

Análisis de motores utilizados en vehículos eléctricos

Fernando Patricio Miño Montaña

Universidad Internacional SEK

Nota de Autor

Fernando Patricio Miño Montaña, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Internacional

SEK; Director Santiago Celi.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

[patomino91@gmail.com](mailto:patomino91@gmail.com).

**Agradecimiento**

Mi agradecimiento va dirigido a todos los profesores de la Facultad de Mecánica, los cuales a lo largo de toda mi carrera han sabido darme la mejor de sus enseñanzas, siendo factor importante para la culminación de este proyecto.

**Dedicatoria**

Dedico primeramente esta tesis a mi madre que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles y a pesar de los momentos de tristeza que hemos vivido ella ha sabido enfrentarlos, por mis hermanos y por mí.

A mi hermano mayor que siempre ha estado junto a mí y brindándome su apoyo, poniéndose muchas veces en el papel de padre.

A mi padre, el cual a pesar de haberlo perdido a temprana edad, ha estado cuidándome y guiándome.

A ciertas personas que por un motivo u otro no pudieron estar conmigo este momento pero fueron parte fundamental en mi crecimiento como persona.

A mi familia en general porque me ha brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

## Contenido

Índice de Tablas .....	X
Índice de Figuras.....	XII
Resumen.....	XVI
Abstract.....	XVII
Introducción .....	XVIII
Antecedentes .....	1
Configuración de los motores .....	16
Yugo del estator .....	17
Dientes del estator.....	17
Ranuras del estator .....	17
Rebordes .....	17
Yugo del rotor.....	17
Dientes del rotor.....	17
Ranuras del rotor.....	18
Puente.....	18
Barras de rotor.....	18
Anillos externos .....	18
Método .....	20
Cálculo de un motor eléctrico trifásico de inducción con rotor jaula de ardilla .....	35

Grueso del manguito .....	65
Diámetro mínimo en los dientes .....	67
Diámetro medio en los dientes.....	67
Diámetro máximo en los dientes.....	68
Paso mínimo de ranura.....	68
Paso medio de ranura .....	69
Paso máximo de ranura.....	69
Anchura mínima de ranura.....	70
Anchura media de ranura .....	70
Anchura máxima de ranura.....	70
Utilización de la ranura.....	71
Sección de ranura.....	71
Sección de aislamiento de ranura y entre capas.....	71
Espacio libre para conductores aislados .....	72
Sección de un hilo aislado.....	72
Sección de un hilo sin aislante .....	73
Sección cuadrada del conjunto.....	73
Factor de utilización de espacio disponible .....	74
Factor de utilización de la ranura.....	75
Altura del yugo .....	75

Diámetro exterior del yugo .....	76
Longitud media líneas de fuerza .....	76
Salientes de manguito .....	78
Juego entre bobinas.....	80
Distancia entre fases .....	80
Distancias a masa.....	81
Longitud media de las cabezas de bobina.....	81
Longitud media del conductor .....	82
Resistencia y pérdidas óhmicas a 75 °C (temperatura media límite) .....	82
Pérdidas relativas por efecto Joule y caídas óhmicas .....	83
Pérdidas por efecto Joule absolutas .....	84
Caída óhmica absolutas.....	84
Resistencia óhmica del enrollamiento .....	85
Alturas.....	85
Anchuras .....	86
Corrección para altura de conductores y resto de ranura.....	86
Longitud axial efectiva de dispersión para la ranura .....	88
Longitud axial de dispersión para la base de cuña.....	88
Longitud axial efectiva de dispersión para la salida del entrehierro.....	89
Número de ranuras del rotor .....	90

Paso de ranuras en el entrehierro .....	90
Salida de ranura.....	90
Factor de corrección .....	90
Coefficiente de corrección por longitud activa .....	92
Coefficiente de Carter .....	92
Factor de saturación .....	93
Potencia reactiva .....	97
F.e.m relativa .....	97
F.e.m absoluta .....	98
Datos fundamentales.....	99
Número de ranuras del rotor .....	99
Paso de ranuras referido al diámetro exterior del entrehierro.....	99
Salida de ranura.....	99
Número de conductores del rotor.....	99
Factor de bobinado en el rotor .....	100
Diámetro del eje.....	100
Número de canales de ventilación radial .....	100
Longitud axial por canal .....	101
Factor de corrección lineal para los dientes.....	101
Rendimiento mecánico (supuesto).....	101

Deslizamiento (supuesto).....	101
Potencia eléctrica del rotor.....	101
Corriente primaria de carga secundaria .....	102
Corriente rotórica .....	102
Densidad de corriente propuesta ( $I_2 > I_1$ ) .....	103
Sección de barra por ranura .....	103
Inducción teórica aparente en los dientes .....	104
Grueso necesario del diente .....	104
Diámetro máximo en los dientes.....	104
Diámetro medio en los dientes.....	105
Diámetro mínimo en los dientes .....	105
Paso máximo de dientes.....	106
Paso medio de dientes.....	106
Paso mínimo de dientes .....	107
Anchura máxima de ranura.....	107
Anchura media de ranura .....	107
Anchura mínima de ranura.....	107
Resistividad.....	111
Caída óhmica en el rotor con relación al estator.....	112
Deslizamiento .....	112



Número de ranuras por polo en el rotor .....	113
Permanencia específica total del rotor .....	116
Caída relativa de reactancia secundaria .....	116
Corriente relativa de máximo par .....	118
Deslizamiento de máximo par .....	118
Corriente relativa de máxima potencia .....	119
Deslizamiento de máxima potencia .....	120
Velocidad angular síncrona.....	120
Velocidad angular nominal del rotor .....	121
Par nominal .....	121
Velocidad de giro del rotor con una frecuencia de 60 Hz.....	122
Par nominal utilizando una frecuencia de 60 Hz .....	123
Resultados.....	124
Motor de inducción con rotor jaula de ardilla.....	124
Plataforma Digital.....	132
Discusión.....	133
Conclusiones.....	136
Recomendaciones .....	137
Bibliografía .....	138

### Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Datos técnicos de dos de los automóviles eléctricos más reconocidos</i> .....	20
Tabla 2. <i>Significado de la simbología citada en las figuras 14 y 15</i> .....	21
Tabla 3. <i>Significado de la simbología citada en la figura 16</i> .....	23
Tabla 4. <i>Significado de la simbología citada en la figuras 19 y 20</i> .....	28
Tabla 5. <i>Significado de la simbología citada en la figuras 21</i> .....	30
Tabla 6. <i>Significado de la simbología citada en la figura 22</i> .....	31
Tabla 7. <i>Significado de la simbología citada en la figura 24</i> .....	32
Tabla 8. <i>Datos principales del diseño del motor eléctrico</i> .....	35
Tabla 9. <i>Valores modificados para un funcionamiento a 60 Hz</i> .....	36
Tabla 10. <i>Variación de potencia en porcentaje según la altura</i> .....	36
Tabla 11. <i>Ranuras recomendables para estatores y rotores de los motores asíncronos de corto circuito</i> .....	44
Tabla 12. <i>Factor de paso o acortamiento y armónicos de un devanado cualquiera de corriente alterna</i> .....	47
Tabla 13. <i>Factores de distribución para arrollamientos trifásicos</i> .....	49
Tabla 14. <i>Tipos de paso de bobina</i> .....	50
Tabla 15. <i>Temperaturas admisibles según la clase de aislamiento</i> .....	58
Tabla 16. <i>Incremento de diámetro de los hilos esmaltados</i> .....	66
Tabla 17. <i>Características del cobre 56 a las temperaturas a las temperaturas admitidas según los aislantes</i> .....	83
Tabla 18. <i>Dimensiones del diseño estator</i> .....	124
Tabla 19. <i>Dimensiones del diseño de rotor</i> .....	126

Tabla 20. <i>Características del motor de inducción calculado</i> .....	128
Tabla 21. <i>Ficha técnica del motor eléctrico diseñado</i> .....	129

### Índice de Figuras

<i>Figura 1.</i> Flota de taxis eléctricos en New York (Chuncusig, 2014, pág. 9). .....	1
<i>Figura 2.</i> Primer auto eléctrico que estableció nuevo récord de velocidad en 1899 (Larminie & Lowry, 2003, pág. 2).....	2
<i>Figura 3.</i> Vehículo eléctrico con cargador desarrollado por General Motors (Chuncusig, 2014, pág. 10). .....	3
<i>Figura 4.</i> Vehículo eléctrico EV1 (Chuncusig, 2014, pág. 11) .....	4
<i>Figura 5.</i> Esquema de vehículo eléctrico impulsado por un motor (Arsuaga, 2010) .....	6
<i>Figura 6.</i> Esquema de vehículo eléctrico impulsado por dos motores independientes (Arsuaga, 2010).....	6
<i>Figura 7.</i> Características del funcionamiento en los cuatro cuadrantes de los ejes Par ( $\Gamma$ ) - Velocidad ( $n$ ) (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011, pág. 41) .....	8
<i>Figura 8.</i> Tipos de motores eléctricos utilizados en vehículos (Alvarado, 2009, pág. 5) 10	
<i>Figura 9.</i> Fases encendidas a diferentes tiempos (Chuncusig, 2014, pág. 26).....	14
<i>Figura 10.</i> Esquema del motor de flujo axial con los imanes permanentes en el rotor (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011, pág. 58) .....	15
<i>Figura 11.</i> Carcasa de un motor asíncrono (Rodríguez, 2010).....	16
<i>Figura 12.</i> Interacción de los polos creados en el estator y el rotor (Rodríguez, 2010)...	19
<i>Figura 13.</i> Vista transversal del estator, rotor y elementos que los conforman. (Tang, 2011).....	21
<i>Figura 14.</i> Forma de las ranuras que conforman el estator (Tang, 2011) .....	22
<i>Figura 15.</i> Forma de las ranuras que conforman el rotor (Tang, 2011). .....	22
<i>Figura 16.</i> Vista lateral simplificada del motor de inducción (Tang, 2011). .....	23

<i>Figura 17.</i> Bobinado preferido para el motor de inducción del diseño propuesto por Tesla Motors (Tang, 2011).....	25
<i>Figura 18.</i> Ilustración esquemática de la configuración de los grupos de bobina por cada fase (Tang, 2011).....	26
<i>Figura 19.</i> Motor eléctrico seccionado longitudinalmente (Laskaris,K.; Baglino, A,; Furey, C.; Nelson, D., 2015).....	27
<i>Figura 20.</i> Motor eléctrico seccionado longitudinalmente enfocado en la esquina derecha de la figura 16 (Laskaris,K.; Baglino, A,; Furey, C.; Nelson, D., 2015).....	29
<i>Figura 21 .</i> Sección transversal de una barra de rotor y un conjunto de discos laminados que conforman el rotor (Lyons, D.; Tesla Motors, Inc.; Straubel, J., 2013).....	30
<i>Figura 22 .</i> Sección de barras que conforman los anillos extremos del rotor (Lyons, D.; Tesla Motors, Inc.; Straubel, J., 2013).....	31
<i>Figura 23.</i> Sección transversal del diseño de anillo externo propuesto por Tesla Motors (Lyons, D.; Tesla Motors, Inc.; Straubel, J., 2013).....	31
<i>Figura 24.</i> Sección transversal del motor de imanes permanentes (Nishimura,S.; Inoue, M.; Hazeyama, M.; Kuroda, Y., 2012).....	32
<i>Figura 25.</i> Potencia, eficiencia, factor de potencia e intensidad para motores de corriente alterna y continua (Viloria, 1989).....	37
<i>Figura 26.</i> Diámetros en función de la potencia de salida y el número de polos (Corrales, 1976).....	40
<i>Figura 27.</i> Carga lineal específica admisible en función de la potencia útil o de salida (Corrales, 1976) .....	42

<i>Figura 28.</i> Densidad de campo megnético recomendable en el entrehierro liso (Corrales, 1976).....	43
<i>Figura 29.</i> Bobina de ynigual a 4 ranuras .....	51
<i>Figura 30.</i> Calentamiento de las cabezas de bobina en las máquinas de alterna (Corrales, 1976, pág. 194). .....	58
<i>Figura 31.</i> Canales de ventilación a lo largo del núcleo del estator (Vallejo, E., 1977)...	61
<i>Figura 32.</i> Ranura estatórica de guía de diseño (Corrales, 1976) .....	64
<i>Figura 33.</i> Ranura rotórica de guía de diseño (Corrales, 1976) .....	65
<i>Figura 34.</i> Grueso de manguito aislante (Corrales, 1976).....	65
<i>Figura 35.</i> Longitudes de corona inducida $lc$ y de corona polar $lcp$ en máquinas de inducido rotórico y de inducido estatórico (Corrales, 1976) .....	77
<i>Figura 36.</i> Entrehierro de los motores asíncronos en función del diámetro $D$ y del número de pares de polos.....	78
<i>Figura 37.</i> Longitud saliente de los manguitos cortos $ac$ y largos $al$ para las bobinas estatórica de alterna (Corrales, 1976, p. 199) .....	79
<i>Figura 38.</i> Distancia entre bobinas de la misma fase (Corrales, 1976, p. 201).....	80
<i>Figura 39.</i> Distancias a masa $b1$ y entre fases $c1$ para las máquinas de alterna (Corrales, 1976, p. 201).....	81
<i>Figura 40.</i> Factores de corrección para conductores y bobina (Corrales, 1976, p. 232)....	87
<i>Figura 41.</i> Pérdida de longitud efectiva $\epsilon n$ por canal de ventilación radial, a los efectos del flujo de dispersión (Corrales, 1976, pág. 245).....	88
<i>Figura 42.</i> Longitud perdida en el entrehierro $\epsilon\delta$ por canal ventilación radial de 10mm y 15mm respectivamente (Corrales, 1976, pág. 148) .....	91

<i>Figura 43.</i> Factor para la permanencia de zig-zag (Corrales, 1976, pág. 254) .....	93
<i>Figura 44.</i> Triángulo de potencias (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011) .....	96
<i>Figura 45.</i> Coeficiente de permanencia $g$ para la dispersión (Corrales, 1976).....	114
<i>Figura 46.</i> Diseño de ranura de estator definitivo .....	125
<i>Figura 47.</i> Diseño de ranura de rotor definitivo .....	127
<i>Figura 48.</i> Estator 3D .....	130
<i>Figura 49.</i> Rotor 3D .....	131

## Resumen

En el presente documento se describen todos los tipos de motores eléctricos utilizados en vehículos, de los cuales se tomaron cinco motores, que son los más empleados. Estos motores son los siguientes: motor asíncrono de jaula de ardilla, de rotor bobinado, motor síncrono de imanes permanentes, motor de reluctancia variable y motor de flujo axial. Se realizó una descripción detallada, tal es el caso de las relaciones de dimensionamiento que propuestas por Tesla Motors, forma de las conexiones eléctricas del bobinado y complementos que ayudan al motor a tener un mejor desempeño como lo son el uso de los escudos de flujo. En el caso de Mitsubishi Motors se realizó una descripción grafica de cómo está compuesto el motor eléctrico, forma del estator y del rotor.

Debido al análisis realizado con anterioridad de los tipos de motores utilizados en vehículos, se tomó la decisión de diseñar un motor de inducción con rotor jaula de ardilla, por sus favorables ventajas y por ser utilizado por la mejor compañía en fabricación de vehículos eléctricos en la actualidad Tesla Motors. Se obtuvo datos favorables en términos de par motor y potencia del motor eléctrico. Se realizaron una serie de tablas donde están los principales datos como los son el amperaje, voltaje, densidad de campo magnético, dimensiones del estator y del rotor, resistencia del bobinado, incluyendo una ficha técnica del motor diseñado y planos de fabricación tanto de la ranura del estator como la del rotor.



### **Abstract**

This document describes all types of electric motors used in vehicles, from which five motors were taken, which are the most used. These motors are asynchronous squirrel cage motor, winding rotor, permanent magnet synchronous motor, variable reluctance motor and axial flow motor. A detailed description was made, such as the sizing relationships proposed by Tesla Motors, the shape of the winding electrical connections and accessories that help the engine to perform better, such as the use of the flux shields. In the case of Mitsubishi Motors, a graphical description of how the electric motor, stator and rotor form is made.

Due to the previous analysis of the types of motors used in vehicles, the decision was made to design an induction motor with squirrel cage rotor, for its favorable advantages and to be used by the best company in the manufacture of electric vehicles in the Current Tesla Motors. Favorable data were obtained in terms of torque and power of the electric motor. A series of tables were made where the main data such as amperage, voltage, magnetic field density, stator and rotor dimensions, winding resistance, including a designed engine datasheet and manufacturing planes of both the slot of the stator as the rotor.

## Introducción

Los motores eléctricos son tan antiguos como los motores de combustión interna, pero debido al gran consumismo de los derivados del petróleo existente en la víspera de la primera Guerra Mundial el desarrollo y aplicación durante esos años no tuvo mayor impacto social.

En un motor térmico durante la combustión genera mucho calor el cual no es aprovechable y se necesitan muchas piezas móviles para transmisiones de movimiento, produciendo pérdidas por calor y fricción. Por otro lado los motores eléctricos pueden trabajar a muy bajas revoluciones lo cual es imposible para un motor de combustión interna, el cual a ralentí trabaja a unas 700 rpm, por debajo de ese valor tienden a fallar.

Un motor impulsado por energía eléctrica no solo es más eficiente en cuestiones de transmisión de trabajo y potencia, al no utilizar derivados del petróleo estos no producen ningún tipo de contaminantes al medio ambiente.

El motor eléctrico está compuesto por las siguientes partes:

Carcasa

Esta rodea la parte exterior del estator, protegiendo del medio ambiente el interior del motor eléctrico.

Estator

Es estator compone la parte fija de la máquina y tiene forma de cilindro hueco.

Yugo del estator

El yugo o núcleo del estator es la parte que no presenta perforación alguna, se encuentra ubicado por encima de las ranuras y los dientes del estator.

### Dientes del estator

Forman parte del núcleo o yugo del estator, son laminaciones dirigidas hacia el centro de del motor eléctrico. Se encuentran entre las ranuras del estator.

### Ranuras del estator

Son perforaciones situadas entre los dientes del estator.

### Rebordes

Son pequeñas extensiones que se encuentran en las esquinas de las ranuras, estas aparecen dependiendo del tipo de ranura que se lo haga al núcleo del estator.

### Rotor

Se coloca en el interior del estator y es la parte móvil del motor eléctrico.

### Yugo del rotor

Es la parte que no presenta perforación alguna, se encuentra ubicado por debajo de las ranuras y los dientes del rotor.

### Dientes del rotor

Forman parte del núcleo o yugo del rotor, son laminaciones dirigidas hacia el exterior de del motor eléctrico. Se encuentran entre las ranuras del rotor.

### Ranuras del rotor

Son perforaciones situadas entre los dientes del rotor.

### Puente

Es la unión que existe entre los extremos de una ranura. Dependiendo del criterio del constructor estas pueden o no ser empleadas en el diseño.

### Barras de rotor

Son barras o varillas generalmente de cobre u otro material altamente conductores como el aluminio. Se sitúan dentro de las ranuras atravesando por completo el rotor.

### Anillos externos

Son elaborados generalmente de cobre. Se ubican en los extremos del rotor de tal forma que entren en contacto con las barras y son utilizados para crear un cortocircuito entre ellas.

### Entrehierro

Entre el estator y el rotor existe una distancia denominada entrehierro, esta impide que entren en contacto entre sí. En el entrehierro tienen lugar los fenómenos electromagnéticos que permiten la conversión de energía eléctrica a mecánica o viceversa.

### Polos magnéticos

Los polos magnéticos van siempre en parejas, de esta forma se encuentran el polo norte o polo positivo y el polo sur o polo negativo. Por lo general están en el estator, y son los encargados de generar el flujo magnético ya sea por imanes permanentes o electroimanes como se precia en la siguiente figura.

Debido a los gases provenientes de los motores de combustión interna los cuales producen un grave impacto medio ambiental a nivel mundial y a la reducción de costo que ha sufrido el petróleo actualmente, grandes países están optando por el uso e implementación de energías alternas.

En Ecuador con la pronta culminación de ocho grandes proyectos hidroeléctricos, las cuales producirán más del 90% de la energía del país, teniendo como una de las principales la hidroeléctrica Coca-Codo Sinclair la cual generará 1500 Megavatios, es una oportunidad idónea para aprovecharla en aplicaciones en vehículos, tal es el caso de los motores eléctricos.

El objetivo de la presente investigación es analizar los tipos de motores empleados en los vehículos eléctricos, utilizando la investigación explicativa y el diseño, para proporcionar al lector conocimientos generales como específicos acerca del funcionamiento y ventajas de este tipo de motores.

Comparar los resultados obtenidos con los datos suministrados por Tesla Motors para determinar si los materiales empleados en la construcción de los motores eléctricos, influyen de gran manera en el desempeño.

## Antecedentes

El primer vehículo eléctrico tuvo sus inicios en el año de 1835 el cual fue diseñado por Sibrindus Stratingh, para después ser construido por su asistente Cristopher Becker en Groningen, Holanda (Chuncusig, 2014).

Chuncusig afirma que “Los primeros vehículos eléctricos utilitarios fueron construidos por Thomas Davenport y Robert Davison en 1842, con el problema de que estos no tenían baterías recargables, por lo que su funcionalidad fue limitada”.

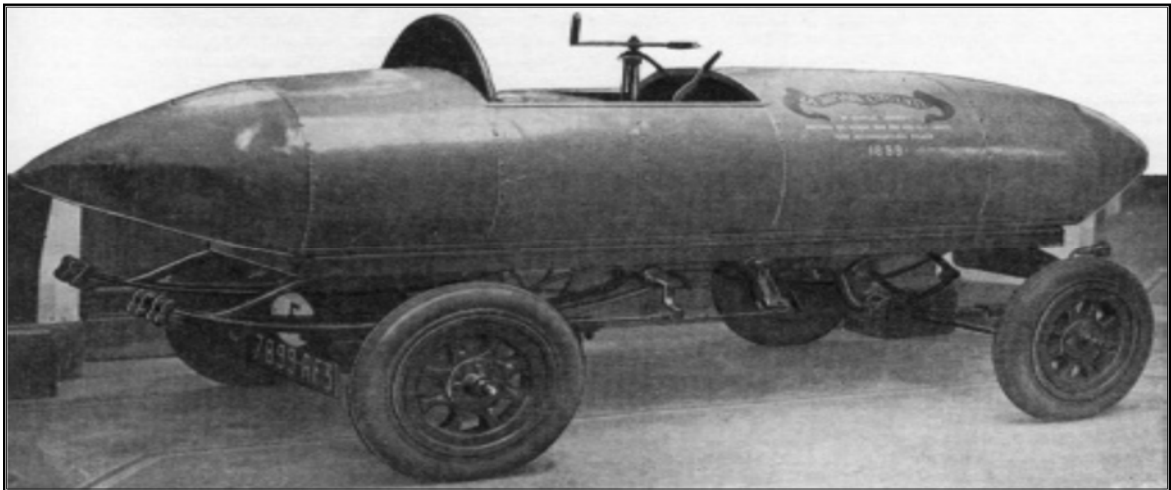
La primera aplicación comercial para vehículos eléctricos fue desarrollada en New York, en 1897, por la Electric Carriage y Wagon Company de Philadelphia, con la creación de una flota de taxis eléctricos (Figura 1), que llegó a contar con un número de 100 unidades aproximadamente, ampliándose más tarde a otras ciudades norteamericanas (Larminie & Lowry, 2003).



*Figura 1.* Flota de taxis eléctricos en New York (Chuncusig, 2014, pág. 9).

Los primeros vehículos eléctricos de la década de 1830 utilizaban baterías no recargables. Cincuenta años después, las baterías se desarrollaron lo suficiente como para ser utilizadas en vehículos eléctricos comerciales. A finales del siglo 19, con la producción en masa de las baterías recargables, los vehículos eléctricos se hicieron ampliamente utilizados (Larminie & Lowry, 2003).

La Figura 2, muestra el vehículo eléctrico conocido como ‘La Jamais Contente’, conducido por piloto de carreras Belga Camille Jenatzy, estableció un nuevo récord de velocidad de 106 kph (Larminie & Lowry, 2003).



*Figura 2. Primer auto eléctrico que estableció nuevo récord de velocidad en 1899 (Larminie & Lowry, 2003, pág. 2)*

Ferdinand Porsche entre 1898 y 1906 desarrolló un sistema de propulsión que consistía en montar los motores directamente en las ruedas logrando minimizar las pérdidas energéticas y reducía el número de partes móviles en el vehículo. Este tipo de vehículos fueron conocidos como Lohner-Porsche. Cada motor disponía de 2.5 CV de potencia, alcanzando en periodos cortos potencias de hasta 3.5CV, logrando una potencia combinada de 7CV y ofreciendo

prestaciones modestas, 15 km/h de velocidades de cruce y 50 km/h de velocidad máxima (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011).

El desuso de vehículos eléctricos particulares no significó la desaparición de los mismos en diferentes aplicaciones, como en camiones comerciales e industriales, los cuales siguieron creciendo durante el año 1920 y en otras aplicaciones en 1930. Los taxis eléctricos fueron abandonados a mediados de 1920 (Santini, 2011).

En los próximos años las grandes marcas de automóviles apostarían poco a poco por los vehículos eléctricos, como Renault con su primer auto eléctrico en 1928, o Peugeot que en el año de 1941 fabricó 400 vehículos eléctricos con una autonomía de 80 km y una velocidad punta de 32 km/h (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011).

General Motors en el año 1973 desarrolló un vehículo eléctrico con cargador de baterías (Figura 3), el cual fue presentado en el primer Simposio de Desarrollo de Sistemas de Energía de baja Contaminación. (Santini, 2011)



*Figura 3.* Vehículo eléctrico con cargador desarrollado por General Motors (Chuncusig, 2014, pág. 10).



El CARB (California Air Resources Board) agencia del gobierno de California ocupada de la calidad del aire, en 1990 aprobó la ley “Vehículo de emisión cero (ZEV)”, la cual obligaba a las compañías fabricantes de automóviles a que dispongan en sus catálogos vehículos de cero emisiones. (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011)

De esa manera nace el modelo EV1 (Figura 4), primer vehículo completamente eléctrico, con una autonomía de 130 km. De la misma iniciativa nacieron vehículos como el Toyota RAV-EV, el Ford Think, el Nissan Altra EV, entre otros. (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2015)



*Figura 4. Vehículo eléctrico EV1 (Chuncusig, 2014, pág. 11)*

Lo más curioso de la situación, es que a pesar de la ayuda financiera que se le otorgaban a las compañías que fabricaban vehículos, estos se oponían a la ley ZEV. En 2003, General Motors canceló la producción del EV1, argumentando que no logró vender suficientes vehículos para que este sea lo suficientemente rentable. El documental “Who killed the electric car” expone una supuesta teoría de conspiración para acabar con la venta de los vehículos eléctricos,

en la que menciona que los intereses de ciertos grupos acabaron con lo que parecía un paso gigante en el futuro de la automoción especialmente cuando la ley ZEV empieza a ser presionada por la industria petrolera argumentando que esta era demasiado estricta. (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2009)

En la actualidad, la inserción de vehículos eléctricos a nivel mundial ha generado gran interés como una posible solución para el calentamiento global, debido a la emisión de gases contaminantes provenientes de vehículos que utilizan combustibles fósiles, de forma simultánea buscando reducir su dependencia. (Chuncusig, 2014)

Después de un pasado como actor secundario, el vehículo eléctrico se posiciona como gran favorito al futuro como automóvil urbano. Las grandes marcas apuestan por él, ya sea como vehículo totalmente eléctrico o híbrido, invirtiendo grandes cantidades de dinero en investigaciones y presentando prototipos con prestaciones que cada vez se acercan más al vehículo de combustión interna. (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011)

Vehículos eléctricos como el Leaf de Nissan durante el año 2011 apuntaba a ser como uno de los automóviles urbanos más fuertes. Este dispone de un motor de 80 kW, alimentado por una batería de iones de litio de 345 voltios y cuenta con una autonomía de 160 km. (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011)

La propuesta de Mitsubishi el iMiEV incorpora un motor síncrono de 49kW con un elevado par motor de 180Nm, utilizando una batería de ion de litio, con una autonomía de 160 km. Dispone de un sistema de carga rápida, el cual puede cargar al 80% de la capacidad máxima de la batería en 30 minutos. (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011)

Los vehículos eléctricos cuentan con un motor alimentado por electricidad unido al eje de las llantas (Figura 5), o a su vez con motores independientes en cada llanta (Figura 6), logrando el movimiento de las mismas o bien para convertir la energía cinética de las ruedas en energía eléctrica y de este modo cargar el acumulador mediante un sistema de frenos regenerativos. (Torres, 2015)

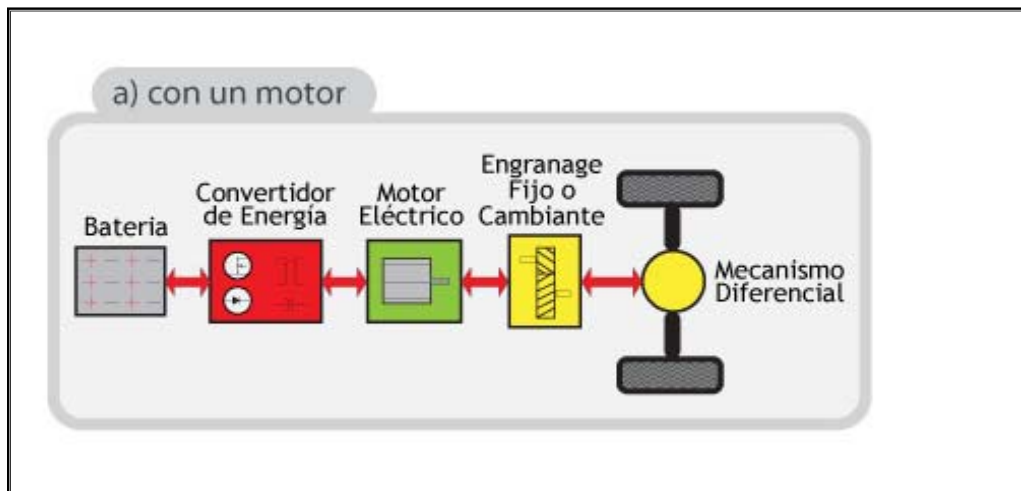


Figura 5. Esquema de vehículo eléctrico impulsado por un motor (Arsuaga, 2010) .

