



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**Tema:**

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

**Autores:** Cuñas Picho, Wilmer Isaac

**Director:** Ing. Erazo Laverde, Washington Germán.

**Latacunga, Enero 2023**



# Contenido

- Antecedentes
- Planteamiento del problema
- Descripción resumida del proyecto
- Justificación e importancia
- Objetivos de la investigación
  - General
  - Específico
- Meta de la investigación
- Marco teórico
  - Movilidad eléctrica
  - Motocicleta eléctrica
  - Autonomía de un vehículo eléctrico
  - Sistema KERS
  - Generadores eléctricos
  - Imán permanente
  - Generador síncrono de imanes permanentes
  - Núcleo ferromagnético



- Núcleo ferromagnético
- Tipos de corriente
- Inversor de corriente
- Regulador de voltaje
- Acumuladores de energía
- Motor eléctrico BLDC
- Diseño y construcción
  - Concepción de la idea
  - Requerimientos
  - Diseño del generador eléctrico
  - Variables de trabajo
  - Fabricación y manufactura de componentes
  - Ensamblaje del sistema de carga regenerativo
  - Etapas de potencia
  - Conexión general
  - Dispositivos de medición
- Pruebas y análisis de resultados
- Conclusiones y recomendaciones

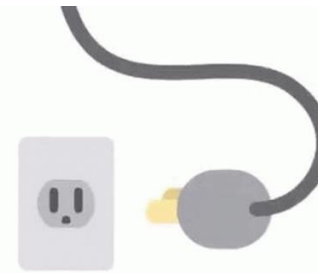


# Antecedentes

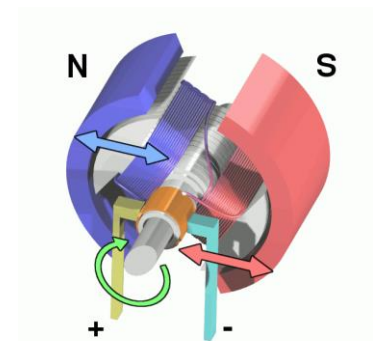
Los altos costos económicos y ambientales asociados con los motores de combustión interna. (Cárdenas, 2019, párr. 1).



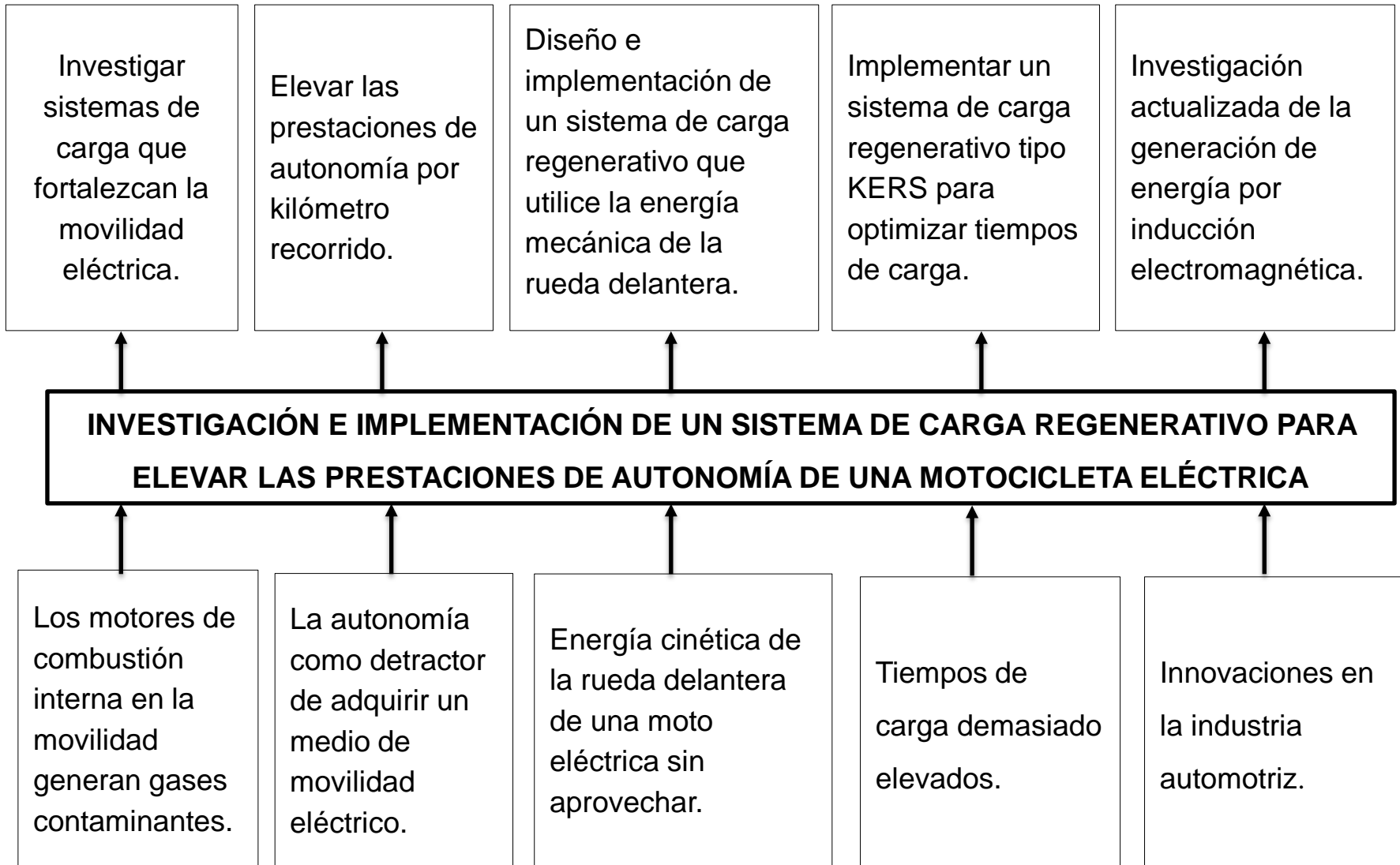
Según (Varela, 2020) la principal limitación de los vehículos eléctricos es su dependencia de conectarse a la red eléctrica.



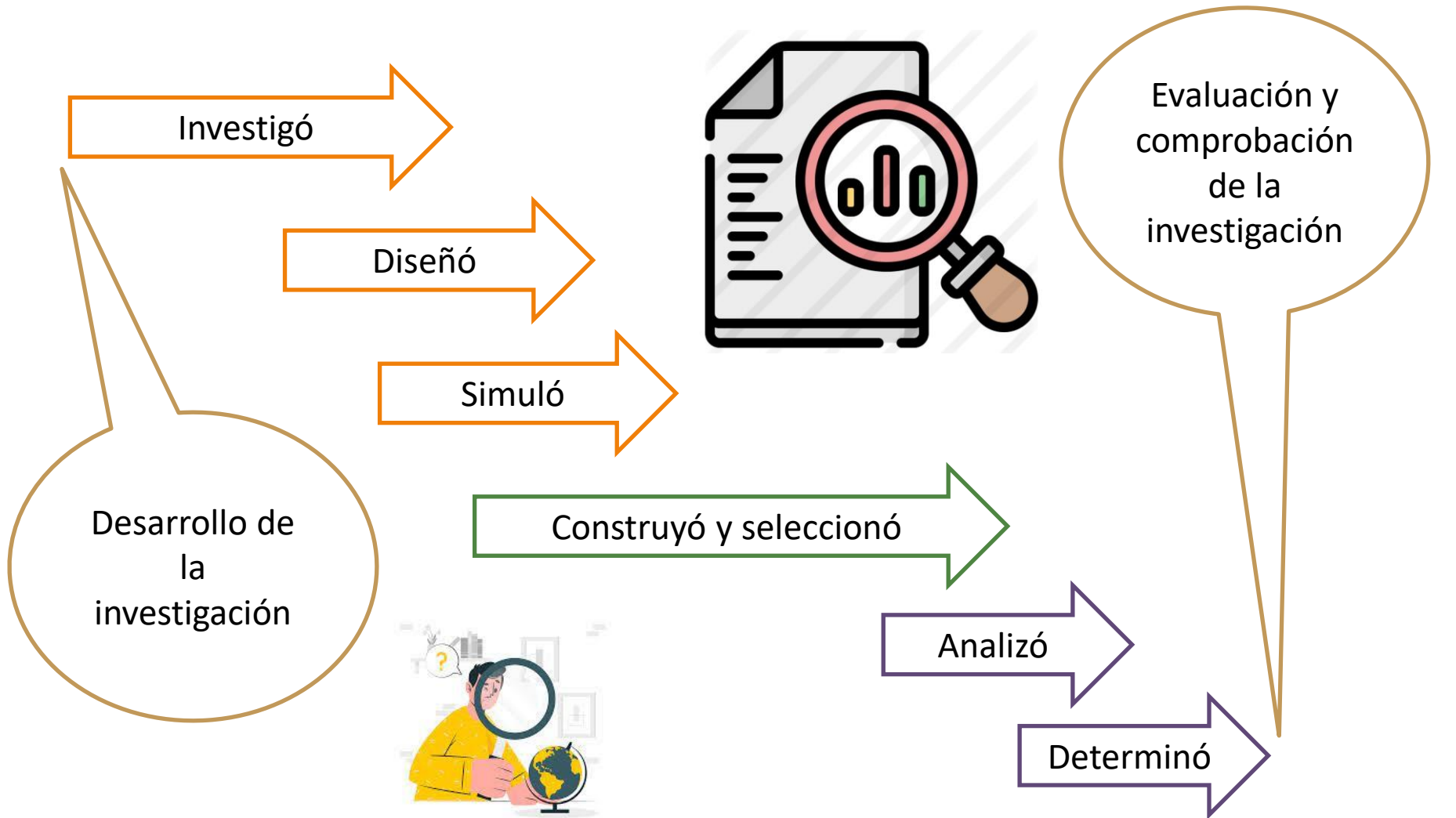
Para aprovechar la energía cinética del vehículo se hace necesario el uso de generadores eléctricos con el objetivo es proporcionar una opción portátil de generación de electricidad a través de la conversión de energía mecánica en energía eléctrica” (México Patente nº WO2016076699A1, 2016).



# Planteamiento del Problema



# Descripción resumida del proyecto



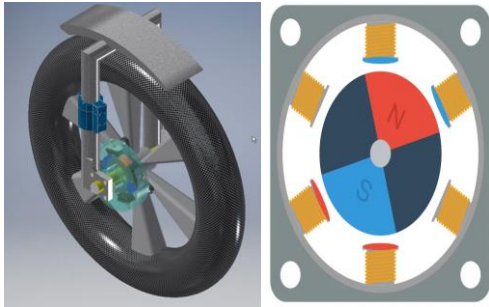
# Justificación e importancia

1



La contaminación de los motores de combustión.

2



Aprovechar la energía mecánica y transformarla en eléctrica.

Investigar sistemas eléctricos-electrónicos y mecánicos que en conjunto mejoren las prestaciones en kilómetros recorridos de una moto eléctrica.

4



Incrementar la autonomía.

3

Loading





# Objetivo general

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





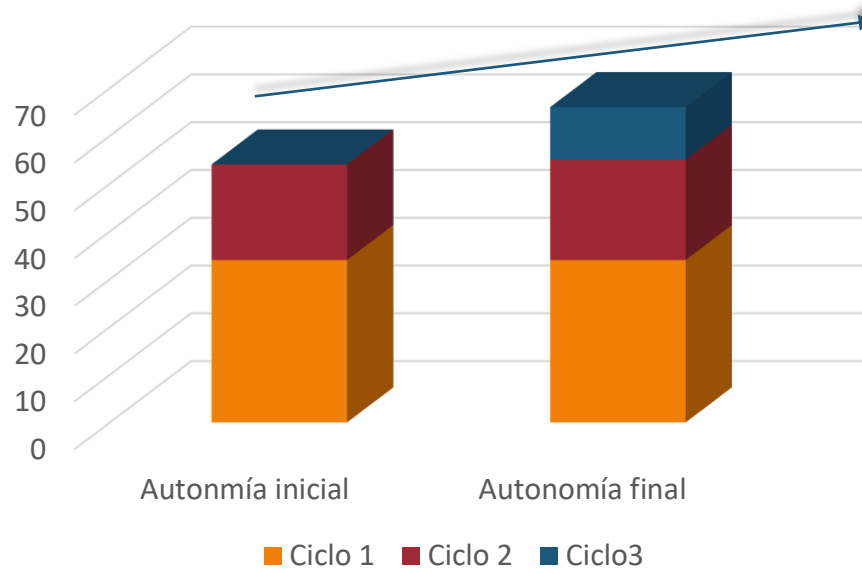
# Objetivos específicos

- 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.
- Seleccionar los elementos eléctricos, electrónicos y mecánicos, del sistema de carga regenerativo y ensamblar cada uno en la moto eléctrica.
- 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.



# Meta de la investigación

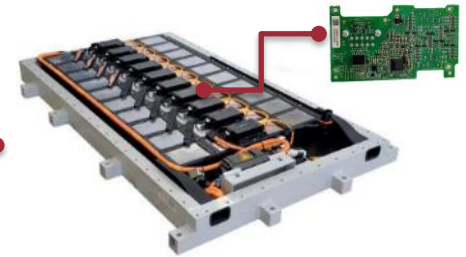
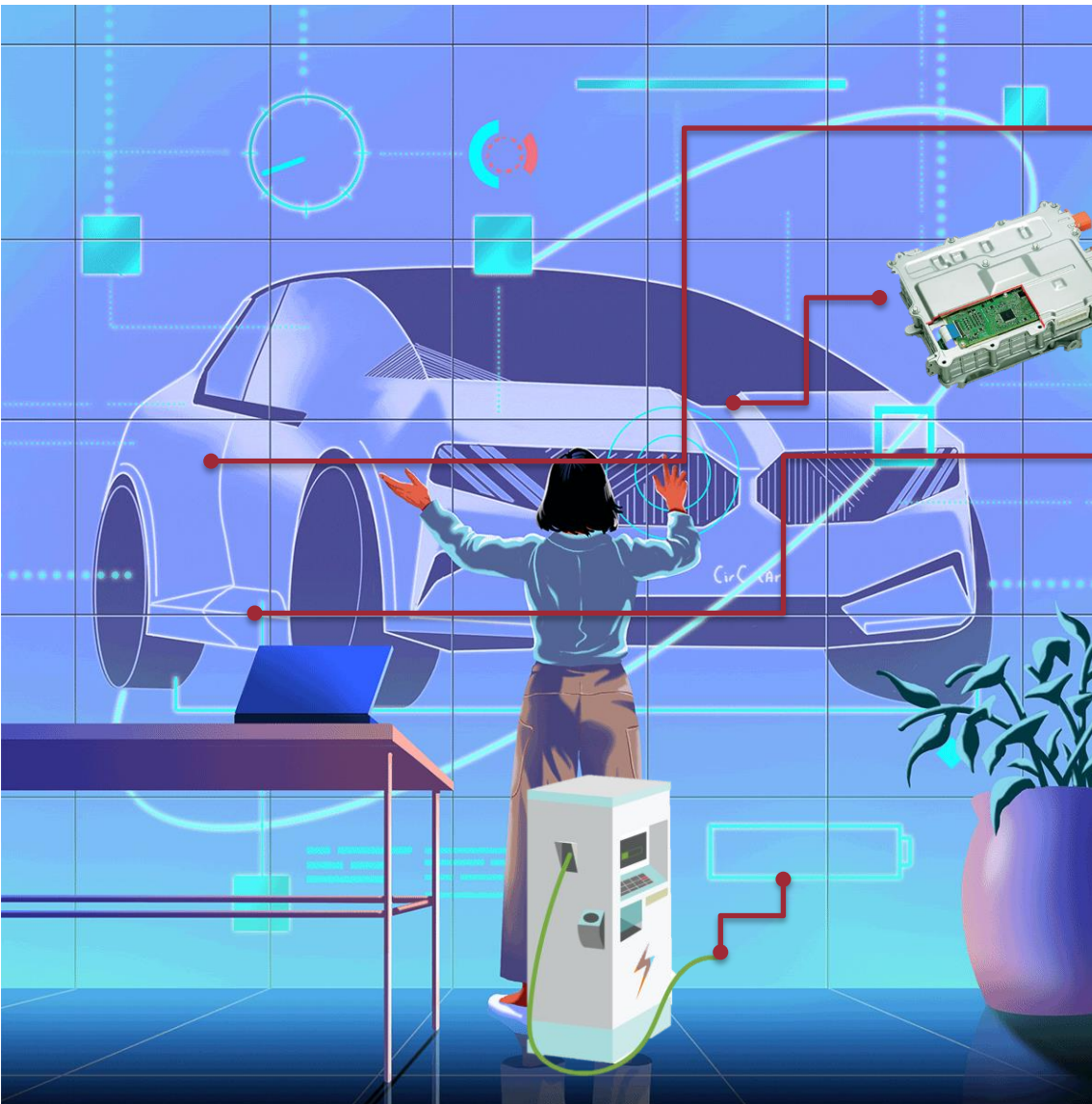
- Investigar e implementar un sistema de carga regenerativo en una motocicleta eléctrica, que permita incrementar su autonomía en un 10 a 15 %.



# *Marco Teórico*



# Movilidad eléctrica

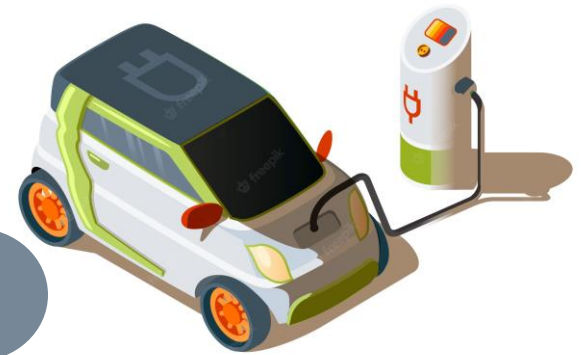


A fin de recuperar la calidad del aire en las grandes ciudades, los medios de movilidad evolucionan con fuentes de energía más limpias para su tracción empleando motores eléctricos y baterías de elevada densidad energética para su movilidad.



# Motocicleta eléctrica

Es un vehículo que no produce contaminación acústica ni atmosférica, no produce emisiones en su funcionamiento y solo necesita de un motor eléctrico, baterías recargables y un módulo de control electrónico para movilizarse.



La practicidad de este medio de transporte equilibra la movilidad sostenible con el cuidado del medio ambiente y ha sido el primer paso para una transformación estructurada en la movilidad.

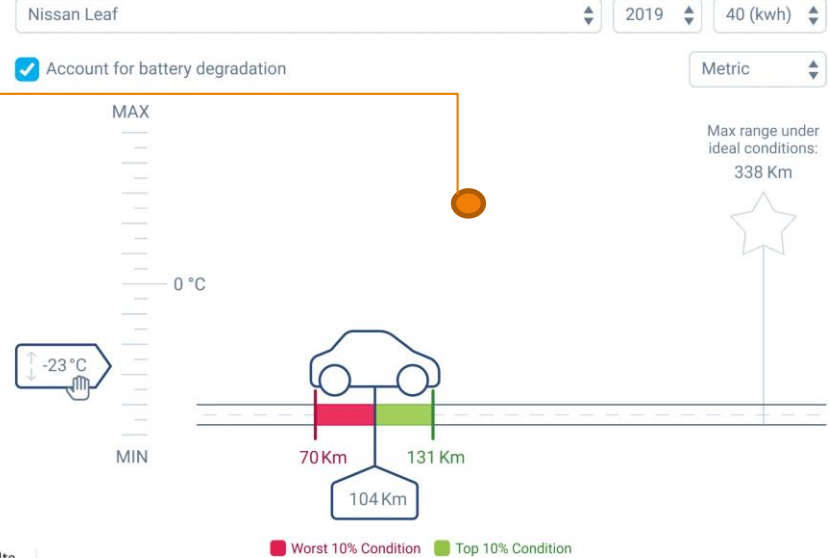
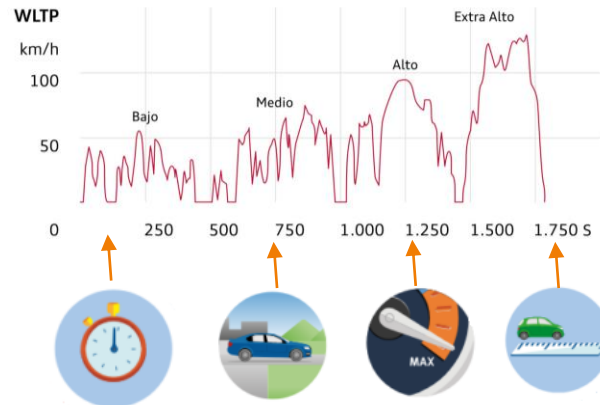
# Autonomía de un vehículo eléctrico

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

¿Cómo se mide?

Protocolo WLTP

Condiciones de prueba

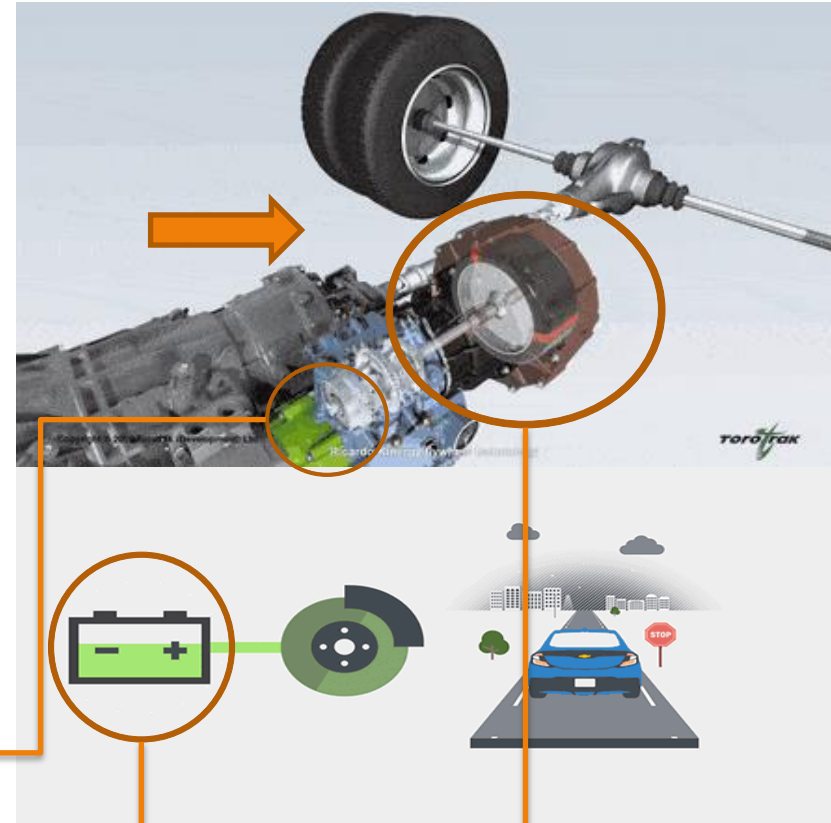
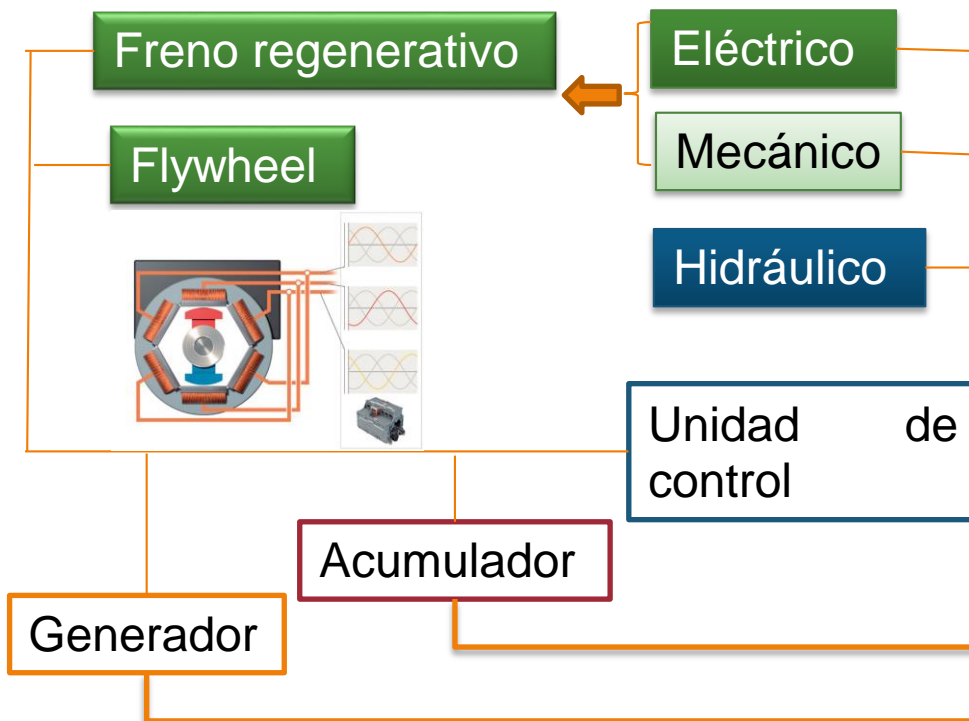


Alrededor de 1 kg de baterías puede almacenar tanta energía como unos 20 gramos de combustible, lo que supone una barrera tecnológica importante.



# Sistema KERS

El sistema de recuperación de energía cinética aprovecha esta energía para producir electricidad





# Generador eléctrico

El generador eléctrico es una máquina que hace uso de la inducción electromagnética para producir un voltaje.

Campo magnético

Imanes permanentes

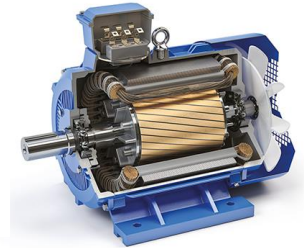
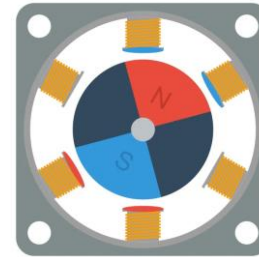
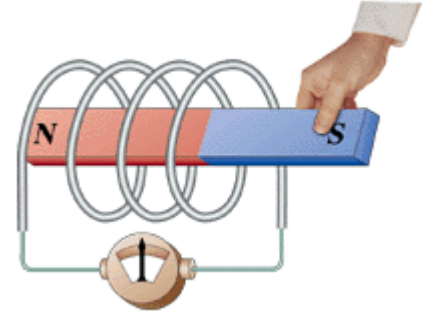
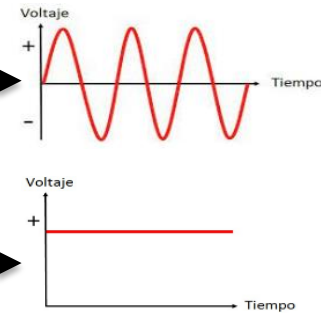
Electroimanes

Generador eléctrico

Por lo general se clasifican por el tipo de corriente que producen.

Alternadores

Dínamos



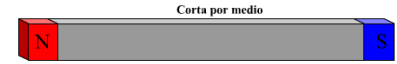
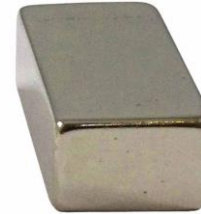
# Imán permanente

Fabricados a base de tierras raras

Neodimio

Samario

Cobalto



Proceso de fabricación

Sinterización

Propiedades magnéticas

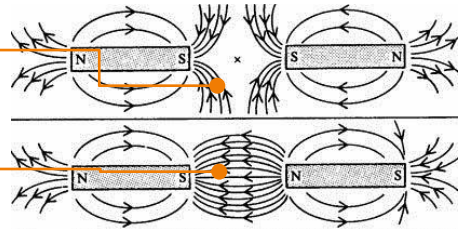
Remanencia magnética  $B_r$

Fuerza coercitiva  $H_c$

Características

B

H



Pérdida de propiedades

Temperatura de Curie

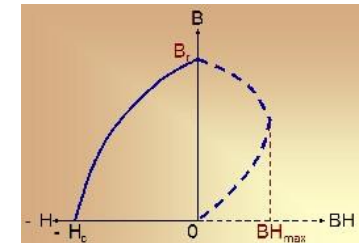
Golpes

Código alfanumérico

Letra

Número

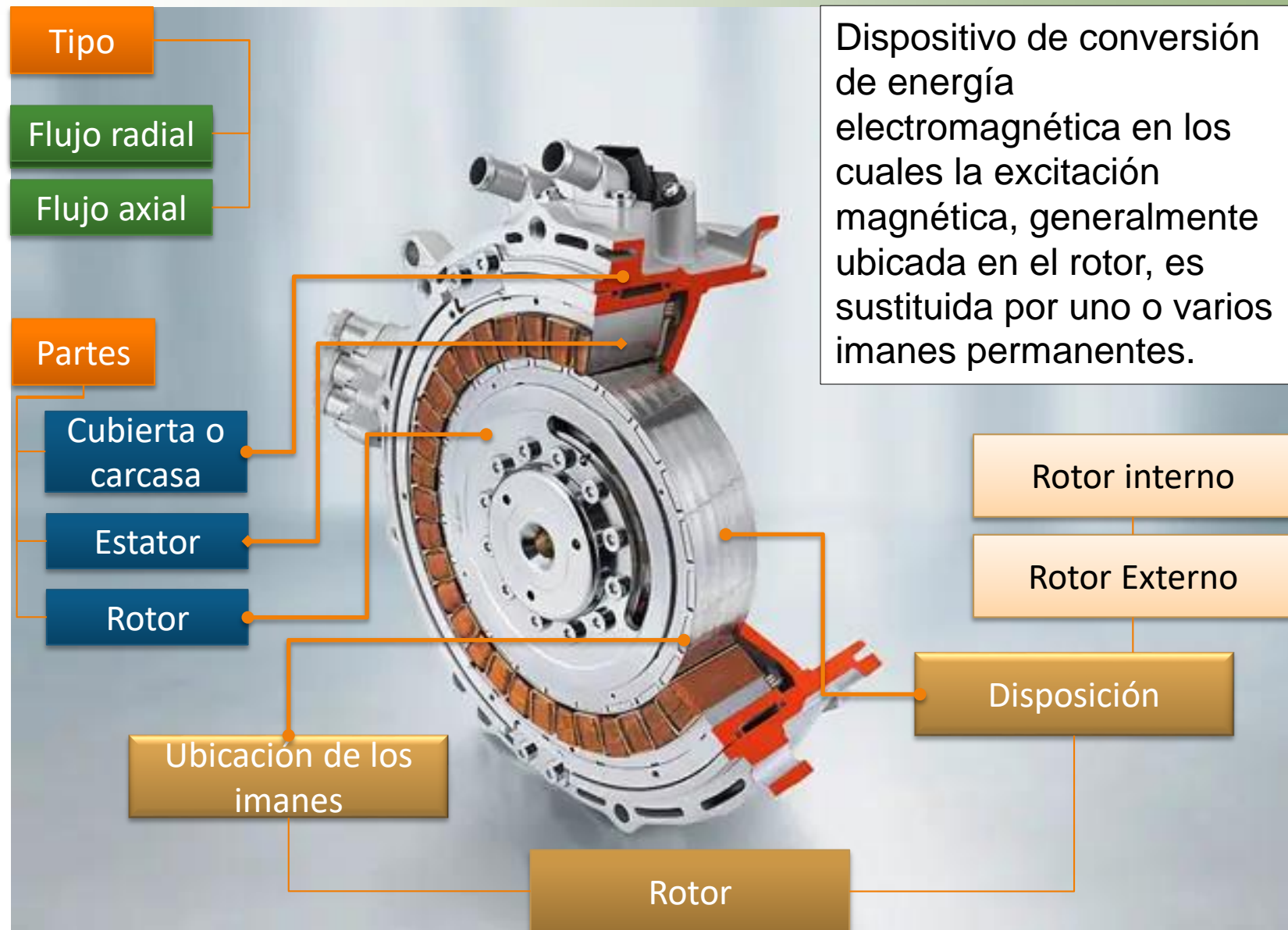
N  
M  
H  
SH  
UH  
EH  
AH



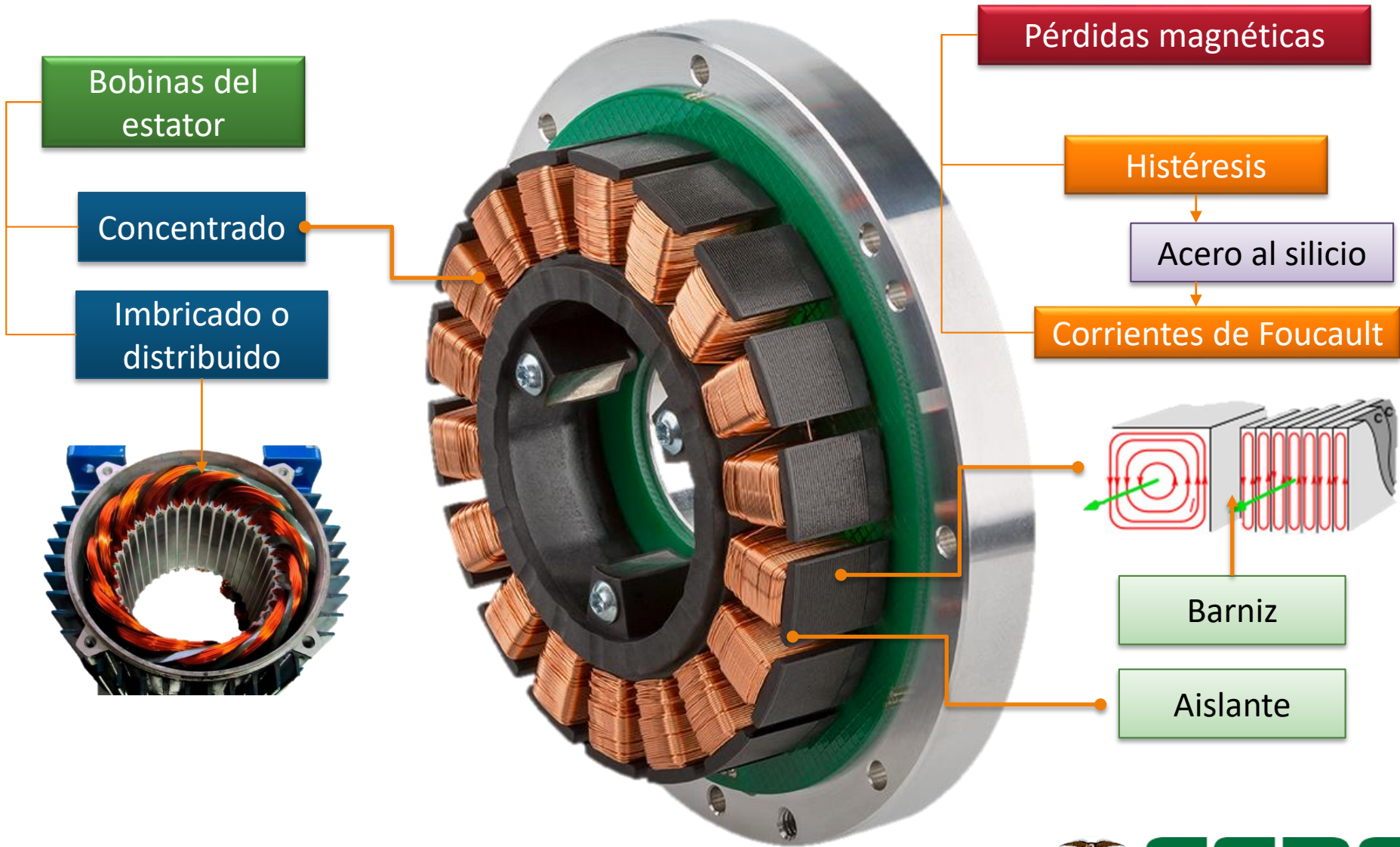
N52



# Generador síncrono de imanes permanentes

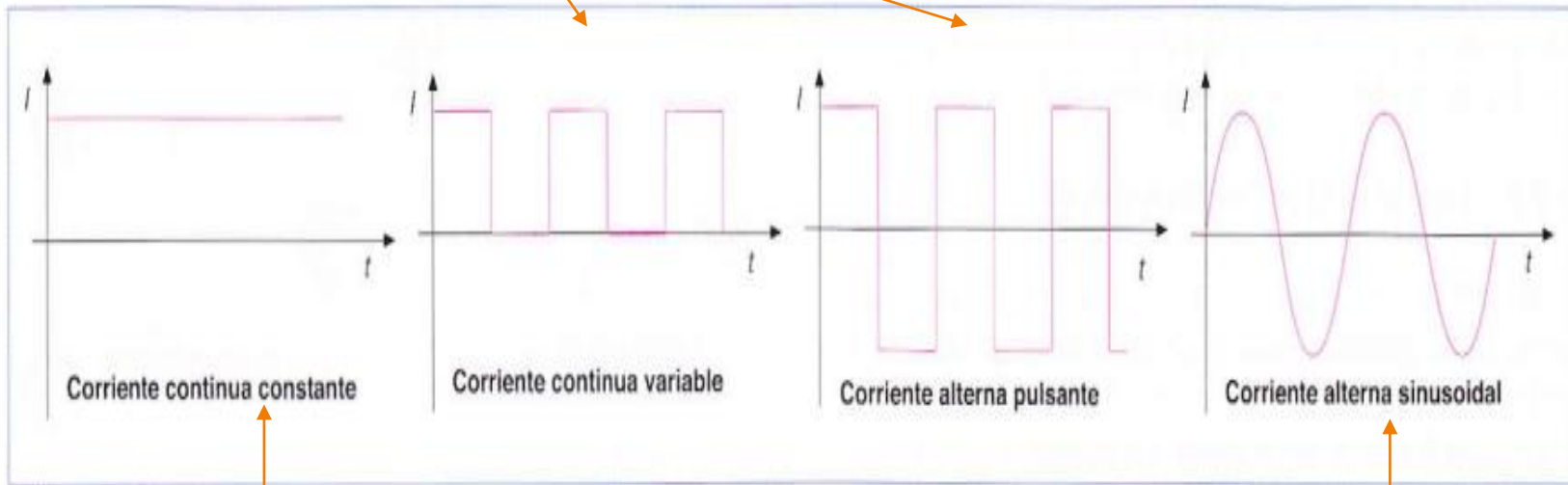
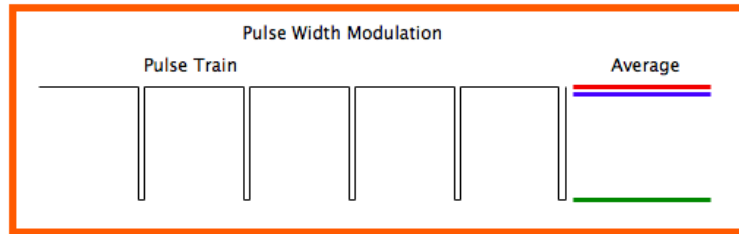


# Núcleo ferromagnético



# Tipos de corriente

Corriente pulsante



Corriente continua

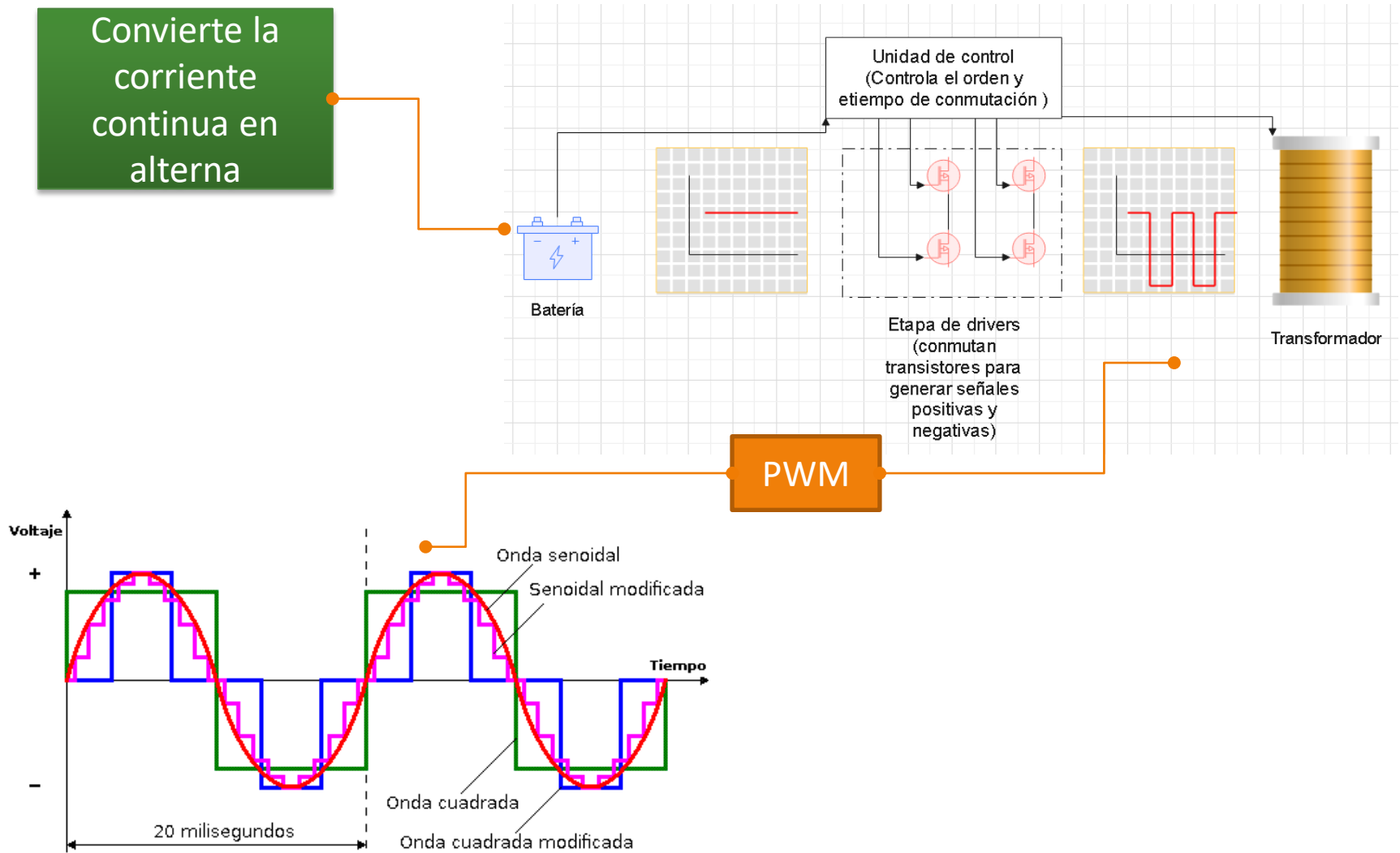
Corriente alterna





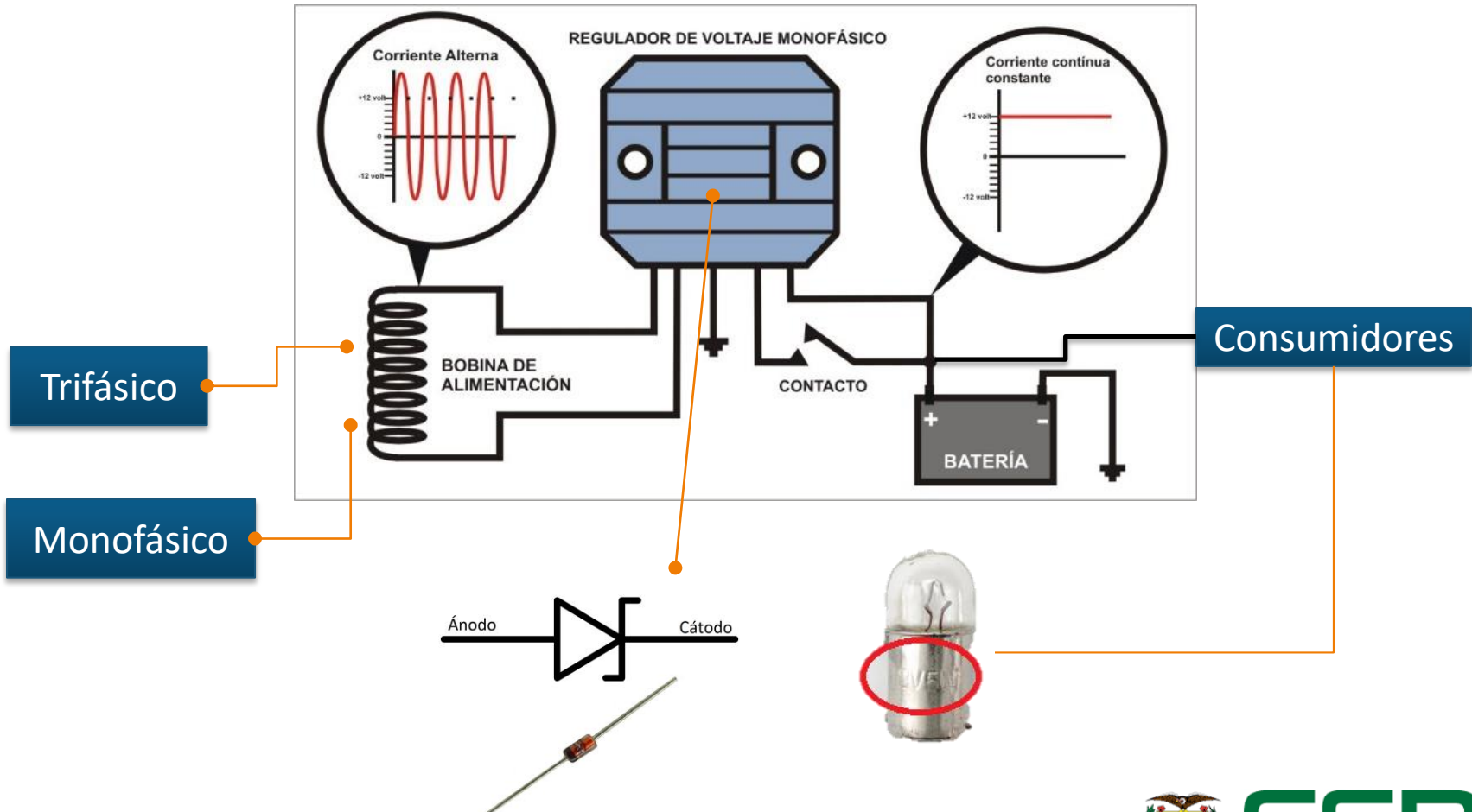
# Inversor de corriente

Convierte la corriente continua en alterna



# Regulador de voltaje

Estabiliza y controla los valores de salida a los consumidores



Trifásico

Monofásico

Consumidores



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

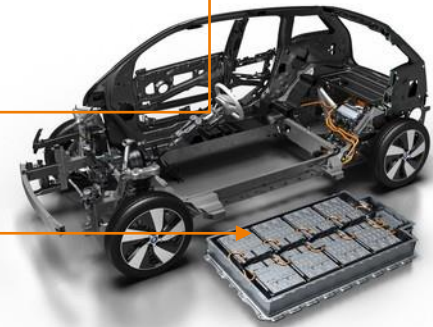


# Acumuladores de energía

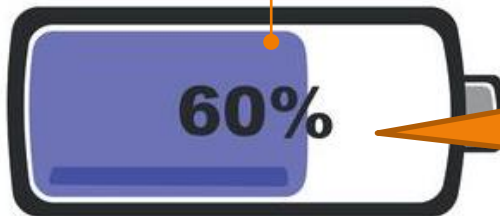
Capacidad



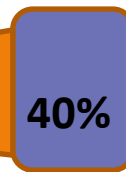
Voltaje



Estado de carga SOC

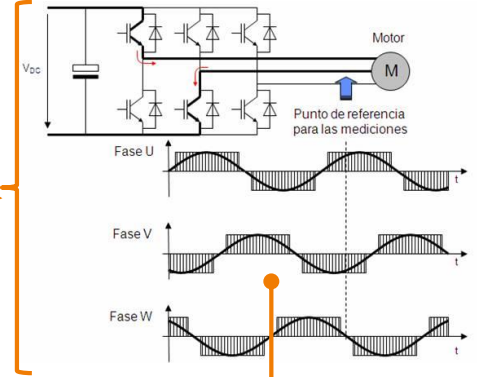
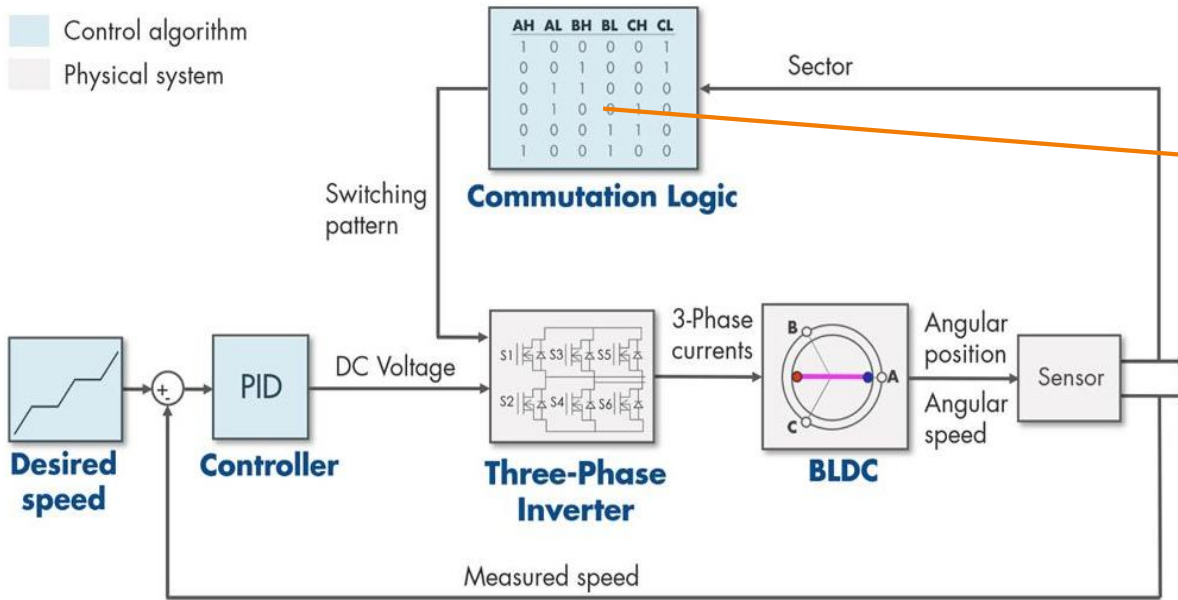


Profundidad de descarga DOD



# Motor eléctrico BLDC

- Control algorithm
- Physical system



Control trapezoidal

Control sinusoidal

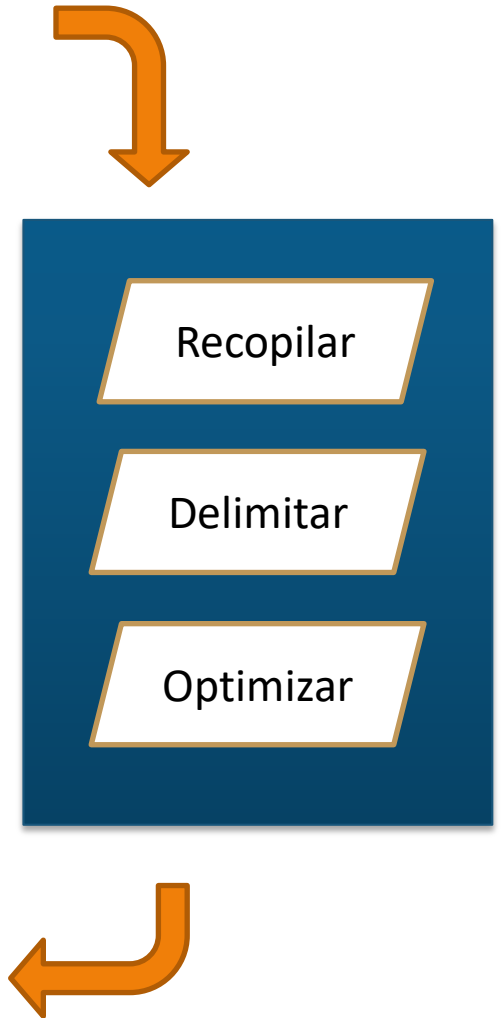
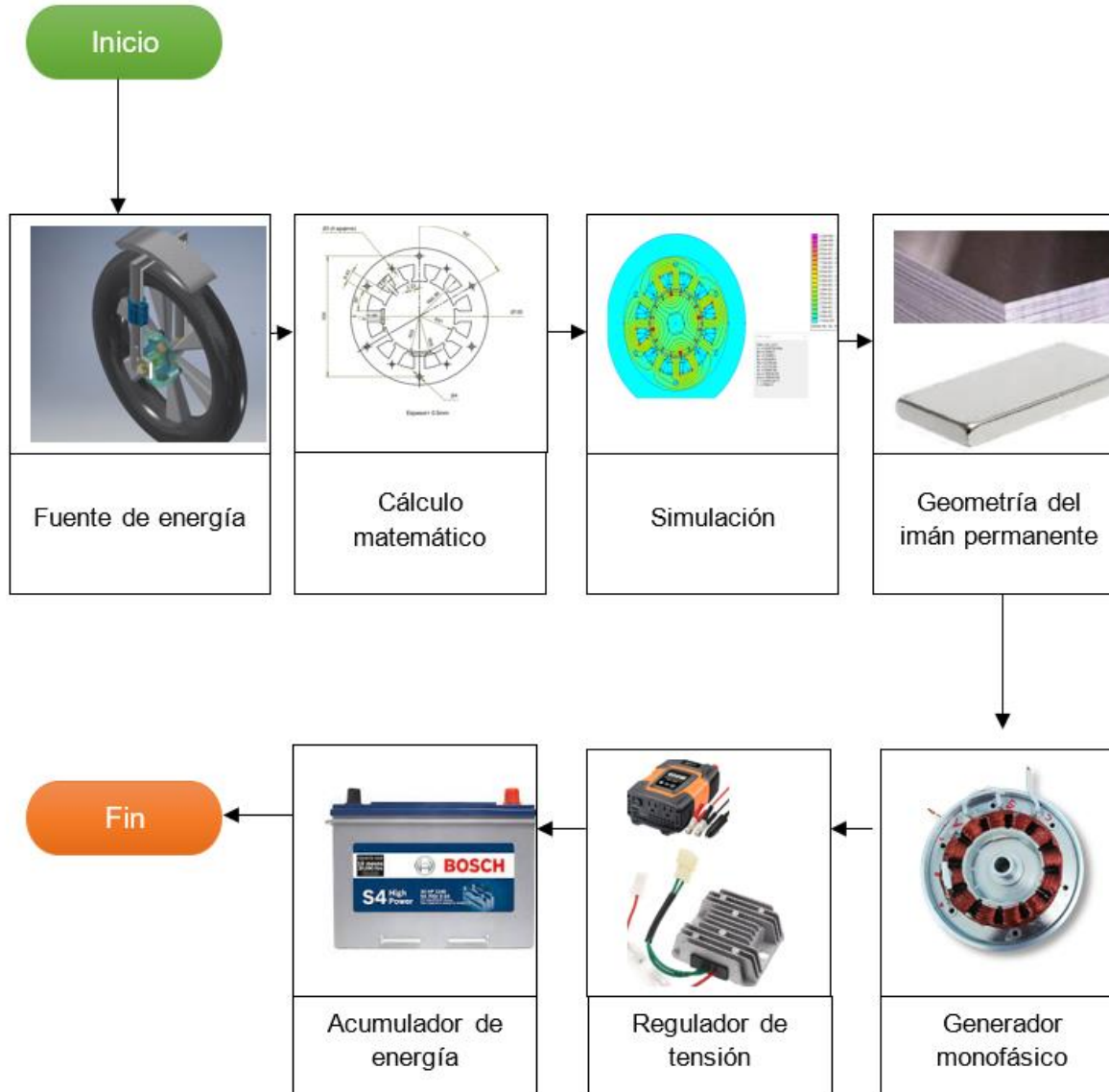


# *Diseño y construcción*



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Concepción de la idea de diseño

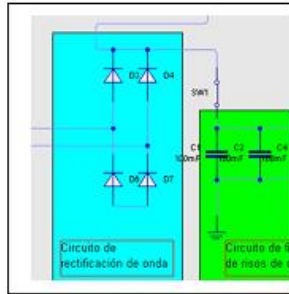


# Requerimientos de diseño

Generador



Rectificador y



Regulador de voltaje

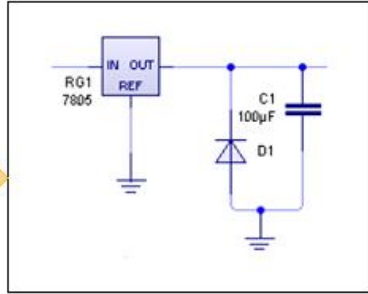


Diagram showing two requirements in a green box:

- Espacio
- Presupuesto

Batería de



Cargador eléctrico original



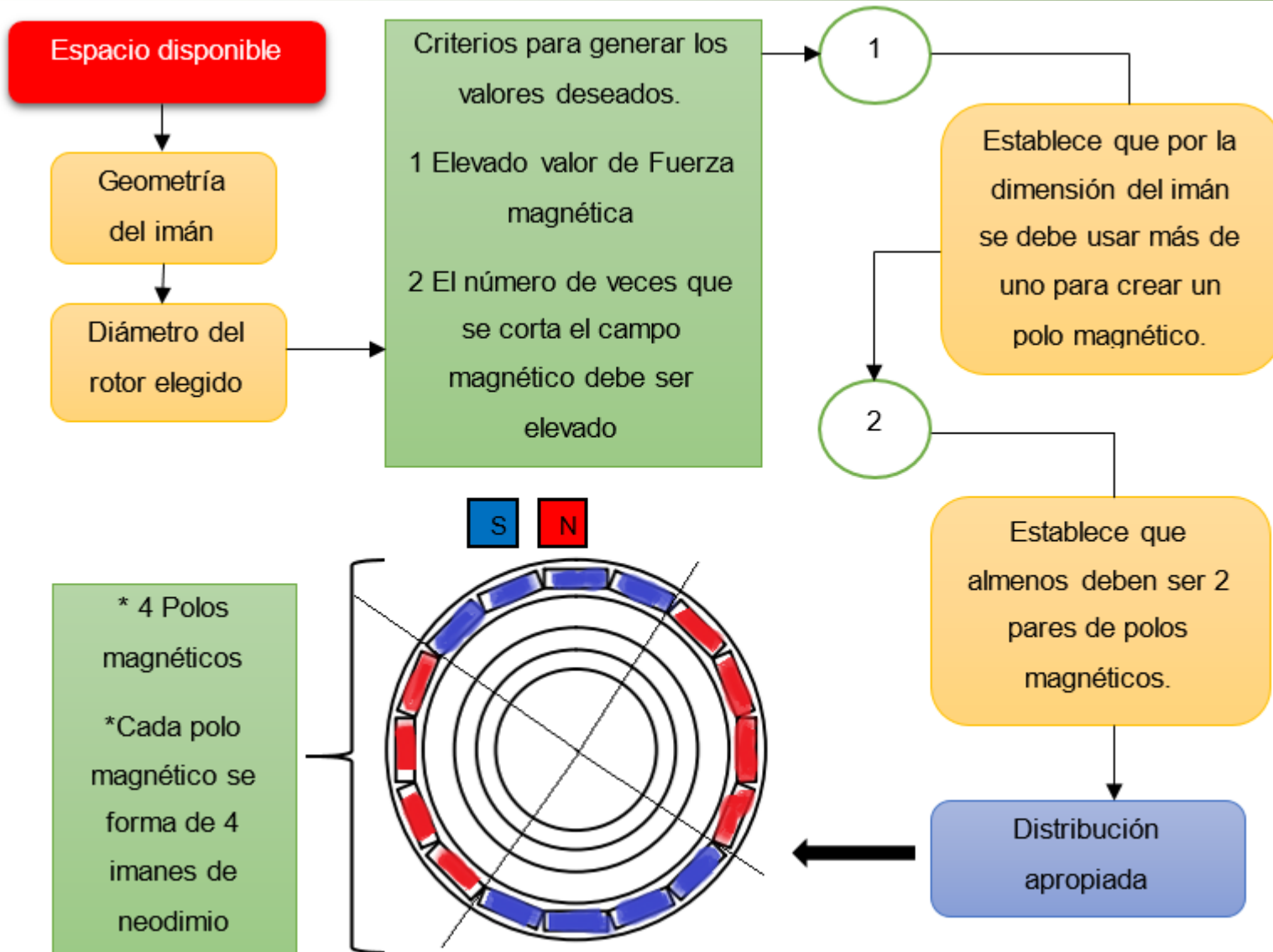
Inversor de 400



Batería de ácido plomo



# Diseño del generador eléctrico

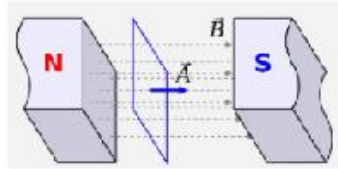




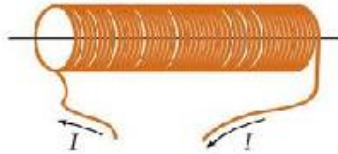
# Diseño del generador eléctrico

Factores del voltaje inducido

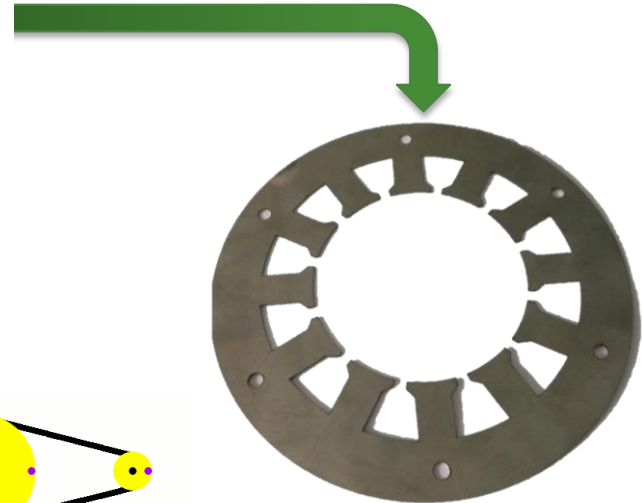
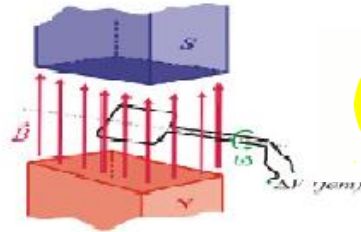
Cantidad de flujo



Número de vueltas

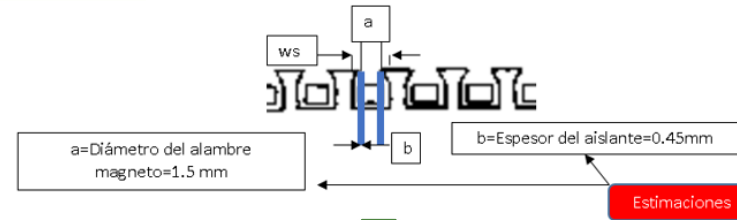


Rapidez con la que se cortan el campo



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

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



**Para 12 ranuras**

$$12 * 3 = 36\text{mm}$$

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

**Para 16 ranuras**

$$16 * 3 = 48\text{mm}$$

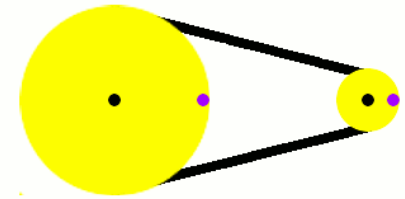
$$P_{str} - 48\text{mm} = 194.77 - 48 = 146.77 \div 16 \text{ ranuras} = 9.17\text{mm}$$





# Variables de trabajo

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



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

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

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

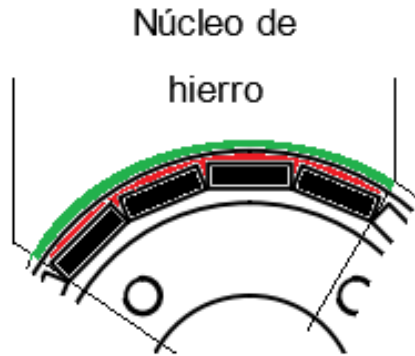
## Parámetros principales

<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
<b>Potencia</b>	40 W
<b>Velocidad de rotación del rotor</b>	2400 rpm
<b>Tensión de fase</b>	20 v
<b>Frecuencia</b>	80 Hz
<b>Pares de polos</b>	2



# Diseño matemático- características magnéticas

## 1 Entrehierro real:



Entrehierro total= 2.4 mm

## 2 Remanencia magnética:

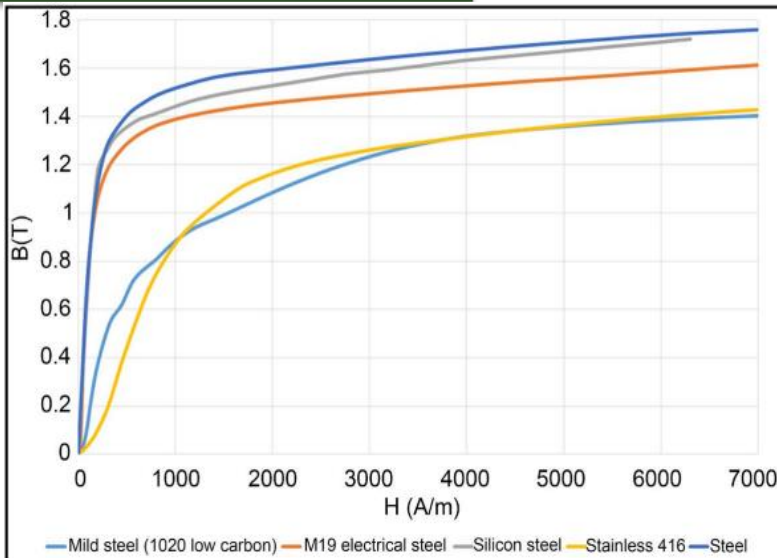
$B_r$ ,  
sube



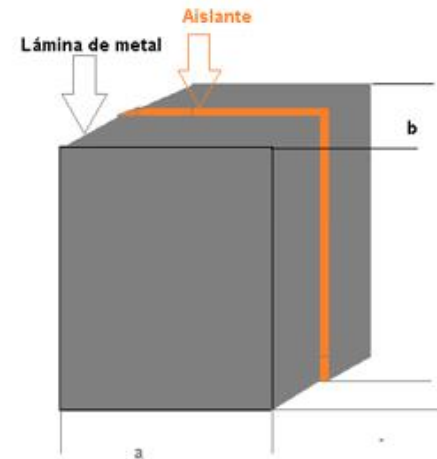
$B_r$ ,  
Se mantiene



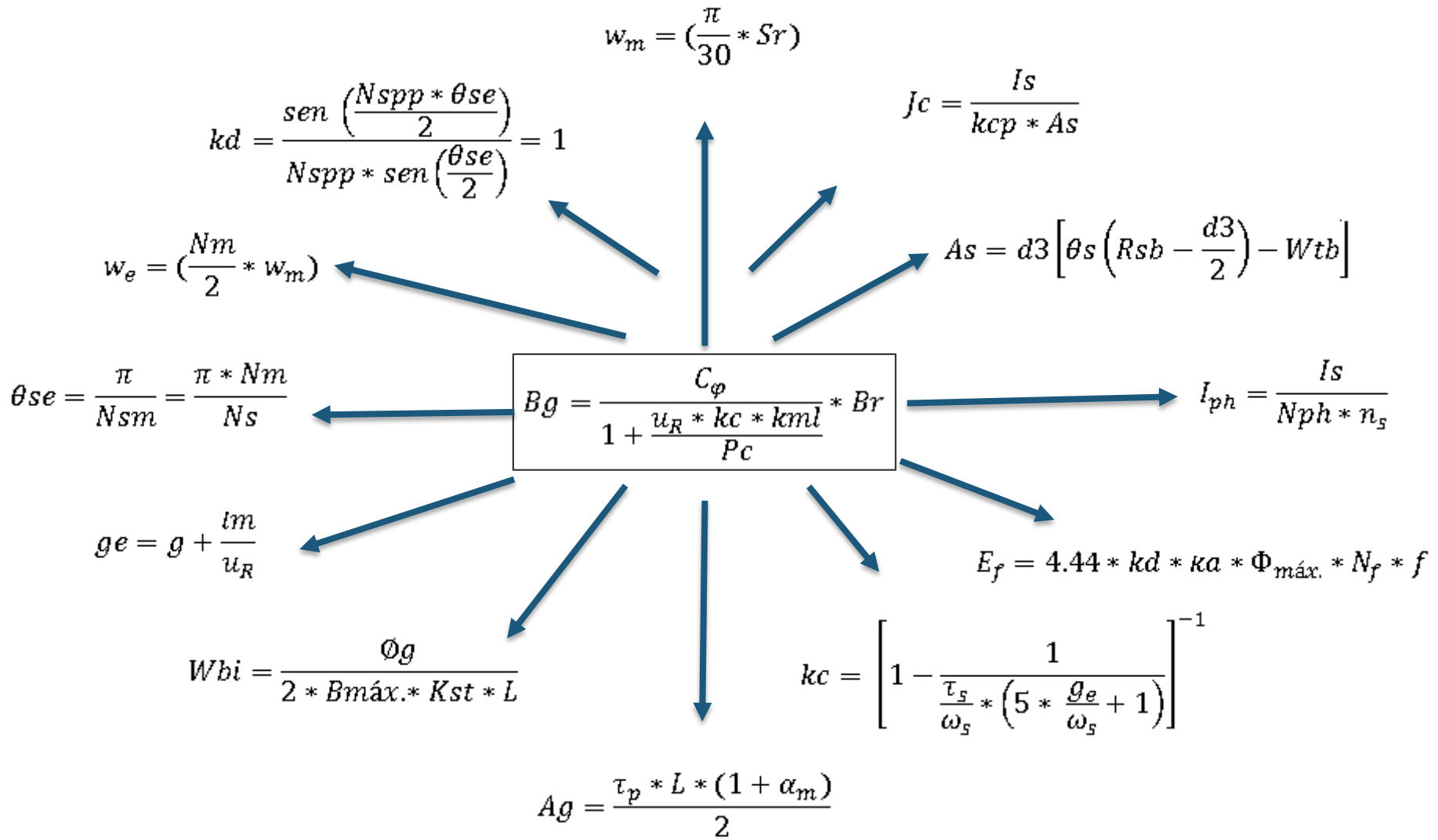
## 3 Material del núcleo:



## 4 Factor de apilamiento:



# Cálculo matemático



# Diseño matemático-geometría del estator

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

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

$$\theta_p = \frac{2\pi}{N_m} = \frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2} \text{ (90°)}$$

$$\theta_s = \frac{2\pi}{N_s} = \frac{2\pi}{12} = \frac{\pi}{6} \text{ (30°)}$$

$$\omega_t = \tau_s - \omega_s = 13.23 \text{ mm}$$

$$d_3 = 10.855 \text{ mm}$$

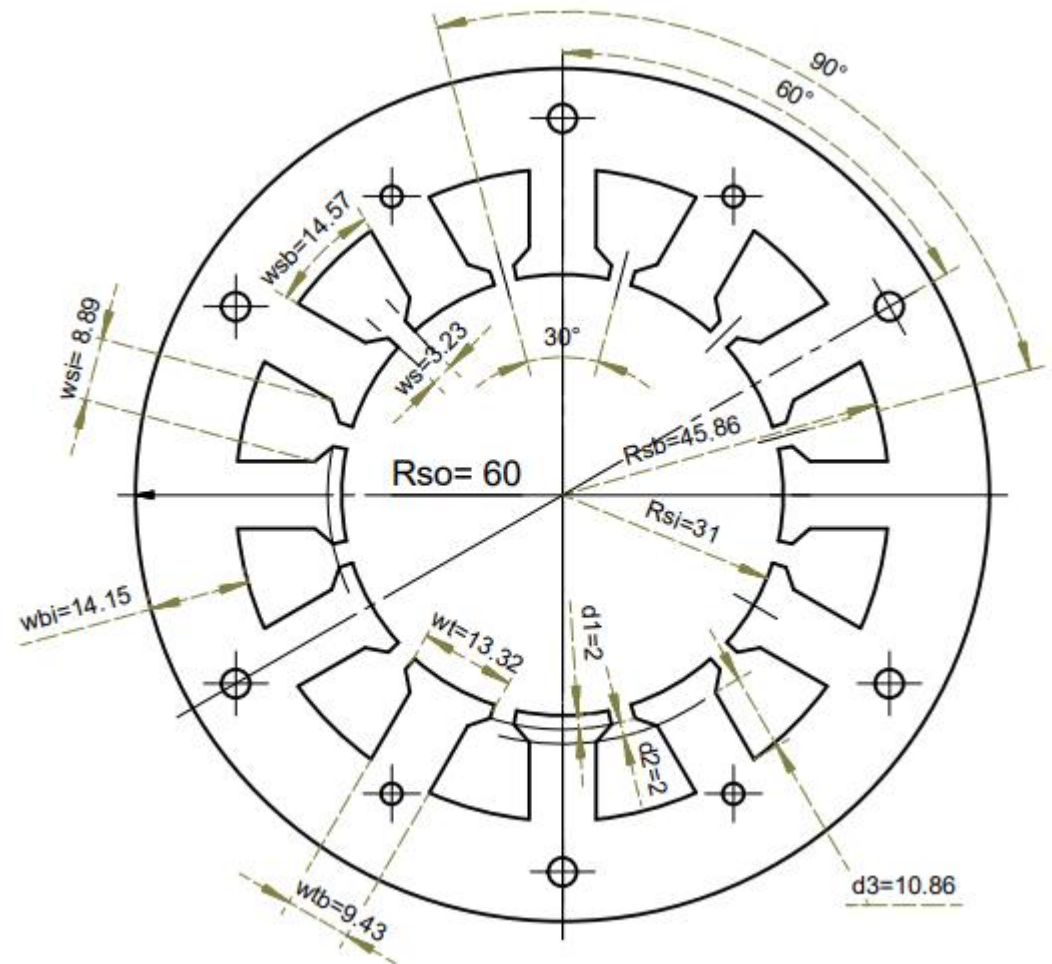
$$W_{tb} = 9.43 \text{ mm}$$

$$W_{sb} = 14.5796 \text{ mm}$$

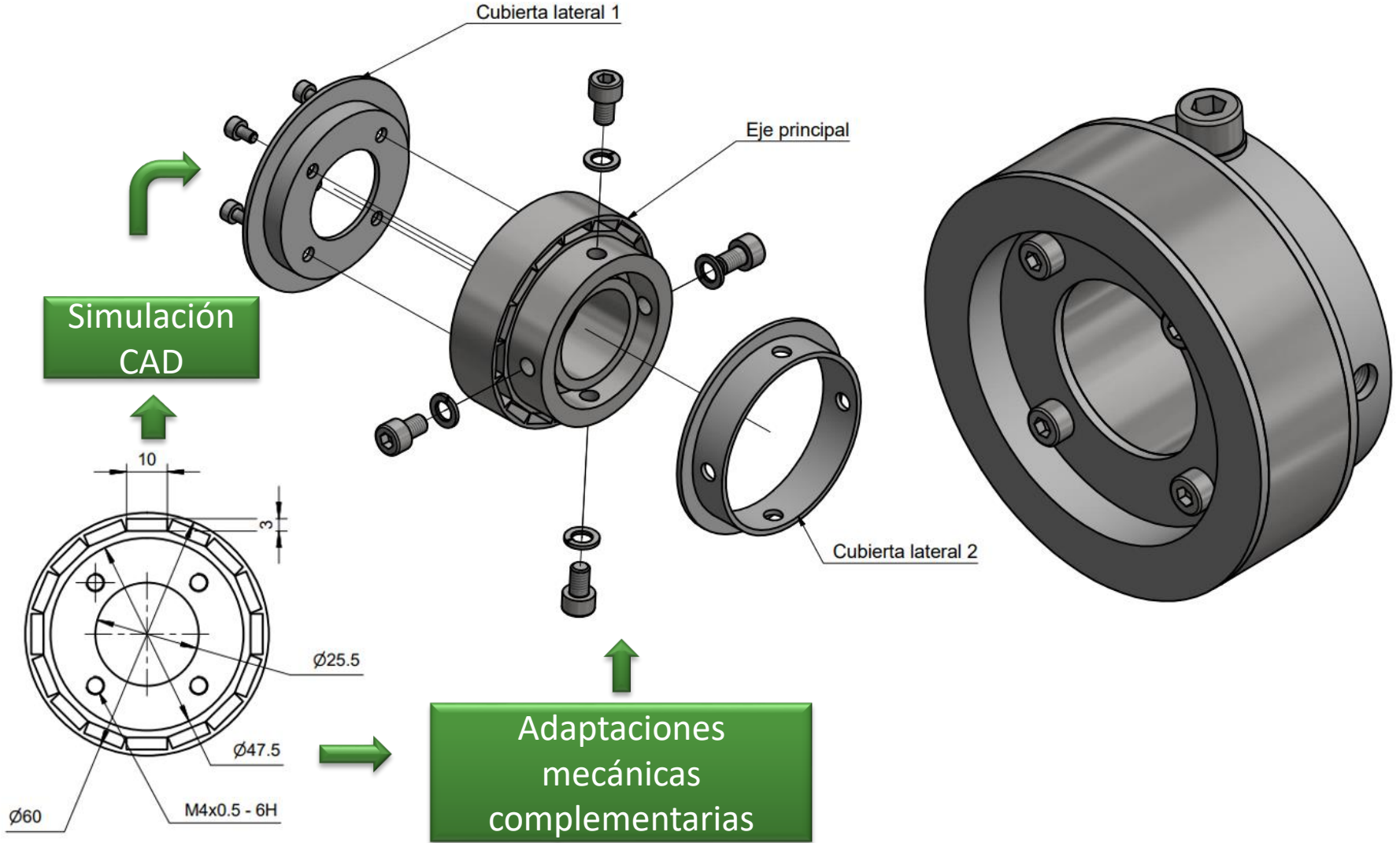
$$W_{si} = 8.89 \text{ mm}$$

$$\omega_s = P_{si} - E_d = 3.23 \text{ mm}$$

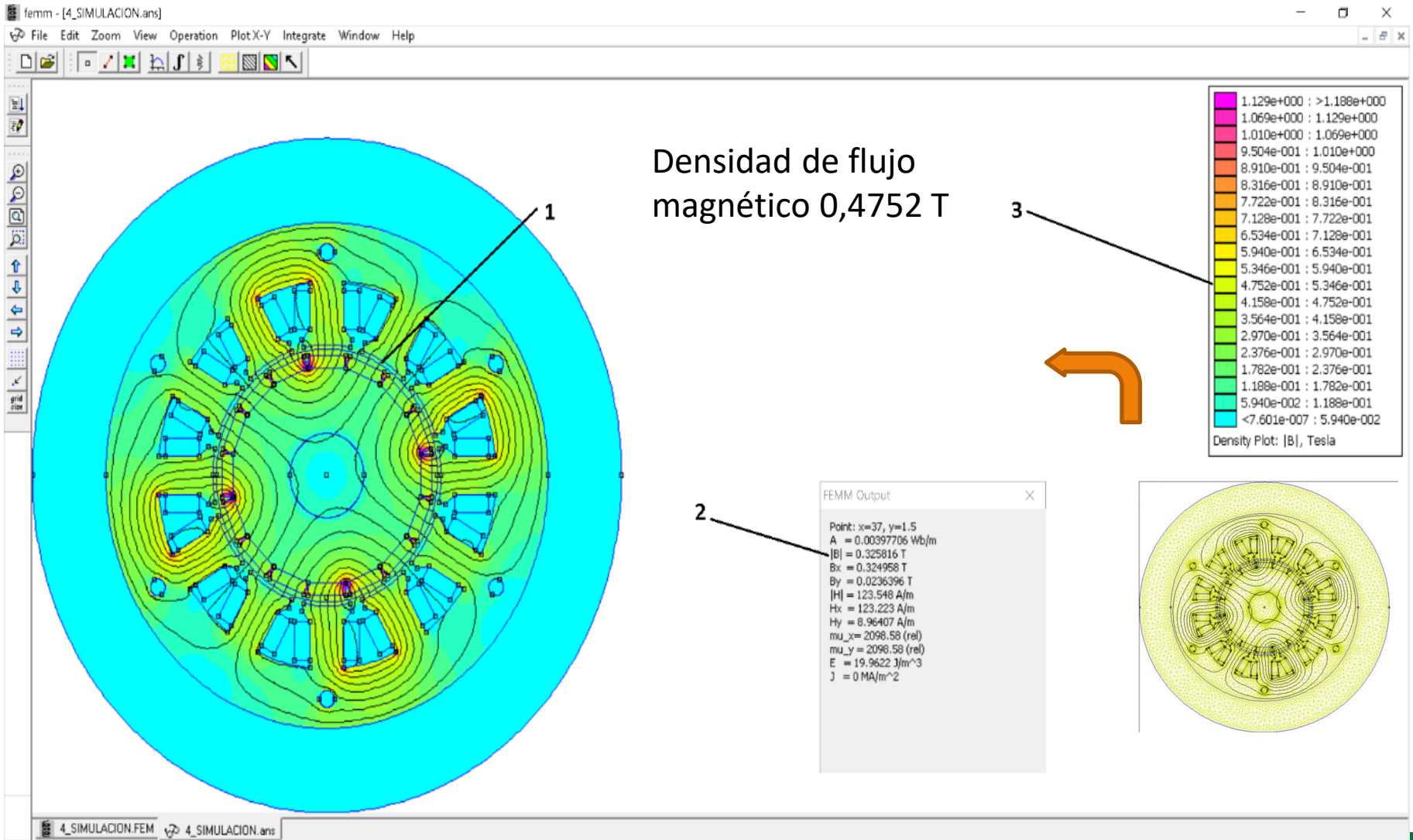
$$W_{bi} = \frac{0.00051868398 \text{ T} \cdot \text{m}^2}{2 * 1.7 \text{ T} * 0.719 * 0.015 \text{ m}} = 14.14 \text{ mm}$$



# Geometría del rotor

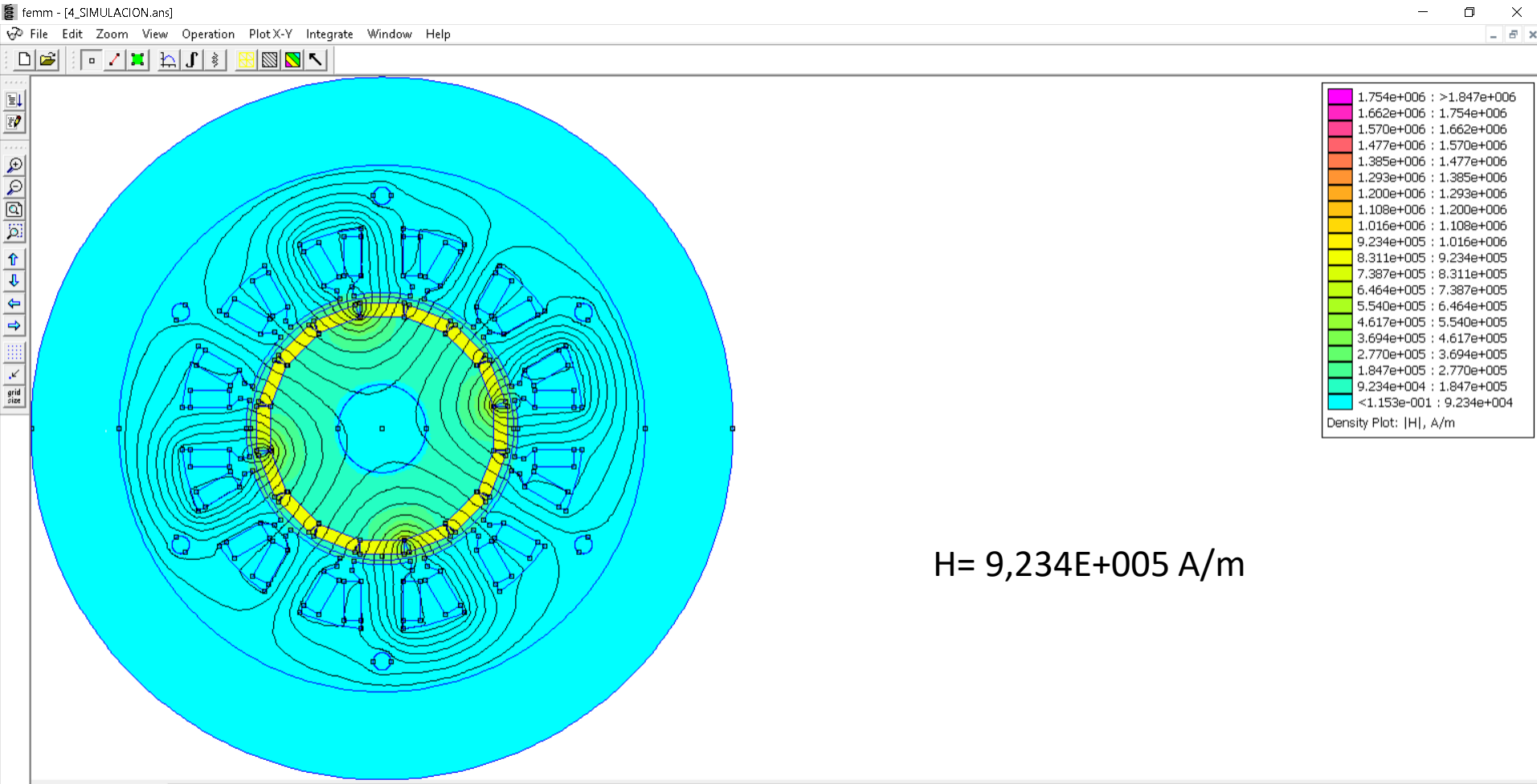


# Diseño-simulación magnética



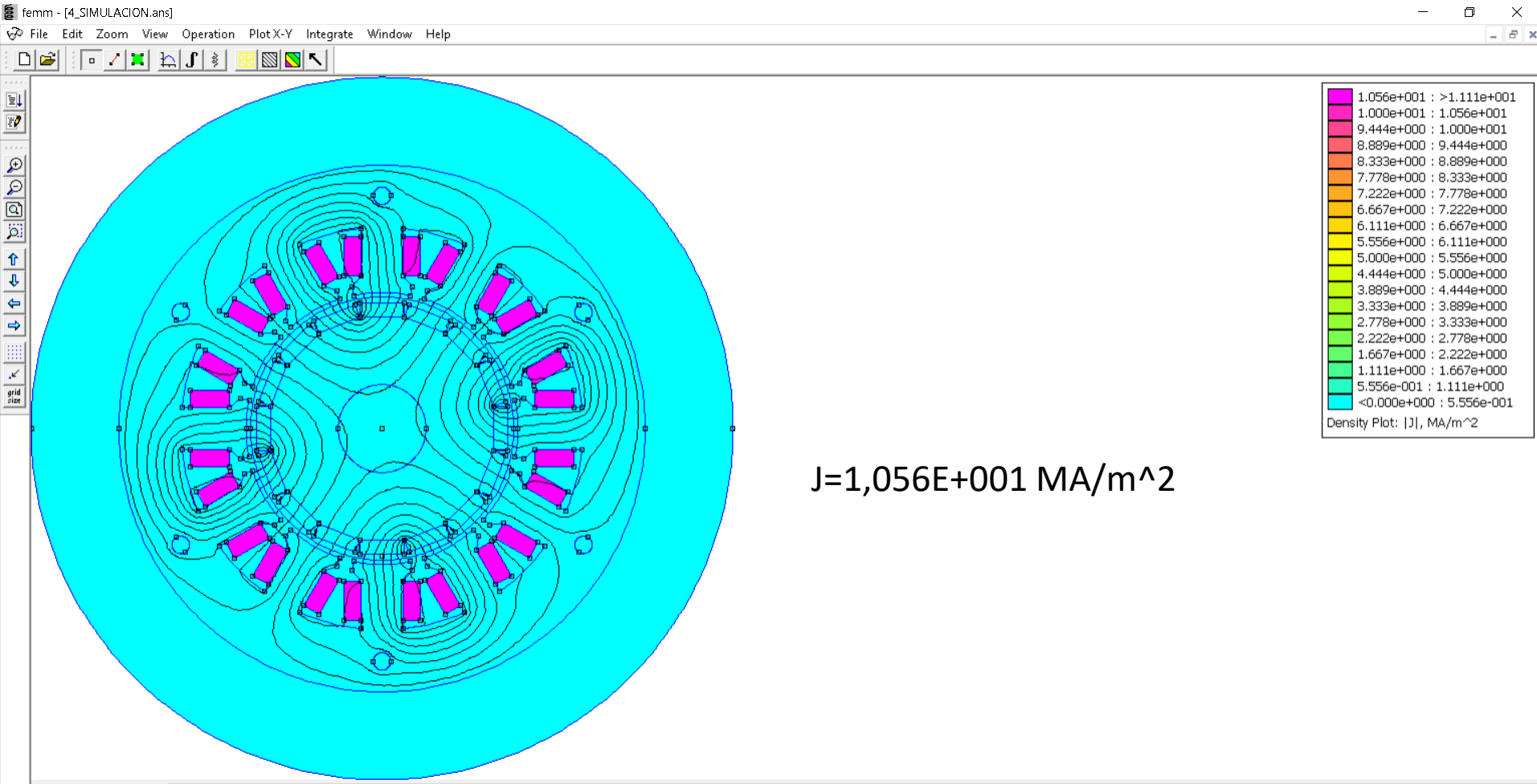


# Diseño-simulación magnética

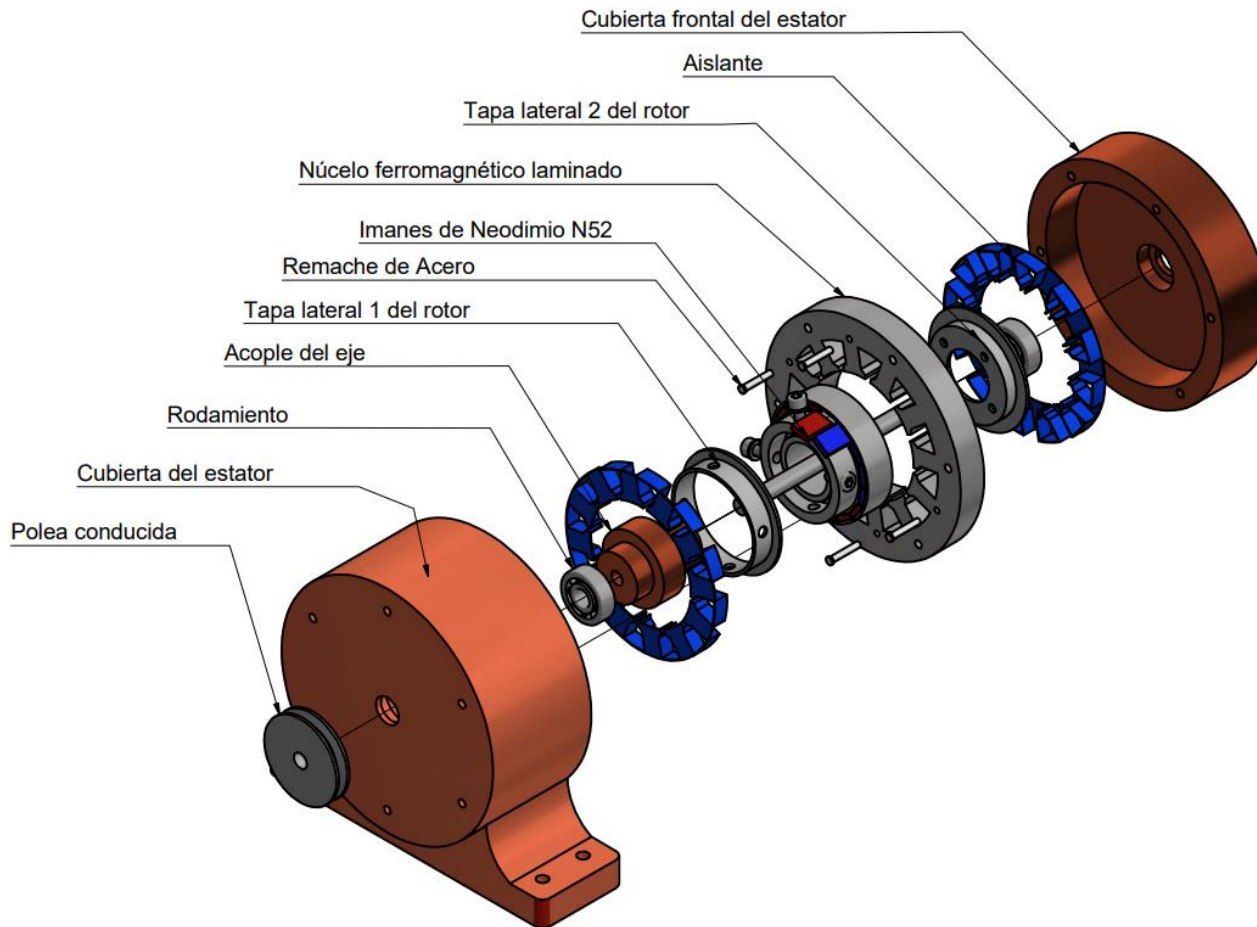




# Diseño-simulación magnética



# Diseño- simulación CAD de piezas



Interferencias mecánicas

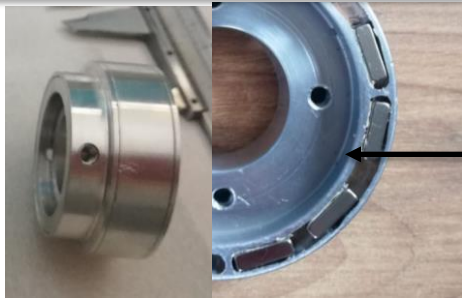
Presupuesto



# Fabricación y manufactura de componentes

1

Rotor



Imán

2

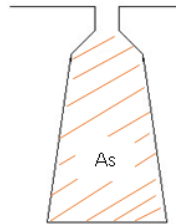
Núcleo ferromagnético del estator



25 Láminas de acero A-430

3

Aislante eléctrico



4

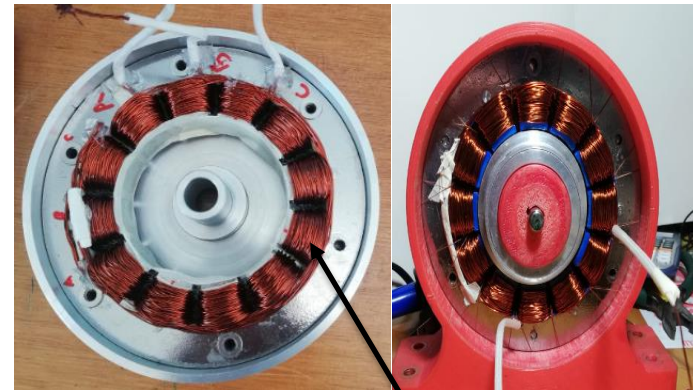
Cubierta del estator



Perforaciones de enfriamiento

5

Bobinado

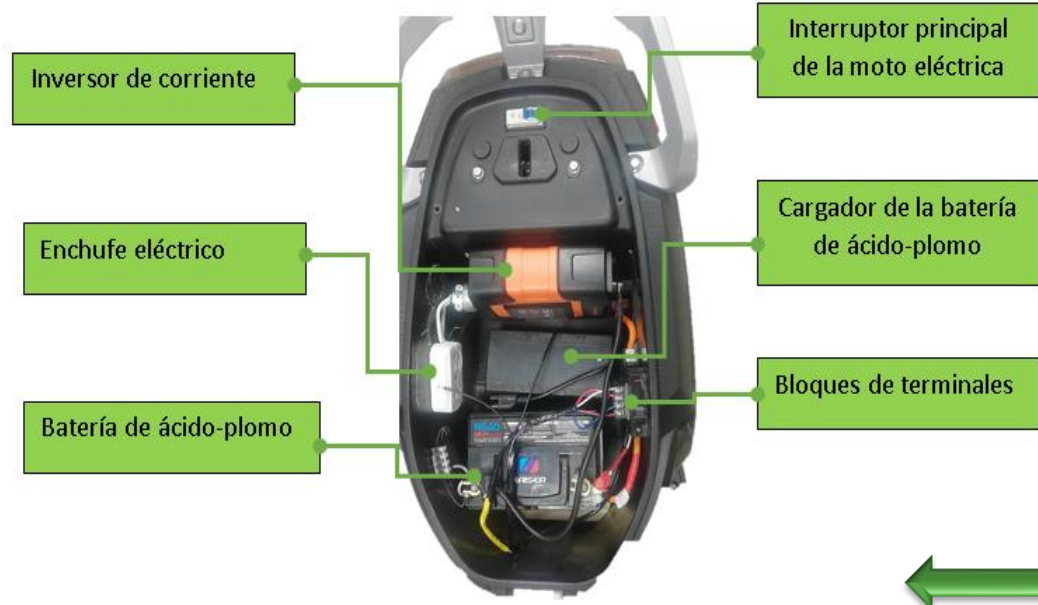
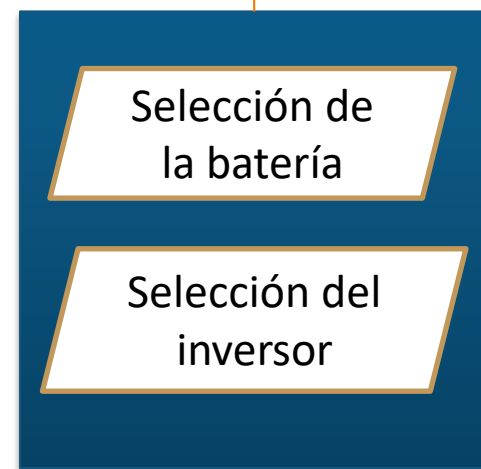
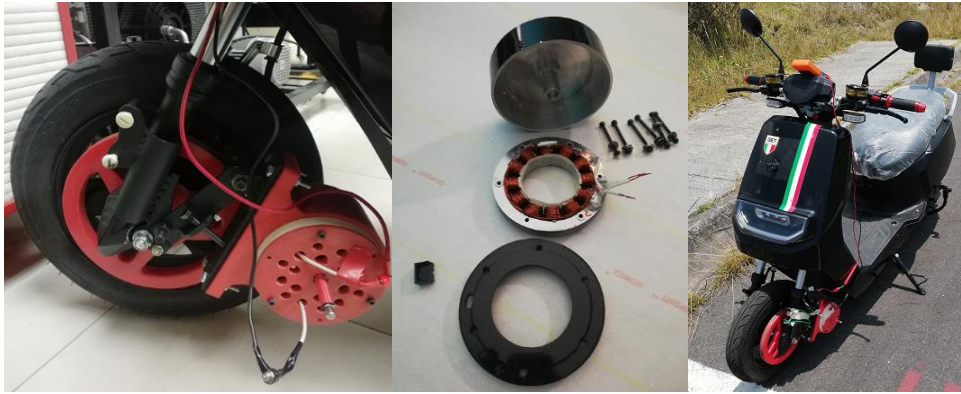


Alambre magneto (AWG 24)



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Selección de componentes complementarios



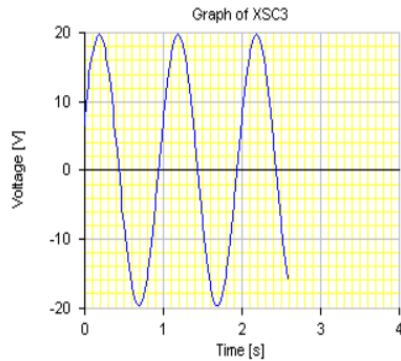
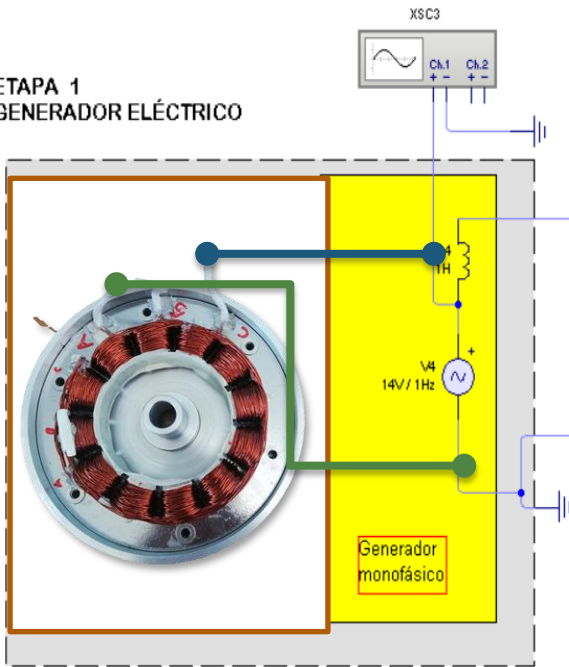


# Ubicación de cada componente

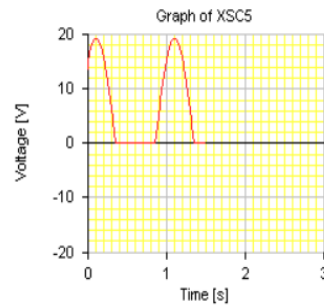
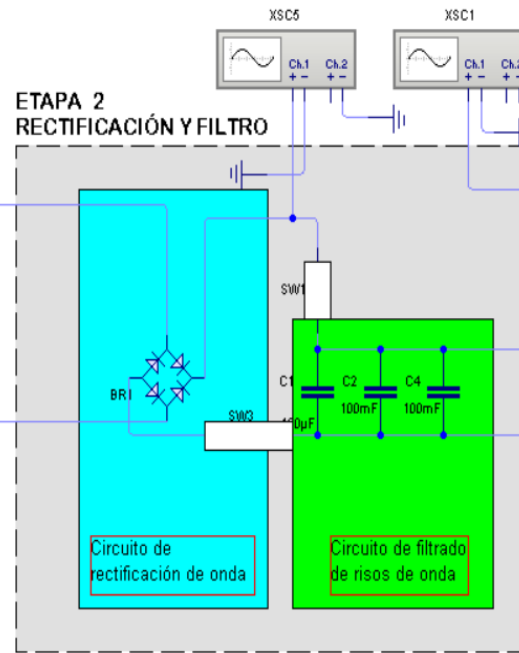


# Etapas de potencia-circuitos eléctricos

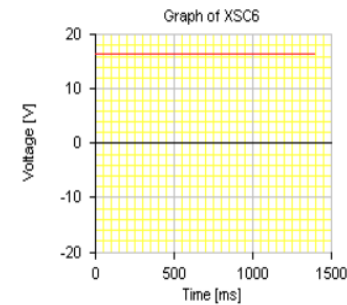
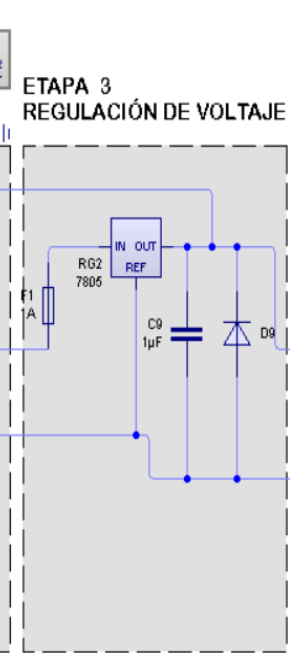
## ETAPA 1 GENERADOR ELÉCTRICO



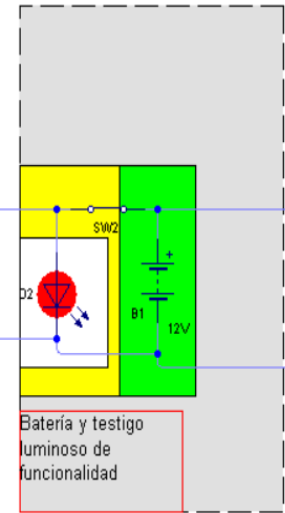
## ETAPA 2 RECTIFICACIÓN Y FILTRO



## ETAPA 3 REGULACIÓN DE VOLTAJE



## ETAPA 4 CONSUMO Y CARGA

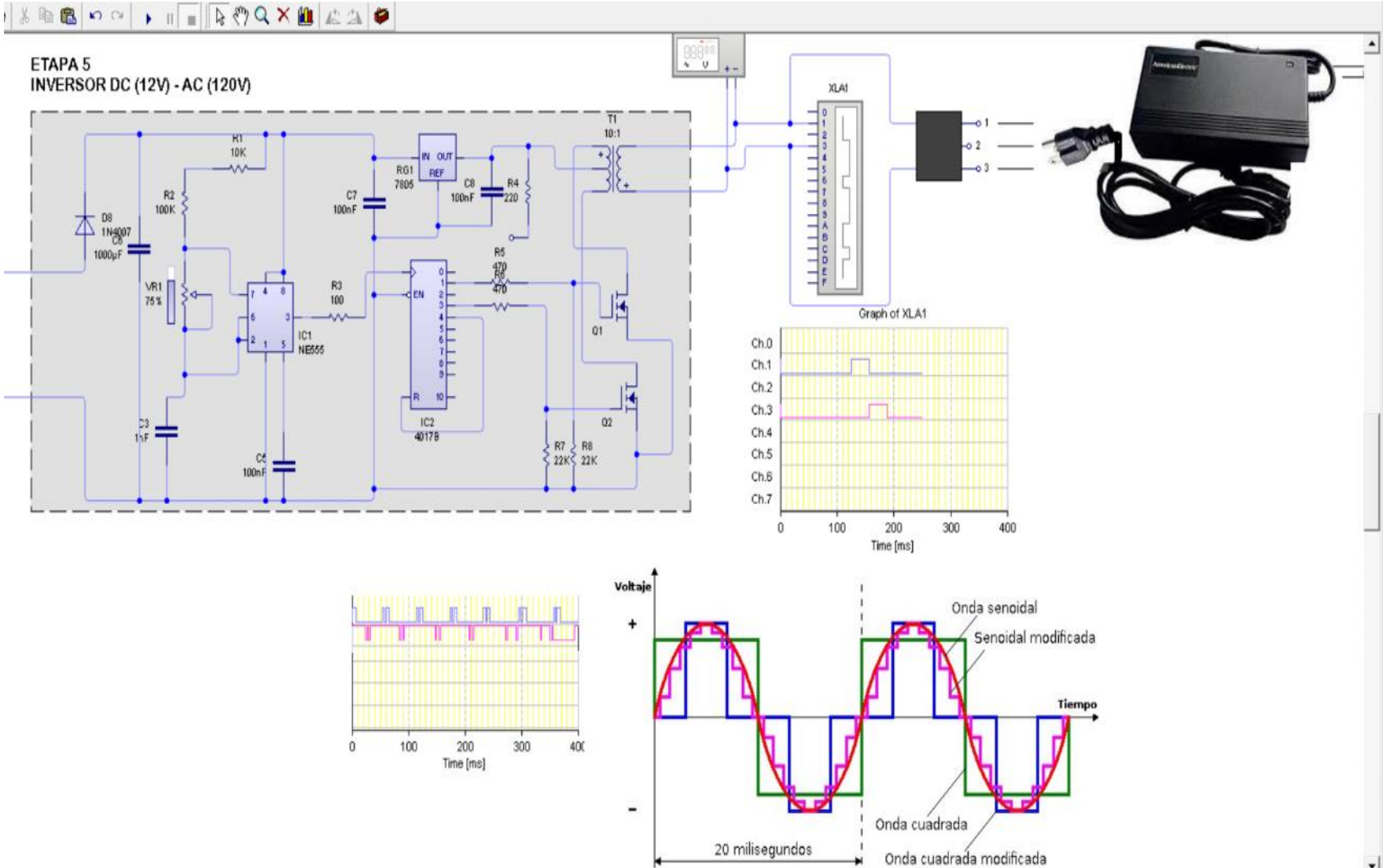


Este testigo se coloca en el tablero junto al interruptor principal

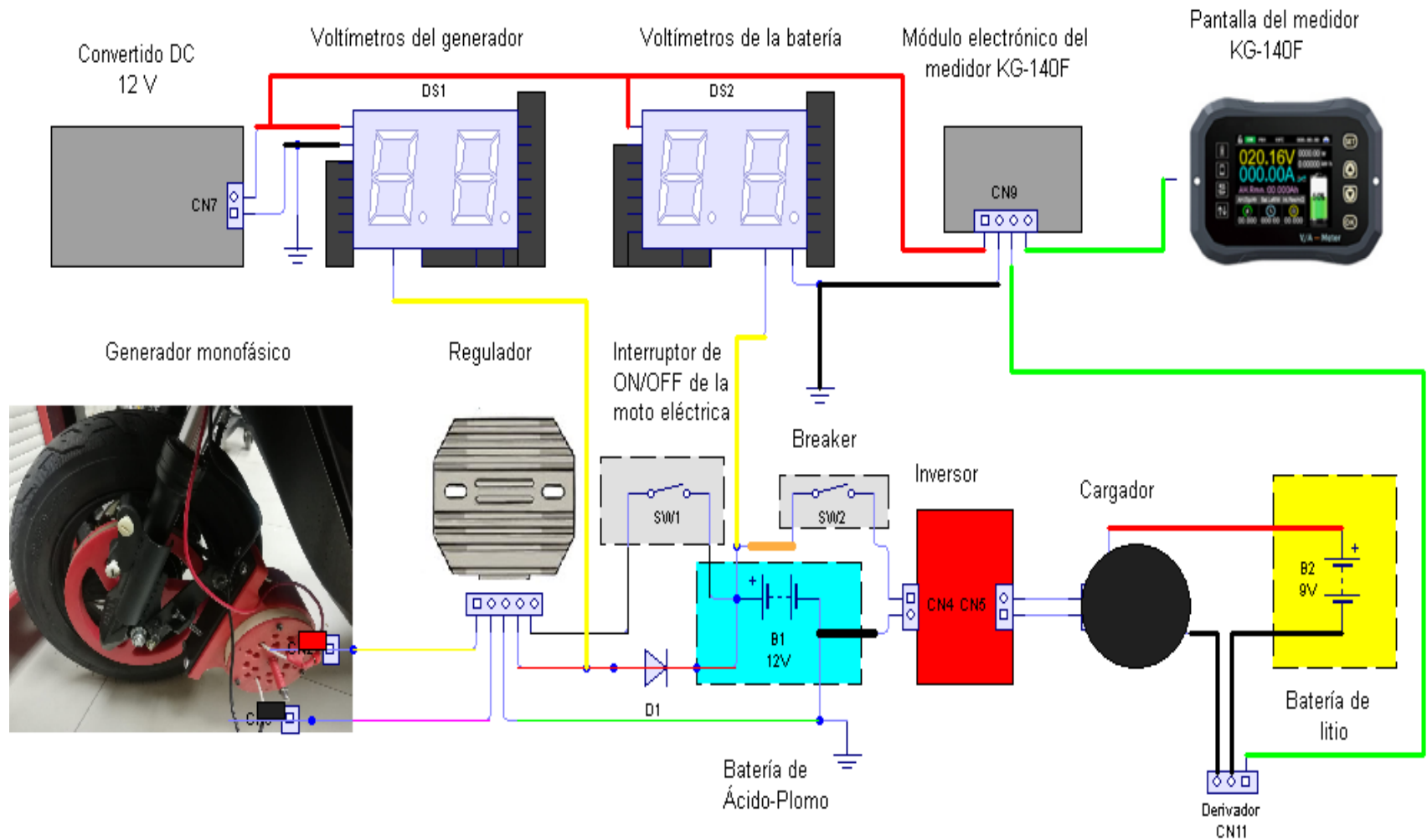




# Etapa 5 de potencia-circuitos eléctricos



# Conexión general de cada componente



# Dispositivos de medición

Indicador de activación del generador eléctrico

Tablero principal

KG-140F



Voltaje de la batería de ácido plomo

Voltímetro-  
Amperímetro del generador eléctrico



# *Pruebas y análisis de resultados*



# Protocolo de pruebas

Descarga de la batería de litio



Calibración de medidores



Calibrar el medidor KG-140F



Punto de corte de la batería



Verificar interferencias



Calibrar el valor de capacidad

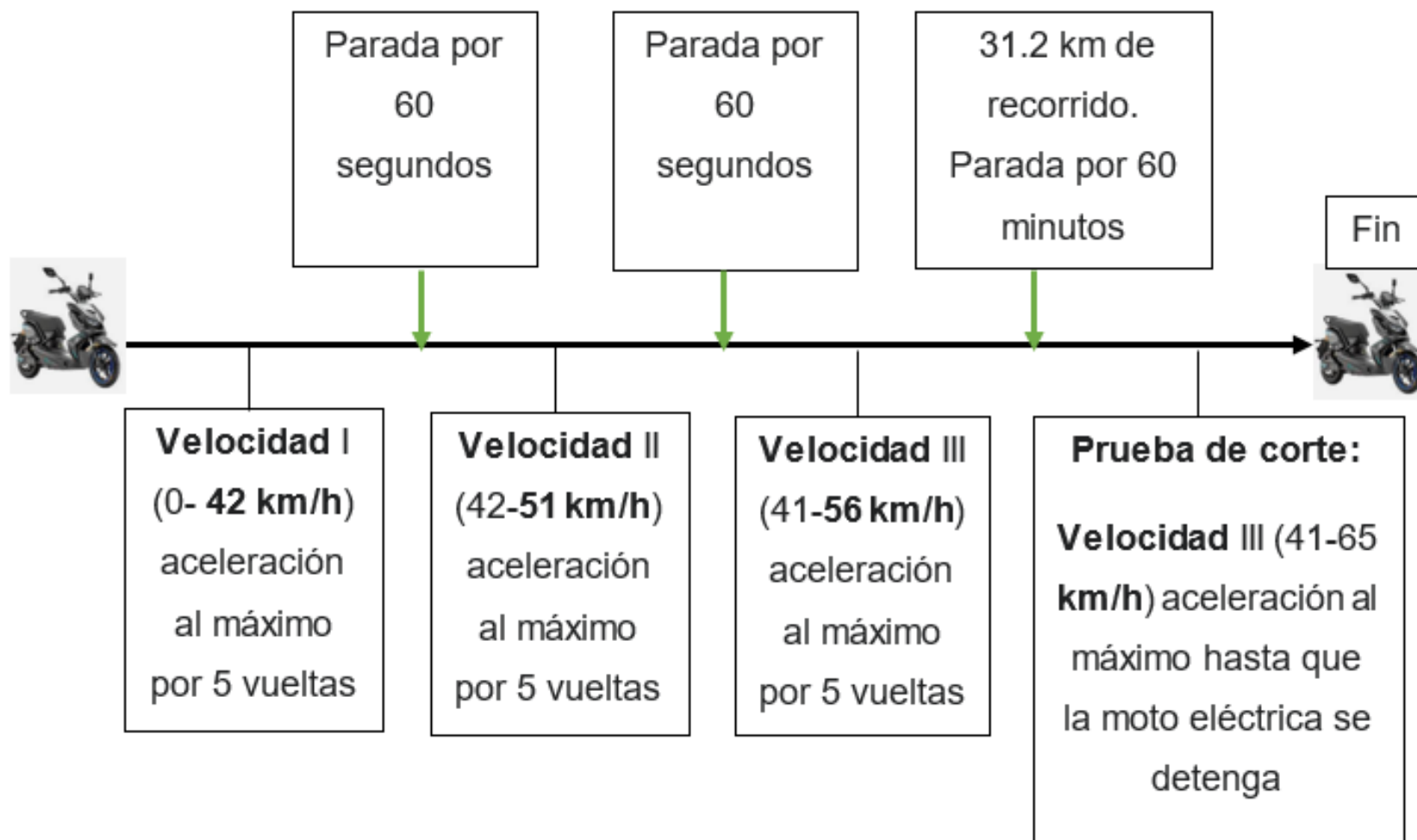


Cargar la moto eléctrica





# Condiciones de prueba



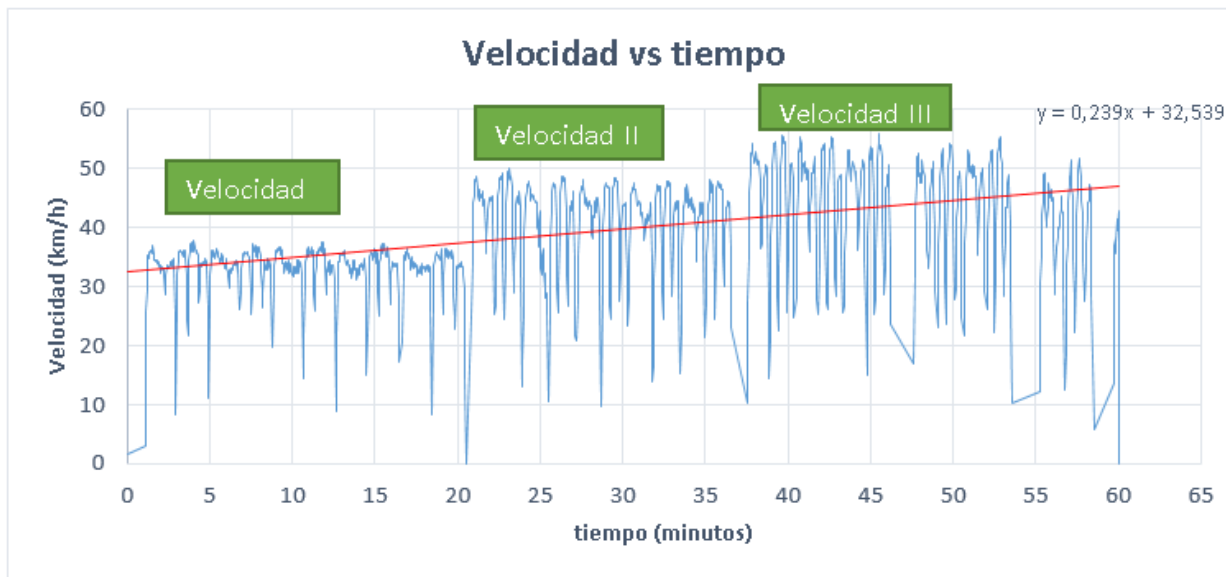


# Comparación de las fases de prueba 1 y 4



**Fase 1**

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



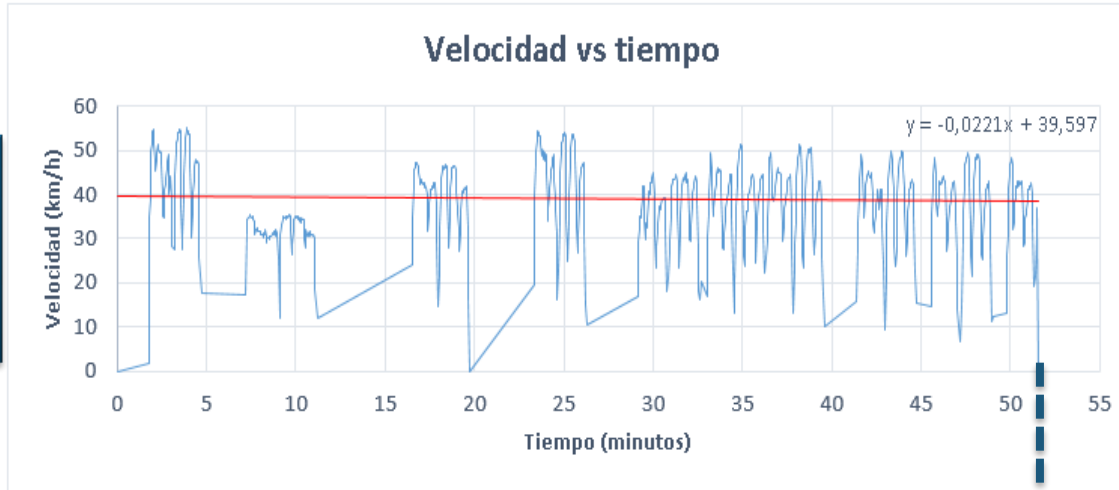
**Fase 4**

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

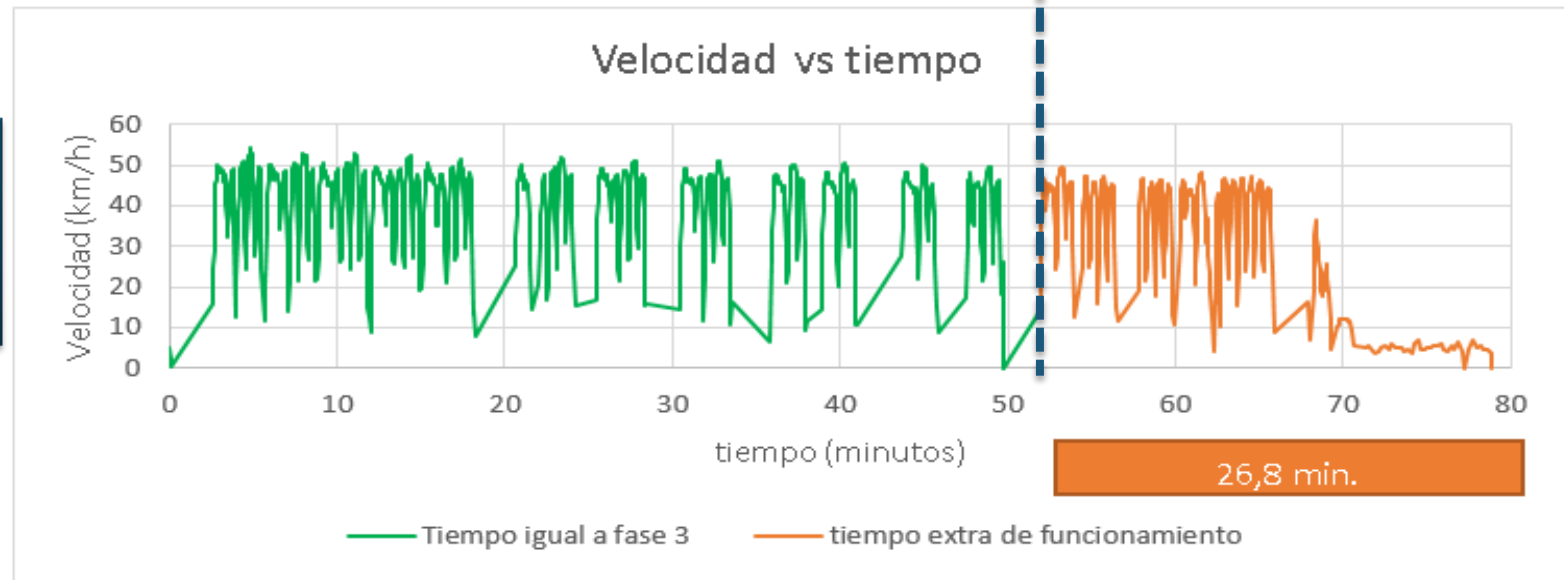


# Comparación de las fases de prueba 3 y 6

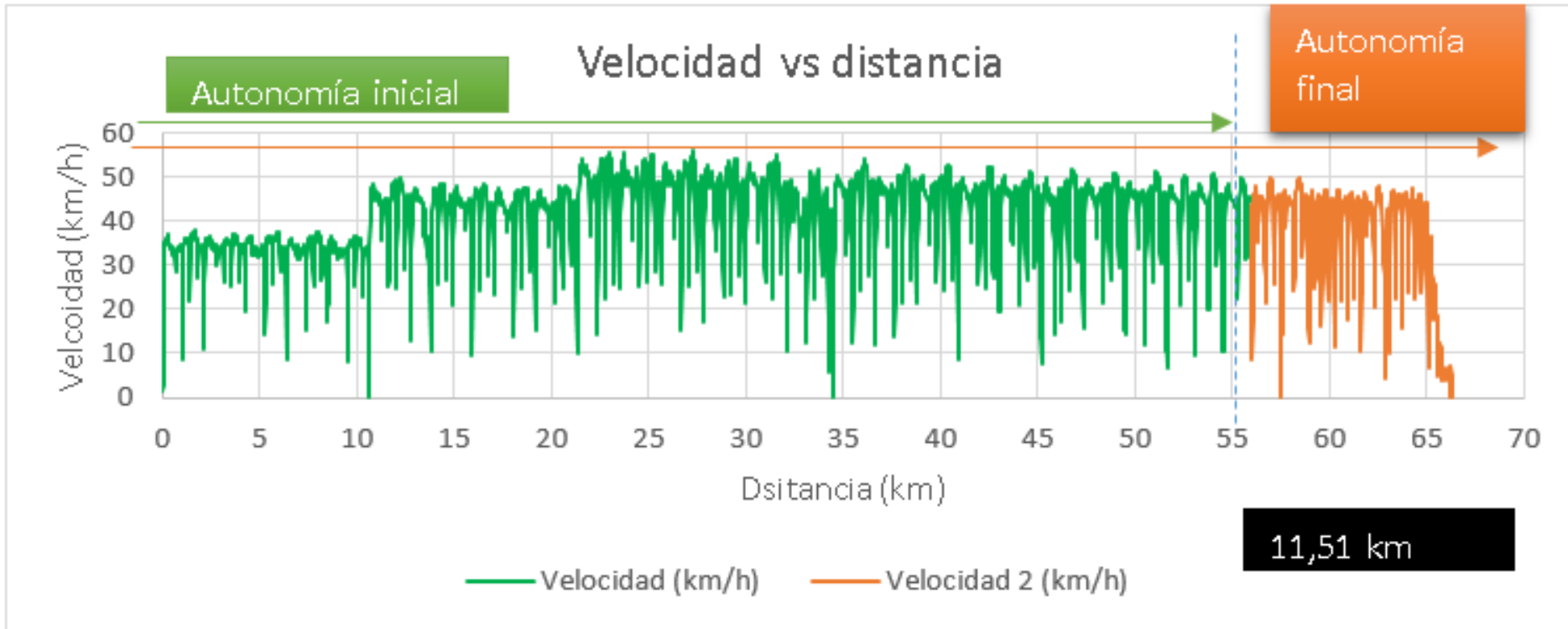
Ciclo de conducción  
Fase 3



Ciclo de conducción  
Fase 6



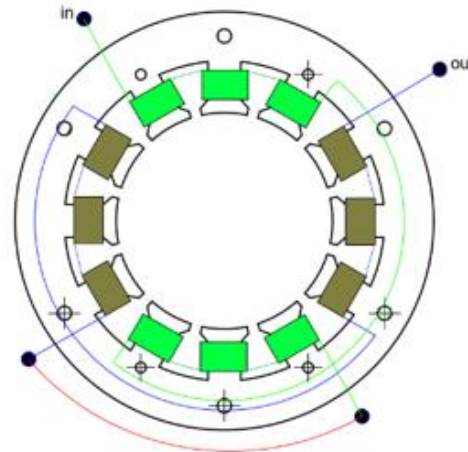
# Autonomía final



Se registra un incremento de 11,51 Km



# Pruebas en el generador eléctrico



**Tipo de conexión:** Monofásica      R. del bobinado: 9.06 – 10  $\Omega$

## 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



# *Conclusiones y recomendaciones*



- 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.
- La implementación de sistemas de carga regenerativa es viable para motos eléctricas, elevando la autonomía del 15 al 25 %.





# Conclusiones

- 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.



# Recomendaciones

- Es indispensable conocer el número de revoluciones exactas del objeto del cual se tomará la energía mecánica para evitar 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 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.



# Recomendaciones

- 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 almenos 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.
- 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.



“

**“Incluso si fallas, terminarás haciendo algo genial durante el proceso”.**

**SUNDAR PICHAI**



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA