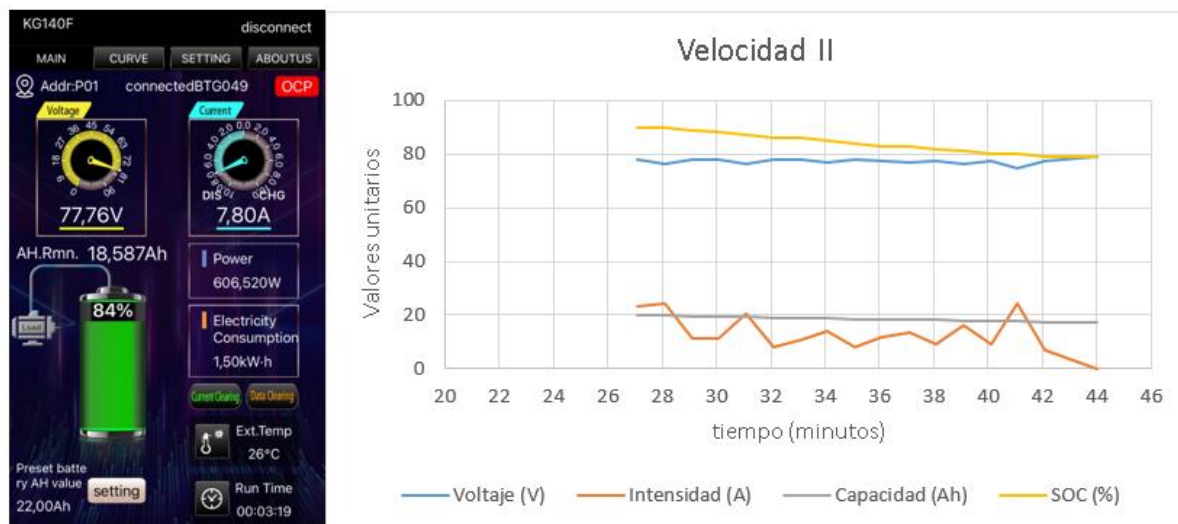
Comportamiento del consumo eléctrico en velocidad I



Nota. Se presenta el comportamiento del voltaje, la Intensidad, capacidad y estado de carga SOC en función del tiempo durante la velocidad I.

Figura 91

Comportamiento del consumo eléctrico en velocidad II

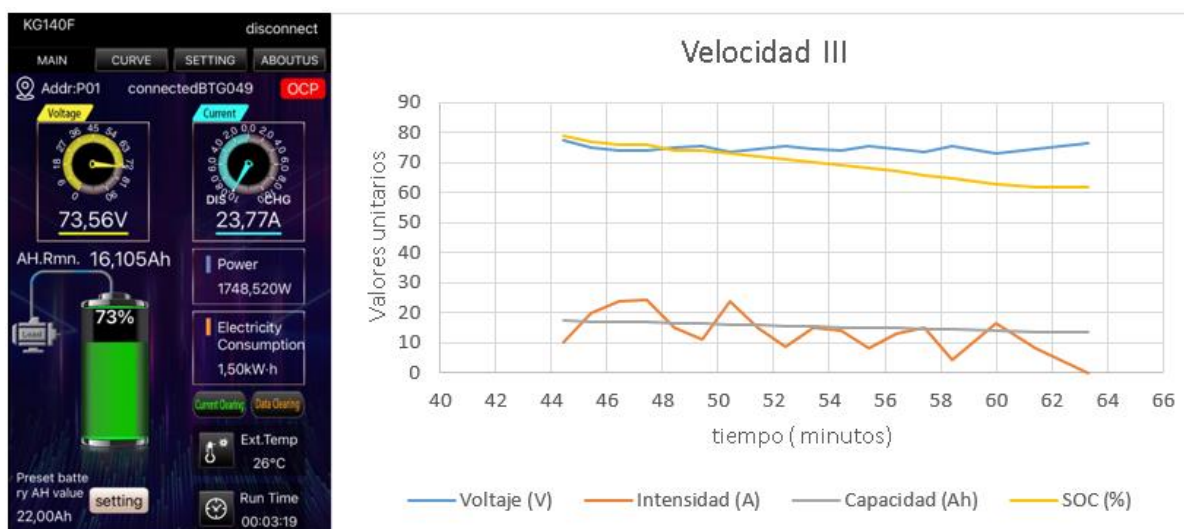


Nota. Se presenta el comportamiento del voltaje, la Intensidad, capacidad y estado de carga SOC en función del tiempo durante la velocidad II.

Todos los valores toman una trayectoria de pendiente negativa a excepción de la corriente que se comporta en función de la demanda de potencia con valores pico de 20-30 Amperios.

Figura 92

Comportamiento del consumo eléctrico en velocidad III



Nota. Nota. Se presenta el comportamiento del voltaje, la Intensidad, capacidad y estado de carga SOC en función del tiempo durante la velocidad III.


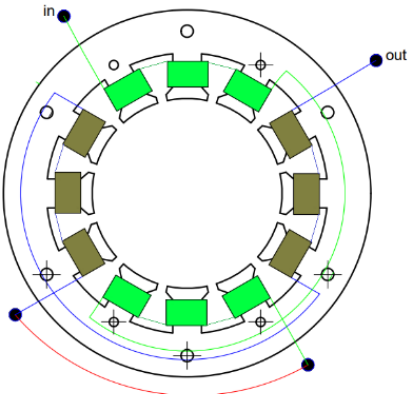
Pruebas del generador eléctrico

Con el fin de verificar el funcionamiento y los valores de voltaje y corriente producidos en el generador eléctrico se realizan las siguientes pruebas:

- Prueba de circuito abierto
- Prueba de cortocircuito entre el bobinado y el núcleo ferromagnético
- Resistencia de fase
- Continuidad en los bobinados
- Voltaje alterno generado
- Corriente generada

Tabla 19

Pruebas de funcionalidad del generador eléctrico

Generador eléctrico (12-20 voltios AC)			
			
Tipo de conexión:	Monofásica	R. del bobinado:	9.06 – 10 Ω
Pruebas con el multímetro			
Prueba de circuito abierto:	Continuidad en el bobinado, lo que significa que no hay cortes en el circuito.		
Prueba de cortocircuito entre el bobinado y el núcleo de hierro:	Circuito aislado, lo que refiere a un sistema aislado entre bobinas y núcleo,		
Valores de salida			
Velocidad I	Voltaje:	12.1 V	Intensidad: 0.4 A
Velocidad II	Voltaje:	12.8 V	Intensidad 0.6 A
Velocidad III	Voltaje:	13.5 V	Intensidad 1.0 A

Nota. Se presentan los datos de funcionamiento del generador eléctrico. El valor de voltaje puede variar en función de velocidades superiores en bajada.

Capítulo V

Marco administrativo

Recursos

Los medios para el desarrollo de la investigación fueron: recursos humanos, materiales y tecnológicos.

Recursos humanos

Tabla 14

Recursos humanos

Orden	Descripción	Cantidad	Función
1.	Wilmer Isaac Cuñas Picho	1	Investigador
2.	Ing. Washington Germán Erazo Laverde	1	Colaborador Científico

Nota. En la tabla se describen las personas involucradas en la investigación.

Recursos materiales

Tabla 15

Recursos materiales

Orden	Cantidad	Descripción	Valor unitario	Valor total
1	1	Moto eléctrica	750	750
			(proporcional)	(proporcional)
2	16	Imanes de Neodimio	1.40	22.40
3	25	Corte laser	16	400
4	2	Duraluminio	100	200
5	1	Regulador eléctrico	10	10
6	1	Elementos eléctricos y electrónicos	50	50
7	1	Mecanismo tensor	25	25
8	1	Alambre magneto	30	30

Orden	Cantidad	Descripción	Valor unitario	Valor total
9	12	Pernos	0.30	4.80
10	1	Pintura y barniz	20	20
11	1	Inversor	50	50
12	1	Batería de ácido plomo	36	36
13	2	Aislante eléctrico (Material PETG- Impresión 3D)	5	10
14	1	Núcleo del generador eléctrico (Material PETG-Impresión 3D)	8	8
15	1	Cubierta posterior y frontal del estator (Material PETG-Impresión 3D)	70	70
16	900	copias	0.02	18
17	20	combustible	2.55	51
18	2	Alimentación movilización	50	100
			Costo total	\$ 1 855.2

Nota. En la tabla se describe el presupuesto de materiales, componentes y equipos del proyecto de investigación.

Recursos tecnológicos

Tabla 16

Recursos tecnológicos

Orden	Detalle	Cantidad	Costo Unitario	Costo
1.	Curso de motores BLDC	1	50	50
2.	Software Inventor Autodesk	1	-	-
3.	Medidor digital KG-140F	1	40	40
4.	Software FEMM	1	-	-
			TOTAL	\$ 90

Nota. En la tabla se mencionan los recursos tecnológicos utilizados en la investigación.

Costo neto de la investigación

El costo empleado para el desarrollo de la investigación es de \$\$ 1 945.2 dólares americanos.

Capítulo VI

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Un sistema KERS utiliza generadores eléctricos para aprovechar la energía mecánica disponible en un vehículo y recuperarla en forma de energía eléctrica, este tipo de sistemas se utilizan en vehículos eléctricos e híbridos para incrementar su autonomía o aumentar la potencia en un tiempo específico.
- El voltaje producido en un generador eléctrico es directamente proporcional a la cantidad de flujo magnético, la frecuencia y el número de vueltas de la bobina.
- El factor determinante en la implementación de un sistema de carga regenerativo es el espacio disponible en la rueda y la ubicación idónea de todos sus componentes en el interior del maletero de la motocicleta eléctrica.
- El análisis por el método de elementos finitos utilizando el software FEMM, permite observar y determinar la densidad magnética en la geometría resultante del cálculo matemático para realizar correcciones y mejoras.
- Mediante la simulación y reconocimiento eléctrico se concluye que las 4 partes fundamentales para el control de tracción en una moto eléctrica son: el acelerador electrónico, el controlador de onda sinusoidal, la batería de litio y el motor eléctrico.
- La disponibilidad de imanes de Neodimio de diferentes formas y tamaños es muy escasa y con precios elevados mientras que la selección de dispositivos eléctricos y electrónicos es variada y asequible en el mercado local.
- Todos los dispositivos electrónicos de potencia generan calor y su disposición en lugares cerrados debe considerar perforaciones o rejillas que aseguren la circulación de aire y la salida de calor hacia el exterior.
- Para generar electricidad útil de carga con valores de 12 voltios el número de revoluciones (rpm) de la rueda delantera debe superar las 1000 rpm, por esto se

debe implementar un mecanismo que multiplique las rpm del rotor hasta un valor idóneo.

- Para obtener valores claros del estado de carga de una batería de litio y en tiempo real es imprescindible utilizar un medidor KG-140F que monitorea la batería y muestra los datos en pantalla. Además implementar un voltímetro-amperímetro en el tablero facilita la obtención de datos de voltaje y corriente producidos por el generador eléctrico.
- Un protocolo de pruebas enmarca todos los factores técnicos y variables que se deben tomar en cuenta para realizar una prueba de ruta y obtener un perfil de velocidad vs tiempo o ciclo de conducción específico para cada prueba.
- Para producir valores de corriente más elevados dentro de las rpm disponibles es indispensable disminuir el calibre del alambre magneto o aumentar la intensidad de campo magnético. Estos dos puntos implican aumento de costos en el diseño.
- El mayor consumo de corriente (15 a 25 Amperios) de una moto eléctrica sucede al romper la inercia y comenzar su movimiento, así como también en cuestas y al mover grandes cargas, esto significa un trabajo de los componentes electrónicos con valores de corriente elevados, que en un tiempo considerable produce daños en el puente de transistores.
- La implementación de sistemas de carga regenerativa proporciona una autonomía extra en la motos eléctrica del 15 al 25 %, esto condiciona su uso entre otras razones porque considera un cargador extra para el acumulador auxiliar y menos espacio en el maletero.
- Un estado de carga del 20% no permite seguir operando el motor eléctrico con carga, sin embargo esta energía aún es suficiente para encender el tablero y prender las luces por un tiempo determinado.
- El circuito electrónico que indica la activación del generador eléctrico emplea un relé que se activa cuando el generador eléctrico produce electricidad y activa un led

verde, en caso de una mala conexión o circuito abierto el relé no se activa y el led rojo queda encendido para denotar que el cableado se debe revisar.

- Se concluye que se puede optimizar el tiempo de fabricación y ensamblaje de un generador eléctrico al utilizar un proceso de fabricación por impresión 3D de componentes como: aislante, cubiertas y carcasa.

Recomendaciones

- Es indispensable conocer el número de revoluciones exactas del objeto del cual se toma la energía mecánica para evitar fallos en el cálculo matemático y el uso de mecanismos extras que multiplican la velocidad del rotor.
- Para iniciar el diseño del generador eléctrico se recomienda enlistar los dispositivos, objetos o materiales que no se pueden manufacturar o alterar su geometría como los imanes y el alambre magneto.
- Se recomienda utilizar chapas metálicas de 1 milímetro para la fabricación del núcleo ferromagnético, para lograr una mayor longitud del mismo y abaratar costos, si bien esto repercute en las pérdidas por corrientes de Foucault lo que ocasiona una mayor temperatura en los bobinados, la ubicación del generador eléctrico permite una buena refrigeración por el flujo de aire durante el movimiento.
- Bajo condiciones normales de uso de la motocicleta eléctrica se recomienda conectar un cargador para la batería de ácido plomo cuando se realice una carga de la batería de litio, el primero es opcional pero mantiene el estado de carga de la batería en valores óptimos sin dejar toda la carga al generador eléctrico ya que se requieren de 2 viajes completos para recuperar toda la energía.
- Se recomienda trabajar con un ancho de diente de 4-6 mm para asegurar un margen de espacio extra al momento de bobinar o bien restar el espesor del aislante a utilizar entre el bobinado y el núcleo ferromagnético.
- La batería de ácido plomo y la batería de litio no deben permanecer inactivas por largos periodos de tiempo, por lo que se recomienda realizar ciclos de carga y descarga al menos una vez por semana.
- Con el fin de evitar fallos por cortocircuitos o circuitos abiertos, para unir los cables se recomienda utilizar terminales de conexión o socket, además de mantener un orden y etiquetado en cada cable añadido para evitar confusiones.

- Para mejorar los valores de autonomía establecidos en esta investigación, para futuros proyectos se recomienda diseñar un generador eléctrico de mayor diámetro y utilizar una batería de mayor capacidad.

Bibliografía

- M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology). (1965). *Circuitos Magnéticos y Transformadores*. New York: REVERTÉ.
- Admin. (05 de Junio de 2014). *Blog Baterías de Litio*. Obtenido de Bateriasdelitio.net:
<https://www.bateriasdelitio.net/?p=6>
- Agotegara, J., & Pinzón, A. (Noviembre de 2020). *Motor de Imanes Permanentes [Gráfico]*.
 Obtenido de Editores: <https://bit.ly/3hnbyyA>
- Aideepen ELEC&Lifes. (12 de Diciembre de 2022). *Voltímetros digitales [Gráfico]*. Obtenido
 de Aliexpress Store: <https://es.aliexpress.com/item/32968097355.html>
- Automoción, S. d. (2011). *Vehículo Eléctrico: Desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocio*. Barcelona: LIBROOKS.
- Ballesteros, L., Padilla, J., & Franco, D. (2018). *Política de movilidad sustentable en la Ciudad de México. Hacia un nuevo modelo*. México: Proyecto M2050.
- Banco Bilbao Vizcaya Argentaria. (24 de Febrero de 2021). *¿Qué es una moto eléctrica?*
 Obtenido de BBVA: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-una-moto-electrica/>
- Basekga, M. (2019). *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. Madrid: Editex, S. A.
- Bastian, P., Eichler, W., Huber, F., Jaufmann, N., Manderla, J., Spielvogel, O., . . . Tkotz, K. (2001). *Electrotecnia*. Madrid: Ediciones AKAL.
- Boylestad, R. (2004). *Introducción al Análisis de Circuitos*. Mexico: PEARSON EDUCACIÓN.
- BUN-CA. (2011). *Motores Eléctricos*. San José, Costa Rica: Diseño Editorial S.A.
- Chiroque, J. (2010). *Microaerogenerador IT-PE-100 PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL*.
 Lima: Soluciones Prácticas.
- dcbBALLESTER. (11 de 12 de 2022). *Carga de batería en 3 etapas [Gráfico]*. Obtenido de
 dcbBALLESTER: <https://dcbballester.com/carga-de-baterias-en-3-etapas>
- Dietsche, K.-H., & Klingebiel, M. (2005). *Manual de la Técnica del Automóvil*. Plochingen: Robert Bosch GmbH.

- Discoveries, I. (22 de Enero de 2020). *Sistema KERS [Gráfico]*. Obtenido de Innovation Discoveries: <https://innovationdiscoveries.space/kinetic-energy-recovery-system-ers/>
- Domínguez, E., & Ferrer, J. (2018). *Sistemas de Transmisión y frenado*. Madrid: Editex.
- Donate, A. H. (1999). *Principios de Electricidad y Electrónica II*. Barcelona: Marcombo.
- Electrocables. (2018). *Catálogo de Productos*. Daule.
- Enríquez, G. (2004). *El libro de los generadores, transformadores y motores eléctricos*. [Gráfico], Gilberto Enríquez: Limusa.
- Espinosa, M., & Belenguer, E. (2004). *Problemas Resueltos de Circuitos Magnéticos y Transformadores*. Balaguer: Universitat Jaume I.
- EUROBALT. (6 de Noviembre de 2022). *Imanes Permanentes*. Obtenido de EUROBALT: <https://eurobalt.net/es/blog/2019/04/16/permanent-magnet/>
- Fink, D., Beaty, W., & Carroll, J. (1981). *Manual Práctico de Electricidad para Ingenieros*. Barcelona: REVERTÉ.
- Fitzgerald, A., Kingsley, C., & Umans, S. (2004). *Máquinas Eléctricas*. [Gráfico]: McGraw-Hill.
- Fowler, R. (1994). *Electricidad Principios y Aplicaciones*. [Gráfico], Richard Fowler: Reverté S.A.
- Gac, A. (2016). *Técnic Electricista 3- Magnetismo*. Barcelona: RedUSERS.
- García, C. (04 de Junio de 2018). *Noticias del motor [Gráfico]*. Obtenido de Autonoción: <https://www.autonocion.com/magnax-motor-electrico-flujo-axial/>
- García, M. C. (2017). *Diseño Electromagnético de un Generador Eléctrico para Turbina Eólica de 100 KW*. [Tesis de ingeniería, Universidad politécnica de Madrid]. Repositorio institucional UPM. <https://oa.upm.es/>.
- Gómez, Á. (2019). *Diseño de un Motor Síncrono de Imanes Permanentes Para el Accionamiento de un Dispositivo Elevador*. [Tesis de Ingeniería, Universidad Politécnica de Madrid], Repositorio Institucional UPM. <https://oa.upm.es/>.
- Guru, B. (2003). *Máquinas Eléctricas y Transformadores*. México: Alfaomega.

- Gussow, M. (1991). *Fundamentos de Electricidad*. México: McGraw-Hill.
- Hangzhou Junce Instruments Co., Ltd. (17 de Diciembre de 2021). *DC Voltage and Current meter [Gráfico]*. Obtenido de junteks: <http://www.junteks.com/>
- Hanselman, D. (1994). *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Harper, H. (2004). *El Libro Práctico de los Generadores, Transformadores y Motores Eléctricos*. México: Limusa.
- Hendershot, J., & Miller, T. (2010). *DESIGN OF BRUSHLESS PERMANENT MAGNET MACHINES*. Florida: Bookmasters, Inc.
- Hewitt, P. (2004). *Física Conceptual* (Vol. IX). México: PEARSON EDUCACION.
- Jmotoblogs. (24 de Abril de 2020). *Jmotoblogs*. Obtenido de <https://jaramotoblogs.wordpress.com/2020/04/24/jmotoblogs-sistema-de-rectificacion-y-carga-de-motos-para-principiantes/>
- Kappatou, J., Zalokostas, G., & Spyratos, D. (2016). Design Optimization of Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Synchronous Machine Using 3D FEM Analysis. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 8, 257.
- Khan Academy. (11 de Noviembre de 2022). *¿Qué es el flujo magnético? [Gráfico]*. Obtenido de Khan Academy: <https://bit.ly/3UhrWzk>
- Kuphal, T. (14 de Noviembre de 2020). *Lessons In Electric Circuits Volume III*. Obtenido de Ibiblio: https://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/Semi/SEMI_3.html
- Lucendo, J. (2019). *Manual Técnico del Automóvil*.
- Manzano, J. (1999). *Mantenimiento de máquinas eléctricas*. Madrid: Paraninfo.
- Manzano, J. (2008). *Electricidad I: Teoría básica y prácticas*. Barcelona: MARCOMBO.
- Martínez, O. (2014). *Sistemas de almacenamiento energético mecánico en el mundo de la automoción*. Valladolid: Cidaut.
- MathWorks. (15 de Noviembre de 2022). *Understanding the Motor Control BLDC Algorithms*. Obtenido de MathWorks:

https://la.mathworks.com/campaigns/offers/next/understanding-bldc-motor-control-algorithms/motor-speed-control.html?s_tid=dl_prv_nxt

Minguela, I. (2016). *Diseño eléctrico y electrónico de una motocicleta eléctrica infantil 2x2*.

[Tesis de ingeniería, Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales].

Repositorio institucional UVaDOC. <https://uvadoc.uva.es/>.

Montoya, F. (2016). *México Patente nº WO2016076699A1*.

Mujal, R. (2004). *Tecnología eléctrica*. Barcelona: EDICIONS UPC.

Pérez, W. (2000). *Física Teoría y Práctica*. Perú: San Marcos.

Rashid, M. (2004). *Electrónica de Potencia Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. México: PEARSON.

Redacción. (15 de Noviembre de 2010). *Generador Motor Integrado (IMG) [Gráfico]*.

Obtenido de Motorenlínea.es: <https://www.motorenlínea.es/articulo-848-audi-q5-ahora-tambien-hibrido>

Redacción. (11 de Agosto de 2010). *Motor Generador de Bosch [Gráfico]*. Obtenido de

motorenlínea.es: <https://www.motorenlínea.es/articulo-456-bosch-a-la-vanguardia-de-la-tecnologia-hibrida>

Ros, A., & Barrera, Ó. (2017). *Vehículos Eléctricos e Híbridos*. Madrid: Paraninfo.

Sáenz, G., & Vidaller, T. (2010). *Sistema para la Recuperación de la Energía Cinética perdida durante la Frenada en la Fórmula 1*. Zaragoza.

Senner, A. (1994). *Principios de Electrotecnia*. Barcelona: REVERTÉ.

Soloelectronicos. (1 de Noviembre de 2016). *Construyase su propia batería [Gráfico]*.

Obtenido de Soloelectrónicos.com:

<https://soloelectronicos.com/2016/11/01/construyase-su-propia-bateria/>

TEINSER, S. (s.f.). *Materiales de Aislamiento Eléctrico*. Bogotá: Hoja de especificaciones técnicas. Obtenido de [http://deltamackalles.azurewebsites.net/wp-](http://deltamackalles.azurewebsites.net/wp-content/uploads/2016/10/03-Isonom-NMN-es-Clase-H.pdf)

[content/uploads/2016/10/03-Isonom-NMN-es-Clase-H.pdf](http://deltamackalles.azurewebsites.net/wp-content/uploads/2016/10/03-Isonom-NMN-es-Clase-H.pdf)

Trashorras, J. (2019). *Vehículos Eléctricos*. Madrid: Paraninfo.

TRUPER. (19 de Diciembre de 2022). *Inversor de corriente de 750W, Truper*. Obtenido de Truper.com: https://www.truper.com/ficha_tecnica/Inversor-de-corriente-de-750-W-4.html

Vallcorba, G., Roncal, B., & Arias, J. (2006). *Electrotecnia*. Mc Graw Hill.

Vargas, F., & Saldarriaga, M. (1990). *Máquinas Eléctricas Rotativas*. Lima: CONCYTEC.

Wikipedia. (2011). *Reluctancia magnética*. [Gráfico]. Wikipedia la Enciclopedia Libre, https://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_magnetico.

Yupanqui, M. (2017). *Diseño de generador hidroeléctrico portable para zonas rurales*. [Tesis de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú], Repositorio Institucional PUCP. <https://repositorio.pucp.edu.pe/>.

Zapata, F. (19 de Febrero de 2020). *Lifeder*. Obtenido de Lifeder: <https://www.lifeder.com/reluctancia-magnetica/>

Zbar, P., Malvino, A., & Miller, M. (2001). *Prácticas de Electrónica*. México: Alfaomega.

Anexos