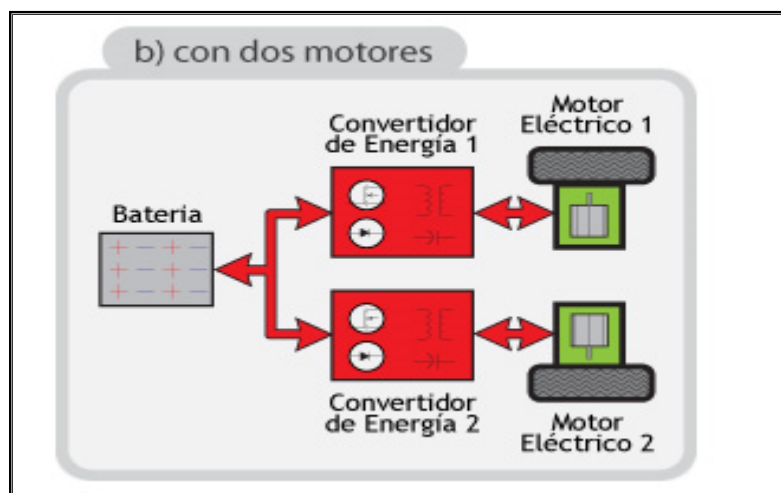


Figura 6. Esquema de vehículo eléctrico impulsado por dos motores independientes (Arsuaga, 2010)

El sistema de tracción del vehículo eléctrico cuenta con un controlador que recoge la energía de la batería y se la entrega al motor. El acelerador del vehículo trabaja a la par con el controlador para que este pueda proporcionar la energía eléctrica necesaria para generar la velocidad del vehículo. (Chuncusig, 2014)

Las baterías empleadas en este tipo de vehículos son de Ion-Litio, sin embargo estas requieren cobalto, el cual es un material costoso y térmicamente inestable. Una alternativa a esto es sustituir el cobalto por manganeso, ya que los electrodos de óxido de manganeso son más estables y menos costosas. Las baterías se recargan de la red eléctrica, de la recuperación de energía en el frenado y de paneles solares fotovoltaicos en los centros de carga. (Torres, 2015)

La utilización del motor eléctrico es uno de los verdaderos puntales para promover el cambio tecnológico, ya que es un sistema motriz que consigue dar par sin emitir ningún tipo de contaminante. (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011)

Algo importante a tener en cuenta con la inserción de los vehículos eléctricos es el consumo energético extra que estos demandan, la cual debe ser gestionada debidamente mejorando a la par la eficiencia energética del sistema eléctrico (Chuncusig, 2014).

### **Motores eléctricos**

Un motor eléctrico es aquel que transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Los motores eléctricos presentan curvas ideales para la tracción de vehículos, es decir, potencia constante en todo el rango de velocidades lo que proporcionan un par elevado a baja velocidad y un par de reducido a elevada velocidad (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2009)

Casi todas las máquinas eléctricas pueden girar en ambos sentidos. Además, el motor puede empujar a la carga (entrega de par) o puede ser empujado por ella (el motor toma la energía mecánica y la transforma en energía eléctrica, actuando como un generador).

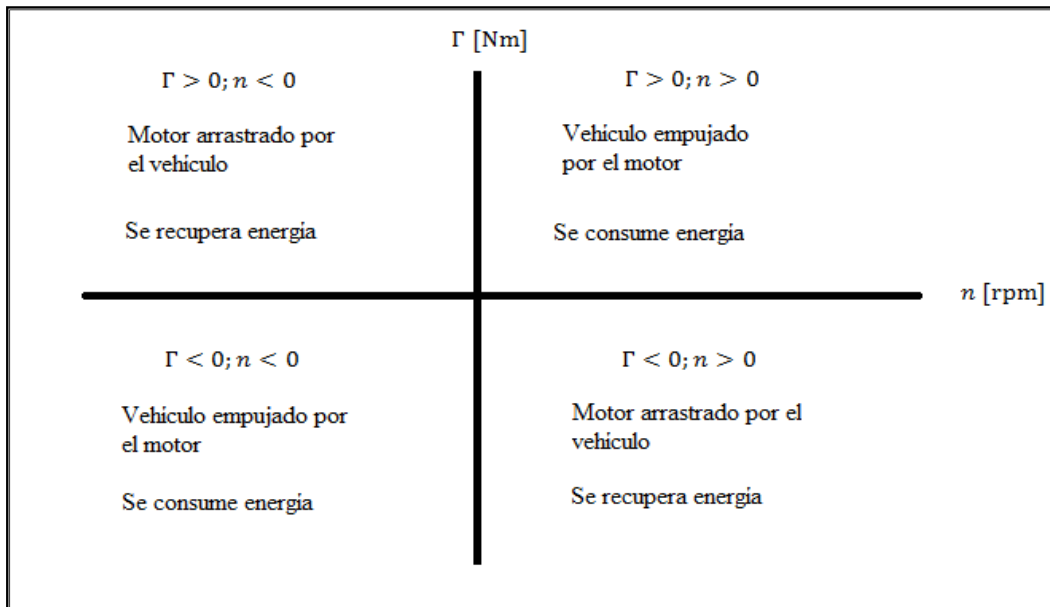


Figura 7. Características del funcionamiento en los cuatro cuadrantes de los ejes Par ( $\Gamma$ ) - Velocidad ( $n$ ) (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011, pág. 41)

En el **primer cuadrante** donde el par y sentido de giro son positivos, el motor arrastra a la carga consumiendo energía eléctrica (marcha adelante y acelerando).

En el **segundo cuadrante** donde el par es positivo y el sentido de giro es negativo, la carga impulsa al motor, en otras palabras el motor realiza la función de generador y frena la carga que en este caso sería el impulso del vehículo hacia atrás (marcha atrás y frenando) (Rocha,J; Tipanluisa,L; Reina, S; Ayabaca,C., 2017)

- **Frenado reostático:** la energía se consume en resistencias o en los devanados del motor eléctrico.
- **Frenado con recuperación (frenado regenerativo):** la energía es devuelta a la batería o acumuladores.

En el **tercer cuadrante** el par y el sentido de giro son negativos. El motor empuja hacia atrás a la carga entregando potencia mecánica (marcha atrás y acelerando).

En el **cuarto cuadrante** el par es negativo y el sentido de giro es positivo. En este caso el vehículo va hacia adelante pero está frenando. El motor funciona como generador, recuperando energía (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011).

Existen ciertos requisitos que un motor eléctrico debe cumplir para que este pueda servir para aplicaciones en vehículos. (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011)

- Alta potencia específica (relación potencia-peso)
- Alto par de arranque (alta capacidad de sobrecarga)
- Alta densidad de energía (alta capacidad de almacenar energía con tamaño y peso reducidos)
- Alta eficiencia (superior al 90% en condiciones nominales)
- Amplia gama de velocidades
- Operación en los 4 cuadrantes
- Control sencillo
- Niveles de ruido y vibraciones bajos
- Par con pocas variaciones
- Robustez mecánica y térmica elevadas
- Fabricación y mantenimiento reducidos
- Bajo costo

Para satisfacer en su gran mayoría todos estos puntos, existen varios tipos de motores eléctricos (Figura 8).

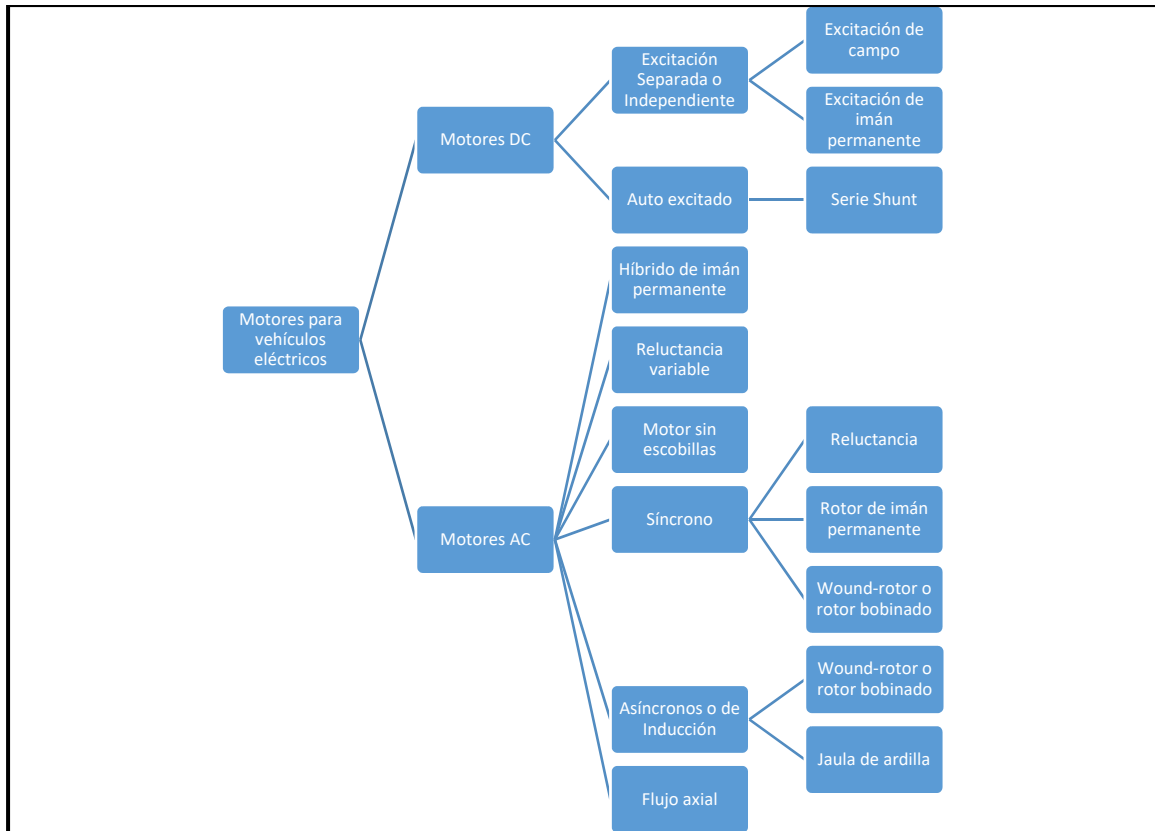


Figura 8. Tipos de motores eléctricos utilizados en vehículos (Alvarado, 2009, pág. 5)

A continuación se analizarán los motores eléctricos más utilizados en vehículos, los cuales son: los motores de inducción con rotor jaula de ardilla, con rotor bobinado, motores síncronos de imanes permanentes, motor de reluctancia variable y motores de flujo axial.

### **Máquinas asincrónicas o de inducción**

Las máquinas asincrónicas o de inducción están formadas principalmente de dos partes: rotor y estator separados por un entrehierro.

El estator es la parte inmóvil de la máquina y está formado por un apilamiento de chapas de acero al silicio en las que sitúa un devanado trifásico, alimentado con corriente alterna, distribuido en ranuras a  $120^\circ$ . El rotor es la parte móvil de la máquina y está formado por un conjunto de barras en cortocircuitadas donde fluye la corriente alterna por inducción.

Su funcionamiento se basa en la acción que ejerce el campo magnético giratorio generado en el estator sobre las corrientes que circulan por las barras conductoras ubicadas en el rotor, en otras palabras, el movimiento se produce por la interacción de los campos magnéticos formados por el estator y el rotor. (Godoy, 2012)

Las máquinas eléctricas de inducción pueden ser de jaula de ardilla o de rotor bobinado.

### **Motor de inducción de jaula de ardilla**

La diferencia radica en que el devanado de este tipo de motores está compuesto por una serie de barras de aluminio o de cobre que están limitadas por medio de anillos soldados a cada extremo del rotor. Este tipo de construcción da como resultado motores más baratos y confiables.

(Rodriguez, 2008)

#### Ventajas

- Económicos
- Poco peso
- Compactos
- Buena robustez mecánica y térmica
- Requieren poco mantenimiento
- Control sencillo
- Alta eficiencia

#### Desventajas

- Baja densidad de potencia
- Pierde rendimiento al disminuir la velocidad



- Altas corrientes de arranque

### **Motor de inducción de rotor bobinado**

Este tipo de máquinas eléctricas no son muy utilizados en la industria de los vehículos, por el simple hecho de que utiliza anillos rozantes y escobillas, lo que significa mantenimientos constantes (Arsuaga, 2010).

### **Motor síncrono de imanes permanentes**

En los motores síncronos la corriente eléctrica pasa directamente por los bobinados del estator, por lo tanto no son necesarias ni las escobillas ni el colector que se utilizan en los brushed. Esta corriente genera un campo electromagnético que interacciona con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor, haciendo que aparezca una fuerza que hace girar al rotor y a su vez al eje del motor. (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011)

#### Ventajas

- Alta densidad de potencia debido a la ausencia de conmutadores mecánicos y escobillas
- Tamaño del rotor pequeño
- Peso reducido
- Alta capacidad de sobrecarga y par de arranque
- Bajo costo de mantenimiento
- Buena disipación térmica

#### Desventajas

- Costo elevado ya que requieren de sensores de posición y electrónica de potencia compleja
- Dificil uso para frecuencias altas
- A altas velocidades, puede reducirse la eficiencia debido a los riegos de desmagnetizacion y las pérdidas en el estator pueden ser importantes
- Dependencia de las tierras raras (como el neodimio-hierro-boro o samario-cobalto), utilizados para la fabricación de los imanes permanentes debido a que presentan mayor campo magnético

### **Motor de reluctancia variable**

Estas máquinas eléctricas están constituidas por un estator y un rotor de polos salientes. En el estator se realiza el bobinado de la máquina. El rotor está constituido por una serie de láminas ferromagnéticas no imantadas. Las fases del motor trabajan por separado. Al crear un campo magnético en las fase correspondiente en el estator el flujo magnético tiende a seguir y cerrar el circuito por lo cual los polos salientes del rotor son atraídos a su correspondiente polo magnético. (Fitzgerald,A; Kingsley,C; Umans,S., 2004)

A continuación se muestra en la Figura 9 un motor de reluctancia variable con sus respectivos bobinados en el estator y su rotor de polos salientes.



Figura 9. Fases encendidas a diferentes tiempos (Chuncusig, 2014, pág. 26)

#### Ventajas

- Construcción simple y robusta
- Control sencillo
- Alta densidad de potencia
- Alta eficiencia
- Rendimiento elevado
- Rango de velocidades muy amplio
- Menores pérdidas por calor

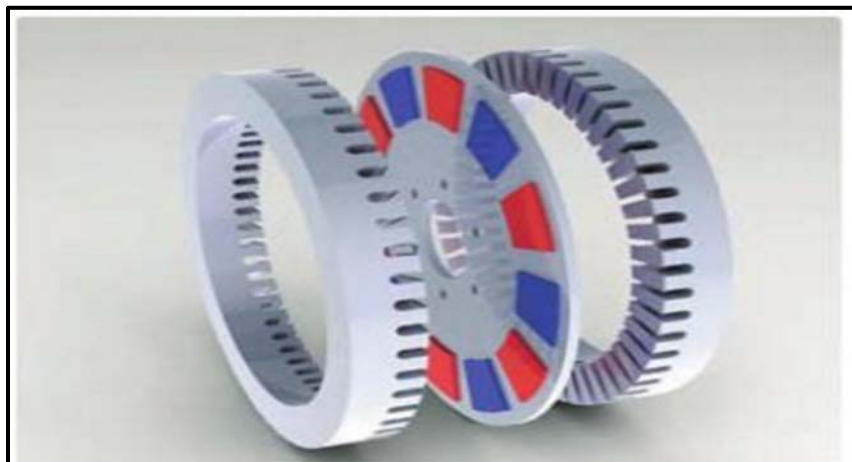
#### Desventajas

- Costo elevado de mantenimiento
- Necesita sensores para saber la posición del rotor
- Ruido acústico
- Interferencia electromagnética

### Motores de flujo axial

A diferencia de los motores tradicionales, el devanado inductor crea un campo magnético paralelo al eje axial o eje principal del rotor. El rotor gira entre dos semi-estatores magnéticamente activos que crean el campo y poseen grandes superficies polares. La forma del disco permite grandes flujos con pequeño volumen rotórico, lo que influye en la disminución del momento de inercia y la masa del motor. (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011)

En la Figura 10 se puede observar un despiece general de un motor de flujo axial, en sus extremos se encuentran los semi-estatores y en el centro está el rotor.



*Figura 10.* Esquema del motor de flujo axial con los imanes permanentes en el rotor (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011, pág. 58)

#### Ventajas

- Ocupan poco espacio
- Par alto a bajas velocidades
- Alta densidad de potencia
- Reducción de partes mecánicas

### Desventajas

- Bajo rendimiento
- Precio elevado

A continuación se explicará a detalle las partes que componen el estator y el rotor.

## Configuración de los motores

### Carcasa

Esta rodea la parte exterior del estator, protegiendo del medio ambiente el interior del motor eléctrico.

En la Figura 11 se representa de forma esquemática un motor eléctrico con sus principales partes.

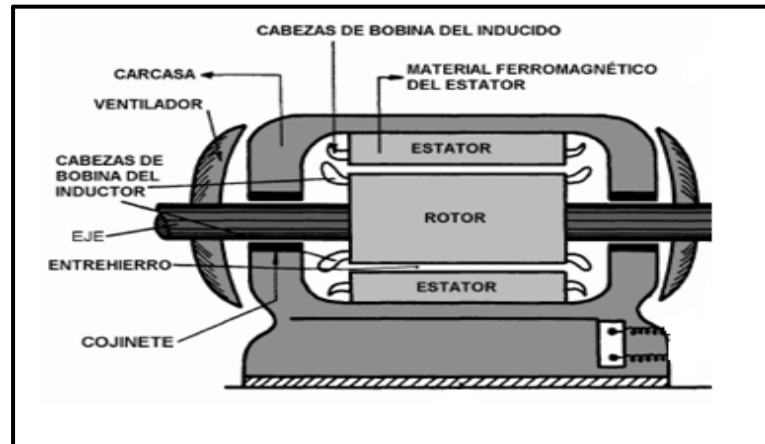


Figura 11. Carcasa de un motor asíncrono (Rodríguez, 2010)

### Estator

Es estator compone la parte fija de la máquina, la cual tiene la forma de un cilindro hueco.

***Yugo del estator***

El yugo o núcleo del estator es la parte que no presenta perforación alguna, se encuentra ubicado por encima de las ranuras y los dientes del estator.

***Dientes del estator***

Forman parte del núcleo o yugo del estator, son laminaciones dirigidas hacia el centro de del motor eléctrico. Se encuentran entre las ranuras del estator.

***Ranuras del estator***

Son perforaciones situadas entre los dientes del estator.

***Rebordes***

Son pequeñas extensiones que se encuentran en las esquinas de las ranuras, estas aparecen dependiendo del tipo de ranura que se lo haga al núcleo del estator.

**Rotor**

En el rotor se aloja el eje del motor. Se coloca en el interior del estator y es la parte móvil del motor eléctrico.

***Yugo del rotor***

Es la parte que no presenta perforación alguna, se encuentra ubicado por debajo de las ranuras y los dientes del rotor.

***Dientes del rotor***

Forman parte del núcleo o yugo del rotor, son laminaciones dirigidas hacia el exterior de del motor eléctrico. Se encuentran entre las ranuras del rotor.

***Ranuras del rotor***

Son perforaciones situadas entre los dientes del rotor.

***Puente***

Es la unión que existe entre los extremos de una ranura. Dependiendo del criterio del constructor estas pueden o no ser empleadas en el diseño.

***Barras de rotor***

Son barras o varillas generalmente de cobre u otro material altamente conductores como el aluminio. Se sitúan dentro de las ranuras atravesando por completo el rotor.

***Anillos externos***

Son elaborados generalmente de cobre. Se ubican en los extremos del rotor de tal forma que entren en contacto con las barras y son utilizados para crear un cortocircuito entre ellas.

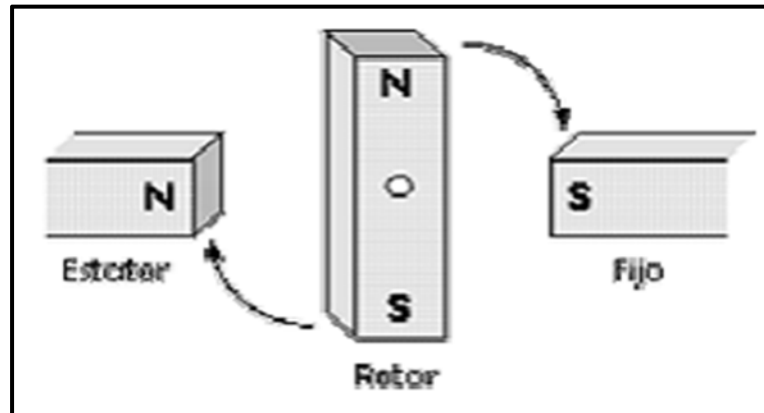
**Entrehierro**

Entre el estator y el rotor existe una distancia denominada entrehierro, esta impide que entren en contacto entre sí. En el entrehierro tienen lugar los fenómenos electromagnéticos que permiten la conversión de energía eléctrica a mecánica o viceversa.

**Polos magnéticos**

Los polos magnéticos van siempre en parejas, de esta forma se encuentran el polo norte o polo positivo y el polo sur o polo negativo. Por lo general están en el estator, y son los encargados de generar el flujo magnético ya sea por imanes permanentes o electroimanes como se precia en la siguiente figura.

Mediante un esquema se puede apreciar en la Figura 12 como se produce el movimiento del rotor en los motores eléctricos.



*Figura 12.* Interacción de los polos creados en el estator y el rotor (Rodríguez, 2010)



### Método

Para el presente análisis se utilizaron dos motores de vehículos eléctricos, los cuales son reconocidos a nivel mundial por su alto desempeño: Tesla Modelo S y el Mitsubishi i-MiEV.

A continuación en la tabla 1 se resaltan algunas características fundamentales para el análisis de los diferentes motores eléctricos utilizados en estos vehículos.

Tabla 1

*Datos técnicos de dos de los automóviles eléctricos más reconocidos*

	<b>Tesla Modelo S 90D</b>	<b>Mitsubishi i-MiEV</b>
<b>Características del técnicas de los motores</b>	Motor inducción de jaula de ardilla	Motor síncrono de imanes permanentes (BLDC)
Autonomía (km)	473.15	150
Potencia Máxima (CV)	263	67
Par motor Máxima (Nm)	657.6	180
Peso en vacío (kg)	-----	1110

Nota: La autonomía es la distancia que puede recorrer un vehículo con una carga completa de batería (refiriéndose a vehículos eléctricos) o con el depósito de combustible lleno (para vehículos con motores de combustión) (arpem, 2012) (Motors, 2016).

Como se puede apreciar en la tabla 1, el modelo S posee una autonomía más de 3 veces la del i-MiEV, lo cual le permite recorrer mayor distancia, con una potencia mayor.

En la Figura 13 se puede observar un esquema del estator y del rotor, el cual es un diseño propuesto por Tesla para sus vehículos eléctricos.

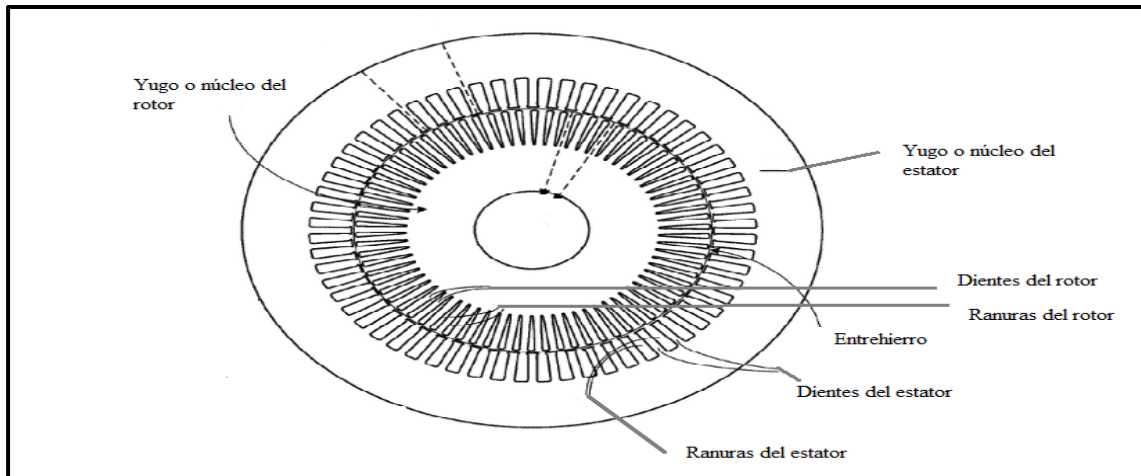


Figura 13. Vista transversal del estator, rotor y elementos que los conforman. (Tang, 2011)

La siguiente tabla nos indica el significado de cada número y letra utilizados en las figuras 14 y 15.

Tabla 2

Significado de la simbología citada en las figuras 14 y 15

Estator	Simbología de la figura 14	Rotor	Simbología de la figura 15
Yugo	115	Yugo	113
Diente	117	Dientes	109
Espesor de yugo	$T_{SY}$	Puente	506
Longitud de los dientes	$L_{ST}$	Espesor de yugo	$T_{RY}$
Anchura de la ranura inferior	$L_{SSB}$	Longitud de los dientes	$L_{RT}$
Anchura de la ranura superior	$L_{SST}$	Superficies laterales de los dientes	501
Anchura del diente	$W_{ST}$	Ranura	111
Región inferior en la ranura	303	Región superior en la ranura	503
Región superior en la ranura	305	Región inferior en la ranura	505
Ranura	119	Anchura de la ranura inferior	$L_{RSB}$
Superficies laterales de los dientes	301	Anchura de la ranura superior	$L_{RST}$
Superficie inferior	307	Espesor del puente	$B_T$
Bordes de ranura de radio corto	309		
Rebordes	311		

Tang afirma que “El diseño del motor de inducción de Tesla, propone ser más eficiente, generando un alto torque y velocidad”. En la Figura 14 se observa que el estator se compone de un yugo (115) y una serie de dientes (117) los cuales se extienden radialmente hacia el eje, donde los dientes tienen una longitud de diente común y sus superficies laterales son paralelos unos con otros.

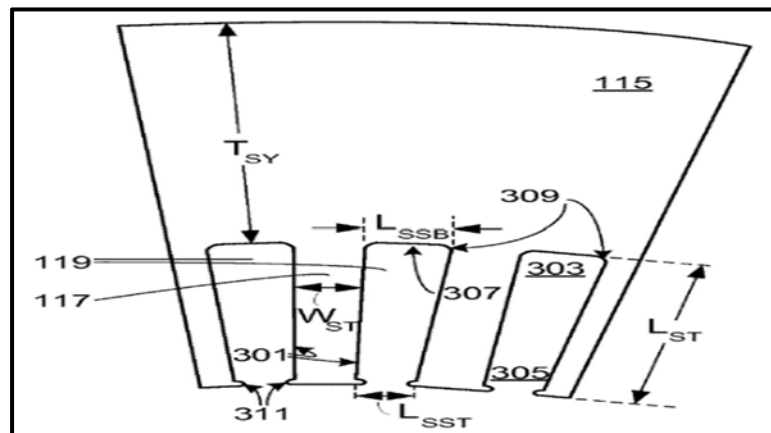


Figura 14. Forma de las ranuras que conforman el estator (Tang, 2011)

En la Figura 15 se aprecia que el rotor al igual que el estator se compone de un yugo (113) y una serie de dientes (109) teniendo en cuenta que los espacios del rotor son cerrados por un puente (506).

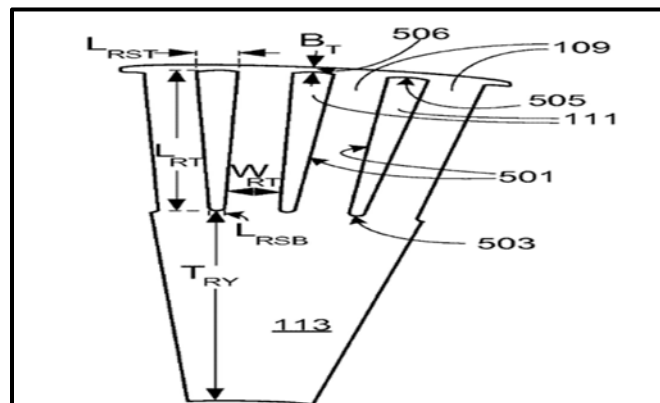


Figura 15. Forma de las ranuras que conforman el rotor (Tang, 2011).

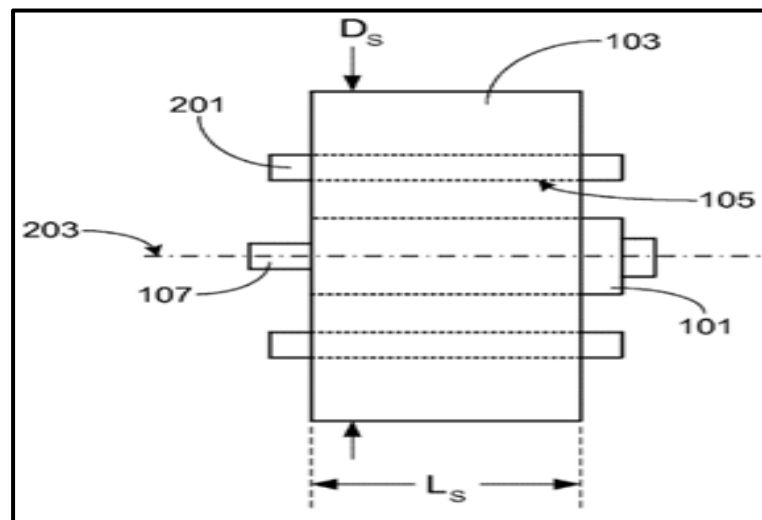
La relación del diámetro del estator a la longitud del mismo es preferible que sea al menos de 1.5:1. Esta relación permite mayor área total de bobinado entre las ranuras y una reducción en las resistencias en la fase de enrollamiento, lo cual es fundamental para conseguir bajas pérdidas en el cobre y una alta eficiencia. Del mismo modo una longitud más corta de rotor ayuda a reducir las pérdidas en las barras de cobre.

Tabla 3

*Significado de la simbología citada en la figura 16*

<b>Motor de inducción</b>	<b>Simbología de la figura 16</b>
Estator	103
Rotor	101
Entrehierro	105
Eje del rotor	107
Anillos extremos	201
Diametro exterior del estator	$D_s$
Longitud del estator	$L_s$

En la Figura 16 se puede apreciar un esquema de la vista lateral del motor eléctrico, indicando principalmente la relación de diámetro y longitud del estator.



*Figura 16.* Vista lateral simplificada del motor de inducción (Tang, 2011).

Al tener un aumento en el radial y reducción axial del estator y del rotor, también mejora las capacidades operacionales a altas velocidades y reducción de vibraciones torsionales.

Las superficies laterales de los dientes del estator pueden tener una parte de labio extendida. Estas son usadas para ayudar a retener los enrollamientos dentro de las ranuras.

El espesor de yugo del estator y del rotor pueden estar entre un 30 % a un 70 % más grande que la longitud de los dientes de cada uno de ellos.

La relación de anchura de diente tanto del estator como el rotor con el espesor de los dos elementos mencionados anteriormente es de 5:1 o más, lo cual ayuda a mejorar la diferencia en el nivel de densidad de flujo. En modelos convencionales esta relación es menor.

La longitud de los dientes del estator y del rotor pueden ser entre 4 a 6 veces el ancho de los dientes de cada uno de ellos.

Preferiblemente el número de dientes del rotor es de al menos 15% mayor que el número total de dientes del estator.

La relación de anchura de los dientes del estator con la anchura de los dientes del rotor puede ser de entre 1:1 y 1.2:1.

El espacio disponible de entrehierro debe comprender los valores entre 0,5 mm y 0,8 mm. (es más grande que los utilizados en los motores convencionales) (Tang, 2011)

Si el espacio del entrehierro llega a ser en exceso menor que las dimensiones de las caras adyacentes del núcleo, el flujo magnético  $\phi$  podría seguir la ruta establecida por el núcleo, en cambio, si la distancia del entrehierro llega en exceso grande, el flujo se dispersará en los

costados del entrehierro. El espacio del entrehierro está diseñado para obtener los niveles de inductancia deseados. (Tang, 2011)

El espacio del entrehierro afecta a los niveles de saturación del flujo magnético en el mismo.

El espesor del puente de diente del rotor está preferiblemente entre 10 % a 70 % más grande que el entrehierro. Este puente ayuda al acoplamiento de los campos magnéticos del estator y el rotor. (Tang, 2011)

El estator incluye preferiblemente 60 dientes y el rotor 74 dientes.

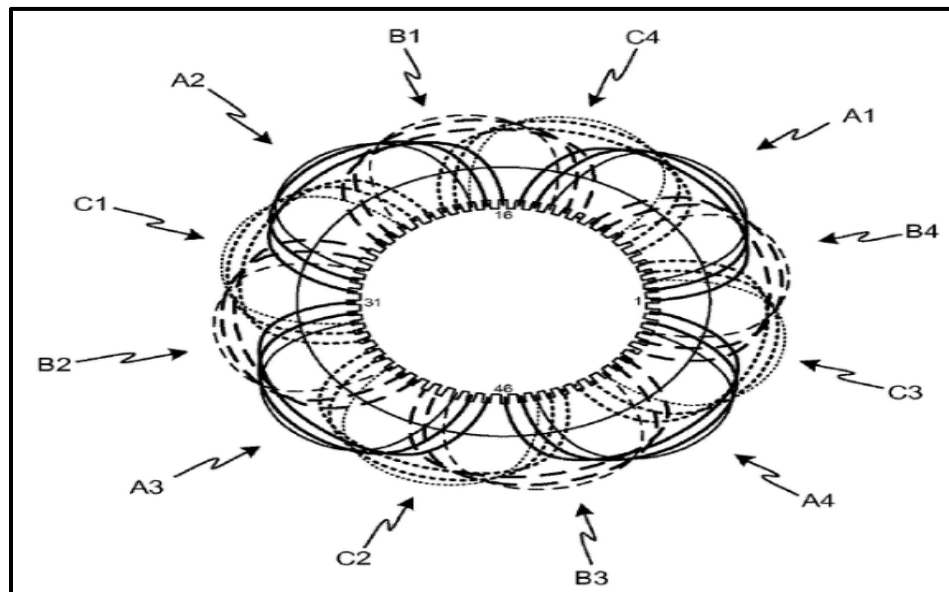
La figura 17 muestra el número de ranuras que debe tener cada bobina. Por ejemplo la bobina 1 de la fase A del grupo A1 va de la ranura 1 a la 15, por lo tanto abarca 14 ranuras con doble vuelta de bobina, la bobina 4 de la fase A del grupo A2 va de la ranura 30 a la 16 abarcando igualmente 14 ranuras con doble vuelta de bobina. La dirección de enrollamiento de estas dos bobinas como se puede observar tiene diferente sentido, de esta forma se logran los polos magnéticos opuestos. Para mayor facilidad de entendimiento la dirección de enrollamiento se indica con un signo negativo delante de la distancia que recorren las bobinas. (Tang, 2011)

Phase A						Phase B						Phase C						
	Coil	Go	Ret	Span	Turns		Coil	Go	Ret	Span	Turns		Coil	Go	Ret	Span	Turns	
A1	1	1	15	14	2	B1	1	11	25	14	2	C1	1	21	35	14	2	
	2	2	14	12	2		2	12	24	12	2		2	2	22	34	12	2
	3	3	13	10	1		3	13	23	10	1		3	23	33	10	1	
A2	4	30	16	-14	2	B2	4	40	26	-14	2	C2	4	50	36	-14	2	
	5	29	17	-12	2		5	39	27	-12	2		5	49	37	-12	2	
	6	28	18	-10	1		6	38	28	-10	1		6	48	38	-10	1	
A3	7	31	45	14	2	B3	7	41	55	14	2	C3	7	51	5	14	2	
	8	32	44	12	2		8	42	54	12	2		8	52	4	12	2	
	9	33	43	10	1		9	43	53	10	1		9	53	3	10	1	
A4	10	60	46	-14	2	B4	10	10	56	-14	2	C4	10	20	6	-14	2	
	11	59	47	-12	2		11	9	57	-12	2		11	19	7	-12	2	
	12	58	48	-10	1		12	8	58	-10	1		12	18	8	-10	1	

Figura 17. Bobinado preferido para el motor de inducción del diseño propuesto por Tesla Motors (Tang, 2011).

El pequeño número de vueltas, en combinación con otros aspectos de diseño, resultan en una alta caída de potencial eléctrico en cada grupo de bobina que abarca un polo completo, dando lugar a una distribución de densidad de flujo muy buena. (Tang, 2011)

En la figura 18 se puede apreciar de una manera mas clara la distribución de los grupos de bobinado del estator. Como se mencionó con anterioridad los grupos A1 y A2 son miembros de una pareja de polos, es decir, se oponen en un sentido electromagnético, mientras que los grupos A3 y A4 forman el segundo par de polos. (Tang, 2011)



*Figura 18.* Ilustración esquemática de la configuración de los grupos de bobina por cada fase (Tang, 2011).

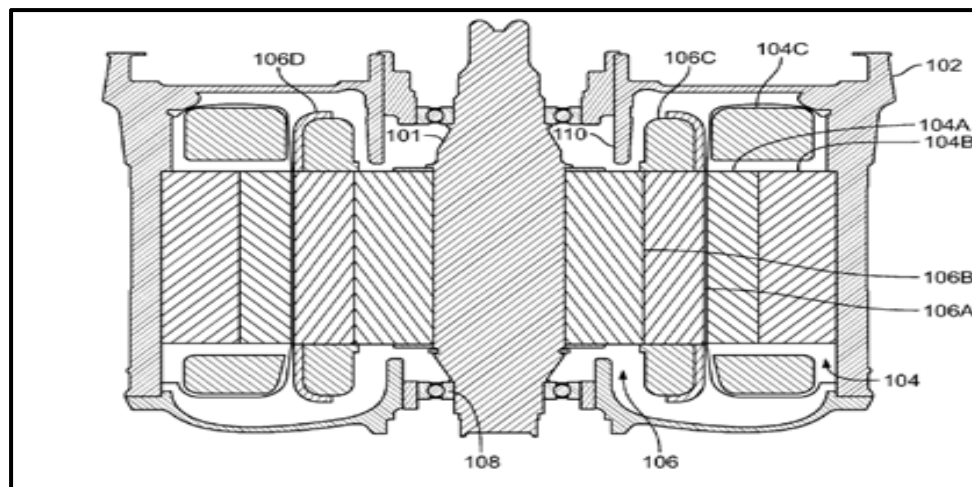
Las letras representan la figura 18 representan las fases, por ejemplo la letra A hace referencia a la primera fase, la letra B a la segunda y la letra C a la tercera fase. Los números por otro lado hacen referencia a la cantidad de polos que posee cada fase, en este caso sería un estator de 4 polos por cada fase. Como se mencionó anteriormente los primeros dos números en

cada fase forman una pareja de polos, mientras que los dos siguientes forman otra su contraparte opuestos en sentido electromagnético.

Para el diseño mencionado anteriormente, las densidades de flujo máximas en el entrehierro y en los puentes de los dientes del rotor son alrededor de 1,6 Tesla y 2,4 Tesla respectivamente. Las densidades de flujo promedio en el entrehierro y en el dientes del rotor son de 0,8 Tesla y 1,8 Tesla respectivamente. (Tang, 2011)

La Figura 19 muestra el seccionamiento de manera longitudinal de un motor eléctrico, indicando muchas de sus partes principales para su funcionamiento óptimo.

En el centro de la figura 19 se encuentra ubicado el eje del rotor, en sus extremos laterales se encuentra el rotor, el cual alberga las barras de conducción eléctrica. El estator se encuentra los lados del rotor como se muestra en la figura 19, este alberga los cables conductores. La parte que rodea estos tres elementos se llama carcasa, y se identifica con el número (102).



*Figura 19.* Motor eléctrico seccionado longitudinalmente (Laskaris,K.; Baglino, A.; Furey, C.; Nelson, D., 2015)



En la tabla 4 proporciona el significado de cada número y letra indicados en las figuras 19 y 20.

Tabla 4

*Significado de la simbología citada en la figuras 19 y 20*

<b>Motor eléctrico</b>	<b>Símbología de la figura 19 y 20</b>
Eje del rotor	101
Carcasa	102
Estator	104
Rotor	106
Porción de estator	104A
Porción de núcleo	104B
Anillos extremos	106C
Porción de rotor	106A
Porción de núcleo	106B
Anillos de contención	106D
Espiras extremas	104C
Escudo de flujo	110
Elemento de la carcasa	200
Cojinetes	108

Nota: La carcasa está fabricada de aluminio u otro material magnéticamente permisible. Los anillos contención son fabricados de un material más duro que los anillos extremos, lo cual ayuda a prevenir deformaciones en estos.

Para mejorar el rendimiento del motor eléctrico, se añadió un tipo de cilindro o forma de copa al diseño de la carcasa, situado entre la porción de eje (101) y el anillo exterior del rotor (106 C) de la Figura 19, al cual denominaron escudo de flujo. El trabajo de los escudos de flujo es prácticamente encerrar todas las partes activas del motor, de ese modo aumenta la tendencia de líneas de campo, aumentando el par disponible del motor, sobre todo a altas velocidades. Estos pueden ser elaborados de aluminio, magnesio o cobre ya que son magnéticamente permisivos.

En la Figura 20 se puede observar que el escudo de flujo 202 se extiende desde un elemento de la carcasa (200) axialmente hacia la porción del núcleo del rotor (106 B). (Laskaris,K.; Baglino, A.; Furey, C.; Nelson, D., 2015).

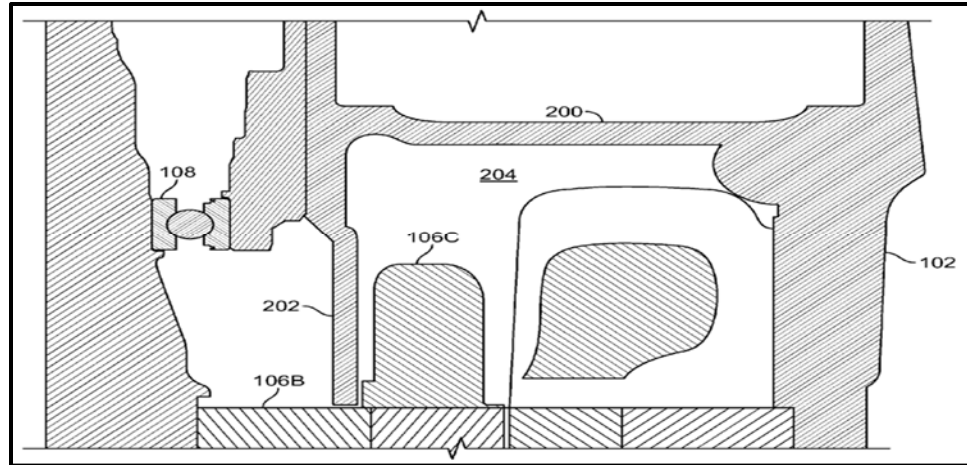


Figura 20. Motor eléctrico seccionado longitudinalmente enfocado en la esquina derecha de la figura 16 (Laskaris, K.; Baglino, A.; Furey, C.; Nelson, D., 2015)

El rotor está formado por un núcleo, el cual es elaborado de una serie de discos laminados de un metal magnéticamente permisivo como puede ser el caso de acero o hierro. Las barras de rotor son colocadas en las ranuras perforadas del rotor, en este diseño utilizaron 68 ranuras. Estas son elaboradas preferiblemente de cobre libre de oxígeno. Las dimensiones de las barras son ligeramente más pequeñas que las ranuras para facilitar el acoplamiento. Estas barras realizan la conexión eléctrica de ambos extremos del rotor. (Lyons, D.; Tesla Motors, Inc.; Straubel, J., 2013)

En la tabla 5 se observa el significado de los números y letras empleados en la Figura 21.

Tabla 5

Significado de la simbología citada en la figuras 21

Rotor	Símbología de la figura 21
Barra de rotor	400
Anchura superior de la barra	401
Anchura inferior de la barra	403
Anchura de la barra	405
Longitud de los discos laminados apilados	503
Longitud de las barras	405
Discos laminados	501

En la Figura 21 se observa el diseño propuesto por Tesla de un rotor de jaula de ardilla conjuntamente mostrando las barras de rotor.

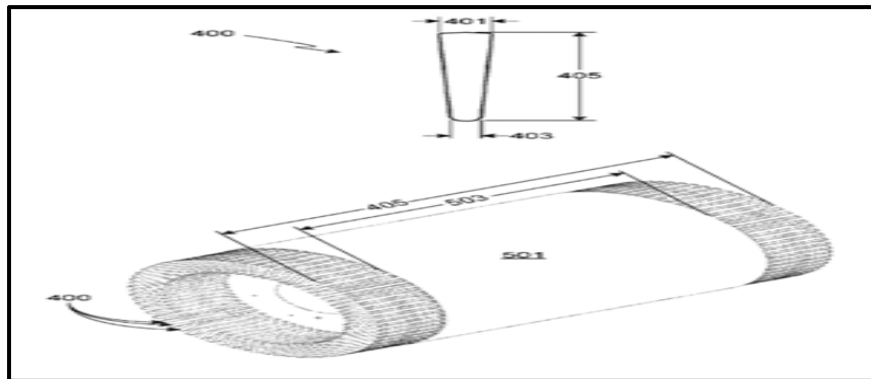


Figura 21 .Sección transversal de una barra de rotor y un conjunto de discos laminados que conforman el rotor (Lyons, D.; Tesla Motors, Inc.; Straubel, J., 2013).

Posteriormente se colocan barras de cobre libre de oxígeno (600) entre los espacios proporcionados por las barras del rotor, estas se sueldan formando un anillo sólido en cada extremo del rotor. Esta forma de fabricación ofrece mejores características eléctricas (menor resistencia al paso de corriente) y mejora la resistencia propia del rotor. Esta configuración ofrece peso inferior a los diseños convencionales.

A continuación se presenta la tabla 6, la cual explica el significado de los números y letras utilizados en la Figura 22.

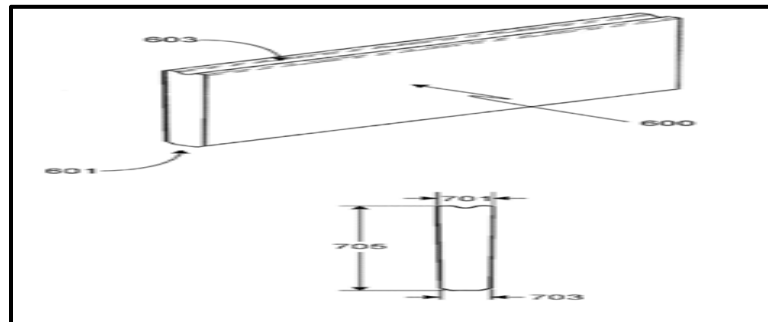
Tabla 6

*Significado de la simbología citada en la figura 22*

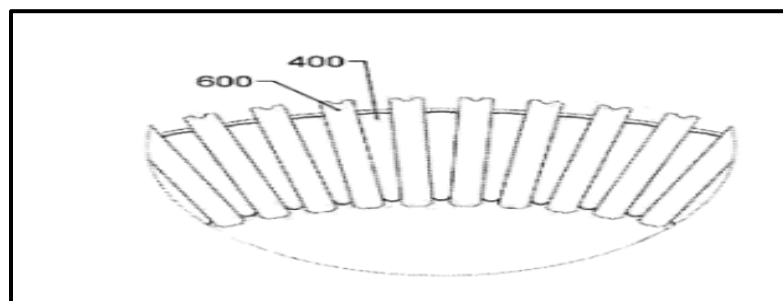
Anillos extremos	Símbología de la figura 22
Barras	600
Borde superior de la barra	603
Borde inferior de la barra	602
Longitud de la barra	705
Anchura superior de la barra	701
Anchura inferior de la barra	703

Nota: La marca que se encuentra en el borde superior, es para que los trabajadores que insertan estas barras a mano sepan en qué posición deben ponerlas.

En la Figura 22 se puede apreciar una barra de todo el conjunto que conforma los anillos extremos del rotor.



*Figura 22 . Sección de barras que conforman los anillos extremos del rotor (Lyons, D.; Tesla Motors, Inc.; Straubel, J., 2013).*



*Figura 23. Sección transversal del diseño de anillo externo propuesto por Tesla Motors (Lyons, D.; Tesla Motors, Inc.; Straubel, J., 2013).*

### Motor Mitsubishi

En la Figura 24 se observa un esquema de la sección transversal del motor eléctrico diseñado por Mitsubishi Motors.

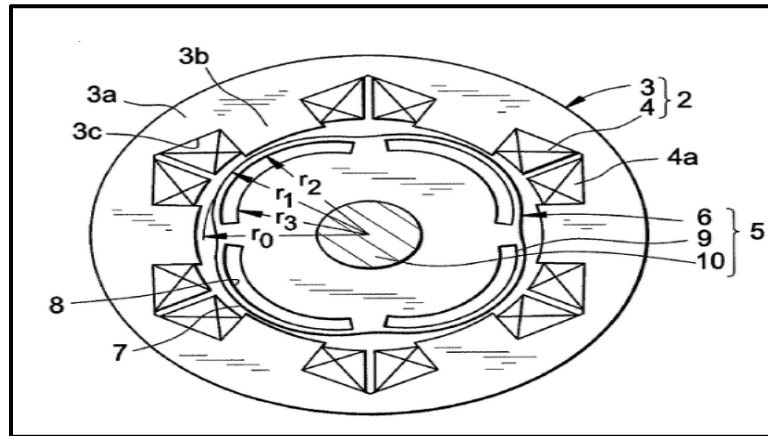


Figura 24. Sección transversal del motor de imanes permanentes (Nishimura, S.; Inoue, M.; Hazeyama, M.; Kuroda, Y., 2012)

A continuación se presenta la tabla 7, la cual explica el significado de los números y letras utilizados en la Figura 24.

Tabla 7

Significado de la simbología citada en la figura 24

Motor eléctrico de imanes permanentes	Símbología de la figura 24
Yugo del estator	3a
Núcleo del estator	3
Estator	2
Diente del estator	3b
Bobina	4
Devanado de bobinas	4a
Ranuras del estator	3c
Rotor	5
Núcleo del rotor	6
Superficies curvas del rotor	7
Imanes permanentes	9
Eje	10
Aberturas para la inserción de los imanes	8
Radio a la superficie superior de los imanes	$r_2$
Radio a la superficie inferior de los imanes	$r_3$
Radio al círculo inscrito por las superficies del rotor	$r_0$
Radio a la superficie del rotor	$r_1$

Mitsubishi pretende con su diseño de motor BLDC (Brushless) reducir las corrientes de Foucault o corrientes parásitas producidas en los imanes permanentes, a su vez, facilitar el montaje de las bobinas del estator. (Nishimura,S.; Inoue, M.; Hazeyama, M.; Kuroda, Y., 2012)

Debido a que las ranuras del estator son abiertas y sin reborde, el montaje de la bobina se facilita y la inductancia en estas se ve reducida, permitiendo alcanzar un mayor rendimiento a altas velocidades. Al reducir las corrientes parásitas, la temperatura en los imanes permanentes es reducida lo cual ayuda a prevenir la desmagnetización térmica (Nishimura,S.; Inoue, M.; Hazeyama, M.; Kuroda, Y., 2012).

En la figura 24 el estator (2) se forma por laminación y la integración de un gran número de placas de acero electromagnéticas que han sido perforadas en formas idénticas, un núcleo de estator (3) que tiene: un yugo (3a) y seis dientes (3b) que tienen cada uno una anchura circunferencial constante, que están dispuestos de manera que se extiendan radialmente hacia dentro desde una superficie circunferencial interior del núcleo hacia atrás (3a), y que están dispuestos en un paso angular uniforme circunferencialmente; y una bobina de estator (4) que está constituido por cierto número de devanado bobinas (4a) que se enrolla en cada uno de los dientes (3b) del núcleo del estator (3). (Nishimura,S.; Inoue, M.; Hazeyama, M.; Kuroda, Y., 2012)

El rotor (5) está formado por laminación y la integración de un gran número de placas de acero electromagnéticas que han sido perforadas en formas idénticas, por ejemplo, un núcleo de rotor (6) formada por una serie de superficies curvadas en forma de arco circulares (7) están dispuestos en un paso angular uniforme circunferencialmente; imanes permanentes (9) que están incrustados en un lado circunferencial interior de cada una de las superficies curvadas en forma

de arco circular (7) del núcleo del rotor (6); y un eje (10) que está fijado al núcleo del rotor (6).

(Nishimura,S.; Inoue, M.; Hazeyama, M.; Kuroda, Y., 2012)

A partir de este punto se diseñará un motor eléctrico con ciertas características similares al motor Tesla visto previamente.

### Cálculo de un motor eléctrico trifásico de inducción con rotor jaula de ardilla

Para el siguiente diseño se procederá a establecer valores, los cuales no varíen en el motor eléctrico, como es la potencia de salida, el voltaje de entrada, la frecuencia de la red y la velocidad síncrona dados en la tabla 8.

Tabla 8

*Datos principales del diseño del motor eléctrico*

Datos principales del motor eléctrico	
$P_{out}$ [hp]	197,264
$V$ [voltios]	500
$f_e$ [Hz]	50
$n_s$ [rpm]	1500

Nota:  $P_{out}$  = Potencia de salida o potencia nominal,  $V$  = Voltaje de línea,  $f_e$  = Frecuencia de la red,  $n_s$  = Velocidad síncrona o velocidad del campo del estator

Debido a que en la figura 25 no se encuentran datos similares a los del motor Tesla, se optó por tomar las cifras mas cercanas a este. Por este motivo se eligió el mayor valor en la potencia, el voltaje de línea se trabajó con el mayor valor suministrado por la figura 25 debido a que este daba un valor de corriente mucho mas bajo que al utilizar voltajes menores, lo cual es beneficioso en varios cálculos posteriores. La frecuencia tomada es debido a que la figura 25 trabaja con dicho valor, pero utilizando la tabla 9, la cual indica los porcentajes en lo que varía la potencia, la velocidad de giro y el par, de esta forma se puede trabajar con el valor de frecuencia suministrado por la figura 25 y si se desea cambiar dicho valor a 60 Hz simplemente deben aplicarse los porcentajes. La velocidad de giro del campo del estator se optiene al multiplcar la frecuencia por 120, y dividido todo para el número de polos, que en este caso se eligió de 4, al ser este el valor adoptado por Tesla para sus motores.



Los motores bobinados a 50 Hz pueden utilizar redes electricas con frecuencia de 60 Hz, teniendo en cuenta las modificaciones de velocidad, potencia y par nominal presentados a continuación en la tabla 9.

Tabla 9

*Valores modificados para un funcionamiento a 60 Hz*

Bobinados 50 Hz V	V	Velocidad del Rotor %	Potencia Nominal %	Par Nominal %
220	255	+ 20	+ 15	- 4
380	440	+ 20	+ 15	- 4
500	600	+ 20	+ 15	- 4
220	220	+ 20	-	- 17
380	380	+ 20	-	- 17
500	500	+ 20	-	- 17

Fuente: (Universidad del Atlántico; Universidad Autónoma de Occidente; Msc. Omar Prias Caicedo, 2014)

Se debe recordar que la potencia de salida es influenciada por la altura a la cual se encuentre la máquina eléctrica. Esto se debe a que a grandes alturas la capacidad de la máquina para disipar calor disminuye, por ser menor la densidad del aire. Este concepto es aplicable a partir de los mil metros sobre el nivel del mar. A continuación se muestra en la tabla 10 la variación de potencia en porcentaje.

Tabla 10

*Variación de potencia en porcentaje según la altura*

Altura sobre el nivel del mar [m]	0-1000	2000	3000	4000
Hasta 1000 rpm, Potencia en %	100	95	90	85
Más de 1000 rpm, Potencia en %	100	90	85	77

Fuente: (Vallejo, 1977)

En la figura 25 se observan valores necesarios para el diseño de un motor eléctrico de corriente alterna o corriente continua.

Potencia útil		Rendimiento $\eta$	cos $\varphi$	c.a. trifásica a 50 Hz			c.a. bi-fásica	c.a. monofásica		corriente continua			
CV	KW			220 V	380 V	500 V	220 V	110 V	220 V	110 V	220 V	440 V	500 V
0,5	0,37	0,74	0,75	1,74	1,10	0,77	1,51	6,02	3,01	4,52	2,26	1,13	1,00
0,75	0,55	0,76	0,77	2,48	1,44	1,09	2,15	8,57	4,29	6,60	3,30	1,65	1,46
1	0,74	0,78	0,80	3,10	1,79	1,37	2,58	10,8	5,36	8,58	4,29	2,15	1,89
1,5	1,10	0,79	0,82	4,47	2,59	1,97	3,87	15,5	7,75	12,7	6,35	3,18	2,80
2	1,47	0,81	0,83	5,74	3,32	2,53	4,97	19,9	9,95	16,5	8,25	4,13	3,64
2,5	1,84	0,81	0,83	7,17	4,15	3,18	6,23	24,9	12,5	20,7	10,4	5,16	4,56
3	2,21	0,82	0,84	8,52	4,93	3,75	7,36	29,6	14,8	24,5	12,3	6,13	5,40
4	2,95	0,83	0,85	11,1	6,40	4,89	9,60	38,4	19,2	32,3	16,2	8,16	7,10
5	3,68	0,85	0,87	13,4	7,80	5,90	11,6	46,3	23,2	39,4	19,7	9,84	8,66
6	4,42	0,86	0,87	15,5	9,00	6,90	13,4	53,7	26,9	46,7	23,4	11,7	10,3
7	5,15	0,86	0,87	18,2	10,5	8,00	15,7	62,6	31,4	54,5	27,3	13,7	12,0
8	5,89	0,87	0,87	20,4	11,8	9,00	17,7	70,7	35,4	61,5	30,8	15,4	13,6
9	6,62	0,87	0,87	23,0	13,3	10,1	19,9	79,6	39,8	69,2	34,6	17,3	15,3
10	7,40	0,87	0,88	25,3	14,6	11,1	21,8	87,4	43,7	76,8	38,4	19,2	17,0
11	8,10	0,87	0,88	27,8	16,1	12,3	24,1	96,0	48,0	84,5	42,3	21,2	18,6
12	8,83	0,87	0,88	30,3	17,5	13,3	26,2	105	52,5	92,0	46,0	23,0	20,4
13	9,57	0,87	0,88	32,8	19,5	14,5	28,4	114	56,8	100	50,0	25,0	22,0
14	10,3	0,87	0,88	35,4	20,5	15,6	30,6	122	61,1	108	53,8	26,9	23,8
15	11,0	0,88	0,88	37,4	21,7	16,5	32,8	130	64,8	114	57,0	28,5	25,2
16	11,8	0,88	0,88	40,0	23,2	17,8	35,0	138	69,0	124	61,8	30,4	26,8
17	12,5	0,88	0,88	42,5	24,6	18,7	37,2	147	73,4	130	64,6	32,3	28,4
18	13,2	0,88	0,89	44,5	25,8	19,8	38,4	154	76,9	137	68,5	34,2	30,2
19	14,0	0,88	0,89	46,9	27,2	20,7	40,6	162	81,0	145	72,2	36,1	31,8
20	14,7	0,88	0,89	49,4	28,6	21,8	42,7	170	85,0	152	76,0	38,0	33,6
21	15,5	0,89	0,89	51,2	29,7	22,6	44,4	178	88,7	158	79	39,5	34,8
22	16,2	0,89	0,89	53,6	31,1	23,6	46,5	186	93,0	166	82,7	41,4	36,4
23	16,9	0,89	0,89	56,1	32,5	24,7	48,5	195	97,2	173	86,4	43,2	38,0
24	17,7	0,89	0,88	58,5	33,9	25,8	50,7	203	102	181	90,2	45,1	39,8
25	18,4	0,89	0,89	61,0	35,3	26,9	52,7	212	106	188	94,0	47,0	41,4
30	22,1	0,89	0,90	72,4	41,9	31,9	62,7	251	126	226	113	56,4	49,6
40	29,5	0,89	0,90	96,6	55,9	42,5	83,6	334	167	300	150	75,1	66,2
50	36,8	0,90	0,91	118	68,3	52,0	102	408	204	372	186	93,0	81,8
60	44,2	0,91	0,92	139	80,2	61,0	120	480	240	441	221	111	97,0
70	51,5	0,91	0,92	162	93,5	71,0	140	560	280	515	258	129	114
80	58,9	0,91	0,92	184	107	81,1	160	640	320	588	294	147	130
90	66,2	0,91	0,92	208	120	91,2	180	719	360	662	331	166	146
100	73,6	0,92	0,93	226	131	99,3	196	782	391	727	364	182	160
125	92	0,93	0,93	279	162	123	242	967	484	900	450	225	198
150	110	0,93	0,93	335	194	148	290	1180	580	1080	540	270	238
200	147	0,93	0,93	446	259	197	387	1545	773	1440	720	360	317

Figura 25. Potencia, eficiencia, factor de potencia e intensidad para motores de corriente alterna y continua (Viloria, 1989)

### Potencia activa o real

Los conductores que llevan al resistor en su circuito transportan la potencia activa. La potencia activa, potencia de entrada o potencia real es la necesaria para que los componentes funcionen correctamente. La potencia activa está relacionada según (Corrales, 1976) por la potencia de salida ( $P_{out}$ ) y la eficiencia del motor ( $\eta_{eff}$ ) que se la encuentra en la figura 25.

$$P = \frac{P_{out}}{\eta_{eff}} \quad (1)$$

$$P = \frac{147,0997kW}{0,93}$$

$$P = 158,172kW$$

### Potencia aparente

Es la potencia total consumida por la carga y es el producto de los valores de tensión e intensidad. Se considera como la suma vectorial de las potencias activa y reactiva y representa la ocupación total de las instalaciones. La potencia aparente está relacionada según (Corrales, 1976) por la potencia de salida, la eficiencia y el factor de potencia ( $\cos \varphi$ ) el cual se encuentra en la figura 25.

El factor de potencia es un término empleado para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo. El factor de potencia ideal es de 1, lo que significa que toda la energía eléctrica ha sido transformada, esto hablando en términos ideales. En la práctica no ocurre esto, ya que existen distintos factores que lo impiden, como son las pérdidas por calor, fricción etc (Godoy, 2012) dado en la ecuación 2.

$$S = \frac{P_{out}}{\eta_{eff} \cos \varphi} \quad (2)$$

$$S = \frac{147,0997kW}{0,93 * 0,93}$$

$$S = 170,077KVA$$

### Corriente eléctrica de línea

Es la cantidad de carga eléctrica que pasa por un conductor por unidad de tiempo. Se debe al movimiento de las cargas (normalmente electrones) en el interior del material. Según (Corrales, 1976, pág. 20) se calcula con la ecuación 3:

Donde:

$I$  = Corriente de línea [A]

$S$  = Potencia aparente [KVA]

$V$  = Voltaje de línea [V]

$$I = \frac{S}{V\sqrt{3}} \quad (3)$$

$$I = \frac{170,077kW}{500V\sqrt{3}}$$

$$I = 196,388A$$

### Diámetro y longitud del inducido

#### Número de polos

Los polos magnéticos van siempre en parejas, de esta forma se encuentran el polo norte o polo positivo y el polo sur o polo negativo. Por lo general están en el estator, y son los encargados de generar el flujo magnético ya sea por imanes permanentes o electroimanes (Rodríguez, Universidad de Cantabria, 2010)

La ecuación 4 según (Godoy, 2012) relaciona la velocidad del campo del estator ( $n_s$ ) y la frecuencia de línea ( $f_e$ ).

$$polos = \frac{120}{n_s} f_e \quad (4)$$

$$polos = \frac{120}{1500rpm} 50Hz$$

$$polos = 4$$

### Diámetro interno del estator

Según Alvarado “El diámetro interno es la anchura de un objeto con forma circular, cilíndrica o esférica”.

Por medio de la figura 26 se determina el valor más adecuado para el diámetro del estator.

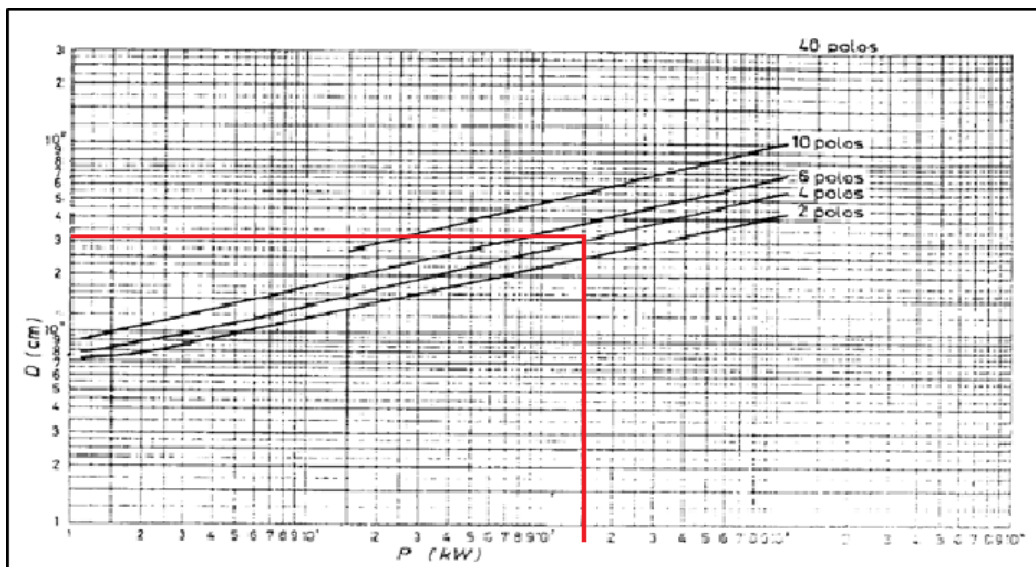


Figura 26. Diámetros en función de la potencia de salida y el número de polos (Corrales, 1976).

Diámetro interno adecuado para el estator es de 35 cm.

$$D = 35\text{cm}$$

### **Par ficticio**

Es el momento aparente en los bornes referido a las magnitudes de potencia aparente y velocidad síncrona (Alvarado, 2009).

El par ficticio según (Corrales, 1976) relaciona la potencia aparente y la velocidad del campo del estator.

$$M_b = S * \frac{1000}{n_s} \quad (5)$$

$$M_b = 170,077\text{KVA} * \frac{1000}{1500\text{rpm}}$$

$$M_b = 113,384[\text{VA}/\text{rpm}]$$

### **Carga lineal**

Arsuaga afirma que “Una carga lineal es una carga eléctrica que en operación normal, presenta una impedancia de carga constante, a la fuente de poder o batería durante todo el tiempo que se aplique el voltaje”.

EcuRed afirma que “La impedancia es la medida de oposición al flujo de corriente alterna la cual se mide en ohmios. La impedancia posee una parte real llamada resistencia y una parte imaginaria llamada reactancia”.

Dependen de ella, en primer lugar las reactancias, la corriente, el par de arranque y la capacidad de sobrecarga. Las últimas tres disminuyen al aumentar la carga lineal.

$q_1$  = Carga lineal

Se utiliza la figura 27 para hallar el valor de  $q_1$ .

Los valores de potencia de la Figura 27 deben ser multiplicados por diez y los primeros valores son números con decimales, por lo cual la primera fila de valores llega solo hasta veinte.

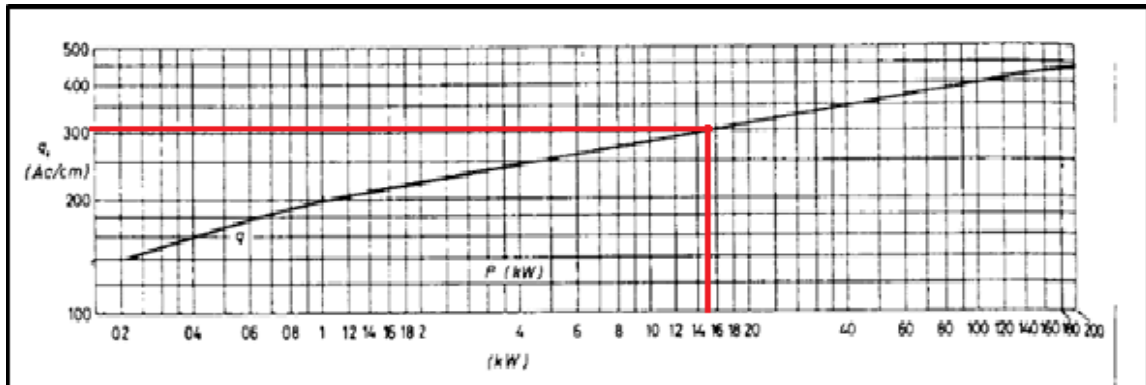


Figura 27. Carga lineal específica admisible en función de la potencia útil o de salida (Corrales, 1976)

El valor de carga lineal según la figura es  $q_1 = 300 Ac/cm$ .

### Densidad de campo magnético recomendable en el entrehierro o Inducción

Bukowski afirma que “La densidad de campo magnético es igual a la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan un área específica. La densidad de campo magnético se mide en Webers sobre metro cuadrado ( $Wb/m^2$ ) o Tesla ( $T$ ).

Esta es calculada mediante la figura 28, utilizando el número de polos de la máquina y el diámetro interior del estator.

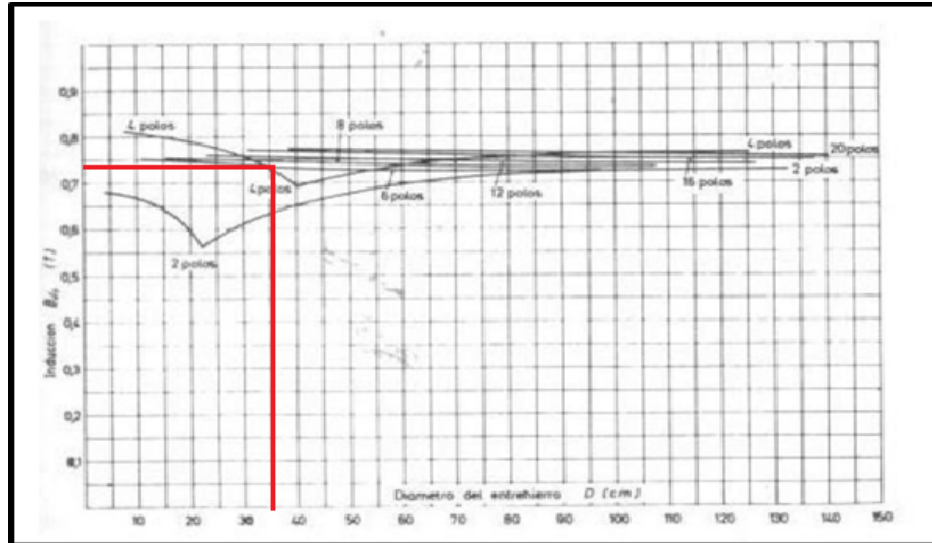


Figura 28. Densidad de campo magnético recomendable en el entrehierro liso (Corrales, 1976)

La inducción recomendable de campo magnético en el entrehierro es de  $\hat{B}_{do} = 0,75 T$ .

Se debe elegir la cantidad de ranuras rotóricas y estáticas que va a tener la máquina, por lo cual se usaran los datos suministrados por la figura 29 teniendo en cuenta los siguientes puntos generales.

Según Corrales (1976, pág. 389):

- En ningún momento las ranuras del estator y del rotor han de ser iguales, o múltiplos entre sí.
- Se recomienda que el número de ranuras del rotor  $n_2$  sea par.
- También es recomendable que para  $n_2 < 1,25n_1 + \frac{polos}{2}$  para motores que han de girar en un solo sentido y  $n_2 < 1,25n_1$  para motores que han de girar en ambos sentidos.
- La diferencia entre  $n_1$  y  $n_2$  será al menos de un 10%.

Tomando en cuenta estas reglas generales se procederá a elegir el número de ranuras del estator y del rotor utilizando la tabla 11 .





	52	64
<b>66</b>	52 82	76
<b>72</b>	58 88	82

---

Nota: Los números en negrillas representan el número de ranuras en el estator recomendables (Corrales, Cálculo Industrial De Máquinas Eléctricas Tomo II, 1976).

Se siguió los datos técnicos recomendados por Tesla Motors para el diseño de ranura del estator y siguiendo las pautas generales se eligió el número de ranuras en el rotor.

Para el diseño se eligió un número de 60 ranuras en el estator y 72 ranuras en el rotor.

$$n_1 = 60$$

$$n_2 = 72$$

Para seleccionar el número de ranuras por polo y fase que va a emplear el motor eléctrico se realizarán los siguientes pasos:

- Se divide el número de ranuras del estator para la cantidad de polos del motor eléctrico

$$n_{rp} = \frac{n_1}{4} \quad (6)$$

$n_{rp}$  = Número de ranuras por polo

- A continuación se procederá a dividir el número de ranuras por polo para el número de fases de la máquina eléctrica.

$$n_{pf} = \frac{n_{rp}}{fases} \quad (7)$$

$n_{pf}$  = Número de ranuras por polo y fase

$n_{rf}$  = Número de ranuras por fase

Siendo el  $n_{rf}$  igual a 20.

Para el diseño del motor eléctrico el número de ranuras por polo se calcula con la ecuación 6:

$$n_{rp} = \frac{n_1}{\text{polos}}$$

$$n_{rp} = \frac{60}{4}$$

$$n_{rp} = 15$$

Corrales afirma que el número de ranuras por polo “Número de espacios en el estator que tendrán cada polo magnético sin tomar en cuenta el número de fases que emplee el motor”.

El número de ranuras por polo y fase se calcula por medio de la ecuación 7:

$$n_{pf} = \frac{n_{rp}}{\text{fases}}$$

$$n_{pf} = \frac{15}{3}$$

$$n_{pf} = 5$$

Corrales afirma que el número de ranuras por polo y fase es “Número de espacios en el estator que tendrán cada polo magnético tomando en cuenta el número de fases que va a emplear el motor”.

### **Factor de distribución**

El factor de distribución se define como la relación entre la amplitud de la onda generada por el devanado distribuido y aquella que se obtendría si todas las bobinas elementales

pertenecientes a un mismo par de polos estuvieran concentradas formando una única bobina diametral (Fravedsa, 2014).

Para el factor de distribución se deberá utilizar la tabla 12. Para cuestiones de cálculo se tomará un valor armónico de 1.

$\xi_1$  = Factor de distribución

Tabla 12

*Factor de paso o acortamiento y armónicos de un devanado cualquiera de corriente alterna*

Paso relativo $y = \frac{y_n}{n_{rp}}$	Armónico $v$					
	1	3	5	7	9	11
$\frac{1}{2}$ (0, 500)	0,707	-0,707	-0,707	0,707	0,707	-0,707
$\frac{8}{15}$ (0, 533)	0,742	-0,592	-0,862	0,418	0,946	-0,242
$\frac{5}{9}$ (0, 553)	0,766	-0,500	-0,940	0,174	1,000	0,174
$\frac{7}{12}$ (0, 583)	0,793	-0,384	-0,991	0,127	0,924	0,643
$\frac{6}{10}$ (0, 600)	0,809	-0,309	-1,000	-0,309	0,809	0,906
$\frac{5}{8}$ (0, 625)	0,831	-0,194	-0,981	-0,559	0,555	0,980
$\frac{2}{3}$ (0, 667)	0,866	-0,000	-0,866	-0,867	0,000	0,866
$\frac{7}{10}$ (0, 700)	0,891	-0,156	-0,707	-0,988	0,454	0,454
$\frac{11}{15}$ (0, 733)	0,913	0,309	-0,500	-0,978	-0,809	-0,105
$\frac{3}{4}$ (0, 750)	0,924	0,383	-0,0436	-0,924	-0,924	-0,383

$\frac{7}{9}$ (0,778)	0,940	0,500	-0,174	-0,766	-1,000	-0,766
$\frac{8}{10}$ (0,800)	0,951	0,588	0,000	-0,588	-0,951	-0,948
$\frac{5}{6}$ (0,833)	0,966	0,707	0,259	-0,259	-0,707	-0,966
$\frac{13}{15}$ (0,833)	0,978	0,809	0,500	0,105	-0,309	-0,669
$\frac{7}{8}$ (0,875)	0,981	0,832	0,555	0,196	-0,194	-0,560
$\frac{8}{9}$ (0,889)	0,985	0,867	0,643	0,342	0,000	-0,342
$\frac{9}{10}$ (0,900)	0,988	0,891	0,707	0,454	0,156	-0,156
$\frac{11}{12}$ (0,917)	0,991	0,924	0,793	0,609	0,383	0,130
$\frac{14}{15}$ (0,933)	0,995	0,950	0,867	0,743	0,588	0,407
<b>1 (1,000)</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>

Fuente: (Corrales, Cálculo Industrial De Máquinas Eléctricas Tomo I, 1976, p. 164)

### Factor de acortamiento

Se define como la relación que existe entre la amplitud de la onda fundamental producida por una sola bobina diametral con la amplitud de onda generada por la pareja de bobinas de paso acortado (Fravedsa, 2014).

Primero se debe encontrar el paso relativo, el cual viene expresado por la siguiente ecuación:

$$y = \frac{y_n}{n_{rp}} \quad (8)$$

$y_n$  = Paso de ranuras

$n_{rp}$  = Número de ranuras por polo

Para el diseño se tomará un paso de ranura de 15, ya que se desea obtener un paso relativo de 1.

Se utiliza la ecuación 8 para encontrar el paso relativo.

$$y = \frac{y_n}{n_{rp}}$$

$$y = \frac{15}{15}$$

$$y = 1$$

Se utiliza la tabla 13 para obtener el valor del factor de distribución el cual tiene un valor de 0,957.

Tabla 13

*Factores de distribución para arrollamientos trifásicos*

Armónico $\nu$	Ranuras por polo y fase $n_{pf}$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	$\infty$
<b>1</b>	1,000	0,966	0,960	0,958	<b>0,957</b>	0,956	0,956	0,956	0,955
<b>3</b>	1,000	0,707	0,667	0,653	0,647	0,644	0,642	0,641	0,637
<b>5</b>	1,000	0,259	0,218	0,205	0,200	0,197	0,196	0,194	0,191
<b>7</b>	1,000	-0,259	-0,177	-0,157	-0,149	-0,145	-0,143	-0,141	-0,136
<b>9</b>	1,000	-0,707	-0,333	-0,270	-0,248	-0,236	-0,229	-0,225	-0,212
<b>11</b>	1,000	-0,966	-0,177	-0,128	-0,109	-0,102	-0,097	-0,095	-0,087

Nota: Los armónicos son distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal. La aparición de estos armónicos en el sistema eléctrico crea problemas tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros (Wildi, 2007) (Corrales, 1976).

El factor de distribución según la tabla 13 es de 0,957

$$\xi_d = 0,957$$

El factor de acortamiento según la tabla 12 es de 1, el cual se encuentra marcado por un rectángulo de color rojo.

$$\xi_y = 1$$

### Factor de bobinado

Es el producto entre el factor de distribución y el factor de paso. En otras palabras el factor de bobinado o devanado es según (Rodríguez, 2008) la relación entre la amplitud de la onda obtenida en el devanado real y la que tendría si todas las bobinas distribuidas y acortadas en él estuviesen en una única bobina diametral (Fravedsa, 2014).

$$\xi = \xi_d \xi_y \quad (9)$$

$$\xi = 0,957 * 1$$

$$\xi = 0,957$$

El paso de las bobinas o paso de ranuras puede ser igual, menor o mayor que el paso polar, y en esos casos se dice que la bobina es diametral, acortada o alargada respectivamente como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14

#### *Tipos de paso de bobina*

<b>Bobina</b>	<b>Paso</b>
Diametral	$y_n = \tau_p$
Acortada	$y_n < \tau_p$
Alargada	$y_n > \tau_p$

Se denomina paso de bobina a la distancia en ranuras que hay entre los dos lados activos de una bobina. Se puede medir en fracciones del paso polar, en radianes eléctricos o geométricos, etc., pero normalmente se mide contando el número de ranuras que hay entre los dos lados de la bobina (Rodríguez, Máquinas Asíncronas, 2008).

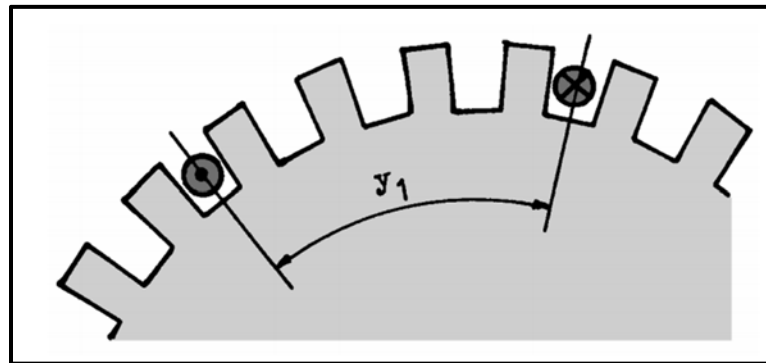


Figura 29. Bobina de  $y_n$  igual a 4 ranuras

### Coefficiente de utilización o constante de inducido

Según (Corrales, 1976) el coeficiente de utilización puede hallarse utilizando las siguientes ecuaciones:

$$C = \frac{M_b}{\underline{V}} \quad (10)$$

$$C = 1,165\xi\left(\frac{q_1}{100}\hat{B}_{do}\right) \quad (11)$$

Donde:

$\underline{V}$  = Volumen prismático [ $dm^3$ ]

$M_b$  = Par ficticio [ $VA/rpm$ ]



$C =$  Coeficiente de utilización  $[(VA/(\frac{r}{m}))/dm^3]$

Aplicando la ecuación 11 para el diseño del motor eléctrico, el valor del coeficiente de utilización es:

$$C = 1,165 \xi \left( \left( \frac{q_1}{100} \hat{B}_{do} \right) \right)$$

$$C = 1,165 * 0,957 \left( \left( \frac{300}{100} 0,75 \right) \right)$$

$$C = 2,508 VA/(rpm)/dm^3$$

### Volumen prismático del estator

Despejando el volumen prismático de la ecuación 10 de coeficiente de utilización, obtenemos que:

$$V_{\zeta} = \frac{M_b}{C} \quad (12)$$

$$V_{\zeta} = \frac{113,384[VA/rpm]}{2,508VA/(rpm))/dm^3}$$

$$V_{\zeta} = 45,208 dm^3$$

### Longitud geométrica del estator

Distancia longitudinal total que tendrá el estator. Según (Corrales, 1976) la longitud geométrica relaciona el volumen prismático ( $V_{\zeta}$ ) y el diámetro interno del estator (D).

$$L = \frac{V_{\zeta}}{D^2} \quad (13)$$

$$L = \frac{45,208dm^3}{12,25dm^2}$$

$$L = 3,69dm = 36,9cm$$

### **Paso polar**

Es la distancia que existe de un polo al siguiente en forma de arco, la cual relaciona diámetro interno del estator y el número de polos del mismo.

Según (Corrales, 1976) se calcula por medio de la ecuación 14.

$$\tau_p = \frac{\pi D}{\text{polos}} \quad (14)$$

$$\tau_p = \frac{\pi 350mm}{4}$$

$$\tau_p = 274,889mm$$

### **Flujo magnético medio por polo**

El flujo magnético es un grupo de líneas de fuerza, las cuales atraviesan la superficie de un objeto sometido a la acción de un campo magnético. El flujo magnético medio por polo está relacionado por la densidad de campo magnético ( $\hat{B}_{do}$ ) el paso polar ( $\tau_p$ ) y la longitud del estator ( $L$ ) (Godoy, 2012).

$$\Phi_m = \hat{B}_{do} \tau_p L \quad (15)$$

$$\Phi_m = 0,75T * 0,274889m * 0,369m$$

$$\Phi_m = 0,07607Wb$$

### Velocidad del rotor en carga (supuesto)

De acuerdo a FitzGerald, A (2004, pág. 310) En condiciones normales de operación el deslizamiento es pequeño: de 2 a 10% a plena carga en la mayoría de los motores de jaula de ardilla. Para el diseño de este motor se designará un deslizamiento de 5%. Se procede a calcular la velocidad del rotor mediante la ecuación 16.

$$n = (1 - s)n_s \quad (16)$$

Donde:

$s$ = Deslizamiento

$n_s$ = Velocidad síncrona o velocidad del campo magnético del estator

$$n = (1 - 0,05)1500rpm$$

$$n = 1425rpm$$

### Velocidad periférica

Es la velocidad máxima que alcanza el eje con referencia a los cojinetes. La velocidad periférica según (Corrales, 1976) relaciona el diámetro interno del estator ( $D$ ), la velocidad del rotor en carga ( $n$ ).

Se calcula por medio de la ecuación 17.

$$v = \frac{\pi * D * n}{60} \quad (17)$$

$$v = \frac{\pi * 0,35m * 1425rpm}{60}$$

$$v = \frac{26,11m}{s}$$

### Número de conductores por ranura

Los conductores son cables de cobre u aluminio por lo general, ubicados entre las ranuras del estator y por los cuales se hace circular corriente eléctrica generando junto a las ranuras los polos magnéticos.

El número de conductores por ranura según (Corrales, 1976) relaciona el voltaje de línea ( $V$ ), el factor de bobinado ( $\xi$ ), el número de ranuras por polo y fase ( $n_{pf}$ ), el diámetro interior del estator ( $D$ ), la longitud del estator ( $L$ ) y la densidad de campo magnético ( $\hat{B}_{do}$ ).

$$Z_n = 45 * \frac{V}{\xi n_{pf} (D * L) \hat{B}_{do}} \quad (18)$$

$$Z_n = 45 * \frac{500V}{0,957 * 5 * (35cm * 36,9cm) * 0,75T}$$

$$Z_n = 4,854$$

$$Z_n = 5 \text{ conductores/ranuras}$$

### Número de conductores totales en el estator

El número de conductores totales según (Corrales, 1976) relaciona el número de conductores por ranura ( $Z_n$ ) y el número de ranuras total del estator ( $n_1$ ).

$$Z_1 = Z_n n_1 \quad (19)$$

$$Z_1 = 5 * 60$$

$$Z_1 = 300 \text{ conductores}$$

### Inducción teórica definitiva

La inducción teórica definitiva según (Corrales, 1976) relaciona la inducción teórica ( $\hat{B}_{do}$ ), el número de conductores por ranura ( $Z_n$ ) y el número de conductores totales en el estator ( $Z_1$ ).

$$B_{do} = \hat{B}_{do} \left( \frac{Z_n}{Z_1} \right) \quad (20)$$

$$B_{do} = 0,75T \left( \frac{4,854}{5} \right)$$

$$B_{do} = 0,7281T$$

### Carga lineal específica definitiva

Según (Corrales, 1976) la carga lineal específica se relaciona con el número totales de conductores ( $Z_1$ ), la intensidad de línea ( $I$ ) y el diámetro interno del estator ( $D$ ).

$$q = \frac{Z_1 I}{\pi D} \quad (21)$$

$$q = \frac{(300c * 196,388A)}{\pi * D}$$

$$q = 535,81 \text{ Ac/cm}$$

### Flujo teórico sinusoidal equivalente

Según Godoy, (2012) “ El flujo magnético es un grupo de líneas de fuerza, las cuales atraviesan la superficie de un objeto sometido a la acción de un campo magnético”.

El flujo teórico sinusoidal según (Corrales, 1976) relaciona el paso polar ( $\tau_p$ ), la longitud del estator ( $L$ ) y la inducción teórica definitiva ( $B_{do}$ ).

$$\Phi_{do} = \frac{2}{\pi} (\tau_p L) * B_{do} \quad (22)$$

$$\Phi_{do} = \frac{2}{\pi} (0,274889m * 0,369m) * 0,7281T$$

$$\Phi_{do} = 0,047 \text{ Wb}$$

La variación de carga lineal en función de la variación de la temperatura para una velocidad periférica de 26,11m/s y sabiendo que el estator es corto, según la figura 30 tenemos que es de:

$$\frac{\Lambda * q}{\Delta\theta_1} = 30 \frac{\left(\frac{Ac}{cm}\right) * \left(\frac{A}{mm^2}\right)}{^{\circ}\text{C}}$$

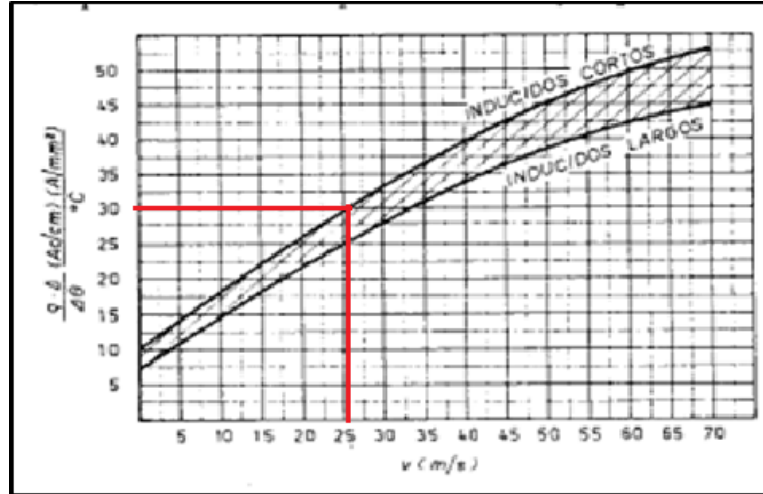


Figura 30. Calentamiento de las cabezas de bobina en las máquinas de alterna (Corrales, 1976, pág. 194).

Esta máquina está provista por un aislamiento de clase E, este posee una temperatura media de 75°C.

$$\Delta\theta_{med} = \text{Temperatura media}$$

Tabla 15

Temperaturas admisibles según la clase de aislamiento

Clase de aislamiento	Temperatura ambiente máxima °C	Incremento de la temperatura media admisible ( $\Delta\theta_{med}$ °C)	Temperatura media admisible en servicio °C	Temperatura admisible en el punto más caliente °C
<b>Y</b>	40	45	85	90
<b>A</b>	40	60	100	105
<b>A<sub>0</sub></b>	40	65	105	-
<b>E</b>	40	75	115	120
<b>B</b>	40	80	120	130
<b>F</b>	40	100	140	155
<b>H</b>	40	125	165	180

Nota: Las cifras de la columna 4 se obtienen sumando las columnas 2 y 3. Los datos de la columna 5 exceden a las de la 4 entre 5 y 15 °C. (Corrales, 1976, p. 19)

La diferencia entre la temperatura media y la temperatura de las cabezas de bobina es 15°C (suponiendo).

De este modo la temperatura de las cabezas de bobina viene a ser:

$$\Delta\theta_1 = 75^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_1 = 60^\circ\text{C}$$

$$(\Lambda * q) \text{ admisible} = \left( \frac{\Lambda * q}{\Delta\theta_1} \right) \Delta\theta_1 = 30 * 60 = 1800$$

### Densidad de corriente admisible

La densidad de corriente es la magnitud vectorial de la cantidad corriente circulante por una superficie cualquiera (Fitzgerald,A; Kingsley,C; Umans,S., 2004).

La densidad de corriente según (Corrales, 1976) está relacionada por la carga lineal-densidad de corriente ( $\Lambda * q$ ) y la carga lineal definitiva ( $q$ ).

$$\Lambda = \frac{\Lambda * q}{q} \tag{23}$$

$$\Lambda = \frac{1800}{535,86}$$

$$\Lambda = 3,359\text{A}/\text{mm}^2$$

### Sección del conductor por fase recomendado

La sección del conductor es el área del cable que se recomienda para un funcionamiento lo más óptimo posible.

La sección del conductor por fase según (Corrales, 1976) está relacionada por intensidad de corriente de línea ( $I$ ) y la densidad de corriente admisible ( $\Lambda$ ).



$$S_f = \frac{I}{\Lambda} \quad (24)$$

$$S_f = \frac{196,388A}{3,358A/mm^2}$$

$$S_f = 58,623mm^2$$

### **Inducción teórica aparente máxima en los dientes**

La inducción aparente para los dientes se llega a  $\hat{B}_{dMo} = 2,1 T$  y a veces a  $2,2 T$ , pero suele admitirse de  $1,8 T$  a  $1,9 T$ . Para el yugo y el núcleo,  $1,9 T \geq \hat{B}_{yo} \geq 1,6 T$  y  $\hat{B}_{no} \leq 1,65 T$ . Por lo tanto se elegirá una densidad de flujo aparente de  $1,9 T$ . (Corrales, Cálculo Industrial De Máquinas Eléctricas Tomo I, 1976)

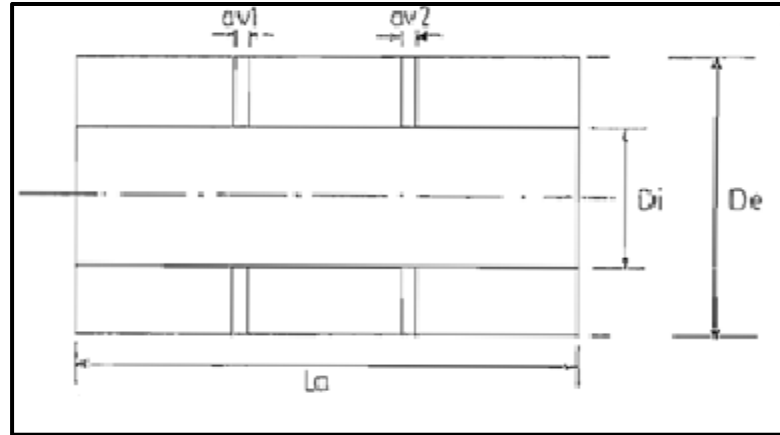
Siguiendo esas normas la inducción teórica máxima en los dientes será de  $1,9 T$ .

$$\hat{B}_{dMo} = 1,9 T$$

### **Canales de ventilación radial**

Los canales de ventilación son pequeñas aberturas a lo largo del estator, las cuales son utilizadas para la refrigeración del motor eléctrico.

Cuando la longitud del núcleo del estator es mayor que 10 o 12,5 cm deberá dividirse en ductos radiales de ventilación para asegurar el enfriamiento del núcleo y del devanado (Vallejo, E., 1977).



*Figura 31. Canales de ventilación a lo largo del núcleo del estator (Vallejo, E., 1977)*

Se deben suponer los siguientes valores para poder realizar los cálculos:

Para el diseño del motor eléctrico se eligió un número total de 9 canales de ventilación.

$$n_{c1} = 9$$

### **Longitud axial por canal**

La longitud axial por canal es la separación que tendrá cada abertura ubicadas en el estator.

Los canales de ventilación tendrán una separación de 1 cm.

$$\varepsilon_{c1} = 1\text{cm}$$

### **Longitud bruta de hierro**

La longitud bruta del hierro según (Corrales, 1976) relaciona la longitud del estator ( $L$ ), el número de canales de ventilación ( $n_{c1}$ ) y la longitud de los canales de ventilación ( $\varepsilon_{c1}$ ).

$$L_{h1} = L - (n_{c1} * \varepsilon_{c1}) \quad (25)$$

$$L_{h1} = 369mm - (9 * 10mm)$$

$$L_{h1} = 279mm$$

### **Longitud neta de hierro**

La longitud bruta de hierro es la longitud real que tendrá el estator. Según (Corrales, 1976) se relaciona con el factor de apilamiento ( $k_{fe}$ ) y la longitud bruta de hierro ( $L_{h1}$ ).

Para cuestiones de cálculo el factor de apilamiento de planchas  $k_{fe}$  es semejante a 0,9. (Corrales, Cálculo Industrial De Máquinas Eléctricas Tomo I, 1976)

$$L_{fe1} = k_{fe} * L_{h1} \tag{26}$$

$$L_{fe1} = 0,9 * 279mm$$

$$L_{fe1} = 251,1mm$$

### **Factor de corrección lineal para los dientes**

El factor de corrección lineal para los dientes según (Corrales, 1976) relaciona la longitud del estator ( $L$ ) y la longitud neta de hierro ( $L_{fe}$ ).

$$K_{fc} = \frac{L}{L_{fe}} \tag{27}$$

$$K_{fc} = \frac{36,9cm}{25,11cm}$$

$$K_{fc} = 1,469$$

### Paso de ranura en el entrehierro

Distancia de una ranura a otra en forma de arco. Según (Corrales, 1976) relaciona el diámetro interno del estator (D) y el número de ranuras del estator ( $n_1$ ).

$$\tau_\delta = \frac{\pi D}{n_1} \quad (28)$$

$$\tau_\delta = \frac{\pi * 350\text{mm}}{60}$$

$$\tau_\delta = 18,325\text{mm}$$

### Grueso del diente en el entrehierro

Según (Corrales, 1976) el grueso del diente en el entrehierro está relacionado por el factor de corrección de los dientes ( $K_{fc}$ ), el paso de ranura en el entrehierro ( $\tau_\delta$ ), la inducción teórica definitiva ( $B_{do}$ ) y la inducción teórica máxima en los dientes ( $\hat{B}_{dMo}$ ).

$$t_0 = K_{fc} * \tau_\delta \left( \frac{B_{do}}{\hat{B}_{dMo}} \right) \quad (29)$$

$$t_0 = 1,469 * 18,325\text{mm} \left( \frac{0,7281\text{T}}{1,9\text{T}} \right)$$

$$t_0 = 10,3158\text{mm}$$

### Anchura de ranura

La anchura de ranura según (Corrales, 1976) está relacionado por el paso de ranura en el entrehierro ( $\tau_\delta$ ) y el grueso del diente en el entrehierro ( $t_0$ ).

$$a_1 = \tau_\delta - t_0 \quad (30)$$

$$a_1 = 18,325\text{mm} - 10,3158\text{mm}$$

$$a_1 = 8,0092\text{mm}$$

Para algunos cálculos se necesita ciertas dimensiones del estator, las cuales no indican como calcular o que referencias tomar para hallarlas. Por este motivo se tomarán algunas medidas de la ranura estatórica que se tiene como guía en la Figura 32 para complementar el diseño.

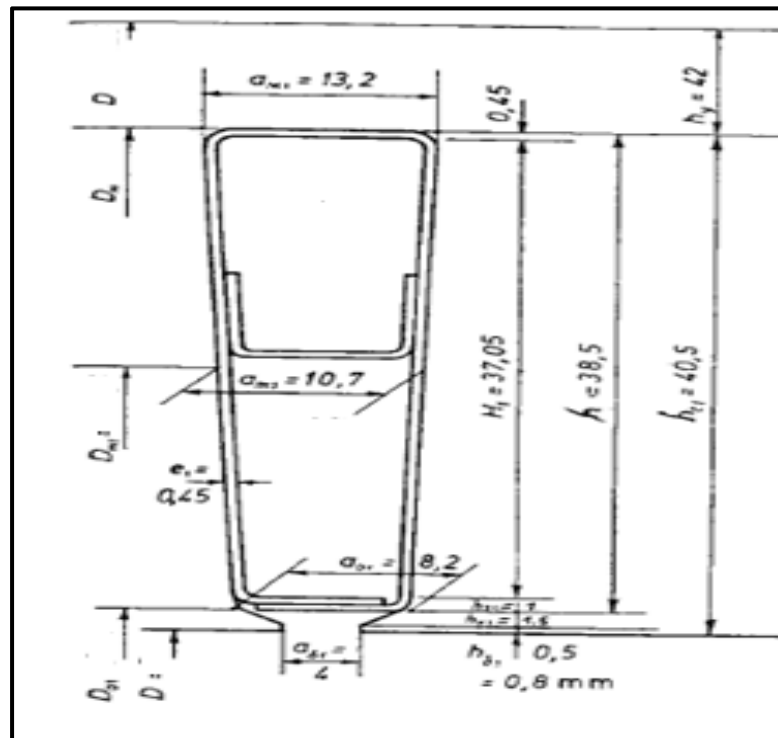


Figura 32. Ranura estatórica de guía de diseño (Corrales, 1976)

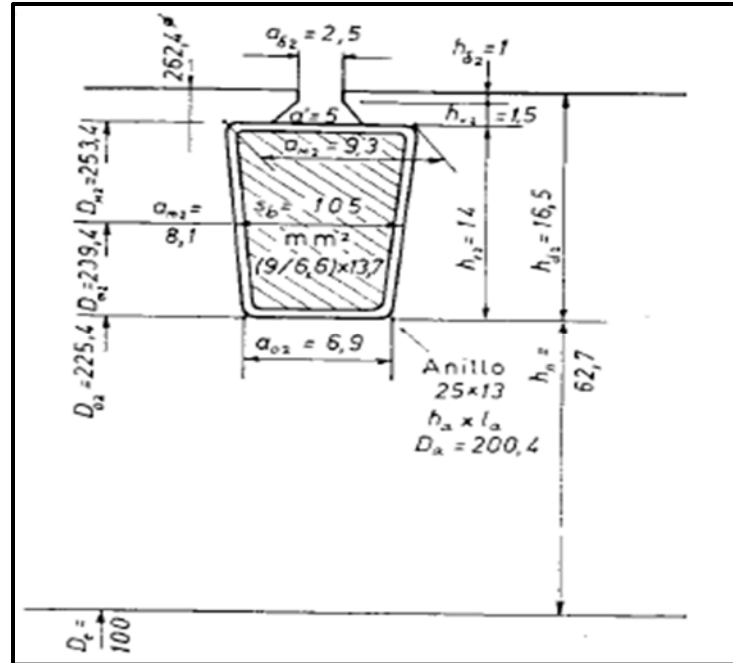


Figura 33. Ranura rotórica de guía de diseño (Corrales, 1976)

### Incremento diametral de espesor

#### Grueso del manguito

El grueso del manguito es el aislante ubicado entre las ranuras del estator y los conductores, los cuales son utilizados para evitar corto circuito.

$$e_2 = 0,6mm$$

Este se lo obtiene de la figura 34, tomando como referencia un alternador normal.

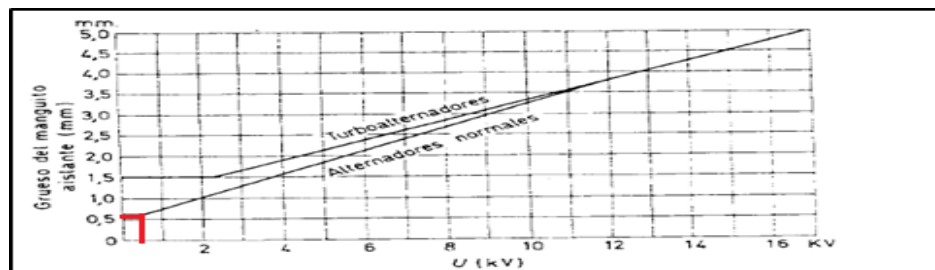


Figura 34. Grueso de manguito aislante (Corrales, 1976)

### Disposición de los conductores definitiva

Número de vías: 4

Número de hilos por conductor: 7

Conductor individual: 1,5 / 1,625 diámetro esmaltado con capa fuerte. Sección del hilo conductor  $1,77\text{mm}^2$ .

Se eligió el número de hilos por conductores siguiendo la guía de cables de cobre desnudo existentes en el mercado y el diámetro por hilo se eligió tomando en cuenta los datos existentes en el mercado y la sección del conductor recomendada (Viakon, 2012).

Tabla 16

#### Incremento de diámetro de los hilos esmaltados

<i>d</i>	Esmaltados capa normal			Esmaltados capa fuerte		AA	SS	V	Am
	$\Delta d_{min.}$	$\Delta d_{normal}$	$\Delta d_{m\acute{a}x.}$	$\Delta d_{min.}$	$\Delta d_{m\acute{a}x.}$	$\Delta d$	$\Delta d$	$\Delta d$	$\Delta d$
1,5	0,050	0,085	0,115	0,100	0,125	0,3		0,22	0,3
1,6	>>	0,090	0,120			>>		>>	>>
1,7	>>	>>	>>			>>		>>	>>
1,8	>>	>>	0,125			>>		0,23	>>
1,9	>>	>>	>>			>>		>>	>>
2,0	>>	>>	>>			>>		>>	>>
2,2	>>	>>	>>			>>		>>	0,35
2,3	>>	>>	>>			>>		>>	>>
2,4	>>	>>	0,130			>>		>>	>>
2,5	>>	>>	>>			>>		0,24	>>
2,6	>>	>>	>>			>>		>>	>>
2,7	>>	>>	>>			>>		>>	>>
2,8	>>	>>	>>			>>		>>	>>
2,9	>>	>>	>>			>>		>>	>>
3,0	>>	>>	>>			>>		>>	>>
<b>Trenza de algodón</b>		$\Delta d + 0,4$			Trenza de vidrio		$\Delta d + 0,35$		

Nota: AA: acetal-polivinilo-algodón; SS: seda; V: vidrio; Am: amianto.

### Sección del conductor por fase

Según (Fitzgerald,A; Kingsley,C; Umans,S., 2004) la sección del conductor por fase relaciona el número de vías, el número de hilos por conductor y la sección del hilo.

$$S_f = \text{número de vias} * \text{número de hilos por conductor} \quad (31)$$

*\* sección del hilo conductor*

$$S_f = 4 \text{ vias} * 7 \frac{\text{hilos}}{\text{cond}} * 1,77 \text{mm}^2$$

$$S_f = 49,56 \text{mm}^2$$

### **Trazado de la ranura según figura (Definitivo)**

#### ***Diámetro mínimo en los dientes***

Diámetro mínimo en los dientes se encuentra desde el centro del estator hacia el final de la cuña, siendo esta la inclinación de la ranura representada en la figura 32.

Los valores de  $h_{\delta_1}$  y de  $h_{v_1}$  se obtienen de la figura 32.

$$h_{\delta_1} = 0,5 \text{ mm}$$

$$h_{v_1} = 1,5 \text{ mm}$$

Según (Corrales, 1976) el diámetro mínimo en los dientes relaciona el diámetro interno del estator ( $D$ ), salida al entrehierro ( $h_{\delta_1}$ ) y la cuña ( $h_{v_1}$ ).

$$D_o = D + 2(h_{\delta_1} + h_{v_1}) \quad (32)$$

$$D_o = 350 \text{mm} + 2(0,5 + 1,5)$$

$$D_o = 354 \text{mm}$$

#### ***Diámetro medio en los dientes***

El diámetro medio en los dientes es la distancia que está comprendida del centro del estator hasta la mitad de la ranura.



El valor de altura de ranura  $h$  se obtiene de la figura 32.

$$h = 38,5 \text{ mm}$$

Según (Corrales, 1976) el diámetro medio en los dientes relaciona el diámetro mínimo en los dientes ( $D_0$ ) y la altura de ranura ( $h$ ).

$$D_m = D_0 + h \quad (33)$$

$$D_m = 354 \text{ mm} + 38,5 \text{ mm}$$

$$D_m = 392,5 \text{ mm}$$

#### ***Diámetro máximo en los dientes***

El diámetro máximo en los dientes es la distancia que está comprendida desde el centro del estator hacia la parte superior de la ranura. Según (Corrales, 1976) el diámetro máximo en los dientes relaciona el diámetro medio en los dientes ( $D_m$ ) y la altura de ranura ( $h$ ).

$$D_M = D_m + h \quad (34)$$

$$D_M = 392,5 \text{ mm} + 38,5 \text{ mm}$$

$$D_M = 431 \text{ mm}$$

#### ***Paso mínimo de ranura***

Es la distancia comprendida entre el lado en que termina una ranura y el lado en que empieza la siguiente ranura. Según (Corrales, 1976) el paso mínimo de ranura relaciona el diámetro mínimo en los dientes ( $D_0$ ) y el número de ranuras en el estator ( $n_1$ ).

$$\tau_0 = \frac{\pi D_0}{n_1} \quad (35)$$

$$\tau_0 = \frac{\pi * 354 \text{ mm}}{60}$$

$$\tau_0 = 18,535 \text{ mm}$$

### ***Paso medio de ranura***

Es la distancia comprendida entre el lado en que termina una ranura y la mitad de la siguiente ranura. Según (Corrales, 1976) el paso medio de ranura relaciona el diámetro medio en los dientes ( $D_0$ ) y el número de ranuras en el estator ( $n_1$ ).

$$\tau_m = \frac{\pi D_m}{n_1} \quad (36)$$

$$\tau_m = \frac{\pi * 392,5 \text{ mm}}{60}$$

$$\tau_m = 20,55 \text{ mm}$$

### ***Paso máximo de ranura***

Es la distancia comprendida entre el lado en que termina una ranura y el lado en que termina la siguiente ranura. Según (Corrales, 1976) el paso máximo de ranura relaciona el diámetro máximo en los dientes ( $D_0$ ) y el número de ranuras en el estator ( $n_1$ ).

$$\tau_M = \frac{\pi D_M}{n_1} \quad (37)$$

$$\tau_M = \frac{\pi * 431 \text{ mm}}{60}$$

$$\tau_M = 22,57 \text{ mm}$$

***Anchura mínima de ranura***

Es la distancia comprendida por las esquinas inferiores de la ranura. Según (Corrales, 1976) la anchura mínima de ranura relaciona el paso mínimo de ranura ( $\tau_0$ ) y el grueso del diente en el entrehierro ( $t_0$ ).

$$a_0 = \tau_0 - t_0 \quad (38)$$

$$a_0 = 18,535mm - 10,3158mm$$

$$a_0 = 8,22 mm$$

***Anchura media de ranura***

Es la distancia comprendida por la separación en la mitad de la ranura. Según (Corrales, 1976) la anchura mínima de ranura relaciona el paso medio de ranura ( $\tau_m$ ) y el grueso del diente en el entrehierro ( $t_0$ ).

$$a_m = \tau_m - t_0 \quad (39)$$

$$a_m = 20,55 mm - 10,3158 mm$$

$$a_m = 10,23mm$$

***Anchura máxima de ranura***

Es la distancia comprendida por las esquinas superiores de la ranura. Según (Corrales, 1976) la anchura mínima de ranura relaciona el paso máximo de ranura ( $\tau_M$ ) y el grueso del diente en el entrehierro ( $t_0$ ).

$$a_M = \tau_M - t_0 \quad (40)$$

$$a_M = 22,57 \text{ mm} - 10,3158 \text{ mm}$$

$$a_M = 12,25 \text{ mm}$$

### ***Utilización de la ranura***

#### ***Sección de ranura***

Área de espacio disponible que tendrá la ranura.

La altura de la ranura es igual 38,5mm.

$h$  = Altura de ranura

Según (Corrales, 1976) la sección de ranura relaciona la altura real de la ranura ( $h$ ) y la anchura media de ranura ( $a_m$ ).

$$A_r = h * a_m \quad (41)$$

$$A_r = 38,5\text{mm} * 10,23\text{mm}$$

$$A_r = 393,855 \text{ mm}^2$$

#### ***Sección de aislamiento de ranura y entre capas***

Devanado en 2 capas

La ranura se divide en dos secciones por medio de aislamientos, las cuales serán ocupadas por los conductores. Según (Corrales, 1976) está relacionada por la altura de la ranura ( $h_r$ ), el ancho de ranura ( $a_m$ ) y el grosor del aislamiento ( $e_2$ ).

$$A_{ar} \approx (2 * h + 5 * a_m) * e_2 \quad (42)$$

$$A_{ar} \approx (2 * 38,5mm + 5 * 10,23mm) * 0,6mm$$

$$A_{ar} \approx 76,89 \text{ mm}^2$$

### ***Espacio libre para conductores aislados***

El espacio libre para los conductores según (Corrales, 1976) está relacionada por la sección de ranura ( $A_r$ ) y la sección de aislamiento de ranuras y entre capas ( $A_{ar}$ ).

$$A_{ac} = A_r - A_{ar} \quad (43)$$

$$A_{ac} = 393,855 \text{ mm}^2 - 76,89 \text{ mm}^2$$

$$A_{ac} = 316,965 \text{ mm}^2$$

El diámetro del hilo con el aislamiento ya ha sido mencionado anteriormente, el cual es de 1,625mm.

### ***Sección de un hilo aislado***

Según (Corrales, 1976) la sección de un hilo aislado se calcula mediante la ecuación 14.

$$A_{ha} = \frac{\pi * D_{ha}^2}{4} \quad (44)$$

Donde:

$D_{ha}$  = Diámetro del hilo con aislamiento

$$A_{ha} = \frac{\pi * (1,625mm)^2}{4}$$

$$A_{ha} = 2,07mm^2$$

### ***Sección de un hilo sin aislante***

El diámetro del hilo sin aislante es de 1,5mm. Según (Corrales, 1976) la sección de un hilo sin aislante se calcula mediante la ecuación 44.

$$A_{hsa} = \frac{\pi * D_{hsa}^2}{4} \quad (44)$$

Donde:

$D_{hsa}$  = Diámetro del hilo

$$A_{hsa} = \frac{\pi * (1,5mm)^2}{4}$$

$$A_{hsa} = 1,77mm^2$$

### ***Sección cuadrada del conjunto***

Debe quedar establecido el número de hilos que tendrá cada ranura del motor eléctrico, para lo cual se utilizara la ecuación 45.

$$N_{h/r} = Z_n * N_{\frac{h}{c}} * \text{número de vías} \quad (45)$$

Donde:

$N_{h/r}$  = Número de hilos por ranura

$Z_n$  = Número de conductores por ranura

$N_{\frac{h}{c}}$  = Número de hilos por conductores

$$N_{h/r} = 5 * 7 * 4$$

$$N_{h/r} = 140$$

El número de hilos por ranura es de 140.

Según (Corrales, 1976) la sección cuadrada del conjunto se calcula mediante la ecuación 46.

$$A_{cc} = N_{h/r} * A_{ha} \quad (46)$$

Donde:

$N_{h/r}$  = Número de hilos por ranura

$A_{ha}$  = Area del hilo con aislamiento

$$A_{cc} = 140 * 2,07mm^2$$

$$A_{cc} = 289,8mm^2$$

### ***Factor de utilización de espacio disponible***

Según (Corrales, 1976) el factor de utilización de espacio disponible relaciona la sección cuadrada del conjunto ( $A_{cc}$ ) y la sección del espacio libre para conductores ( $A_{ac}$ ).

$$f_0 = \frac{A_{cc}}{A_{ac}} \quad (47)$$

$$f_0 = \frac{289,8mm^2}{316,965mm^2}$$

$$f_0 = 0,9$$

Lo normal para un factor de utilización de espacio es semejante a 0,8 (Corrales, 1976, pág. 405).

### ***Factor de utilización de la ranura***

Según (Corrales, 1976) el factor de utilización de la ranura está relacionada por el número de hilos por ranura ( $N_h$ ), la sección de un hilo sin aislante ( $A_{hsa}$ ) y el área de la ranura ( $A_r$ ).

$$f_u = \frac{N_h * A_{hsa}}{A_r} \quad (48)$$

$$f_u = \frac{140 * 1,77mm^2}{403,062 mm^2}$$

$$f_u = 0,61$$

### **Cálculo del yugo**

#### ***Altura del yugo***

Es la distancia comprendida entre el lado superior de la ranura y el final del estator.

Según (Corrales, 1976) la altura del yugo relaciona el factor de corrección de los dientes ( $K_{fc}$ ), el diámetro interno del estator ( $D$ ), la inducción teórica definitiva ( $B_{do}$ ) y la inducción aparente en el yugo ( $\hat{B}_{y0}$ ).

Según las reglas citadas en la sección de Inducción aparente, la inducción en el yugo puede estar en valores entre 1,6 T y 1,9 T. El valor de  $\hat{B}_{y0}$  será igual a 1,9 T.



$$h_y = \frac{K_{fc}}{2} * \left( \frac{D}{\text{polos}} \right) * \left( \frac{B_{do}}{B_{yo}} \right) \quad (49)$$

$$h_y = \frac{1,469}{2} * \left( \frac{350\text{mm}}{\frac{4}{2}} \right) * \left( \frac{0,7281T}{1,9T} \right)$$

$$h_y = 49,2569\text{mm}$$

### ***Diámetro exterior del yugo***

Es la distancia comprendida entre el centro del estator hasta donde termina el mismo.

Según (Corrales, 1976) el diámetro medio del yugo relaciona el diámetro máximo en los dientes ( $D_M$ ) y la altura del yugo ( $h_y$ ).

$$D_{yM} = D_M + 2h_y \quad (50)$$

$$D_{yM} = 431\text{mm} + 2 * 49,2569\text{mm}$$

$$D_{yM} = 529,5138\text{mm}$$

### ***Longitud media líneas de fuerza***

En la región que rodea un imán o a una bobina por el cual circula corriente eléctrica, existe un campo magnético que puede ser representado por líneas de flujo magnético o líneas de fuerza, estas líneas no tienen un origen o un punto final, existen en lazos cerrados (Rodríguez, Máquinas Asíncronas, 2008)

Según (Corrales, 1976) la longitud media de líneas de fuerza está relacionada por el diámetro exterior del yugo ( $D_{yM}$ ) y el número de polos (*polos*). Estas se pueden apreciar en la

figura 35, las cuales están ubicadas a lo largo de la longitud diametral del estator entre dos polos que se encuentren uno a lado del otro.

$$l_y = \pi * \frac{D_{ym}}{4 * \frac{\text{polos}}{2}} \quad (51)$$

$$l_y = \pi * \frac{52,95 \text{cm}}{4 * 2}$$

$$l_y = 20,79 \left( \frac{\text{cm}}{\text{polo}} \right)$$

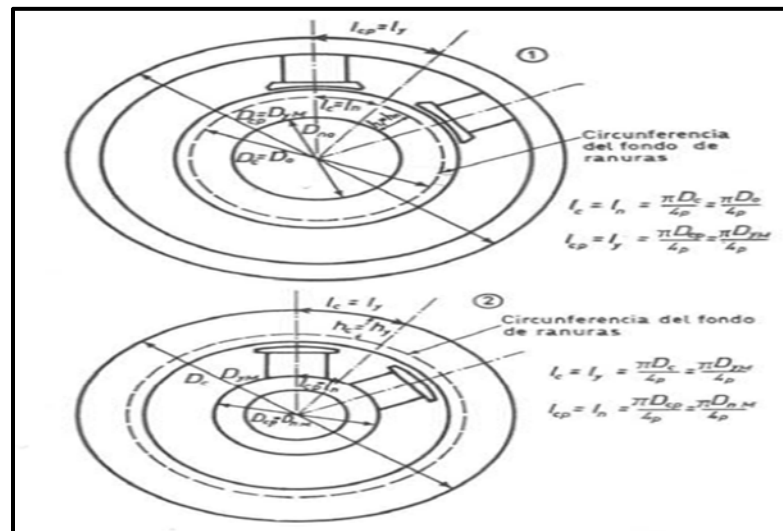


Figura 35. Longitudes de corona inducida  $l_c$  y de corona polar  $l_{cp}$  en máquinas de inducido rotórico y de inducido estático (Corrales, 1976)

### Altura radial del entrehierro

La altura del entrehierro es la distancia que separa el estator del rotor. Al tener un entrehierro se reduce la posibilidad de saturación para fuerzas magneto-motrices mayores (Fitzgerald,A; Kingsley,C; Umans,S., 2004).

Para un motor de diámetro interno del estator de  $D = 35\text{cm}$  y *par de polos* = 2 , la longitud del entrehierro según la figura 36 debe ser de  $\delta = 0,8\text{mm}$ .

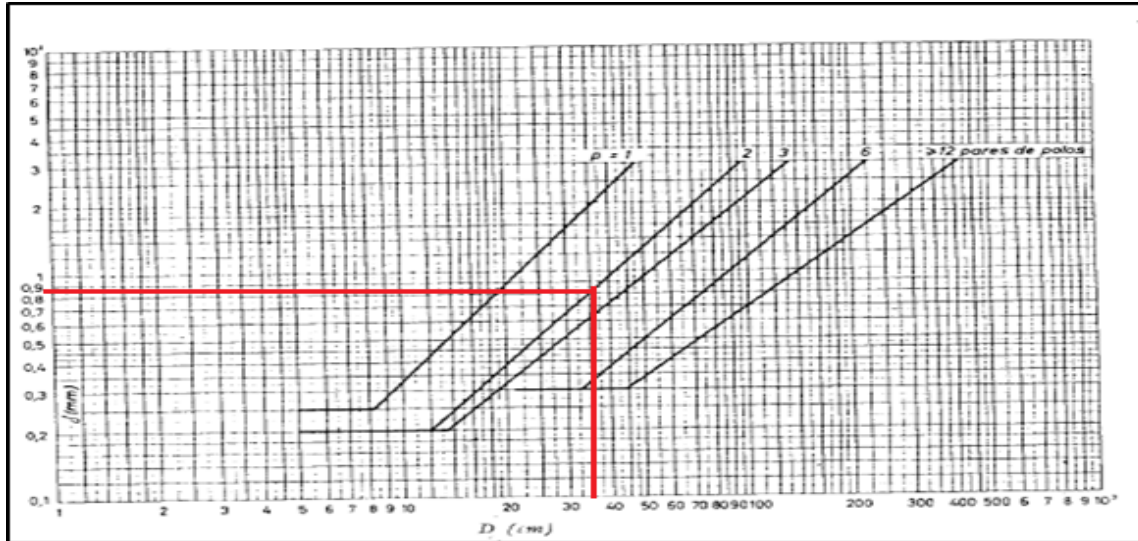


Figura 36. Entrehierro de los motores asíncronos en función del diámetro D y del número de pares de polos

### Dimensiones complementarias del estator

Las salientes de manguitos o aislantes son prolongaciones a la salida de las ranuras para aumentar de este modo las líneas de fuga.

#### *Salientes de manguito*

Manguito corto

Según (Corrales, 1976) las salientes de aislantes cortos se calculan por medio de la ecuación 52.

$$a_c = 10 + 5,5 * V$$

( 52)

$$a_c = 10 + 5,5 * 0,5KV$$

$$a_c = 12,75m$$

Manguito largo

Según (Corrales, 1976) las salientes de aislantes largos se calculan por medio de la ecuación 53.

$$a_l = 15 + 7,5 * V \quad (53)$$

$$a_l = 15 + 7,5 * 0,5KV$$

$$a_l = 18,75mm$$

La línea roja representa el valor 10 mm usado en el manguito corto y la línea azul representa el valor de 15 mm utilizado en el manguito largo.

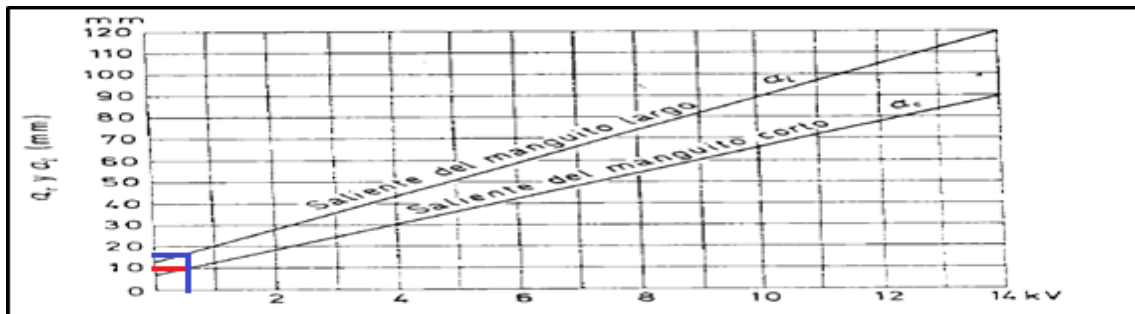


Figura 37. Longitud saliente de los manguitos cortos  $a_c$  y largos  $a_l$  para las bobinas estática de alterna (Corrales, 1976, p. 199)

***Juego entre bobinas***

El valor de 2.5 mm utilizado en la ecuación 54, se lo obtiene de la Figura 38, cuyo dato está resaltado con una línea roja. Según (Corrales, 1976) el juego entre bobinas se calcula con la ecuación 54.

$$j_1 = 2,5 + 0,4 * V \quad (54)$$

$$j_1 = 2,5 + 0,4 * 0,5KV$$

$$j_1 = 2,7mm$$

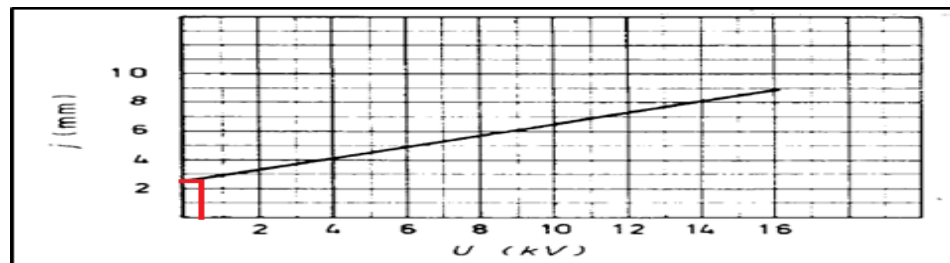


Figura 38. Distancia entre bobinas de la misma fase (Corrales, 1976, p. 201)

***Distancia entre fases***

Los valores de 4 mm y 5 mm utilizados en las ecuaciones 55 y 56 respectivamente, son obtenidos de la figura 39, la cual está marcada con línea roja para el primer valor y una línea azul para el segundo valor. Según (Corrales, 1976) la distancia entre fases se calcula por medio de la ecuación 55.

$$c_1 = 4 * V \quad (55)$$

$$c_1 = 4 * 0,5KV$$

$$c_1 = 2mm$$

***Distancias a masa***

Según (Corrales, 1976) la distancias a masa se calculan mediante la ecuación 56.

$$b_1 = 5 * V$$

(56)

$$b_1 = 5 * 0,5KV$$

$$b_1 = 2,5mm$$

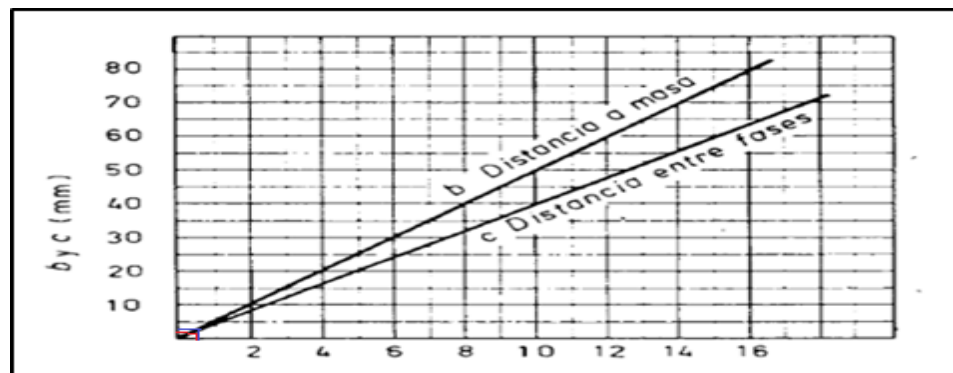


Figura 39. Distancias a masa  $b_1$  y entre fases  $c_1$  para las máquinas de alterna (Corrales, 1976, p. 201)

***Longitud media de las cabezas de bobina***

Las cabezas de bobina son la parte inactiva en los conductores, por ellas circula corriente eléctrica pero no realizan ningún tipo de trabajo.

Para un devanado en doble capa

Según (Corrales, 1976) la longitud media de las cabezas de bobina relaciona el diámetro medio en los dientes ( $D_m$ ), número de polos (*polos*) y mango largo ( $a_l$ ).

$$L_{cb} \approx 5 * \frac{D_m}{\text{polos}} + a_l \quad (57)$$

$$L_{cb} \approx 5 * \frac{39,25\text{cm}}{4} + 0,1875\text{cm}$$

$$L_{cb} \approx 49,25\text{cm}$$

Al no ser un valor preciso este tiende a elevarse, lo cual tendremos un margen de error de menos cinco y sin tomar en cuenta los decimales. (Corrales, 1976)

$$L_{cb} = 44,25\text{cm}$$

### ***Longitud media del conductor***

Según (Corrales, 1976) la longitud media del conductor relaciona la longitud del estator ( $L$ ) y la longitud de cabezas de bobina ( $L_{cb}$ ).

$$l_m = L + L_{cb} \quad (58)$$

$$l_m = 36,9\text{cm} + 44\text{cm}$$

$$l_m = 80,9\text{cm}$$

### **Constantes óhmicas en el estator**

#### ***Resistencia y pérdidas óhmicas a 75 °C (temperatura media límite)***

Fitzgerald afirma que “La resistividad o resistencia eléctrica específica es la resistencia de un material conductor según su longitud y anchura. Esta es una constante los materiales independiente de la forma de resistor”.

El valor de resistividad es de  $e_1 = 0,0217 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$  y se la encuentra en la tabla 17.

Tabla 17

*Características del cobre 56 a las temperaturas admitidas según los aislantes*

Clase de aislamiento	Incremento de la temperatura media admisible °C	Temperatura media límite $\theta$ °C	$k_{\theta} = \frac{235 + \theta}{310}$	$e_{\theta} = \frac{k_{\theta} * e_{75}}{\Omega * mm^2}$	$\chi_{\theta} = \frac{1}{\frac{s * m}{mm^2}}$	$\frac{1000 * e_{\theta}}{y \Omega}$ $kg(A/mm^2)^2$
-	-	20	0,82	0,0179	56	2,01
-	-	75	1,00	0,0217	46	2,44
<b>Y</b>	45	85	1,03	0,0224	44,6	2,48
<b>A</b>	60	100	1,08	0,0234	42,6	2,64
<b>A<sub>0</sub></b>	65	105	1,10	0,0238	42	2,68
<b>E</b>	75	115	1,13	0,0245	40,8	2,75
<b>B</b>	80	120	1,14	0,0248	40,2	2,80
<b>F</b>	100	140	1,21	0,0262	38,1	2,95
<b>H</b>	125	165	1,29	0,0280	35,7	3,15

Nota:  $e_{\theta}$ =resistividad;  $\chi_{\theta}$ =conductividad. La nomenclatura cobre 56 hace referencia a la resistividad que es tomada en este libro para dicho elemento. La resistividad del cobre queda expresada de la siguiente forma:  $\frac{56(s \cdot m)}{mm^2}$  (Corrales, 1976, p. 18)

### *Pérdidas relativas por efecto Joule y caídas óhmicas*

Se conoce como efecto Joule al fenómeno por el cual si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones es transformada en calor debido al choque que sufren con los átomos del material conductor (Godoy, 2012).

Según (Corrales, 1976) las pérdidas relativas por efecto Joule y caídas óhmicas están relacionadas por la resistividad ( $e_1$ ), el diámetro interior del estator ( $D$ ), el factor de bobinado ( $\xi$ ), la longitud media del conductor ( $l_m$ ), la longitud del estator ( $L$ ), velocidad del campo magnético del estator ( $n_s$ ), la densidad de corriente ( $\Lambda$ ) y la inducción teórica definitiva ( $B_{do}$ ).

$$p_{J1} = u_{R1} = \frac{270 * e_1}{\xi * D} * \frac{\frac{l_m}{L}}{\frac{n_s}{1000}} * \left( \frac{\Lambda}{B_{do}} \right) \quad (59)$$

$$p_{J1} = u_{R1} = \frac{270 * 0,0217}{0,957 * 35} * \frac{\frac{80,9}{36,9}}{\frac{1500}{1000}} * \left( \frac{3,359}{0,7281} \right)$$

$$p_{J1} = u_{R1} = 1,18\%$$



***Pérdidas por efecto Joule absolutas***

Según (Corrales, 1976) las pérdidas por efecto Joule absolutas están relacionadas por las pérdidas por efecto Joule porcentual ( $p_{J1}$ ) y la potencia aparente (S).

$$p_J = p_{J1} * \frac{S}{100} \quad (60)$$

$$p_J = 1,18 * \frac{170,077\text{KVA}}{100}$$

$$p_J = 2,007\text{kW}$$

***Caída óhmica absolutas***

Son producidas por las caídas de tensión cuando una determinada corriente circula por un conductor de un material y sección determinados. Estas pérdidas se minimizan con dimensionamiento adecuado de los conductores (Aguillera, 2011).

Según (Corrales, 1976) las caídas óhmicas absolutas están relacionadas por la caída óhmica porcentual ( $u_{R1}$ ) y el voltaje de línea (V).

$$u_R = u_{R1} * \frac{V}{100} \quad (61)$$

$$u_R = 1,18 * \frac{500V}{100}$$

$$u_R = 5,9V/\text{fase}$$

Por el momento el diseño de la máquina esta propuesto para trabajar con un solo tipo de voltaje, en caso de que el motor sea construido para trabajar con conexiones estrella-delta se deberá emplear el voltaje mas bajo para el cálculo de pérdidas por efecto Joule y caídas óhmicas absolutas.

### ***Resistencia óhmica del enrollamiento***

Según (Corrales, 1976) la resistencia óhmica del enrollamiento relaciona las caídas óhmicas absolutas ( $u_R$ ) y la intensidad de línea ( $I$ ).

$$R_1 = \frac{u_R}{I} \quad (62)$$

$$R_1 = \frac{5,9V/fase}{196,388A}$$

$$R_1 = \frac{0,03\Omega}{fase} \text{ a } 75^\circ\text{C}$$

### **Constantes inductivas del estator**

#### ***Alturas***

$$H = 36,7mm$$

Los siguientes valores se encuentran en la figura 32, que se tomó como referencia para el diseño de la máquina

Extremo de ranura

$$h_r = 1mm$$

Cuña

$$h_c = 1,5mm$$

Salida al entrehierro

$$h_\delta = 0,5mm$$

***Anchuras***

De ranura

$$a_0 = 8,22mm$$

De salida de entrehierro

$$a_{\delta_1} = 4mm$$

***Corrección para altura de conductores y resto de ranura***

Utilizando la ecuación 8 se obtiene el valor del paso relativo empleado anteriormente.

$$\frac{y_n}{n_{rp}} = \frac{15}{15} = 1$$

Por medio de la figura 40 quedan determinados los factores de corrección para la permanencia del cuerpo de las bobinas en la ranura ( $k_a$ ) y para la permanencia del espacio exterior a las bobinas ( $k_c$ ). Ambos factores están representados por una línea roja.

$$k_a = 1$$

$$k_c = 1$$

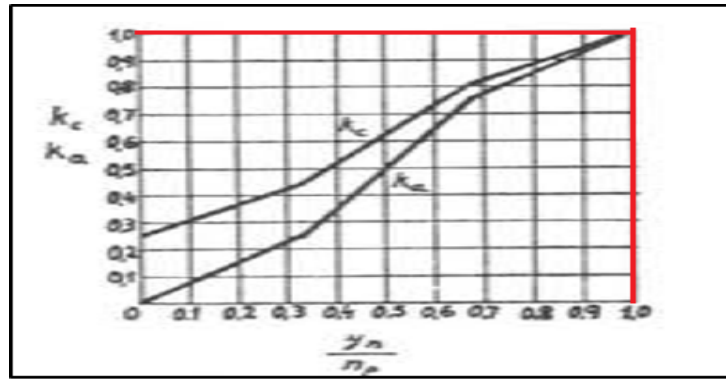


Figura 40. Factores de corrección para conductores y bobina (Corrales, 1976, p. 232)

### Longitud axial efectiva de dispersión

Las medidas de pérdida de longitud efectiva ( $\varepsilon_n$ ) se obtienen a partir de la figura 41, para una longitud axial por canal ( $\varepsilon_{c1}$ ) de 10 mm.

Ranura

$$a_m = 10,72mm; \varepsilon_{c1} = 10mm; \varepsilon_n = 2,6mm$$

Base de cuña

$$a_0 = 8,22mm; \varepsilon_{c1} = 10mm; \varepsilon_n = 3,1mm$$

Salida de entrehierro

$$a_\delta = 4mm; \varepsilon_{c1} = 10mm; \varepsilon_n = 5mm$$

El factor de dispersión en la ranura está señalada en la figura 41 mediante una línea roja. El factor de dispersión para la base de cuña está marcada con una línea azul y para la salida del entrehierro el factor de dispersión está marcada con una línea verde.

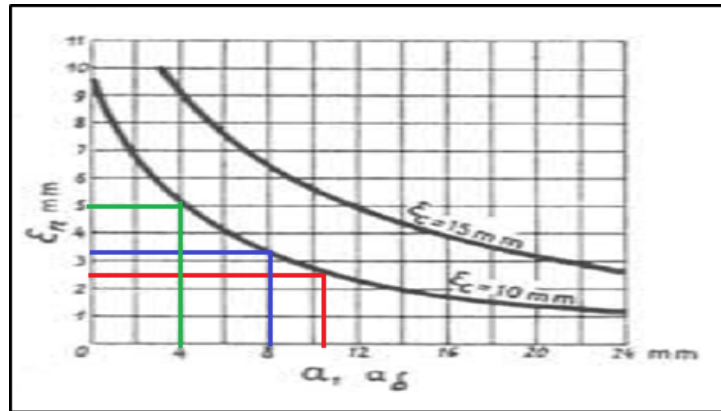


Figura 41. Pérdida de longitud efectiva  $\epsilon_n$  por canal de ventilación radial, a los efectos del flujo de dispersión (Corrales, 1976, pág. 245)

### **Longitud axial efectiva de dispersión para la ranura**

Según (Corrales, 1976) la longitud axial efectiva de dispersión para la ranura relaciona la longitud del estator ( $L$ ), el número de canales de ventilación ( $n_{c1}$ ) y la longitud efectiva para la ranura ( $\epsilon_n$ ).

$$L_{nm} = L - n_{c1}\epsilon_n \quad (63)$$

$$L_{nm} = 369\text{mm} - 9 * 2,6\text{mm}$$

$$L_{nm} = 345,6\text{mm}$$

### **Longitud axial de dispersión para la base de cuña**

Según (Corrales, 1976) la longitud axial efectiva de dispersión para la ranura relaciona la longitud del estator ( $L$ ), el número de canales de ventilación ( $n_{c1}$ ) y la longitud efectiva para la base de cuña ( $\epsilon_n$ ).

$$L_{n0} = L - n_{c1}\epsilon_n \quad (64)$$

$$L_{n0} = 369mm - 9 * 3,1mm$$

$$L_{n0} = 341,1mm$$

### ***Longitud axial efectiva de dispersión para la salida del entrehierro***

Según (Corrales, 1976) la longitud axial efectiva de dispersión para la ranura relaciona la longitud del estator ( $L$ ), el número de canales de ventilación ( $n_{c1}$ ) y la longitud efectiva para la salida del entrehierro ( $\varepsilon_n$ ).

$$L_{n\delta} = L - n_{c1}\varepsilon_n \quad (65)$$

$$L_{n\delta} = 369mm - 9 * 5mm$$

$$L_{n\delta} = 324mm$$

### **Permanencia específica de ranura**

La permanencia específica de ranura o dispersión de ranura ocurren debido a las líneas de campo magnético que rodean a las ranuras concatenando a los conductores alojados en ellas.

Según (Corrales, 1976) la permanencia específica se calcula mediante la ecuación 66.

$$\lambda_r = \frac{H}{3 * a_0} * (k_c) \left( \frac{L_{nm}}{L} \right) + \left( \frac{h_r}{a_0} \right) * k_a \left( \frac{L_{n0}}{L} \right) + \frac{2 * h_c}{a_0 + a_\delta} * k_a * \frac{L_{n0} + L_{n\delta}}{2 * L} + \frac{h_\delta}{a_\delta} * k_a * \left( \frac{L_{n\delta}}{L} \right) \quad (66)$$

$$\lambda_r = \frac{36,7}{3 * 8,22} * (1) \left( \frac{345,6}{369} \right) + \left( \frac{1}{8,22} \right) * 1 \left( \frac{341,1}{369} \right) + \frac{2 * 1,5}{8,22 + 4} * 1 * \frac{341,1 + 324}{2 * 369} + \frac{0,5}{4} * 1 * \left( \frac{324}{369} \right)$$

$$\lambda_r = 1,8715 \frac{M/Gb}{cm}$$

### **Dispersión en Zig-Zag**

Si el entrehierro es pequeño como ocurre con las máquinas asíncronas las líneas de inducción pasan de un diente a otro situado enfrente, al otro lado del entrehierro, antes que al diente contiguo (Rodríguez, Universidad de Cantabria, 2011).

#### *Número de ranuras del rotor*

$$n_2 = 72$$

#### *Paso de ranuras en el entrehierro*

Distancia que tendrá cada ranura del rotor en forma de arco.

$$\tau_{\delta 2} = \pi * \frac{D}{n_2} \quad (67)$$

$$\tau_{\delta 2} = \pi * \frac{350\text{mm}}{72}$$

$$\tau_{\delta 2} = 15,27\text{mm}$$

#### *Salida de ranura*

Se tomó el dato de la figura 33.

$$a_{\delta 2} = 2,5\text{mm}$$

### **Permanencia específica de zig-zag**

#### *Factor de corrección*

Según (Corrales, 1976) el factor de corrección relaciona la longitud del estator ( $L$ ), el número de canales de ventilación ( $n_{c1}$ ) y la longitud perdida en el entrehierro ( $\epsilon_{\delta}$ ).

$$K_L = \frac{L}{L - n_{c1} * \varepsilon_\delta} \quad (68)$$

Para encontrar el valor de la longitud perdida en el entrehierro ( $\varepsilon_\delta$ ) teniendo que la máquina esta compuesta por 9 canales de ventilación, 10 mm de separación, un entrehierro de 0,8mm y el tipo de ventilación utilizado es el número 1, el cual se encuentra señalado en la figura 42.

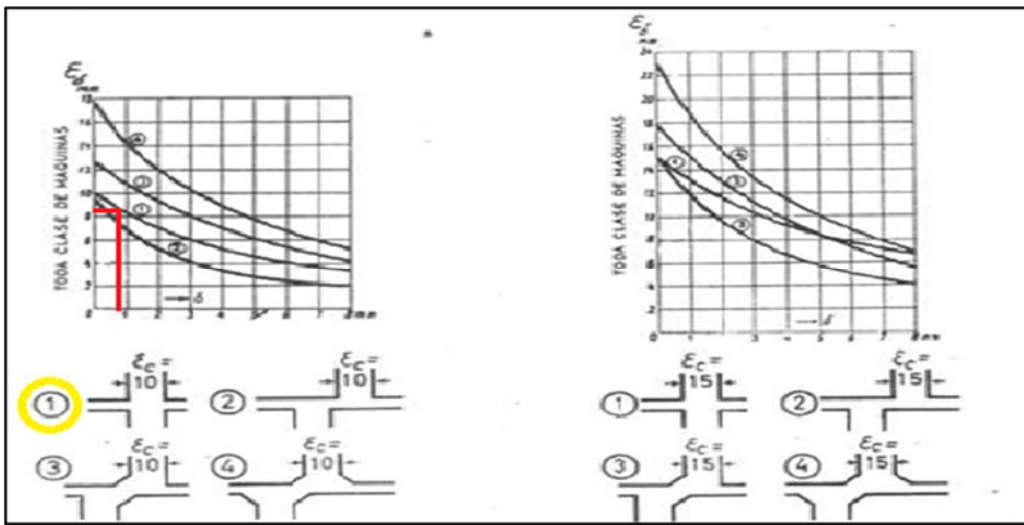


Figura 42. Longitud perdida en el entrehierro  $\varepsilon_\delta$  por canal ventilación radial de 10mm y 15mm respectivamente (Corrales, 1976, pág. 148)

La longitud perdida será para esta máquina de 8,4mm

$$\varepsilon_\delta = 8,4mm$$

Utilizando la ecaución 68 se obtiene el factor de corrección.

$$K_L = \frac{369mm}{369mm - 9 * 8,4mm}$$

$$K_L = 1,257$$



***Coefficiente de corrección por longitud activa***

Con la ecuacione 69 se calculan los coeficientes de corrección por longitud activa.

$$K_{c1} = \frac{\tau_{\delta}}{\tau_{\delta} - \frac{\left(\frac{a_{\delta 1}}{\delta}\right)^2}{\left(5 + \left(\frac{a_{\delta 1}}{\delta}\right)\right)} (\delta)} \quad (69)$$

$$K_{c1} = \frac{18,325mm}{18,325mm - \frac{\left(\frac{4mm}{0,8mm}\right)^2}{\left(5 + \left(\frac{4mm}{0,8mm}\right)\right)} (0,8mm)}$$

$$K_{c1} = 1,123$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_{\delta 2}}{\tau_{\delta 2} - \frac{\left(\frac{a_{\delta 2}}{\delta}\right)^2}{\left(5 + \left(\frac{a_{\delta 2}}{\delta}\right)\right)} (\delta)} \quad (70)$$

$$K_{c2} = \frac{15,27mm}{15,27mm - \frac{\left(\frac{2,5mm}{0,8mm}\right)^2}{\left(5 + \left(\frac{2,5mm}{0,8mm}\right)\right)} (0,8mm)}$$

$$K_{c2} = 1,067$$

***Coefficiente de Carter***

Según (Corrales, 1976) el coeficiente de Carter relaciona los coeficientes de corrección por longitud activa ( $K_{c1}$ ), ( $K_{c2}$ ).

$$K_c = K_{c2} * K_{c1} \quad (71)$$

$$K_c = 1,067 * 1,123$$

$$K_c = 1,198$$

### ***Factor de saturación***

El factor de saturación no puede calcularse hasta conocer la excitación que precisamente se trata de buscar. Es necesario por tanto admitir un valor previo y revisarlo posteriormente en caso de ser necesario. (Corrales, 1976, pág. 142)

Para este diseño se tomará el valor proporcionado por el libro, donde el factor de saturación ( $k_s$ ) es igual a 1,33 (Corrales, Cálculo Industrial De Máquinas Eléctricas Tomo II, 1976).

$$k_s = 1,33$$

Ranuras por polo $n_{rp} = \frac{n_1}{2p}$	$\sum \left( \frac{1}{\frac{n_1}{p} v \pm 1} \right)^2$
3	0,097
4	0,053
5	0,036
6	0,023
7	0,017
8	0,013
9	0,010
10	0,0083
12	0,0057
15	0,0036
20	0,0021
25	0,0013
30	0,0009
40	0,0005
50	0,0003
$\infty$	0,0000

*Figura 43.* Factor para la permanencia de zig-zag (Corrales, 1976, pág. 254)

$$\lambda_z = \frac{n_{rp}}{\pi^2} \left( \frac{\tau_p}{\delta K_C k_s K_L} \right) * \sum \left( \frac{I}{\frac{n_1}{p} v \pm I} \right)^2 \quad (72)$$

La expresión  $\sum \left( \frac{I}{\frac{n_1}{p} v \pm I} \right)$  se la puede tomar directamente de la figura 43.

$$\sum \left( \frac{I}{\frac{n_1}{p} v \pm I} \right) = 0,0036$$

Según (Corrales, 1976) la permanencia específica de zig-zag se calcula mediante la ecuación 72.

$$\lambda_z = \frac{15}{\pi^2} \left( \frac{27,4889 \text{ cm}}{0,08 * 1,198 * 1,33 * 1,257} \right) * 0,0036$$

$$\lambda_z = 0,9387 \frac{\text{M/Gb}}{\text{cm}}$$

### Dispersión de cabezas de bobinas

Los lados activos de los conductores se encuentran situados frente al entrehierro, alojados en las ranuras de los núcleos magnéticos de la máquina. A causa de esto la corriente que pasa a través de ellos contribuye a la formación del campo magnético. Sin embargo las cabezas de bobina están situadas fuera del entrehierro y la corriente que pasa por ellas genera un campo magnético el cual no puede atravesar dicho entrehierro, por lo cual se genera en su totalidad una dispersión de las líneas de inducción (Rodríguez, Universidad de Cantabria, 2011).

$$\lambda_{cb} = n_{pf} \left( 0,47 * \left( \frac{L_{cb}}{L} \right) - 0,3 * \frac{y_n * \tau_m}{L} \right) \quad (73)$$

$$\lambda_{cb} = 5 \left( 0,47 * \left( \frac{44,25}{36,9} \right) - 0,3 * \frac{15 * 2,055}{36,9} \right)$$

$$\lambda_{cb} = 1,565 \frac{M/Gb}{cm}$$

### Permanencia específica total del estator

Según (Corrales, 1976) la permanencia específica total se calcula mediante la ecuación

74.

$$\lambda_x = \lambda_r + \lambda_z + \lambda_{cb} \quad (74)$$

$$\lambda_x = 1,8715 \frac{M/Gb}{cm} + 0,9387 \frac{M/Gb}{cm} + 1,565 \frac{M/Gb}{cm}$$

$$\lambda_x = 4,3752 \frac{M/Gb}{cm}$$

### Caídas de reactancia

La reactancia es la oposición al paso de la corriente alterna que ofrece un inductor (bobina) y condensadores. Junto con una resistencia eléctrica determinan la impedancia total de un circuito, de tal forma la reactancia (x) es la parte imaginaria de la impedancia y la resistencia es la parte real. (Fitzgerald,A; Kingsley,C; Umans,S., 2004)

Según (Corrales, 1976) las caídas de reactancia están relacionadas por el factor de bobinado ( $\xi$ ), el número de ranuras por polo y fase ( $n_{pf}$ ), la carga lineal ( $q_1$ ), la permanencia total ( $\lambda_x$ ) y la inducción teórica definitiva ( $B_{do}$ ).

$$\dot{e}_{x1} = \frac{5,58}{\xi * \text{numero de fases} * n_{pf}} * \left(\frac{q_1}{100}\right) * \left(\frac{\lambda_x}{B_{do}}\right) \quad (75)$$

$$\dot{e}_{x1} = \frac{5,58}{0,957 * 3 * 5} * \left(\frac{535,81}{100}\right) * \left(\frac{4,3752}{0,7281}\right)$$

$$\dot{e}_{x1} = 12,52\% \text{ de } V$$

$$E_x = \dot{e}_{x1} * \left(\frac{V}{100}\right) \quad (76)$$

$$E_x = 12,52\% * \left(\frac{500V}{100}\right)$$

$$E_x = 62,6V/\text{fase}$$

### Fuerza electromotriz relativa y absoluta

Para encontrar la fuerza electromotriz generada en el estator, se debe tener previamente el factor de potencia ( $\cos \varphi$ ) y el  $\sin \varphi$ . El factor de potencia se lo puede encontrar en la figura 1 utilizando los datos proporcionados para motores de 200 CV y para calcular el  $\sin \varphi$  debemos usar el triangulo de potencias figura 44.

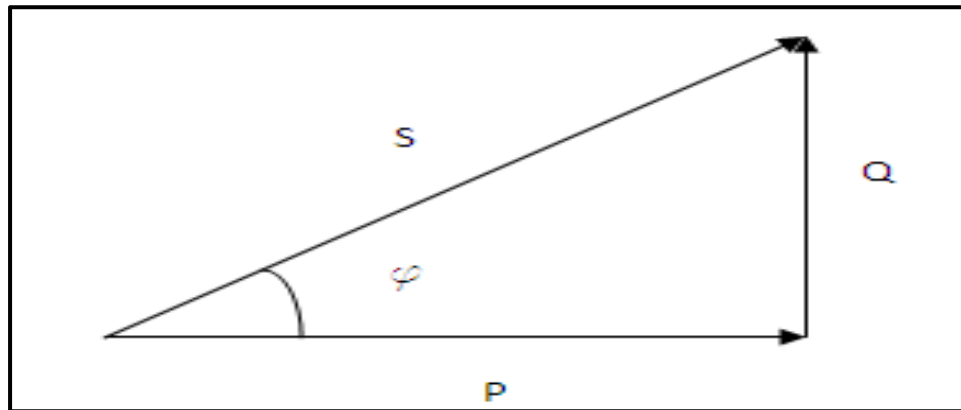


Figura 44. Triángulo de potencias (Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S., 2011)

La potencia de entrada necesaria para que el motor funcione correctamente ya fue calculado el cual es de un valor de:

$$P = 158,172kW$$

La potencia aparente es de un valor de:

$$S=170,077KVA$$

### ***Potencia reactiva***

Por Pitágoras encontramos el valor de la potencia reactiva.

La potencia reactiva no es una potencia realmente consumida, ya que no produce trabajo.

La potencia reactiva aparece debido a los elementos como bobinas o condensadores, y es necesaria para crear campos magnéticos y eléctricos en dichos componentes (Corrales, 1976).

$$Q = \sqrt{((S)^2 - (P)^2)} \quad (77)$$

$$Q = \sqrt{((170,077)^2 - (158,172)^2)}$$

$$Q = 62,51kvar$$

El  $\sin \varphi$  quedaría de la siguiente forma:

$$\sin \varphi = Q/S$$

$$\sin \varphi = \frac{62,51}{170,077}$$

$$\sin \varphi = 0,37$$

Con estos datos se procederá al cálculo de las F.e.m.

### ***F.e.m relativa***

Según (Corrales, 1976) la fuerza electromotriz está relacionada por las caídas óhmicas porcentuales ( $(u_{R1})$ ) y las caídas de reactancia ( $(\dot{e}_x)$ ).

$$\dot{E} \approx 100 - (u_{R1} * \cos \varphi) - \dot{e}_{x1} \sin \varphi \quad (78)$$

$$\dot{E} \approx 100 - (1,18 * 0,93) - 12,52 * 0,37$$

$$\dot{E} \approx 94,27\% \text{ de } V$$

### ***F.e.m absoluta***

Se conoce como fuerza electromotriz (FEM) a la energía distribuida de cualquier fuente o batería. Para ello se necesita que exista una diferencia de potencial entre dos puntos o polos de dicha fuente, que sea capaz de impulsar las cargas eléctricas a través de un circuito cerrado (García, 2015).

Según (Corrales, 1976) la FEM absoluta relaciona la fuerza electromotriz relativa ( $\dot{E}$ ) y el voltaje de línea ( $V$ ).

$$E_1 = \dot{E} * V \quad (79)$$

$$E_1 = 94,27\% * 500V$$

$$E_1 = 471,35V$$

## **Rotor de jaula simple**

### *Datos fundamentales*

#### *Número de ranuras del rotor*

Este valor ya se ha elegido anteriormente siguiendo las recomendaciones de los documentos de Tesla Motors y los del libro guía.

$$n_2 = 72$$

#### *Paso de ranuras referido al diámetro exterior del entrehierro*

Según (Corrales, 1976) el paso de ranura del rotor relaciona el diámetro interno del estator (D) y el número de ranuras del rotor ( $n_2$ ).

$$\tau_{\delta 2} = \frac{\pi D}{n_2}$$

$$\tau_{\delta 2} = \frac{\pi * 350\text{mm}}{72}$$

$$\tau_{\delta 2} = 15,27\text{mm}$$

#### *Salida de ranura*

$$a_{\delta 2} = 2,5\text{mm}$$

#### *Número de conductores del rotor*

(Fitzgerald,A; Kingsley,C; Umans,S., 2004) Afirma que el número de conductores del rotor va a ser igual numero de ranuras que este disponga, ya que un rotor de jaula de ardilla.

$$Z_2 = n_2$$

$$Z_2 = 72$$



**Factor de bobinado en el rotor**

Al estar compuesto por barras de cobre, el factor de bobinado es tomado con el valor de

1.

$$\xi_2 = 1$$

**Diámetro del eje**

Si la relación  $\frac{P_{out}}{\frac{n}{1000}}$  es < que 100 se utiliza la siguiente ecuación. El diámetro del eje

relaciona la potencia de salida ( $P_{out}$ ) y la velocidad del rotor ( $n$ ) (Corrales, Cálculo Industrial De Máquinas Eléctricas Tomo I, 1976).

$$D_e = 3,2 \dots 3,5 \sqrt[4]{\frac{P_{out}}{\frac{n}{1000}}} \quad (80)$$

Si la relación es mayor que 100 se utiliza la siguiente ecuación.

$$D_e = 2 \dots 2,3 \sqrt[4]{\frac{P_{out}}{\frac{n}{1000}}} \quad (81)$$

Al realizar los cálculos se determina que la relación es mayor que 100, por lo tanto se utilizará la ecuación 81.

$$D_e = 2,2 * \sqrt[4]{\frac{147,0997kW}{\frac{1425rpm}{1000}}}$$

$$D_e = 7,012cm$$

**Número de canales de ventilación radial**

$$n_{c2} = n_c = 9$$

***Longitud axial por canal***

La longitud de los canales de ventilación en el rotor será igual que los del estator.

$$\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{c1} = 1\text{cm}$$

***Factor de corrección lineal para los dientes***

Es el mismo factor calculado que para el estator.

$$K_{fc} = 1,469$$

**Características eléctricas para el rotor*****Rendimiento mecánico (supuesto)***

En toda transformación de energía siempre existen pérdidas, ya sea por fricción, calor que son los más comunes. El rendimiento mecánico o eficiencia puede definirse como el cociente entre la potencia de entrada y la potencia de salida del rotor (Godoy, 2012).

$$\eta_m = 0,98$$

***Deslizamiento (supuesto)***

Se conoce como deslizamiento a la diferencia porcentual que existe entre las velocidades del campo magnético generado en el estator y la parte móvil denominada rotor.

$$s = 5\%$$

***Potencia eléctrica del rotor***

La potencia eléctrica es la cantidad de energía entregada o absorbida en un tiempo determinado.

Según (Corrales, 1976) la potencia eléctrica del rotor relaciona la potencia de salida ( $P_{out}$ ), el rendimiento mecánico ( $\eta_m$ ) y el desplazamiento ( $s$ ).

$$P_{1-2} = \frac{P_{out}}{\eta_m * (1 - s)} \quad (82)$$

$$P_{1-2} = \frac{147,0997kW}{0,98 * (1 - 0,05)}$$

$$P_{1-2} = 158kW$$

### ***Corriente primaria de carga secundaria***

Según (Corrales, 1976) la corriente primaria de carga secundaria relaciona la potencia eléctrica del rotor ( $P_{1-2}$ ) y la fuerza electromotriz ( $E_1$ ).

$$I'_2 = \frac{P_{1-2}}{\text{numero de fase} * E_1 * \cos \varphi_2} \approx \frac{P_{1-2}}{\text{numero de fases} * E_1} \quad (83)$$

$$I'_2 = \frac{158kW}{3 * 0,47135kV}$$

$$I'_2 = 111,735 A/fase$$

### ***Corriente rotórica***

Según (Corrales, 1976) la corriente rotórica relaciona la corriente primaria de carga secundaria ( $I'_2$ ), el número de conductores totales ( $Z_1$ ), el factor de bobinado del estator ( $\xi$ ), el factor de bobinado del rotor ( $\xi_2$ ) y el número de conductores en el rotor ( $Z_2$ ).

$$I_b = I_2 = I'_2 * \frac{Z_1 * \xi}{Z_2 * \xi_2} \quad (84)$$

$$I_b = I_2 = 111,735 * \frac{300 * 0,957}{72 * 1}$$

$$I_b = I_2 = \frac{445,5 A}{\text{barra rotórica}}$$

***Densidad de corriente propuesta (  $\Lambda_2 > \Lambda$  )***

El calentamiento de las barras y anillos desnudos de los rotores de jaula de ardilla no se halla sujeto a limitaciones de temperatura por causa del aislamiento pero afecta localmente al devanado del estator. Son densidades de corriente de 6 a 8  $\frac{A}{mm^2}$  para el cobre. (Corrales, 1976, pág. 391)

$$\Lambda_b = \frac{6A}{mm^2}$$

***Sección de barra por ranura***

Según (Corrales, 1976) la sección de barra por ranura relaciona la corriente rotórica ( $I_b$ ) y la densidad de corriente ( $\Lambda_b$ ).

$$S_b = \frac{I_b}{\Lambda_b} \tag{85}$$

$$S_b = \frac{445,5}{6}$$

$$S_b = 74,3mm^2$$

### Dimensiones de la ranura rotórica

#### *Inducción teórica aparente en los dientes*

Bukowski afirma que “La densidad de campo magnético es igual a la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan un área específica. La densidad de campo magnético se mide en Webers sobre metro cuadrado ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ ) o Tesla ( $T$ ).

Se utiliza el mismo concepto citado en la parte de Inducción teórica aparente máxima en los dientes del estator.

$$\hat{B}_{dM02} = 1,9T$$

#### *Grueso necesario del diente*

Según (Corrales, 1976) el grueso del diente en el rotor relaciona el factor de corrección para los dientes ( $K_{fc}$ ), paso de ranura en el rotor ( $\tau_{\delta 2}$ ), inducción teórica definitiva ( $B_{do}$ ) y la inducción teórica en los dientes del rotor ( $\hat{B}_{dM02}$ ).

$$t_{02} = K_{fc} * \tau_{\delta 2} \left( \frac{B_{do}}{\hat{B}_{dM02}} \right) \quad (86)$$

$$t_{02} = 1,469 * 15,27\text{mm} \left( \frac{0,7281T}{1,9T} \right)$$

$$t_{02} = 8,595\text{mm}$$

### Trazado de la ranura definitivo

#### *Diámetro máximo en los dientes*

Para el diseño del motor eléctrico se tomarán ciertas medidas del diseño guía, indicado en la figura 33. Salida al entrehierro ( $h_{\delta 2}$ ), cuña ( $h_{c2}$ ) y altura de ranura ( $h_{r2}$ ).

$$h_{\delta 2} = 1mm$$

$$h_{c2} = 1,5mm$$

$$h_{r2} = 14mm$$

Según (Corrales, 1976) el diámetro máximo en los dientes relaciona el diámetro interno del estator ( $D$ ), longitud del entrehierro ( $\delta$ ), salida al entrehierro ( $h_{\delta 2}$ ) y la cuña ( $h_{c2}$ ).

$$D_{M2} = D - 2 * (\delta + h_{\delta 2} + h_{c2}) \quad (87)$$

$$D_{M2} = 350mm - 2 * (0,8mm + 1mm + 1,5mm)$$

$$D_{M2} = 343,4mm$$

#### ***Diámetro medio en los dientes***

Según (Corrales, 1976) el diámetro medio en los dientes relaciona el diámetro máximo en los dientes ( $D_{M2}$ ) y la altura de ranura ( $h_{r2}$ ).

$$D_{m2} = D_{M2} - h_{r2} \quad (88)$$

$$D_{m2} = 343,4mm - 14mm$$

$$D_{m2} = 329,4mm$$

#### ***Diámetro mínimo en los dientes***

Según (Corrales, 1976) el diámetro mínimo en los dientes relaciona el diámetro medio en los dientes ( $D_{m2}$ ) y la altura de ranura ( $h_{r2}$ ).

$$D_{02} = D_{m2} - h_{r2}$$

( 89)

$$D_{02} = 329,4mm - 14mm$$

$$D_{02} = 315,4mm$$

### ***Paso máximo de dientes***

Según (Corrales, 1976) el paso máximo de dientes relaciona el diámetro máximo en los dientes ( $D_{M2}$ ) y número de dientes en el rotor ( $n_2$ ).

$$\tau_{M2} = \pi * \frac{D_{M2}}{n_2} \quad (90)$$

$$\tau_{M2} = \pi * \frac{343,4mm}{72}$$

$$\tau_{M2} = 14,98mm$$

### ***Paso medio de dientes***

Según (Corrales, 1976) el paso medio de dientes relaciona el diámetro medio en los dientes ( $D_{m2}$ ) y el número de ranuras en el rotor ( $n_2$ ).

$$\tau_{m2} = \pi * \frac{D_{m2}}{n_2} \quad (91)$$

$$\tau_{m2} = \pi * \frac{329,4mm}{72}$$

$$\tau_{m2} = 14,37mm$$

***Paso mínimo de dientes***

Según (Corrales, 1976) el paso mínimo de dientes relaciona el diámetro mínimo en los dientes ( $D_{m2}$ ) y el número de ranuras en el rotor ( $n_2$ ).

$$\tau_{02} = \pi * \frac{D_{02}}{n_2} \quad (92)$$

$$\tau_{02} = \pi * \frac{315,4mm}{72}$$

$$\tau_{02} = 13,76mm$$

***Anchura máxima de ranura***

Es la distancia comprendida por las esquinas superiores de la ranura. Según (Corrales, 1976) la anchura mínima de ranura relaciona el paso máximo de ranura ( $\tau_{M2}$ ) y el grueso del diente en el entrehierro ( $t_{02}$ ).

$$a_{M2} = 6,4mm$$

***Anchura media de ranura***

Es la distancia comprendida por la separación en la mitad de la ranura. Según (Corrales, 1976) la anchura mínima de ranura relaciona el paso medio de ranura ( $\tau_{m2}$ ) y el grueso del diente en el entrehierro ( $t_{02}$ ).

$$a_{m2} = 5,8mm$$

***Anchura mínima de ranura***

Es la distancia comprendida por las esquinas inferiores de la ranura. Según (Corrales, 1976) la anchura mínima de ranura relaciona el paso mínimo de ranura ( $\tau_{02}$ ) y el grueso del diente en el entrehierro ( $t_{02}$ ).



$$a_{02} = 5,2mm$$

Para encontrar los valores de anchura de ranura, se debe despejar dichos valores ecuación 93:

$$t_{02} = \tau_{M2} - a_{M2} \quad (93)$$

Ya que el grosor de diente calculado anteriormente es constante y los pasos de dientes ya fueron calculados, se pueden hallar todas las anchuras cambiando los datos dependiendo si es máximo, medio o mínimo.

### Densidad de corriente referida al primario

Según (Corrales, 1976) la densidad de corriente referida al primario relaciona la densidad de corriente propuesta ( $\Lambda_b$ ), la intensidad de línea ( $I_1$ ) y la corriente primaria de carga secundaria ( $I'_2$ ).

$$\Lambda_{2/1} = \Lambda_b * \left( \frac{I_1}{I'_2} \right) \quad (94)$$

$$\Lambda_{2/1} = 6A/mm^2 * \left( \frac{196,388A}{111,735 A} \right)$$

$$\Lambda_{2/1} = \frac{10,55A}{mm^2}$$

### Corriente en los anillos

Según (Corrales, 1976) la corriente en los anillos relaciona el número de conductores totales en el rotor ( $Z_2$ ), la intensidad en el rotor ( $I_b$ ) y el número de polos de la máquina.

$$I_a = \frac{Z_2 * I_b}{\text{numero de polos} * \pi} \quad (95)$$

$$I_a = \frac{72 * 445,5 A}{4 * \pi}$$

$$I_a = 2552,53A$$

### Sección de cada anillo

La densidad de corriente en los anillos de cobre será la misma que para las barras en el rotor.

$$\Lambda_a = \Lambda_b \quad (96)$$

$$\Lambda_a = 6A/mm^2$$

Según (Corrales, 1976) la sección de cada anillo relaciona la intensidad en los anillos ( $I_a$ ) y la densidad de corriente en los anillos ( $\Lambda_a$ ).

$$S_a = \frac{I_a}{\Lambda_a} \quad (97)$$

$$S_a = \frac{2552,53A}{6A/mm^2}$$

$$S_a = 425,4mm^2$$

Por lo tanto las dimensiones de los anillos serán:

$$h_a = 32,72mm$$

$$l_a = 13mm$$

### **Longitud equivalente de barra**

Según (Corrales, 1976) la longitud equivalente de barra relaciona la longitud del estator ( $L$ ) y el ancho de la sección cuadrada de los anillos ( $l_a$ ).

$$l_b = L + 5 + 5 + l_a \quad (98)$$

$$l_b = 369 + 5 + 5 + 13$$

$$l_b = 392mm$$

### **Diámetro medio de los anillos**

Según (Corrales, 1976) el diámetro medio de los anillos relaciona el diámetro mínimo en los dientes del rotor ( $D_{02}$ ) y la altura de los anillos ( $h_a$ ).

$$D_{ma} = D_{02} - h_a \quad (99)$$

$$D_{ma} = 315,4mm - 32,72mm$$

$$D_{ma} = 282,68mm$$

### **Inducción teórica admisible en el núcleo**

Se utilizará como punto de partida el párrafo citado en la parte de Inducción teórica aparente máxima en los dientes del estator.

$$\hat{B}_{no} = 1,6T$$

### Altura del núcleo

Según (Corrales, 1976) la altura del yugo relaciona el factor de corrección de los dientes ( $K_{fc}$ ), el diámetro interno del estator (D), la inducción teórica definitiva ( $B_{do}$ ), la inducción teórica admisible en el núcleo ( $\hat{B}_{no}$ ) y el par de polos del motor.

$$h_n = \frac{K_{fc}}{2} * \left( \frac{D}{(\text{par de polos})} \right) * \left( \frac{B_{do}}{\hat{B}_{no}} \right) \quad (100)$$

$$h_n = \frac{1,469}{2} * \left( \frac{35\text{cm}}{(2)} \right) * \left( \frac{0,7281T}{1,6T} \right)$$

$$h_n = 5,85\text{cm}$$

### Constantes óhmicas del rotor de jaula de ardilla simple

Caída relativa de resistencia y deslizamiento a 75°C

#### *Resistividad*

Fitzgerald afirma que “La resistividad o resistencia eléctrica específica es la resistencia de un material conductor según su longitud y anchura. Esta es una constante los materiales independiente de la forma de resistor”.

$$e_2 = e_1$$

(101)

$$e_2 = 0,0217 \frac{\Omega * mm^2}{m}$$

***Caída óhmica en el rotor con relación al estator***

Son producidas por las caídas de tensión cuando una determinada corriente circula por un conductor de un material y sección determinados. Estas pérdidas se minimizan con dimensionamiento adecuado de los conductores (Aguillera, 2011). Según (Corrales, 1976) las caídas óhmicas en el rotor se calculan por medio de la ecuación 102.

$$\dot{u}_{R2/1} = \frac{270 * e_2}{\xi_2 * D} * \left( \frac{\frac{l_b}{L}}{\frac{n_s}{1000}} \right) * \left( \frac{\Lambda_2}{B_{do}} \right) \quad (102)$$

$$\dot{u}_{R2/1} = \frac{270 * 0,0217 \frac{\Omega * mm^2}{m}}{1 * 35cm} * \left( \frac{\frac{39,2cm}{36,9cm}}{\frac{1500}{1000}} \right) * \left( \frac{\frac{10,636A}{mm^2}}{0,7281T} \right)$$

$$\dot{u}_{R2/1} = 1,7318 \% \text{ del } V$$

***Deslizamiento***

Corrales afirma que “El valor de  $\cos \varphi_2$  es siempre semejante a 1”. Según (Corrales, 1976) el deslizamiento se calcula por medio de la ecuación 103.

$$s = \frac{\frac{\dot{u}_{R2}}{1}}{100 * \cos \varphi_2} * \left( \frac{I'_2}{I} \right) * \left( \frac{V}{E_1} \right) \quad (103)$$

$$s = \frac{1,7318}{100 * 1} * \left( \frac{111,735A}{196,388A} \right) * \left( \frac{500V}{471,35V} \right)$$

$$s = 0,0105$$

$$s = 1,05\%$$

### Permanencia específica en las ranuras

La permanencia específica de ranura o dispersión de ranura ocurren debido a las líneas de campo magnético que rodean a las ranuras concatenando a los conductores alojados en ellas.

El valor de  $a'$  es igual a 5 mm y se encuentra en la figura 33 del diseño guía.

$$\lambda_{r2} = \frac{h_{r2}}{3 * a_{M2}} + \frac{2 * h_{c2}}{a' + a_{\delta 2}} + \frac{h_{\delta 2}}{a_{\delta 2}} \quad (104)$$

$$\lambda_{r2} = \frac{14}{3 * 6,4} + \frac{2 * 1,5}{5 + 2,5} + \frac{1}{2,5}$$

$$\lambda_{r2} = 1,53 \frac{\text{M/Gb}}{\text{cm}}$$

### Permanencia en zig-zag

#### *Número de ranuras por polo en el rotor*

Según (Corrales, 1976) el número de ranuras por polo en el rotor relacionan el número de ranuras en el rotor ( $n_2$ ) y el número de polos del motor.

$$n_{rp2} = \frac{n_2}{\text{número de polos}} \quad (105)$$

$$n_{rp2} = \frac{72}{4}$$

$$n_{rp2} = 18$$

### Permanencia específica en zig-zag

Si el entrehierro es pequeño como ocurre con las máquinas asíncronas las líneas de inducción pasan de un diente a otro situado enfrente, al otro lado del entrehierro, antes que al diente contiguo (Rodriguez, Universidad de Cantabria, 2011).

$$\lambda_{z2} = \frac{n_{rp2}}{\pi^2} \left( \frac{\tau_p}{\delta K_C k_s K_L} \right) * \sum \left( \frac{I}{\frac{n_2}{p} v \pm 1} \right)^2 \quad (106)$$

El valor de  $\sum \left( \frac{I}{\frac{n_2}{p} v \pm 1} \right)^2$  se lo encuentra en la figura 43.

$$\lambda_{z2} = \frac{18}{\pi^2} \left( \frac{27,4889 \text{ cm}}{0,08 \text{ cm} * 1,198 * 1,33 * 1,257} \right) * 0,0021$$

$$\lambda_{z2} = 0,657 \frac{\text{M/Gb}}{\text{cm}}$$

### Dispersión en los aros o anillos del rotor

Se asumirá un vuelo de cabeza de 17 cm. y una distancia media de 20 cm.

$$\omega = 20 \text{ cm}$$

$$v = 17 \text{ cm}$$

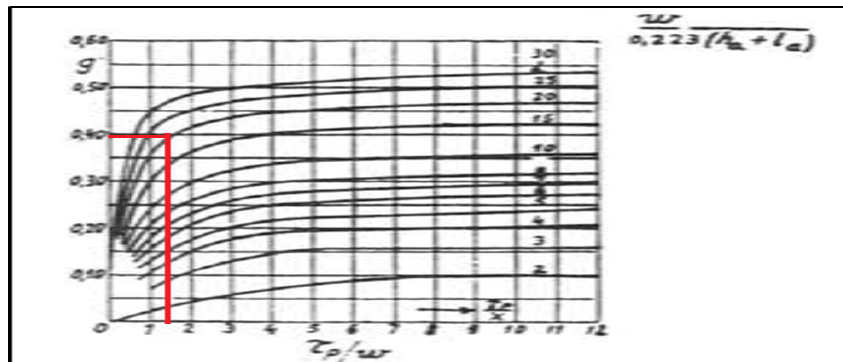


Figura 45. Coeficiente de permanencia  $g$  para la dispersión (Corrales, 1976)

Por medio de las siguientes relaciones se obtienen los datos necesarios para emplearlos en la figura 45 y obtener el coeficiente de permanencia  $g$ .

$$\frac{\tau_p}{\omega} = \frac{27,4889cm}{20cm} = 1,37$$

$$\frac{\omega}{0,223(h_a + l_a)} = \frac{20}{0,223(3,272 + 1,3)} = 19,62$$

$$g = 0,41$$

### Permanencia lineal específica de los anillos

Según (Corrales, 1976) la permanencia lineal específica de los anillos se calcula mediante la ecuación 107.

$$\lambda_{cb2} = \frac{n_2}{\text{número de polos} * \text{número de fases}} * \frac{\tau_p}{L} * g \quad (107)$$

$$\lambda_{cb2} = \frac{72}{4 * 3} * \frac{27,4889cm}{36,9cm} * 0,41$$

$$\lambda_{cb2} = 1,833 \frac{M/Gb}{cm}$$

### Caídas de reactancia rotórica

La reactancia es la oposición al paso de la corriente alterna que ofrece un inductor (bobina) y condensadores. Junto con una resistencia eléctrica determinan la impedancia total de un circuito, de tal forma la reactancia ( $x$ ) es la parte imaginaria de la impedancia y la resistencia es la parte real. (Fitzgerald,A; Kingsley,C; Umans,S., 2004)



***Permanencia específica total del rotor***

Según (Corrales, 1976) la permanencia específica total del rotor relaciona la permanencia específica en las ranuras ( $\lambda_{r2}$ ), la permanencia específica en zig-zag ( $\lambda_{z2}$ ) y la permanencia específica de los anillos ( $\lambda_{cb2}$ ).

$$\lambda_{x2} = \lambda_{r2} + \lambda_{z2} + \lambda_{cb2}$$

( 1008)

$$\lambda_{x2} = 1,53 \frac{M/Gb}{cm} + 0,657 \frac{M/Gb}{cm} + 1,833 \frac{M/Gb}{cm}$$

$$\lambda_{x2} = 4,02 \frac{M/Gb}{cm}$$

***Caída relativa de reactancia secundaria***

Según (Corrales, 1976) relaciona la caídas de reactancia primaria ( $\dot{e}_{x1}$ ), el número de ranuras del estator ( $n_1$ ), el número de ranuras del rotor ( $n_2$ ), el factor de bobinado del estator ( $\xi$ ) y rotor ( $\xi_2$ ), la permanencia total en el estator ( $\lambda_{x1}$ ) y en el rotor ( $\lambda_{x2}$ ).

$$\dot{e}_{x2/1} = \dot{e}_{x1} * \left(\frac{n_1}{n_2}\right) * \left(\frac{\xi}{\xi_2}\right)^2 * \left(\frac{\lambda_{x2}}{\lambda_{x1}}\right)$$

( 109)

$$\dot{e}_{x2/1} = 12,52\% * \left(\frac{60}{72}\right) * \left(\frac{0,957}{1}\right)^2 * \left(\frac{4,02}{4,3752}\right)$$

$$\dot{e}_{x2/1} = 8,77\% \text{ de } V$$

### Características límites a 75°C

#### Par máximo, corrientes y deslizamientos asociados

La relación entre las corrientes secundaria y primaria  $\frac{I'_{M2}}{I_{M1}}$  en las condiciones de máximo par no varían mucho, de 0,85 a 0,95, primera cifra para los motores pequeños y lentos, siendo la última cifra para motores grandes y rápidos. (Corrales, 1976, pág. 298)

$$\frac{I'_{M2}}{I_{M1}} = 0,93$$

#### Par máximo

Es la fuerza con la que gira el eje del rotor por longitud perpendicular a dicha fuerza. El par máximo es el trabajo que producirá la máquina teniendo en cuenta que el tiempo prolongado de uso ocasionará que problemas en su funcionamiento terminando en el daño permanente de la máquina (Fitzgerald,A; Kingsley,C; Umans,S., 2004). Según (Corrales, 1976) el par máximo se calcula mediante la ecuación 110.

$$\dot{M}_{max} = \frac{M_{max}}{M} = \frac{100}{2 \left( \dot{u}_{R1} + \sqrt{(\dot{u}_{R1})^2 + (\dot{e}_{x1} + \frac{\dot{e}_{x2}}{1})^2} \right)} * \frac{\eta_m(1-s)}{n_{eff} * \cos \varphi} \quad (110)$$

$$\dot{M}_{max} = \frac{100}{2(1,18 + \sqrt{(1,18)^2 + (12,52 + 8,77)^2})} * \frac{0,98(1 - 0,0105)}{0,93 * 0,93}$$

$$\dot{M}_{max} = 2,51$$

La variable  $\dot{M}_{max}$  significa el número de veces en que es superado el valor de par nominal.

**Corriente relativa de máximo par**

Es la corriente máxima que alcanzarán las intensidades en el estator y en el rotor cuando la maquina este trabajando a par máximo. Según (Corrales, 1976) la corriente relativa de máximo par se calcula mediante la ecuación 111.

$$\dot{I}_{M1} = \frac{I_{M1}}{I} = \frac{100}{\sqrt{(\dot{u}_{R1} + \frac{I'_{M2}}{I_{M1}} * \sqrt{(\dot{u}_{R1})^2 + (\dot{e}_{x1} + \frac{\dot{e}_{x2}}{1})^2})^2 + (\dot{e}_{x1} + \frac{\dot{e}_{x2}}{1} * \frac{I'_{M2}}{I_{M1}})^2}} \quad (111)$$

$$\dot{I}_{M1} = \frac{100}{\sqrt{((1,18 + 0,93 * \sqrt{(1,18)^2 + (12,52 + 8,77)^2})^2 + ((1,18 + 8,77 * 0,93)^2)}$$

$$\dot{I}_{M1} = 3,415$$

**Deslizamiento de máximo par**

Tiene que existir una velocidad relativa entre el campo del estator y el rotor para que se produzca una fem inducida en el rotor que genere una corriente que posibilite la existencia de fuerza o par. El porcentaje en que se diferencian estas velocidades se lo conoce como deslizamiento, para este caso es el deslizamiento cuando se aplica el máximo par en la máquina (Santos, 2014). Según (Corrales, 1976) el deslizamiento de máximo par se calcula mediante la ecuación 112.

$$s_M = \frac{\frac{\dot{u}_{R2}}{1}}{\sqrt{(\dot{u}_{R1})^2 + (\dot{e}_{x1} + \frac{\dot{e}_{x2}}{1})^2}} \quad (112)$$

$$s_M = \frac{1,7318}{\sqrt{(1,18)^2 + (12,52 + 8,14)^2}}$$

$$s_M = 0,0836$$

$$s_M = 8,36\%$$

### Potencia mecánica relativa máxima

Según (Corrales, 1976) el potencia máxima se calcula mediante la ecuación 113.

$$\dot{P}_{max} = \frac{P_{max}}{P} = \frac{100}{2 \left( (\dot{u}_{R1} + \frac{\dot{u}_{R2}}{1}) + \sqrt{(\dot{u}_{R1} + \frac{\dot{u}_{R2}}{1})^2 + (\dot{e}_{x1} + \frac{\dot{e}_{x2}}{1})^2} \right)} * \frac{\eta_m(1-s)}{n_{eff} * \cos \varphi} \quad (113)$$

$$\dot{P}_{max} = \frac{100}{2((1,18 + 1,7318) + \sqrt{(1,18 + 1,7318)^2 + (12,52 + 8,77)^2})} * \frac{0,98(1 - 0,0105)}{0,93 * 0,93}$$

$$\dot{P}_{max} = 2,358$$

### Corriente relativa de máxima potencia

Es la corriente que alcanzarán las intensidades ubicadas en el estator y el rotor al estar la maquina sometida a máxima potencia.

Para la relación  $\frac{I'_{P2}}{I_{P1}}$  se utiliza el mismo concepto que para la relación  $\frac{I'_{M2}}{I_{M1}}$  citada anteriormente (Corrales, 1976, p. 303).

$$\frac{I'_{P2}}{I_{P1}} = 0,93$$

$$i_{P1} = \frac{I_{P1}}{I} = \frac{100}{\left( \sqrt{(\dot{u}_{R1} + \frac{\dot{u}_{R2}}{1} + \sqrt{(\dot{u}_{R1} + \frac{\dot{u}_{R2}}{1})^2 + (\dot{e}_{x1} + \frac{\dot{e}_{x2}}{1})^2}) * \frac{I'_{P2}}{I_{P1}})^2 + (\dot{e}_{x1} + \frac{\dot{e}_{x2}}{1} * \frac{I'_{P2}}{I_{P1}})^2} \right)} \quad (114)$$

$$i_{P1} = \frac{I_{P1}}{I} = \frac{100}{\left( \sqrt{(1,18 + (1,7318 + \sqrt{(1,18 + 1,7318)^2 + (12,52 + 8,77)^2}) * 0,93)^2 + (12,52 + 8,77 * 0,93)^2} \right)}$$

$$i_{P1} = 3,33$$

***Deslizamiento de máxima potencia***

El porcentaje en que se diferencian las velocidades del campo del estator y el eje del rotor se lo conoce como deslizamiento, para este caso es el deslizamiento cuando se aplica el máximo par en la máquina (Santos, 2014). Según (Corrales, 1976) el deslizamiento de máxima potencia se calcula mediante la ecuación 115.

$$s_p = \frac{\frac{\dot{u}_{R2}}{1}}{\frac{\dot{u}_{R2}}{1} + \sqrt{(\dot{u}_{R1} + \frac{\dot{u}_{R2}}{1})^2 + (\dot{e}_{x1} + \frac{\dot{e}_{x2}}{1})^2}} \quad (115)$$

$$s_p = \frac{1,7318}{1,7318 + \sqrt{(1,18 + 1,7318)^2 + (12,52 + 8,14)^2}}$$

$$s_p = 0,0766$$

$$s_p = 7,66\%$$

***Velocidad angular síncrona***

La velocidad angular síncrona es la velocidad a la que gira el campo del estator medido en radianes por segundo. Según (Bukowski, 2015) relaciona la frecuencia ( $f_e$ ) y el número de polos de la máquina.

$$\omega_s = \frac{4\pi * f_e}{\text{número de polos}} \quad (116)$$

$$\omega_s = \frac{4\pi * 50Hz}{4}$$

$$\omega_s = 157,08 \text{ rad/s}$$

***Velocidad angular nominal del rotor***

La velocidad angular nominal del rotor es la velocidad a la que gira el eje del rotor medido en radianes por segundo. Según (Rodríguez, 2008) la velocidad angular nominal del rotor relaciona el desplazamiento ( $s$ ) y la velocidad angular síncrona ( $\omega_s$ ).

$$\omega = (1 - s)\omega_s \quad (117)$$

$$\omega = (1 - 0,0105)157,08$$

$$\omega = 155,43 \text{ rad/s}$$

***Par nominal***

Es la fuerza con la que gira el eje del rotor por longitud perpendicular a dicha fuerza. El par nominal es el trabajo que producirá la máquina sin que esta tenga algún problema en su funcionamiento. Según (Wildi, 2007) el par nominal relaciona la potencia de salida ( $P_{out}$ ) y la velocidad angular del rotor ( $\omega$ ).

$$M_n = \frac{P_{out}}{\omega} \quad (118)$$

$$M_n = \frac{147099,7W}{155,43 \text{ rad/s}}$$

$$M_n = 946 \text{ Nm}$$

El diseño se realizó a una frecuencia de 50 Hz, debido a que la potencia requerida solo se encontraba tabulada a dicha frecuencia, pero utilizando la tabla 9, la cual nos indica el cambio que sufren los valores principales al utilizar una frecuencia de 60 Hz. A continuación se aplicarán los porcentajes de cambio que sufre la velocidad de giro del rotor, el par nominal y la

potencia nominal. Este último valor según la tabla 9 no sufre ningún tipo de cambio ya que no se modificó el valor de voltaje como se expresa en dicha tabla.

***Velocidad de giro del rotor con una frecuencia de 60 Hz***

Se empleará el deslizamiento real de la maquina el cual es de 1,05%. Primero se debe calcular la velocidad de giro del campo magnético del estator a frecuencia de 60 Hz. Para eso se utilizará la ecuación 4, de la cual se debe despejar la velocidad síncrona y queda de la siguiente manera.

$$n_s = \frac{120}{\text{polos}} f_e \quad (119)$$

$$n_s = \frac{120}{4} 60\text{Hz}$$

$$n_s = 1800 \text{ rpm}$$

Se utilizará la ecuación 16 para encontrar la velocidad de giro del rotor.

$$n = (1 - s)n_s$$

$$n = (1 - 0,0105) 1800 \text{ rpm}$$

$$n = 1781 \text{ rpm}$$

Si aplicamos el porcentaje de aumento que nos proporciona la tabla 9 obtenemos el siguiente valor.

Se tiene que la velocidad del rotor es de 155,43 rad/s, transformado a revoluciones por minuto se tiene una velocidad de 1484 rpm. La tabla 9 indica que la velocidad de giro del rotor tiene un aumento del 20 %. Si aplica dicho porcentaje a la velocidad de giro se tiene que la nueva

velocidad es de 1780,8 rpm. De esta forma se puede observar que la tabla 9 ofrece datos muy exactos y verídicos.

***Par nominal utilizando una frecuencia de 60 Hz***

El valor de par nominal es de 946 Nm. De acuerdo a la tabla 9 el par nominal se reduce en un 17 %. Aplicando dicho porcentaje el par nominal el cual en este caso utiliza una frecuencia de 60 Hz es igual a 785,18 Nm



## Resultados

### Motor de inducción con rotor jaula de ardilla.

A continuación en tabla 18 se presentan las dimensiones del estator, las ranuras y los conductores para un motor eléctrico de las siguientes características.

Una potencia de salida de 200CV (Caballos Vapor), una velocidad de giro del campo del estator de 1500 rpm (revoluciones por minuto), utilizando un frecuencia de red de 50 Hz (Hertz), 4 polos, 3 fases (motor trifásico), con un voltaje de entrada de 500 V y una corriente de 197 A (amperios).

Tabla 18

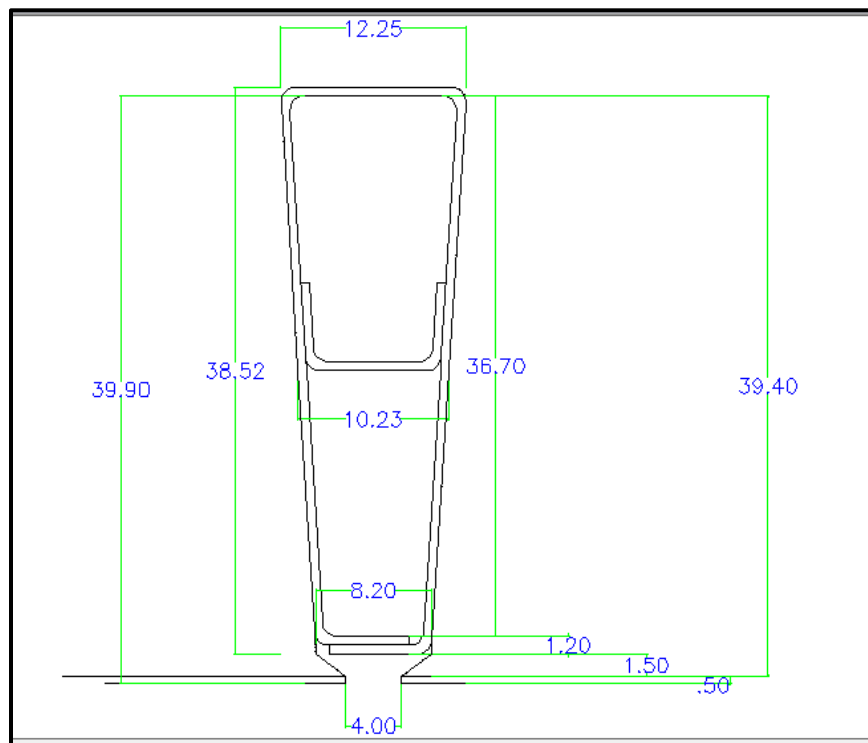
#### *Dimensiones del diseño estator*

<b>Estator</b>		
Diámetro interno	350 mm	Figura 26
Diámetro externo	529,5138 mm	
Longitud total	369 mm	Ecuación 13
Número de canales de ventilación	9	
Longitud de los canales de ventilación	10 mm	
Longitud neta de hierro	251,1 mm	Ecuación 26
<b>Ranura</b>		
Número	60	Tabla 11
Profundidad	38,52 mm	Figura 46
Ancho mínimo	8,20 mm	Ecuación 38
Ancho medio	10,23 mm	Ecuación 39
Ancho máximo	12,25 mm	Ecuación 40
Aislamiento	Clase E	Tabla 15
<b>Conductores</b>		
Por ranura	5	Ecuación 18
Hilos	7	
Número de vías en paralelo	4	
Número total de hilos conductores por ranura	140	Ecuación 45
Sección del hilo con aislante	2,07 mm <sup>2</sup>	Ecuación 44
Sección total	49,56 mm <sup>2</sup>	Ecuación 31
Longitud media	809 mm	Ecuación 58
Resistencia por fase a 75 °C	0,03 Ω	Ecuación 62

Como se puede apreciar en la tabla 18, se tiene un estator corto, debido a que su diámetro es superior a 100 mm este debe estar provisto por canales de ventilación a lo largo de todo el

estator. De acuerdo a las reglas provistas por el libro guía y las recomendaciones de Tesla Motors, se optó por un motor con 60 ranuras en el estator, los cables de conducción y las ranuras se encuentran separadas por un aislante de clase E. Cada conductor esta provisto por 7 finos hilos conductores, teniendo un total de 140 hilos por ranura.

En la Figura 46 está representado el resultado del diseño de ranura del estator que tiene este motor con sus respectivas dimensiones.



*Figura 46.* Diseño de ranura de estator definitivo

Las dimensiones de la ranura del estator son pequeñas debido a la gran cantidad de ranuras que posee. En el caso de disminuir la cantidad de ranuras estatóricas se podrá aumentar de manera significativa el tamaño de las mismas. Las dimensiones de ranura de la figura 32 guía utilizada para el diseño, fue elaborada para un número menor de ranuras por lo cual las

dimensiones de longitud y diámetro del estator se ven reducidas de igual manera, por este motivo las dimensiones obtenidas son similares.

A continuación en la tabla 19 se presentan las dimensiones del rotor, las ranuras y los conductores para un motor eléctrico con las especificaciones mencionadas anteriormente.

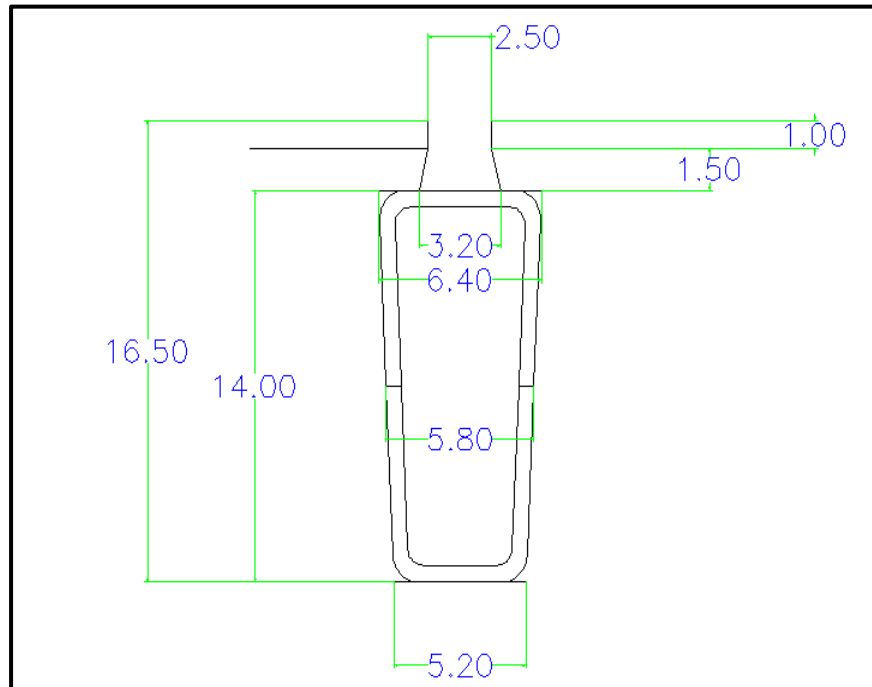
Tabla 19

*Dimensiones del diseño de rotor*

<b>Rotor</b>		
Diámetro exterior	348,4 mm	Ecuación 87 y Figura 47
Número canales de ventilación	9	
Longitud de los canales de ventilación	10 mm	
Ranura		
Número	72	Tabla 11
Profundidad	14 mm	Figura 47
Ancho mínimo	5,2 mm	Ecuación 93
Ancho medio	5,8 mm	Ecuación 93
Ancho máximo	6,4 mm	Ecuación 93
Conductor		
Por ranura	1	
Longitud	392 mm	Ecuación 98
Sección	74,3 mm <sup>2</sup>	Ecuación 85
Material	Cobre	
Anillo externo		
Sección	425,4 mm <sup>2</sup>	Ecuación 97
Material	Cobre	

Como se puede apreciar en la tabla 19, se tiene un rotor con un entrehierro de 0.8 mm, de acuerdo a las recomendaciones de Tesla Motors, este un óptimo entrehierro para motores grandes. Al igual que el estator, el rotor consta de canales de ventilación los cuales ayudan a la refrigeración, evitando calores excesivos y protegiendo los elementos que lo componen tal es el caso de los conductores. De acuerdo a las recomendaciones dadas por el libro guía se llegó a la conclusión de utilizar un número total de 72 ranuras de rotor. El rotor está compuesto por barras rígidas conductoras de cobre no por cables, las cuales se encuentran aseguradas y cortocircuitadas por anillos de cobre ubicados a los extremos del rotor.

En la Figura 47 está representado el resultado del diseño de ranura del rotor que tiene este motor con sus respectivas dimensiones.



*Figura 47. Diseño de ranura de rotor definitivo*

Las dimensiones de la ranura del rotor son pequeñas debido a la gran cantidad de ranuras que posee. En el caso de disminuir el número de ranuras rotóricas se podrá aumentar de manera significativa el tamaño de las mismas, pero deben seguirse las reglas para la definición del número de ranuras. Las dimensiones de ranura de la figura 33 utilizada para el diseño, fue elaborada para un número menor de ranuras por lo cual las dimensiones de longitud y diámetro del estator se ven reducidas de igual manera, por este motivo las dimensiones obtenidas son similares.

En la tabla 20 se presentan los principales valores obtenidos con el diseño realizado posteriormente.

Tabla 20

*Características del motor de inducción calculado*

<b>Estator y Rotor</b>		
Corriente en las barras del rotor	445,5 A	Ecuación 84
Corriente en los anillos extremos	2555,53 A	Ecuación 95
Corriente por fase	111,735 A	Ecuación 83
Rendimiento mecánico (supuesto)	0,98	
Potencia eléctrica del rotor	158 kW	Ecuación 82
F.e.m	471,35 V	Ecuación 79
Inducción teórica en los dientes del rotor y estator	1,9 T	
Inducción teórica en el núcleo	1,6 T	
Inducción teórica definitiva en los entrehierros lisos	0,7281 T	Figura 28 y Ecuación 18
Inducción teórica en el yugo	1,9 T	
Flujo magnético sinusoidal	0,047 Wb	Ecuación 20
Deslizamiento	1,05%	Ecuación 103
Entrehierro	0.8mm	Figura 36
Resistividad	$0,0217 \frac{\Omega * mm^2}{m}$	Ecuación Tabla 17
Deslizamiento de máximo par	8,36%	Ecuación 112
Número de veces que la potencia máxima supera la nominal	2,358	Ecuación 113
Número de veces que el par máximo supera al par nominal	2,51	Ecuación 110
Deslizamiento de máxima potencia	7,66%	Ecuación 115
Par nominal	946 Nm	Ecuación 118

Como se puede apreciar en la tabla 20, la corriente en los anillos del rotor es sumamente elevada, por lo cual se debe realizar una correcta elección del material y una refrigeración del motor, ya que una intensidad tan alta conlleva a una generación de calor igualmente elevada. Se debe tener en cuenta que el rendimiento mecánico es del rotor, al no tener la potencia de entrada al rotor este debe asumirse. La fuerza electromotriz generada en el motor es muy elevada, de

manera simplificada, la fem es la presión que necesitan los átomos para desplazarse por el conductor. Los deslizamientos cuando el par es máximo y cuando la potencia es máxima se encuentran entre los rangos recomendables por lo que no habría mayor inconveniente.

A continuación en la tabla 21 se presenta una ficha técnica del motor diseñado.

Tabla 21

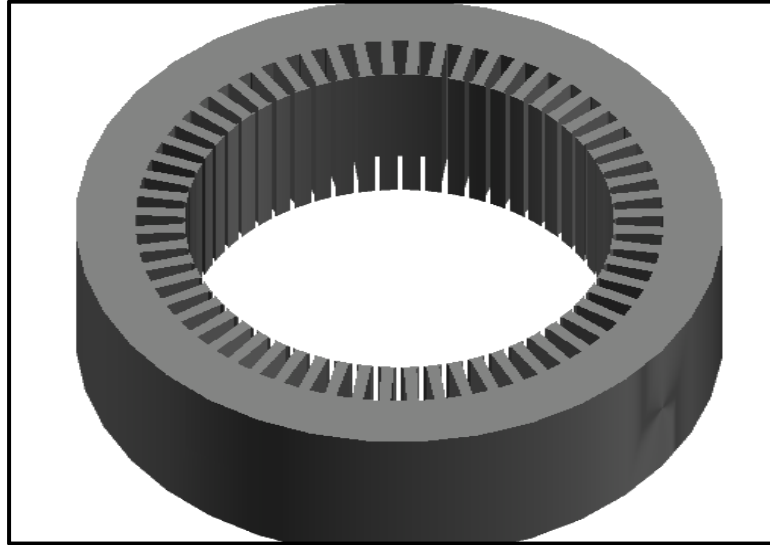
*Ficha técnica del motor eléctrico diseñado*

<b>Ficha Técnica</b>		
Potencia nominal	147 kW	Tabla 8
Potencia máxima	512 kW	Ecuación 113 y Tabla 8
Par nominal	946 Nm	Ecuación 118
Par máximo	2231 Nm	Ecuación 118 y Ecuación 110
Voltaje de trabajo	500 V	Tabla 8
Corriente de trabajo	197 A	Ecuación 3
Velocidad del motor	1500 rpm	Tabla 8
Frecuencia	50 Hz	Tabla 8
Peso aproximado	200 kg	
Clase de aislamiento	E	Tabla 15

Nota: La carcasa del motor es de lámina rolada, por este motivo el peso de este se reduce un gran porcentaje a comparación de un motor con una carcasa de fundición gris, el cual puede llegar a pesar 1000 kg con una potencia semejante al motor diseñado.

Como se puede observar en la tabla 21, la potencia máxima es la rapidez más alta a la que puede trabajar el motor, teniendo en cuenta que este valor solo puede ser utilizado por breves periodos de tiempo, ya que el uso prolongado de esta potencia pondría en riesgo los elementos y el motor en sí. El par máximo es la fuerza que producen los cuerpos en rotación, pero igual que la potencia máxima, este valor solo puede ser usado en breves periodos de tiempo. En todas las fichas técnicas utilizan la velocidad síncrona para definir la velocidad del motor, pero en realidad la velocidad que entrega el motor es que es provista por el rotor. La frecuencia es un fenómeno físico que se repita cíclicamente un número determinado de veces en el transcurso de un segundo.

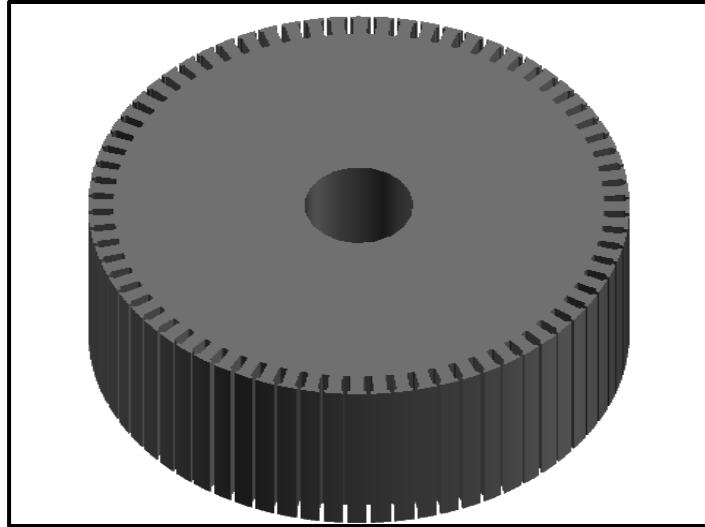
Se presenta a continuación en la Figura 48 el modelado en tercera dimensión del estator del motor eléctrico diseñado.



*Figura 48.* Estator 3D

En la figura 48 se observa un estator corto, formado de 60 ranuras, elaborado de láminas de acero apiladas una encima de la otra. En las ranuras del estator se ubican los aislamientos y los cables conductores, por donde circulará una corriente eléctrica suministrada por la batería. La relación de diámetro y longitud es baja en comparación a la que se debería tener, pudiendo tener problemas en trabajo a altas velocidades.

En la Figura 49 se muestra el diseño terminado del rotor en tercera dimensión del motor eléctrico diseñado.



*Figura 49. Rotor 3D*

En la figura 49 se observa un rotor formado por 72 ranuras, elaborado con láminas de acero apiladas una encima de la otra. En el centro se encuentra ubicado del eje del rotor, el cual transmite el movimiento hacia el exterior. En las ranuras van ubicadas los aislamientos y las barras, por donde circulará una corriente eléctrica.

A continuación se presenta en la tabla 22 datos técnicos del motor diseñado utilizando una frecuencia de 60 Hz.

Tabla 22

*Ficha técnica del motor eléctrico diseñado utilizando una frecuencia de 60 Hz*

<b>Ficha Técnica</b>		
Potencia nominal	147 kW	Tabla 8
Potencia máxima	512 kW	Ecuación 113 y Tabla 8
Par nominal	785,18 Nm	Ecuación 118 y Tabla 9
Par máximo	2010 Nm	Ecuación 118, Tabla 9 y Ecuación 110
Voltaje de trabajo	500 V	Tabla 8
Corriente de trabajo	197 A	Ecuación 3
Velocidad síncrona	1800 rpm	
Frecuencia	60 Hz	
Velocidad del rotor	1781 rpm	Ecuación 119
Peso aproximado	200 kg	
Clase de aislamiento	E	Tabla 15

Nota: La carcasa del motor es de lámina rollada, por este motivo el peso de este se reduce un gran porcentaje a comparación de un motor con una carcasa de fundición gris, el cual puede llegar a pesar 1000 kg con una potencia semejante al motor diseñado.



*Plataforma Digital*

Tabla 23

*Dimensiones de la ranura del estator*

Variables	Datos	Valores	Unidades
D;h $\delta$ ;l;hv1	Do	354	mm
Do;h	Dm	392.5	mm
Dm;h	DM	431	mm
$\tau_0$ ;to	ao	8,213	mm
$\tau_m$ ;to	am	10,229	mm
$\tau_M$ ;to	aM	12,245	mm
DM;Do	h	38,5	mm
h;e2;hv1	ht	39,4	mm
ht;h $\delta$ l	hw	39,9	mm

Nota: Algunas variables no se encuentran en el texto debido a que estas fueron utilizadas en el programa.

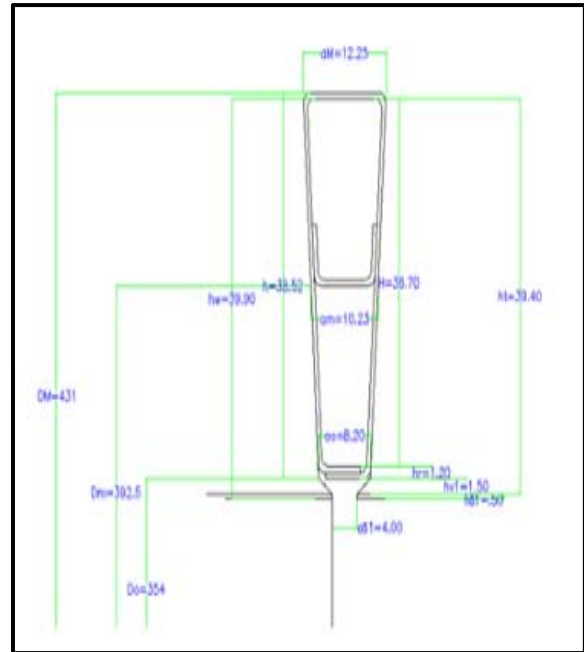


Figura 50. Ranura diseñada con sus respectivas dimensiones.

Al obtener los datos de la tabla 23 se utilizó un programa matemático el cual permite resolver, analizar y compartir cálculos de ingeniería llamado Mathcad. Este programa define constantes y variables, para el diseño solo se necesita variables, ya que modificando los datos principales se logra llegar a distintos resultados tomando en cuenta que deben emplearse las figuras y tablas explicadas en el programa y en este documento. Para definir las variables se debe utilizar los dos puntos a continuación agregar el valor. Al iniciar el programa debemos ubicarnos en la parte inferior derecha, para a continuación elegir la opción de visualización Draft view, de esta manera se observarán las tablas y figuras situadas a lado derecho en la sección de trazado definitivo de ranuras.

### Discusión

El problema medio ambiental ocasionado por los motores de combustión empeora con el pasar de los años, por lo cual es necesario un cambio en la forma en como los vehículos son impulsados. Una de las mejores opciones es el uso de motores completamente eléctricos.

Se han estudiado diversos tipos de motores eléctricos y se ha determinado que el motor de inducción con rotor jaula de ardilla es el más adecuado para un proceso de construcción, ya que los materiales y maneras de elaboración son menos complejas y costosas con relación a otros motores, ofreciendo un alto desempeño. Como se puede apreciar en los resultados obtenidos en el Par motor y Potencia, los motores eléctricos son más que capaces de ofrecer un alto desempeño y rendimiento sin dañar el medio ambiente.

En lo que se refiere a cálculos lo que más sorprendió fue el resultado de Par máximo, ya que este sobrepasa por mucho al que indica Tesla en su modelo S. Una posible explicación de este resultado es que Tesla utiliza como Par máximo el Par nominal, ya que este valor es mucho más cercano al valor obtenido en el diseño. Esto puede deberse a que el valor de Par máximo calculado es teniendo en cuenta que la máquina operaría por un tiempo no muy prolongado para después averiarse, ya sea por recalentamiento de los elementos eléctricos o rompimiento de los elementos mecánicos siendo este el eje del rotor.

Se sugiere una relación entre el diámetro del estator y su longitud de 1,5:1, en el diseño se obtuvo una relación de 0,9485:1, lo que conlleva a no disminuir en su gran parte las pérdidas en el cobre, sino que también no se logra la máxima eficiencia en cuestiones de utilización de ranura para los conductores.

Otra desventaja al tener un aumento axial y una disminución radial, son las capacidades operacionales a altas velocidades y el aumento de vibraciones del motor eléctrico, pero, al no ser tan grandes las diferencias geométricas del estator, el motor eléctrico no se verá tan afectado por esos efectos.

La altura de yugo del estator debe estar entre el 30 % y el 70 % más grande que la longitud de los dientes. En el diseño propuesto se obtuvo una relación entre la altura del yugo del estator y sus dientes del 17 %, lo que conlleva a una disminución en los niveles de saturación magnética en el yugo y en los dientes del estator.

La altura de yugo del rotor debe estar entre el 30 % y el 70 % más grande que la longitud de los dientes. En el diseño propuesto se obtuvo una relación entre la altura del yugo del rotor y sus dientes del 72 %, con este resultado se puede decir que se mejoró los niveles de saturación magnética en el yugo y en los dientes del rotor.

La relación de altura de yugo del estator con la anchura de los dientes del mismo debe ser de alrededor de 5:1 o más, pero en modelos convencionales esta relación puede ser menor. En el diseño propuesto la relación entre la altura del yugo del estator y la anchura de los dientes es de 4,775:1, lo cual está cercano al valor recomendado, por lo que se puede decir que los niveles de densidad magnética en dichos elementos son cercanos a los adecuados.

La relación de altura de yugo del rotor con la anchura de los dientes del mismo debe ser de alrededor de 5:1 o más, pero en modelos convencionales esta relación puede ser menor. La relación entre el yugo del rotor y la anchura de los dientes del mismo que se obtuvo con el diseño es de 6,8:1, lo que conlleva a una mejora en los niveles de densidad magnética en el estator como en el rotor.

La relación de longitud de diente en el estator debe ser de 4 a 6 veces la anchura del diente del estator. En el diseño se obtuvo una relación en longitud de dientes del estator y la anchura de los dientes de 3,92:1, lo que significa que puede mejorarse la utilización del espacio de ranura.

La relación de longitud de diente en el estator debe ser de 4 a 6 veces la anchura del diente del estator. En el diseño se obtuvo una relación en longitud de dientes del rotor y la anchura de los dientes de 1,92:1, lo que significa que la utilización del espacio de ranura en el rotor es baja.

La relación entre la anchura de los dientes del estator y del rotor es de 1,1:1 o 1,2:1. La relación que se obtuvo en el diseño para la anchura de los dientes del estator y del rotor es de 1,2:1, lo que sugiere una buena selección de datos para el diseño de ranura y dientes en el estator y rotor.

## Conclusiones

Se toma en cuenta que para el diseño se utilizó un motor de gran potencia, por lo cual los datos obtenidos tanto de demanda como de entrega de la máquina son elevados y los materiales empleados en la construcción deben ser los mejores en caso de llevarse a cabo.

Los diseños de motores de Tesla si bien varían en ciertos elementos de construcción, disminuyendo el peso o logrando una mejor transferencia de calor hacia el medio ambiente, no son muy diferentes de los motores tradicionales, por ende, el excelente desempeño de los vehículos Tesla no se debe simplemente a su motor eléctrico.

Utilizando el número de ranuras en el estator y un número recomendado para las ranuras del rotor en el diseño de los motores de Tesla Motors se llegaron a valores muy cercanos con respecto a la intensidad de flujo magnético o inducción tanto en los dientes del rotor como en el entrehierro.

Se realizó un rediseño en cuestiones de dimensionamiento de la longitud y el diámetro del estator utilizando las relaciones que se sugieren para comprobar de qué forma pueden variar los datos con los valores obtenidos.

Las relaciones que se obtuvieron en comparación con las sugeridas, si bien no son iguales tienen valores muy cercanos por lo que en términos generales el diseño obtenido cumple con la mayoría de requisitos.

## **Recomendaciones**

Se debe ser sumamente cuidadoso al momento de realizar los cálculos, ya que al tener tantos datos variables, algunos de ellos son de una extrema sensibilidad para el diseño.

Se recomienda que se ha haga un rediseño del motor de inducción tomando datos más cercanos a la realidad del país, ya que la potencia elegida es para un vehículo que va a circular a altas velocidades y como este proyecto no es aplicable para camiones o vehículos pesados es demasiado elevado el par motor obtenido.

Si se decide aplicar el proyecto es aconsejable buscar una asesoría acerca de la fabricación de los mismos, ya que los datos obtenidos en el diseño de las ranuras, si es verdad que estos son muy cercanos a la realidad pueden variar al momento de la elaboración.

Debido a que el proyecto se vio enfocado solo al análisis de motores, en especial los de los automóviles Tesla, quedó una gran duda acerca del porque estos vehículos eléctricos son más eficientes que otros, es recomendable un análisis a profundidad de sus otras partes que lo componen como puede ser su fuente de energía o batería.

### Bibliografía

Aguillera, N. (2011). *Google Books*. Obtenido de Mantenimiento de Instalaciones Solares

Fotovoltaicas :

<https://books.google.com.ec/books?id=qCj5bWrKCEYC&pg=PA128&lpg=PA128&dq=que+son+las+caidas+ohmicas&source=bl&ots=ZLaOgXggbT&sig=kC4ibu3f6S0MzJ4w0G2ThSObofY&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjldXD2KHQAhXJIcAKHZ-NASEQ6AEIQjAH#v=onepage&q=que%20son%20las%20caidas%20>

Alonso, M; Buyolo, F; Catellá, S. (2011). *El Vehículo Eléctrico*. Barcelona: Libbooks.

Alvarado, I. (09 de Diciembre de 2009). Obtenido de Diseño y Construcción De Un Vehículo

Eléctrico Con Variador De Velocidad Mediante Un Convertidor CD-CD:

[http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/10990.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/10990.pdf)

*arpem*. (s.f.). Obtenido de Ficha Técnica Tesla Roadster Sport 2.5:

<http://www.arpem.com/coches/coches/tesla/tesla-roadster/modelos-09/tesla-roadster-288-sport.html>

*arpem*. (2012). Obtenido de Ficha Técnica Mitsubishi i-MiEV:

<http://www.arpem.com/coches/coches/mitsubishi/i-miev/modelos-11/mitsubishi-i-miev-67.html>

Arsuaga, P. (2010). *Vehículos eléctricos y redes para su recarga*. Madrid: RA-MA.

Bukowski, A. (15 de Octubre de 2015). *SlideShare*. Obtenido de

<http://es.slideshare.net/ArelyBukowski/densidad-de-flujo-magntico>

Chuncusig, D. (Noviembre de 2014). Análisis Técnico-Económico para la Inserción de Vehículos Eléctricos en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano. Quito, Pichincha, Ecuador.

Corrales, J. (1976). *Cálculo Industrial De Máquinas Eléctricas Tomo I*. Barcelona: Publicaciones Reunidas, S.A.

Corrales, J. (1976). *Cálculo Industrial De Máquinas Eléctricas Tomo II*. Barcelona: Publicaciones Reunidas, S.A.

EcuRed. (20 de Febrero de 2014). Obtenido de [https://www.ecured.cu/Reactancia\\_el%C3%A9ctrica](https://www.ecured.cu/Reactancia_el%C3%A9ctrica)

Fitzgerald,A; Kingsley,C; Umans,S. (2004). *Máquinas Eléctricas*. México: McGraw-Hill.

Fravedsa. (2 de Septiembre de 2014). *Ingeniería Eléctrica*. Obtenido de <http://ingenieriaelectricafravedsa.blogspot.com/2014/09/factor-devanado.html>

Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2009). *Guía del vehículo eléctrico*. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A.

Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2015). *Guía del vehículo eléctrico*. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A. Obtenido de Guía del vehículo eléctrico II: <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-del-Vehiculo-Elctrico-II-fenercom-2015.pdf>

Garcia, J. (Septiembre de 2015). *Así Funciona*. Obtenido de Qué es la fuerza electromotriz?: [http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke\\_fem/ke\\_fem\\_1.htm](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_fem/ke_fem_1.htm)

Gijs, M. (2004). *The electric vehicle : technology and expectations in the automobile age*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press.



Godoy, W. (2012). *Máquina de Inducción*. Lima.

Grupo WEG . (20 de Abril de 2010). *www.weg.net*. Obtenido de Motores Eléctricos-Guía de especificación: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacion-50039910-manual-espanol.pdf>

Larminie, J., & Lowry, J. (2003). *Electric Vehicle Technology*. Chichester: Jhon Wiley & Sons, Ltd.

Laskaris, K.; Baglino, A.; Furey, C.; Nelson, D. (07 de Mayo de 2015). *Patentdocs*. Obtenido de Flux Shield for Electric Motor: <http://www.patentsencyclopedia.com/app/20150123511>

Lyons, D.; Tesla Motors, Inc.; Straubel, J. (21 de Marzo de 2013). *Patentdocs*. Obtenido de Rotor Design for an Electric Motor: <http://www.patentsencyclopedia.com/app/20130069476>

Motors, T. (2016). *Tesla Motors*. Obtenido de Model S: <https://www.teslamotors.com/models>

Nishimura, S.; Inoue, M.; Hazeyama, M.; Kuroda, Y. (25 de Octubre de 2012). *Patentdocs*. Obtenido de Embedded Permanent Magnet Electric Motor: <http://www.patentsencyclopedia.com/app/20120267975>

Rodriguez, M. (2008). *Máquinas Asíncronas*. Cantabria.

Rodriguez, M. (21 de 09 de 2010). *Universidad de Cantabria*. Obtenido de Constitución De Las Máquinas Eléctricas : <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/constitucion%20maq%20elec.pdf>

Rodríguez, M. (27 de Enero de 2010). *Universidad de Cantabria*. Obtenido de Constitución de las Máquinas Eléctricas: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>

- Rodriguez, M. (2011). *Universidad de Cantabria*. Obtenido de Campos Magnéticos de Dispersión: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>
- Santini, D. (06 de Septiembre de 2011). Obtenido de intechopen: <http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-the-benefits-and-barriers/plug-in-electric-vehicles-a-century-later-historical-lessons-on-what-is-different-what-is-not>
- Santos, D. (24 de Marzo de 2014). *Universidad Carlos III de Madrid*. Obtenido de Máquinas Eléctricas de Corriente Alterna. Máquina Asíncrona.: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/maquinas-electricas-de-corriente-alterna/material-de-clase-1/capitulo-ii-maquina-asincrona>
- Tang, Y. (18 de Agosto de 2011). *Patentdocs*. Obtenido de Induction Motor Lamination Design: <http://www.patentsencyclopedia.com/app/20110198962>
- Torres, D. (2015). Estudio de viabilidad en la implementación de vehículos eléctricos en la ciudad de Cuenca. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Universidad del Atlántico; Universidad Autónoma de Occidente; Msc. Omar Prias Caicedo. (24 de Enero de 2014). Obtenido de Eficiencia Energética en Motores Eléctricos.
- Vallejo, E. (12 de Diciembre de 1977). Obtenido de Cálculo y Diseño de un Motor de Inducción Jaula de Ardilla: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6177>
- Vallejo, E. (Diciembre de 1977). Obtenido de Cálculo y Diseño de un Motor de Inducción con Rotor Jaula de Ardilla.
- Viakon. (10 de Marzo de 2012). *Viakon*. Obtenido de <http://www.viakon.com/>
- Viloria, J. (1989). *Neumática, Hidráulica y Electricidad Aplicada*. Madrid: Paraninfo.

Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y Sistemas de potencia*. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación.