



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA-DISEÑO MECÁNICO

Diseño de Motor Eléctrico para Taxi de Tracción Delantera que operará en CDMX.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ALFONSO ARRIAGA VIGIL.

Tutor :
Dr. Marcelo López Parra
Unidad de Alta Tecnología, Facultad de Ingeniería.

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, septiembre 2019.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ramírez Reivich Alejandro C.

Secretario: Dr. Dorador González Jesús Manuel

Vocal: Dr. López Parra Marcelo

1^{er.} Suplente: Dr. Rocha Cózatl Edmundo Gabriel

2^{d o.} Suplente: Dr. Romo Fuentes Carlos

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Unidad de Alta Tecnología, FI, UNAM, Juriquilla

TUTOR DE TESIS:

Dr Marcelo López Parra.

FIRMA

Diseño de Motor Eléctrico para Taxi de Tracción Delantera que operará en CDMX.

Alfonso Arriaga Vigil

19 de agosto de 2019

Índice general

1. Introducción.	15
1.1. Motores eléctricos para aplicaciones de tracción.	16
1.1.1. Requerimientos especiales de los motores eléctricos de tracción.	17
1.1.2. Metodologías de diseño y análisis de los motores eléctricos de tracción.	18
1.2. Objetivos.	19
1.2.1. Objetivo general.	19
1.2.2. Objetivo particular.	19
1.3. Descripción de la aplicación: taxi eléctrico en CDMX.	20
2. Vehículos Eléctricos.	21
2.1. Tipos de vehículos electrificados.	21
2.1.1. Vehículos híbridos.	22
2.1.1.1. Tren motriz híbrido en serie.	23
2.1.1.2. Tren motriz híbrido en paralelo.	23
2.1.1.3. Tren Motriz híbrido en serie-paralelo	23
2.1.2. Vehículos eléctricos.	25
2.1.2.1. Vehículos eléctricos de baterías.	26
2.1.2.2. Vehículos eléctricos con celdas de combustible.	26
2.2. Panorama actual de los vehículos eléctricos.	27

2.3. Breve historia de los vehículos eléctricos.	28
2.3.1. Las primeras compañías líderes en vehículos eléctricos.	29
2.3.2. Los vehículos eléctricos de las grandes empresas.	32
2.3.2.1. General Motors Company.	32
2.3.2.2. Nissan	34
2.3.2.3. Toyota	36
2.3.2.4. Ford Motor Company	38
2.3.2.5. Peugeot	38
2.3.2.6. Renault	39
2.3.2.7. BMW	39
2.3.2.8. Tesla Motors.	39
2.4. Conclusiones del capítulo.	40
3. Teoría de los motores eléctricos	42
3.1. Conceptos de la teoría electromagnética.	42
3.1.1. Fuerza Eléctrica.	43
3.1.2. Campo eléctrico.	44
3.1.3. Potencial Eléctrico.	44
3.1.4. Corriente eléctrica y densidad de corriente.	45
3.1.5. Fuerza Magnética	45
3.1.6. Campo magnético.	45
3.1.7. Fuerza de Lorentz.	46
3.1.8. Flujo Magnético	46
3.1.9. La permitividad, permeabilidad y conductividad del medio.	47
3.2. Leyes de Maxwell.	47
3.2.1. Ley de Faraday.	48

3.2.2.	Ley de Ampere.	48
3.2.3.	Ley de Gauss para campos eléctricos.	49
3.2.4.	Ecuación de Gauss para campos magnéticos.	50
3.2.5.	Potencial vector.	50
3.3.	Definición de conceptos para los MET	51
3.3.1.	Curva par-velocidad.	51
3.3.2.	Par.	51
3.3.3.	Potencia.	54
3.3.4.	Velocidad	56
3.3.5.	Eficiencia	56
3.3.6.	Transformaciones en otros ejes.	57
3.3.7.	Valores unitarios.	58
3.4.	Campos magnéticos giratorios y devanados trifásicos.	58
3.4.1.	Devanados.	59
3.5.	Materiales usados en los motores eléctricos de tracción.	59
3.5.1.	Acero al silicio.	60
3.5.2.	Imanes permanentes.	61
3.5.3.	Aislantes.	63
3.6.	Pérdidas en los motores eléctricos.	64
3.6.1.	Pérdidas en los núcleos.	64
3.6.2.	Pérdidas por corrientes parásitas.	64
3.6.3.	Pérdidas térmicas.	64
3.7.	Procesos de ensamble y manufactura.	65
3.7.1.	Manufactura y ensamble de los núcleos laminados.	65
3.7.2.	Magnetización de los imanes	67
3.7.3.	Ensamble de la flecha	67

3.8. Análisis de Elemento Finito aplicado a máquinas eléctricas.	67
3.8.1. Ansys.	68
3.8.2. FEMM y Octave.	68
3.8.3. Simetría de los motores eléctricos.	68
3.8.4. Ecuaciones gobernantes.	69
3.8.4.1. Ecuaciones gobernantes en el análisis electromagnético.	69
3.8.4.2. Ecuaciones gobernantes en el análisis mecánico.	69
3.9. Conclusiones del Capítulo.	70
4. Motores usados en los vehículos eléctricos.	72
4.1. Motores síncronos de imanes permanentes.	72
4.1.1. Principio de funcionamiento.	73
4.1.2. Estado del arte de los MSIP para tracción.	73
4.1.2.1. Honda Accord 2005.	74
4.1.2.2. Toyota Prius 2004.	79
4.1.2.3. Nissan Leaf 2012.	85
4.1.2.4. BMW i3 2016.	88
4.1.2.5. Chevrolet Bolt EV 2018.	94
4.2. Motores de inducción.	96
4.2.1. Principio de funcionamiento.	98
4.2.2. Estado del arte de los MI para tracción.	98
4.2.2.1. GM EV1.	98
4.2.2.2. Tesla Model S.	99
4.3. Motores de reluctancia.	101
4.4. Motores de corriente directa.	101
4.5. Tendencia en el diseño de MET	102
4.6. Conclusiones del capítulo.	102

5. Metodología de diseño.	104
5.1. Descripción de la metodología.	104
5.1.1. Análisis de la aplicación.	104
5.1.2. Diseño electromagnético.	105
5.1.2.1. Diseño del circuito magnético	105
5.1.2.2. Optimización.	106
5.1.3. Diseño mecánico.	106
5.1.4. Ingeniería de detalle.	107
5.2. Diseño de dos prototipos.	107
5.2.1. Análisis de la aplicación.	107
5.2.1.1. Datos del vehículo.	107
5.2.1.2. Ciclo de manejo seleccionado.	109
5.2.2. Evaluación de distintas geometrías de circuitos magnéticos.	109
5.2.2.1. Cálculo de las cargas en el motor.	110
5.2.2.2. Eficiencia de ciclo de manejo.	113
5.2.3. Análisis sensitivo.	117
5.2.3.1. Variaciones Geométricas.	117
5.2.3.2. Variaciones de material.	119
5.2.4. Diseño Mecánico.	122
5.2.4.1. Diseño para ensamble y manufactura del estator.	122
5.2.4.2. Diseño para ensamble y manufactura del rotor.	124
5.2.4.3. Diseño del sistema de enfriamiento.	126
5.2.4.4. Diseño de la estructura.	128
5.2.4.5. Selección de los elementos comerciales	129
5.2.5. Simulaciones simultáneas.	130
5.3. Conclusiones del capítulo	131

6. Resultados y Conclusiones	132
6.1. Arreglo general del diseño final.	132
6.1.1. Desempeño esperado del motor.	134
6.2. Guías de diseño.	135
6.3. Trabajo a futuro.	139
6.3.1. Diseño del banco de pruebas.	139
6.3.2. Áreas de mejora en la metodología.	139
6.4. Conclusiones	140
 Apéndice	 142
Planos para fabricación y ensamble	142
Lista de materiales y costos	164
Memoria de cálculo de los ajustes y tolerancias	172
Código de los programas de Matlab-FEMM	174
Código para el análisis de la aplicación	174
Código para la prueba a rotor bloqueado	181
Código para la eficiencia de ciclo.	183

Índice de figuras

2.1. Niveles de electrificación de los vehículos.	22
2.2. Configuración en serie de tren motriz híbrido, modificado de (Ehsani et al., 2005).	24
2.3. Configuración en paralelo de tren motriz híbrido, modificado de (Ehsani et al., 2005).	24
2.4. Tren motriz híbrido-paralelo, modificado de (Ehsani et al., 2005)	25
2.5. Vehículos eléctricos en el mundo, modificado de IEA (2018)	27
2.6. Algunos de los modelos vendidos por la compañía de Riker.	30
2.7. Carteles de venta y Fotos de Riker	30
2.8. El Electrobat de Morris y Salom.	31
2.9. EV Columbia de Pope Manufacturing Company.	32
2.10. La Historia de los Vehículos Eléctricos de GM.	34
2.11. Vehículos eléctricos de Nissan.	37
3.1. Fuerza de Coulomb entre dos cargas estáticas.	43
3.2. Curva par-velocidad ideal de un MET.	51
3.3. Curva típica para imanes permanentes, densidad-intensidad de campo.	62
3.4. Elemento infinitesimal sometido a esfuerzos (Cornell, 2018)	70
4.1. Geometría del motor en Honda Accord 2005	76
4.2. Geometría parcial utilizada en la simulación.	76
4.3. Simulación de la prueba a rotor bloqueado, Accord 2005.	77

4.4. Corriente en la simulación de la prueba a rotor bloqueado del Accord.	78
4.5. Rizado en el par continuo del motor en el Honda Accord 2005.	78
4.6. Magnitud de la densidad de flujo magnético en Accord 2005.	79
4.7. Geometría interna del MSIP en Toyota Prius	80
4.8. Devanado del MSIP en el Toyota Prius 2004.	81
4.9. Análisis a rotor bloqueado para Toyota Prius 2004.	82
4.10. Corriente en la simulación de la prueba a rotor bloqueado en Prius.	83
4.11. Par continuo del MSIP del Toyota Prius 2004.	83
4.12. Dos geometrías parciales AEF.	84
4.13. Densidad de flujo en los valores nominales para Prius 2004.	84
4.14. Mapa de eficiencia del motor en Prius 2004.	85
4.15. Geometría interna del MSIP en Nissan LEAF 2012.	86
4.16. Geometría parcial del motor en Nissan Leaf.	86
4.17. Prueba a rotor bloqueado para motor en Nissan Leaf.	87
4.18. Corriente en la prueba a rotor bloqueado.	88
4.19. Rizado del par en el motor de Nissan Leaf 2012.	89
4.20. Variación del par promedio con respecto al ángulo de carga.	89
4.21. Densidad de flujo magnético en el motor del Nissan Leaf.	90
4.22. Mapa de eficiencia del motor en Nissan Leaf.	90
4.23. Geometría completa del motor en el modelo BMW i3 2016.	92
4.24. Geometría parcial del motor en BMW i3.	92
4.25. Prueba a rotor bloqueado para el motor en BMW i3.	93
4.26. Corriente en la prueba a rotor bloqueado. (a) datos de ORNL (b) simulación FEM	93
4.27. Rizado de par en el motor de BMW i3.	94
4.28. Densidad de flujo magnético, BMW i3.	94
4.29. Mapa de eficiencia para motor en BMW i3.	95

4.30. Tren motriz del modelo Bolt EV 2018.	95
4.31. Geometría del motor en Chevrolet Bolt EV 2018.	97
4.32. Configuración para análisis de elemento finito Bolt EV.	97
4.33. Tren motriz en el modelo GM EV1.	99
4.34. Geometría interna del motor en Tesla Model S.	100
4.35. Geometría parcial del motor en Model S para AEF.	100
5.1. Metodología general de diseño de MET.	105
5.2. Metodología específica para el diseño para construcción de dos prototipos.	108
5.3. Ciclo de manejo FTP.	109
5.4. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas en el vehículo (Emadi, 2014, Gillespie, 2000).	110
5.5. Cargas en el avance del vehículo en un camino sin pendiente.	112
5.6. Gráficas de la fuerza de tracción contra las cargas para los motores analizados	114
5.7. Gráficas de los puntos de operación del ciclo para cada uno de los motores	115
5.8. División de las cargas en seis zonas.	116
5.9. Análisis sensitivo de la geometría del puente de flujo.	118
5.10. Resultado del análisis sensitivo de la geometría del puente.	118
5.11. Ángulo entre los imanes del polo	119
5.12. Análisis sensitivo del ángulo entre imanes del polo.	120
5.13. Variaciones al labio del diente en el estator.	120
5.14. Resultados de la variación de la geometría del diente en el estator.	121
5.15. Análisis sensitivo del tipo de imanes permanentes.	121
5.16. Conceptos de unión del estator.	123
5.17. Posibles configuraciones para el ensamble estator-estructura.	124
5.18. Configuración para el diseño de la flecha.	125
5.19. Configuración del ensamble del rotor.	127

5.20. Configuración del sistema de enfriamiento.	128
5.21. Simulaciones realizadas en el diseño del motor.	130
5.22. Configuración para análisis de deformación.	131
6.1. Arreglo general del diseño final.	133
6.2. Arreglo general con vista de sección.	134
6.3. Valores de la amplitud para el voltaje (a) y corriente (b) trifásicos.	135
6.4. Valores de la potencia de entrada (a) y potencia de salida (b).	135
6.5. Mapa de pérdidas totales.	136
6.6. Deformación en los dientes del estator.	136

Índice de cuadros

4.1. Principales dimensiones del motor en Honda Accord 2005.	75
4.2. Error relativo en la prueba a rotor bloqueado.	77
4.3. Principales dimensiones del MSIP en Toyota Prius 2004.	80
4.4. Error relativo en la prueba a rotor bloqueado.	83
4.5. Principales dimensiones del motor en Nissan Leaf 2012.	87
4.6. Principales dimensiones del motor en BMW i3.	91
4.7. Principales dimensiones del motor en Chevrolet Bolt EV 2018.	96
5.1. Datos y dimensiones del vehículo propuesto.	109
5.2. Datos del tren motriz seleccionado para cada motor.	113
5.3. Eficiencias de ciclo para los motores analizados.	117
5.4. Características del sistema de enfriamiento en VE comerciales	128
6.1. Principales dimensiones del diseño final.	133
6.2. Características principales del diseño final.	134

Nomenclatura

ϵ	La permitividad eléctrica del medio, [F/m]
μ	Permeabilidad magnética del medio, (H/m)
Φ_L	Flujo magnético concatenado.
Φ_M	Flujo de magnetización.
ϑ_c	Ángulo de inclinación del vehículo
ρ_a 1.225 (Kg/m)	Densidad del aire en la Ciudad de México.
A (m ²)	Área frontal del vehículo.
A _{DE}	Ancho del diente del estator
A _{RE}	Ancho de la ranura del estator
AEF	Análisis de elemento finito.
B _{eh} (T)	Flujo magnético en el entrehierro
B _E (kG)	Campo magnético en el estator
B _r	Campo magnético en el rotor
C _D	Coefficiente aerodinámico del vehículo
C _e (A/m)	Carga eléctrica
D _{EE}	Diámetro externo del estator.
d _{eh} (m)	Diámetro del entrehierro
E _{CE}	Espesor de la culata del estator.

E_{CR}	Espesor de la culata del rotor.
F (N)	Fuerza
F_g (N)	Fuerza de la componente del peso en dirección del movimiento.
F_r (N)	Fuerza de resistencia al rodamiento.
F_t (N)	Fuerza de tracción total del vehículo.
F_V (N)	Fuerza de resistencia aerodinámica.
F_z (N)	Fuerza normal del camino sobre la rueda.
I_{RD} (Kg m ²)	Inercia rotacional total; caja de engranes y diferencial.
L_{DE}	Largo del diente del rotor.
L_{NE}	Largo del núcleo laminado del estator.
l_r	Carga eléctrica
m_v (kG)	Masa del vehículo
MCI	Motor de Combustión Interna
ME	Motor Eléctrico
MET	Motores eléctricos de tracción
MSIP	Motores síncronos de imanes permanentes.
MSR	Motores síncronos de reluctancia.
n	Velocidad del eje del motor (rpm).
n_0	Velocidad síncrona (rpm).
N_R	Relación de transmisión de la caja reductora de engranes.
\bar{N}_R	Relación de transmisión del diferencial.
P_{nt} (W)	Potencia nominal teórica.
q (C)	Carga eléctrica.
S	Desplazamiento.

T_M (Nm)	Par entregado por el motor.
v	velocidad, (m/s)
v (m/s)	Velocidad del vehículo.
v_v (m/s)	Velocidad del viento
VCI	Vehículo de combustión interna
VE	Vehículo Eléctrico
VEH	Vehículos eléctricos híbridos

Capítulo 1

Introducción.

En este proyecto se realizó el diseño detallado de un motor eléctrico que es capaz de impulsar un taxi en la Ciudad de México. En el transcurso del proyecto visitamos diversos congresos de electrificación para identificar las tendencias en la industria automotriz; nos acercamos a compañías automotrices emergentes para entender las necesidades y plantear un proyecto que pudiera tener impacto; obtuvimos asesoría del Prof Antonios Kladas de la NTUA, quien posee una amplia experiencia en el diseño de motores y fue el asesor durante el doctorado del jefe de diseño de motores de Tesla Motors y cubrimos diversos cursos técnicos para aprender el manejo de paquetes de diseño y análisis por computadora. La industria automotriz está sufriendo un cambio de paradigma hacia la electrificación de los vehículos. Después de utilizar por más de 100 años al motor de combustión interna como medio de tracción principal, los vehículos eléctricos se consideran como la opción para el transporte del futuro. En este cambio de paradigma se ha requerido de mucha innovación y desarrollo para el diseño de los componentes de los nuevos vehículos.

En el presente capítulo se muestran algunos datos en torno al diseño de motores eléctricos para vehículos, se describe cuáles son los principales requerimientos en el diseño de este tipo de motores y se establecen los objetivos y alcanzables del presente trabajo. En este capítulo se presentan datos e información que dejan ver claramente la gran oportunidad que existe en los motores eléctricos de tracción, que el diseño de estos motores es un reto muy importante y que se requiere de metodologías complejas para lograrlo.

En el capítulo 2 se muestra el marco teórico de los vehículos eléctricos, primero se describen los principales tipos y configuraciones de transporte electrificado, posteriormente se desarrolla una breve historia de los vehículos eléctricos, dicha sección deja claro que se han desarrollado este tipo de vehículos desde hace tiempo atrás y que nos encontramos en un tercer periodo de electrificación, que por lo demás parece ser el periodo de escalamiento comercial. Se finaliza este capítulo con un estudio de mercado de los vehículos comerciales de las grandes compañías automotrices.

En el capítulo 3 se cubre la teoría principal que nos permite diseñar motores eléctricos de tracción. En dicho capítulo se cubren tanto conceptos magnéticos como mecánicos y además se consideran aspectos de manufactura y ensamble. Se desarrolló el marco teórico tratando de describir, siempre que fuera posible, de una manera directa y simple cómo se aplica dicha teoría en el diseño práctico de motores.

En el capítulo 4 se realizó un estudio del estado del arte de los motores eléctricos de tracción. Se incluye el análisis de distintos motores eléctricos que han sido usados en los vehículos electrificados que han sido puestos en el mercado. Se analizaron muy detalladamente seis motores, los cuales han sido usados en los siguientes vehículos: Honda Accord 2005, Toyota Prius 2005, Nissan Leaf 2012, BMW i3 2016, Chevrolet Bolt 2018 y Tesla Model S. El análisis para cada uno de estos motores incluye, entre otras, gráficas de par y mapas de eficiencia. Para aquellos motores ampliamente documentados, los resultados de dichas simulaciones se comparan con los resultados de laboratorio.

En el capítulo 5 se muestra la metodología de diseño que se llevó a cabo para realizar este proyecto. Se establece que los mínimos aspectos que debe cumplir una metodología de diseño de motores eléctricos de tracción son: el análisis de la aplicación, la optimización de un diseño base y el empleo de métodos precisos efectivos de análisis y predicción. El análisis de la aplicación nos permite esclarecer los objetivos del diseño, la optimización garantizar que el motor propuesto es la mejor opción para la aplicación; los métodos de análisis y predicción son empleados, entre otras cosas, para reducir costos, en este caso se empleó análisis por elemento finito.

En el capítulo 6 se presentan el diseño final, se analizan cuáles deben de ser los trabajos para desarrollar en el futuro para continuar con esta línea de investigación. También se presenta una lista de guías de diseño para motores eléctricos de tracción. Por último, se exponen las conclusiones del proyecto. En el apéndice se puede encontrar diversa información detallada que resultaría poco práctico incluir en los capítulos, dicha información incluye código de programas utilizados para los cálculos y dibujos de ingeniería.

1.1. Motores eléctricos para aplicaciones de tracción.

Los motores eléctricos son usados en muchas aplicaciones, es uno de los sectores industriales con mayor crecimiento, aproximadamente el 45 % del consumo de energía eléctrica en el mundo se debe a la operación de motores eléctricos. Para el 2030 la energía a nivel mundial consumida por los motores eléctricos se estima en 13360 (TWh) por año (Tong, 2014). Por otro lado, la energía usada en la industria por los motores representa el 65 % del consumo, lo cual representa alrededor de 9 mil millones de dólares. Además, se proyecta que para 2023 habrá una necesidad de 147.7 millones de motores eléctricos sólo para aplicaciones de tracción (Emadi, 2014).

El diseño de los motores eléctricos de tracción (MET) es particularmente más complejo que el diseño de otros tipos de motores eléctricos (Yilmaz, 2015). Los motores eléctricos convencionales, operan en estado permanente y no presentan

requerimientos dinámicos (Tang, 2010), mientras que los MET tienen requerimientos muy específicos resultado de la aplicación que desempeñan.

El primer aspecto por considerar en el diseño y selección de MET es el tipo de aplicación, los medios de transporte que pueden ser electrificados incluyen bicicletas, motocicletas, vehículos de pasajeros, autobuses, vehículos de reparto, camiones de carga, etc. Cada una de estas aplicaciones demandará cargas diferentes dependiendo de las condiciones de manejo en las que opere.

La integración exitosa de los MET en los nuevos vehículos eléctricos (VE) y vehículos eléctricos híbridos (VEH), requiere cubrir diferentes especificaciones en términos de volumen, peso, altas temperaturas de operación, desempeño, confiabilidad y costo. Las mejoras en los sistemas de tracción de los VE y VEH tienen un impacto positivo en la eficiencia general y rango por carga de batería (Yilmaz, 2015).

1.1.1. Requerimientos especiales de los motores eléctricos de tracción.

De acuerdo con Yilmaz (2015), los requerimientos especiales de los MET son:

- Una eficiencia alta en un rango amplio de velocidad y par: Los MET no operan en un solo punto óptimo.
- Densidad de par alta: Alto par a bajas velocidades para iniciar a mover el vehículo y para escalar caminos con pendientes.
- Densidad de potencia alta: Alta potencia a velocidades altas de crucero.
- Rango amplio de velocidades: las velocidades bajas para manejo en la ciudad y las velocidades más altas para el manejo en carreteras. Además, la velocidad máxima puede ser mucho más grande que la velocidad base a la cual el par nominal es entregado.
- Peso y volumen lo más bajos posible: Un motor ligero de gran potencia beneficia el consumo de la energía.
- Sometido a paros y arranques frecuentes.
- Respuesta dinámica rápida.
- Sometido a sobrecargas intermitentes frecuentes, comúnmente el doble del par nominal.
- Alta confiabilidad para operar en condiciones ambientales severas.
- Alta tolerancia a fallas y control robusto.
- El costo más bajo posible.

- Mantenimiento simple.
- Bajas pérdidas de par.
- Bajo ruido.
- Requerimientos bajos de enfriamiento: bajas pérdidas de cobre.
- Tecnología madura, integridad estructural y diseño modular.
- Ruido por interferencia electromagnética bajo y mínimo factor de distorsión por armónicos
- A prueba de agua, a prueba de polvo y resistente a impactos.
- Facilidad de ejecutar un debilitamiento del campo a altas velocidades: Cuando se efectúa un debilitamiento del campo en el motor aumenta la velocidad (Chapman, 2005). Con la técnica de debilitamiento de flujo en la zona de potencia constante la velocidad del motor es de 4 a 5 veces la velocidad base, lo cual es una característica deseada en las MET.

Sin embargo, en términos del diseño de máquinas eléctricas, algunos de estos requerimientos se contradicen. Un motor eléctrico con una potencia alta y un volumen pequeño presenta cargas eléctricas y magnéticas más grandes, lo que impacta negativamente a la eficiencia (Emadi, 2014). Algunos motores no cumplen con las demandas de par requeridas en el manejo debido a que se saturan en los picos de par, por otro lado, los motores que cumplen con las demandas de picos de par presentan una eficiencia menor (Tang, 2010).

1.1.2. Metodologías de diseño y análisis de los motores eléctricos de tracción.

Para realizar un análisis eficiente de los MET, se requiere modelar distintos fenómenos como la saturación de los materiales ferromagnéticos, corrientes de parásitas, e histéresis. Dichos fenómenos son difíciles de modelar, pero son requeridos para ejecutar un análisis preciso. Los métodos tradicionales para el análisis y diseño de los motores eléctricos se efectúan optimizando un solo punto de operación (Staton, 2016); estos métodos están basados en ecuaciones empíricas y reglas obtenidas de normas de diseño. Sin embargo, los MET no operan en un sólo un punto y muchas de las consideraciones en los métodos tradicionales de diseño de motores conllevan a resultados pocos precisos en la predicción del desempeño. Los MET de tracción deben ser diseñados y optimizados para un ciclo de manejo.

La optimización de los MET para un ciclo de manejo en específico requiere de un método rápido para analizar el desempeño electromagnético y térmico bajo las cargas generadas (Staton, 2016). El resultado de dicho análisis es el mapa de eficiencia del motor bajo el ciclo de manejo, para obtener el mapa de eficiencia durante la etapa de diseño,

en la que se tienen que analizar diversas opciones, es importante resolver el desempeño electromagnético realizando el mínimo de cálculos posibles e incluir el cálculo rápido, pero con precisión de las diferentes pérdidas en el motor.

El diseñador de máquinas eléctricas debe poseer conocimientos en distintas áreas, debe conocer cómo se afecta el rendimiento del motor cuando ciertos parámetros son modificados, debe optimizar el diseño de acuerdo con los puntos de operación y desempeño deseado y debe seleccionar los materiales más adecuados y el diseño mecánico que garantice la integridad estructural, confiabilidad y vida útil (Emadi, 2014).

Si se consideran algunos de los casos de motores de tracción en los VE comerciales, podemos observar que la evolución en el desempeño ha sido considerable. El resultado de dicha mejora se debe a la aplicación de métodos de análisis y diseño que cubren los requisitos antes mencionados. También se han publicado diversos artículos donde se proponen técnicas diseño y análisis. Se requiere entrenar a ingenieros en este campo para contar con los expertos especializados que demandará la industria; por lo anterior es importante proponer una metodología para el diseño de motores.

1.2. Objetivos.

Con este proyecto se busca iniciar una línea de investigación en el diseño y desarrollo de tren motrices eléctricos en el laboratorio de Ingeniería Automotriz de la la Unidad de Alta Tecnología. Se espera que el presente trabajo funcione como documentación introductoria a aquellos participantes en proyectos similares. Además, se espera que con el desarrollo de la ingeniería detallada presentada se pueda buscar recurso económico para la construcción de dos prototipos. Dichos objetivos se plantean de forma detallada a través de los siguientes objetivos generales y objetivos particulares.

1.2.1. Objetivo general.

En este trabajo se busca realizar el diseño detallado de un prototipo a de motor eléctrico de tracción que pueda ser utilizado para impulsar un taxi eléctrico que circularía en Ciudad de México. Los alcanzables del diseño detallado son:

- Dibujos mecánicos para construcción y ensamble y diagramas eléctricos.
- Lista de materiales y componentes con el presupuesto para construcción.
- Simulaciones de ingeniería asistida por computadora para predecir el desempeño del motor.

1.2.2. Objetivo particular.

Para lograr el objetivo general descrito en la sección previa, se cubrirán los siguientes objetivos particulares.

- Realizar un estudio del estado del arte y un estudio de mercado de los diferentes MET.
- Determinar cuáles de los requerimientos especiales de los MET son prioritarios para la aplicación.
- Realizar el análisis conjunto de los fenómenos electromecánicos, térmicos y mecánicos.
- Incluir el fenómeno no lineal de saturación del material, las pérdidas en los núcleos y pérdidas resistivas.

1.3. Descripción de la aplicación: taxi eléctrico en CDMX.

Ciudad de México presenta problemas grandes en temas de contaminación del aire. El 18 % de la emisión de gases de efecto invernadero y el 76 % de la contaminación del aire son causados por el transporte. Al año, 4000 muertes relacionan con la contaminación del aire.

Existe un debate fuerte sobre el impacto que los VE tendrán sobre los problemas de contaminación. Por un lado, algunos análisis muestran los efectos negativos debido al incremento en la demanda de energía eléctrica, lo cual representa un mayor consumo de combustibles fósiles en las plantas termoeléctricas y posibles problemas con las redes de suministro actuales. Sin embargo, si se consideran a los VE como una herramienta que forma parte de una solución más compleja, no cabe duda que esta tecnología es la única capaz de integrarse a cualquier red de producción y consumo sustentable.

En la Ciudad de México existe un servicio de taxis eléctricos que opera desde el año 2011. Por otro lado, diversas normativas de la ciudad buscan realizar el cambio de unidades que han cumplido su vida útil por vehículos eléctricos o híbridos, cabe mencionar que se han realizado diversas propuestas por compañías privadas para la electrificación de toda la flota de taxis de la ciudad. Por otro lado, la CDMX forma parte de diversas asociaciones internacionales por lo que se ha fijado metas para abatir los problemas de contaminación por el uso de combustibles fósiles.

Capítulo 2

Vehículos Eléctricos.

Se define como vehículo eléctrico (VE) a aquel en el que la fuerza de tracción es proporcionada por un motor eléctrico (ME), en contraste con aquellos vehículos cuyo principal componente es el motor de combustión interna (MCI) . Los ME son diseñados para operar con eficiencias por encima del 90 %, lo cual representa un gran beneficio cuando se compara con la eficiencia promedio del 30 % de los MCI (Emadi, 2014). Además, cuando la energía eléctrica utilizada por un VE proviene de medios renovables, como la energía solar o eólica, las únicas emisiones de gases de efecto invernadero durante todo el ciclo de vida del VE, se relacionan con la manufactura, ensamble y transporte.

El tren motriz de los VE se compone por el motor eléctrico normalmente conectado a un reductor de engranes de una sola velocidad, aunque recientemente se ha propuesto el uso de cajas de velocidades, también podemos considerar como parte del tren motriz al controlador del motor y el sistema de almacenamiento de energía. El uso de motores eléctricos en los coches permite un gran número de configuraciones que se pueden lograr de una forma más flexible que en los VCI, por ejemplo, se puede fácilmente tener un motor para cada una de las cuatro llantas, se puede integrar el motor a la llanta como un sólo sistema e incluso se pueden combinar uno o varios motores eléctricos con un motor de combustión interna (vehículos híbridos).

2.1. Tipos de vehículos electrificados.

El nivel de electrificación de cualquier automóvil se define como el porcentaje de potencia eléctrica con respecto al total de la potencia en el vehículo, incluyendo aquellos sistemas que no son de tracción. Los vehículos se pueden clasificar de acuerdo a su nivel de electrificación, figura 2.1, en donde el 0 % representa los vehículos con ningún sistema eléctrico y el 100 % son aquellos vehículos que tienen solo sistemas eléctricos (Emadi, 2014), la mayoría de los vehículos convencionales modernos, poseen un nivel de electrificación al rededor del 5 %-10 %.

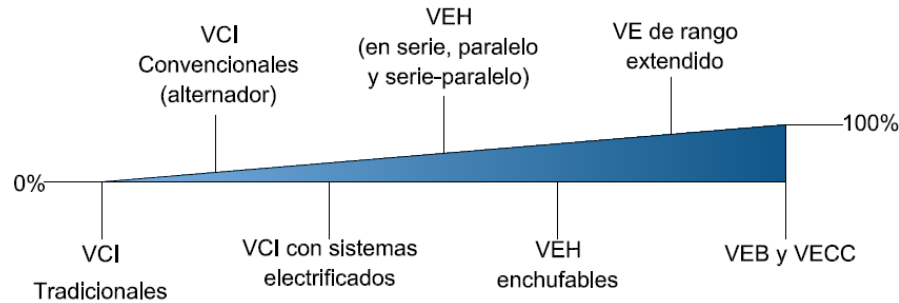


Figura 2.1: Niveles de electrificación de los vehículos.

En los VCI se pueden encontrar diversos sistemas eléctricos y electrónicos de sistemas auxiliares y de control que cumplen con distintos objetivos que van desde aumento de eficiencia hasta mayor confort para los pasajeros. Algunos ejemplos de los sistemas que se han electrificado en los VCI son: los sistemas de dirección asistidos por servomotores, suspensiones activas, sistemas de seguridad, sistemas de confort como seguros y espejos eléctricos, sistemas auxiliares de estacionamiento, entre muchos más. Dichos sistemas no se relacionan con la propulsión del vehículo, por lo que aportan poco al nivel de electrificación

Por otro lado, algunos tipos de vehículos con alto nivel de electrificación son los vehículos híbridos (VEH), los vehículos eléctricos a baterías (VEB) y los vehículos eléctricos con celdas de combustible de hidrógeno (VECC). Los VEH son considerados como tecnologías de transición hacia la electrificación total. En cuanto a los VEB, los modelos comerciales disponibles han aumentado considerablemente en los últimos años y debido a la simplicidad de su configuración representan una de las posibles opciones para en un corto y mediano plazo. Los (VECC) son otro de los posibles candidatos a dominar el mercado en los próximos 50 años.

2.1.1. Vehículos híbridos.

Se define como vehículo híbrido a aquel que posee dos sistemas diferentes de almacenamiento de energía y dos o más sistemas de conversión de energía, siendo uno de estos el principal y otro el secundario o auxiliar. En aquellos vehículos con un tren motriz eléctrico son llamados vehículos eléctricos híbridos (Ehsani et al., 2005). La arquitectura del tren motriz híbrido se refiere a la conexión de los diferentes componentes del tren motriz para determinar el flujo de energía. Existen tres configuraciones generales del tren motriz híbrido: en serie, en paralelo y serie-paralelo (Emadi, 2014). A continuación, se describen brevemente dichas configuraciones.

2.1.1.1. Tren motriz híbrido en serie.

En esta configuración el vehículo es impulsado por la acción del motor eléctrico de tracción, identificado como ME 2 en la figura 2.2. En el vehículo existen dos fuentes de almacenamiento de energía, el tanque de combustible y la batería eléctrica. Por medio del MCI y del generador eléctrico (ME 1) se puede generar energía eléctrica que se ocupa directamente para mover el vehículo o se puede almacenar en la batería eléctrica. La batería se puede recargar por medio de un cargador y una fuente de alimentación externa (en el caso de los VEH enchufables) o por medio del frenado regenerativo. La energía almacenada en la batería también se utiliza para mover el vehículo.

La energía eléctrica a la salida del MCI se envía al bus de potencia a través del rectificador, el sistema de gestión de energía determina si se utilizará para mover el vehículo o para recargar la batería. El controlador proporciona los niveles adecuados de potencia eléctrica al motor para cumplir con los requerimientos de carga.

La principal ventaja de esta configuración es que el MCI opera únicamente en una zona de alta eficiencia y bajas emisiones. Sin embargo, presenta la desventaja de llevar a cabo una doble conversión de energía por lo que disminuye la eficiencia general del vehículo por otro lado, la necesidad de contar con el generador agrega peso y costo al vehículo, además el motor de tracción debe ser dimensionado para cumplir con la máxima demanda de carga debido a que es la única fuente de tracción disponible en el tren motriz.

Comercialmente los vehículos que poseen esta configuración son conocidos como coches eléctricos de rango extendido, sobre todo en aquellos modelos en que el motor es totalmente eficiente para producir la energía que recarga a las baterías, pero es bastante pequeño comparado con otras configuraciones.

2.1.1.2. Tren motriz híbrido en paralelo.

En esta configuración el coche es impulsado tanto por el motor eléctrico como por el motor de combustión interna, dependiendo de las demandas el vehículo puede ser movido sólo por el motor eléctrico, sólo por el motor de combustión interna o una combinación de ambos. La potencia del MCI y del ME están acoplados mecánicamente, como se muestra en la figura 2.3.

El acoplamiento mecánico da origen a diversas configuraciones las cuales se diferencian principalmente porque unas se basan en la suma de los pares mientras que otras se basan en la suma de las velocidades de los motores.

2.1.1.3. Tren Motriz híbrido en serie-paralelo

Esta configuración incorpora dos máquinas eléctricas y un motor de combustión interna para la tracción. Los motores eléctricos son de potencia más baja que los usados en otras configuraciones y ambos pueden actuar como motor o como

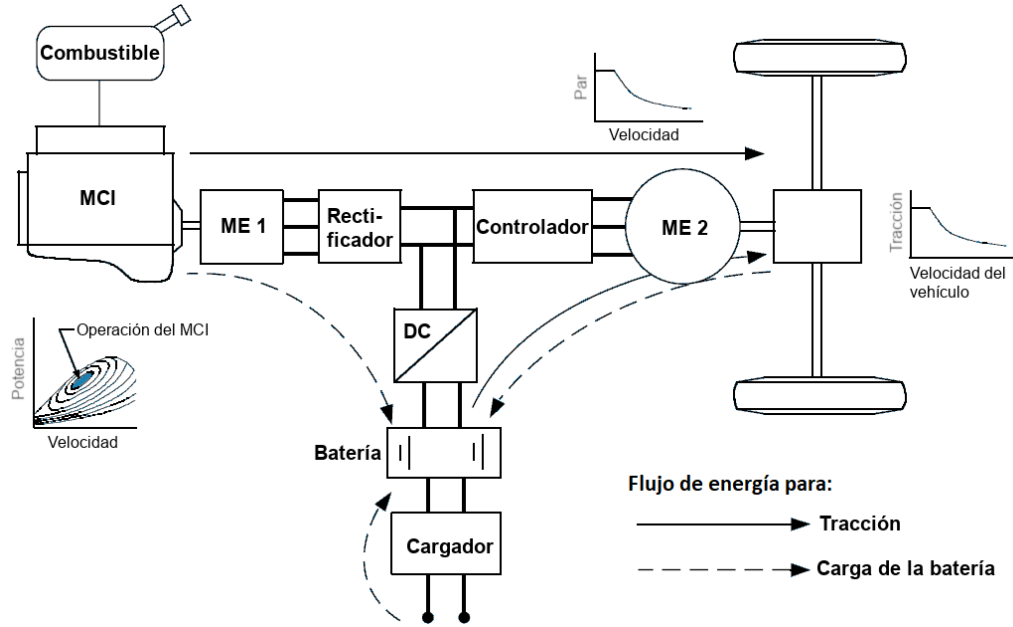


Figura 2.2: Configuración en serie de tren motriz híbrido, modificado de (Ehsani et al., 2005).

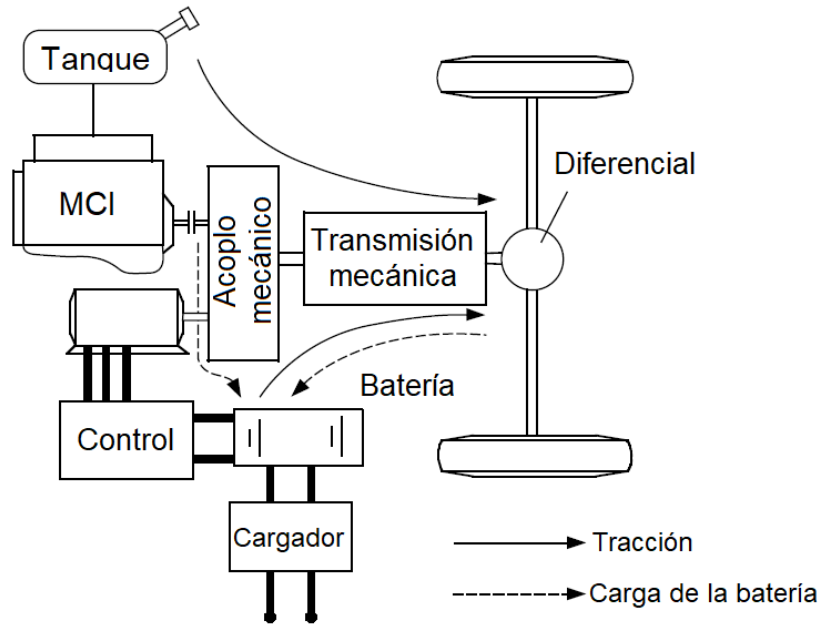


Figura 2.3: Configuración en paralelo de tren motriz híbrido, modificado de (Ehsani et al., 2005).

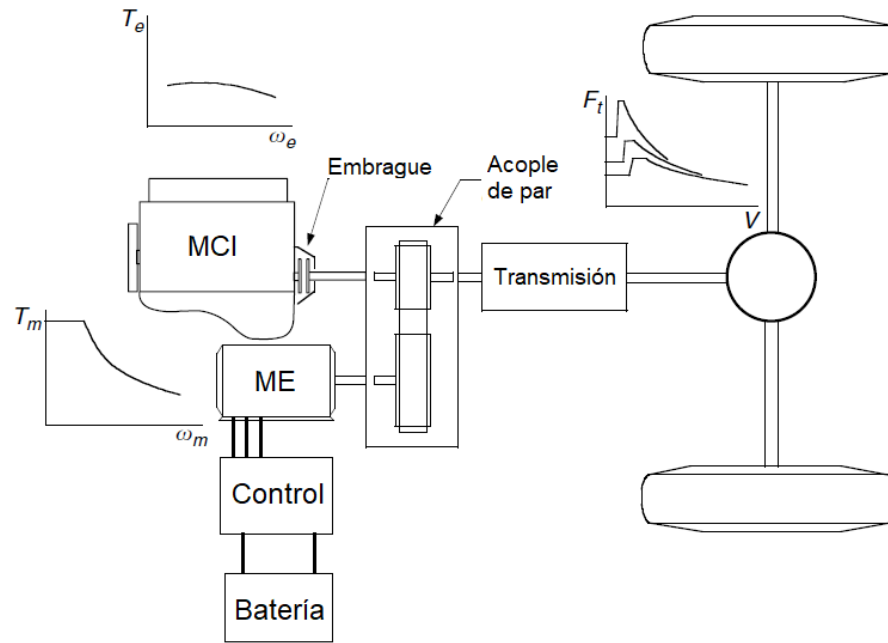


Figura 2.4: Tren motriz híbrido-paralelo, modificado de (Ehsani et al., 2005)

generador. Los dos ME y el MCI son conectados al eje por medio de un sistema de engranes planetarios, figura 2.4. La flexibilidad de este sistema de engranes permite tener una gran combinación de modos de operación en los que se combinan de distintas formas la potencia de los diferentes motores (Emadi, 2014).

Actualmente, las configuraciones más usadas en los vehículos híbridos son el tren en paralelo y el tren serie-paralelo. El tren motriz serie-paralelo consiste en dos motores eléctricos y un motor de combustión interna conectados por medio de un dispositivo de distribución de potencia, el cual consiste una serie de engranes planetarios que permiten realizar distintas configuraciones y funciones de transmisión y generación de energía.

2.1.2. Vehículos eléctricos.

Los vehículos eléctricos incluyen a los vehículos eléctricos de baterías (VEB) y a los vehículos eléctricos de celdas de combustible (VECC), entre otras configuraciones. El tren motriz de estos vehículos se compone de uno o varios motores eléctricos de tracción; elementos de transmisión de potencia que pueden ser reductores de engranes con una relación fija, cajas de velocidades, poleas y bandas o inclusive cadenas; los elementos de la electrónica de potencia como el controlador del motor y el inversor, y la batería como fuente de almacenamiento.

2.1.2.1. Vehículos eléctricos de baterías.

En los VEB, la energía que mueve al motor proviene de un banco de baterías que almacena energía eléctrica de una toma externa. Los componentes principales del tren motriz de este tipo de vehículos son, el motor eléctrico, una unidad electrónica de control, un banco de baterías, un sistema de gestión de baterías, un convertidor de potencia un inversor y un sistema de frenado regenerativo. El sistema electrónico de control adquiere las señales de los pedales del acelerador y del freno y utilizando las señales de retroalimentación adquiridas de los sensores del vehículo calcula las señales para controlar la potencia requerida por el motor.

Existen diversas configuraciones de los VEB, la más sencilla es aquella donde el MCI fue directamente reemplazado por el ME, conservando los demás elementos del tren motriz como el embrague la transmisión y el diferencial; sin embargo, debido a la gran flexibilidad que proporciona la electrificación la transmisión puede ser reemplazada por una caja de relación fija o inclusive, el diferencial, que permite a las llantas girar a diferentes velocidades durante las curvas, puede ser eliminado si se tiene una configuración de dos motores eléctricos. Se pueden obtener configuraciones que sean más sencillas, ligeras y eficientes.

Algunos de los tipos de baterías que se usan en estos vehículos son las baterías de plomo ácido, las baterías de níquel-cadmio y las baterías de iones de litio. Aunque este es un sistema simple existen diversos retos que enfrentan los VEB relacionados con el costo de las baterías, el volumen y peso, autonomía por carga, tiempo de recarga.

2.1.2.2. Vehículos eléctricos con celdas de combustible.

Este tipo de vehículos se componen de los mismos elementos que los VEB, excepto por el sistema de almacenamiento de energía, que en este caso reemplaza las baterías por una celda de combustible que produce electricidad a partir de hidrógeno y sin emitir contaminantes. Se estima que estos vehículos sean los más utilizados para

el año 2050 (Melaina and Eichman, 2015), debido a que se soluciona el problema del tiempo de recarga y rango de manejo que afrontan los VEB.

Sin embargo, antes de poder ser comercializados las celdas de combustible requieren un poco más de madurez tecnológica, principalmente para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables y en la seguridad del almacenamiento de hidrógeno en el vehículo. También se tendrá que invertir en la infraestructura necesaria para las estaciones de recarga de hidrógeno.

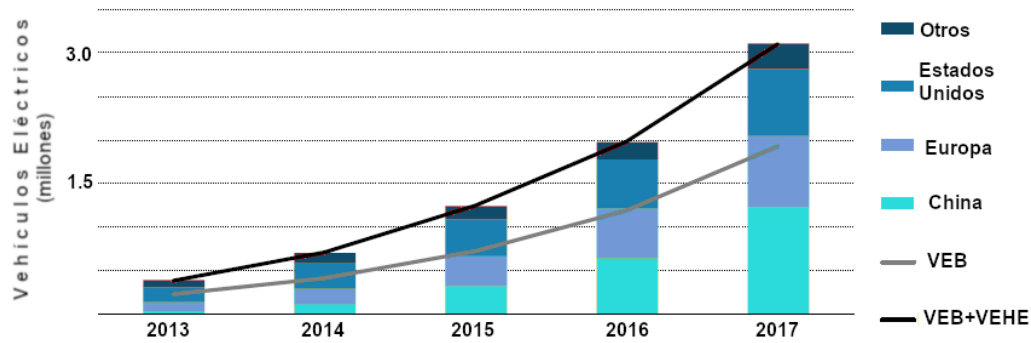


Figura 2.5: Vehículos eléctricos en el mundo, modificado de IEA (2018)

2.2. Panorama actual de los vehículos eléctricos.

La electrificación de los medios de transporte es el medio principal con el cual podemos lograr una industria automotriz sustentable en la próxima mitad de siglo (Emadi, 2014). Cambios tecnológicos en los sistemas eléctricos para tracción de vehículos y en las redes de transporte transformarán a la industria automotriz, enfocando su atención en la fuente de potencia motriz más eficiente: electricidad. Las compañías buscarán asegurar que estas nuevas tecnologías sean escalables para explotación en el mercado, mientras que los consumidores demandarán cada vez más vehículos eléctricos que sean; de bajo costo, bajo mantenimiento, seguros, confiables, robustos y amigables con el medio ambiente.

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), el número global de vehículos eléctricos para pasajeros alcanzó los 3.1 millones en el 2017 con un incremento del 57% con respecto al año previo (IEA, 2018). Del total del mercado de los vehículos eléctricos, los vehículos de baterías representan dos tercios de la flota en el mundo.

En cuanto a los vehículos eléctricos con celdas de combustible, el inventario global superó las 7200 unidades en el 2017, de las cuales Estados Unidos posee casi la mitad con 3500 unidades, Japón ocupa el segundo lugar con 2300 unidades mientras que en la Unión Europea, Francia y Alemania reportaron casi 1200 vehículos eléctricos con celdas de combustible en circulación.

Además de los 3.1 millones de vehículos eléctricos para pasajeros, en el 2017 se reportaron aproximadamente 250,000 vehículos eléctricos de carga ligera. La mayoría de este tipo de vehículos se encuentran circulando en China, con un total de 170,000 unidades, seguido por Francia y Alemania con 33,000 y 11,000 vehículos en circulación respectivamente. Aproximadamente el 99% del inventario total utiliza baterías.

La Iniciativa de Vehículos Eléctricos (EVI por sus siglas en inglés) es un foro integrado por distintos gobiernos establecido en el 2009 que busca acelerar el despliegue de vehículos eléctricos alrededor del mundo, facilitando políticas de mercado y funcionando como una plataforma para el intercambio de conocimientos, políticas y programas que apoyan el desarrollo y uso de los vehículos eléctricos.

La campaña llamada EV30@30 establece como meta colectiva que los miembros de EVI alcanzarán un 30 % del mercado en vehículos eléctricos para el año 2030.

2.3. Breve historia de los vehículos eléctricos.

Durante más de 100 años la industria del transporte ha basado su proliferación en el uso de motores de combustión interna, aun cuando el vehículo eléctrico fue inventado antes, en año de 1834 por Tomas Davenport y en el año 1900 se vendían más vehículos eléctricos que coches con motor de combustión interna. El principio del siglo XX comenzó con una intensa actividad en una naciente industria automotriz, esta fue la primera época en la que se utilizaron tres diferentes tipos de tecnologías al mismo tiempo; en ese caso fueron: los coches de vapor, los vehículos eléctricos y los vehículos de combustión interna. Los dos últimos se encontraban en pleno desarrollo y para el año 1895 se predecía el nacimiento de una industria tal que reflejaría la más grande de las civilizaciones, cuyos medios de transporte serían tan sofisticados que ya no dependerían de la fuerza de un animal para ser movidos.

En este sentido, el vehículo eléctrico es una idea que se ha tratado de retomar varias veces y no un concepto nuevo. Entre los años 1805 y 1906 existió una gran comercialización de vehículos eléctricos, el mercado estuvo tan bien establecido que varias compañías surgieron y crearon una verdadera competencia; se realizaban eventos donde se mostraban los nuevos modelos puestos a la venta, se lanzaban propagandas que contaban con todas las características de un producto formal, en la figura se muestran algunas imágenes de carteles y eventos de esta época.

Para esas fechas los VE dominaban el mercado sobre los VCI. Ambos presentaban sus desventajas; por un lado, los VE presentaban poco rango de recorrido por carga de batería, mientras que los MCI eran considerados sucios y el arranque era muy complicado. Sin embargo, con el desarrollo de los alternadores para simplificar el arranque de los MCI y debido factores políticos y económicos, los VCI comenzaron a ganar territorio hasta desplazar a los VE a unas cuantas aplicaciones como vehículos de reparto.

Durante la década de 1970 la crisis energética marcó el inicio de un nuevo interés en los vehículos eléctricos y surge la interrogante sobre la capacidad de éstos para resolver las necesidades de transporte de aquella época; sin embargo, el precio del petróleo se recuperó y el desarrollo de vehículos eléctricos perdió ritmo nuevamente. Actualmente el principal factor para el desarrollo de transportes electrificados es la conservación ambiental y control del cambio climático; ahora se requiere conocer si los vehículos eléctricos pueden tener un precio asequible

2.3.1. Las primeras compañías líderes en vehículos eléctricos.

Riker Electric Motor Company Riker fue uno de los personajes más influyentes dentro de la historia de la industria automotriz, fue el primer presidente la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, por sus siglas en inglés) desde 1905 hasta 1907. A la edad de 26 construyó su primer prototipo de vehículo eléctrico (Donovan, 2003) y en 1896 fundó Riker Electric Motor Company, la compañía estuvo activa hasta 1902, bajo otros dos nombres distintos durante este periodo. La empresa de Riker fue una de las líderes en producción de vehículos eléctricos, vendió carros, camiones y camionetas; la figura 2.6 muestra algunos de sus modelos, entre los más sobresalientes se encuentran el Phaeton, Demi Coach, y Victoria. Durante el onceavo encuentro del Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos en Nueva York, Riker enunció algunas de las características ideales de los coches eléctricos (Chan and Chau, 2001): libres de calor, olor, ruido y vibraciones, además de ser muy simples de controlar, por otro lado expuso que para aquella época el mayor defecto de esta tecnología eran las baterías, debido a que no existían en el mercado una solución para las condiciones de servicio requeridas, también explicó algunas de las características de los vehículos diseñados en su compañía: la aplicación de un solo motor para proporcionar la fuerza de tracción a ambas llantas traseras en lugar de dos motores separados, la implementación de engranes para obtener una baja velocidad y alto par y permitir que el motor trabajara en su punto óptimo, el empleo de llantas de tamaño pequeño en comparación con aquellas usadas habitualmente, el uso llantas neumáticas, el equipamiento del vehículo con dispositivos de seguridad contra sobre carga, indicadores en el panel sobre el estado de carga de la batería y también promovió el uso de metales en lugar de la madera para la carrocería. En 1899 The Riker Electric Vehicle Co, vendió una de sus unidades a un cliente en París por un precio de 3,500 dólares. El modelo The Riker Torpedo impuso en el año 1901 un récord de velocidad para vehículos eléctricos, el cual se mantuvo por una década, además de eventos de exhibiciones en Estados Unidos, Alemania y Francia donde Riker se presentaba, dichos eventos consolidaron a la empresa como líder en el ramo, la figura 2.7 muestra algunos de los carteles de venta de la compañía y algunos eventos donde estuvo presente.

The Electric Carriage and Wagon Company Fue una de las primeras manufactureras de vehículos eléctricos en los Estados Unidos de Norte América; los propietarios fueron Henry G. Morris y Pedro G. Salom. El modelo llamado "Electrobat", figura 2.8, marcó un suceso importante debido a que fue el primer coche eléctrico construido con fines comerciales en el año 1895; se considera que fue el primer vehículo totalmente utilizable y fue llevado de ser un vehículo de reparto a circular por las calles de Filadelfia en 1894 (Chan and Chau, 2001). El Electrobat no se ofreció a la venta del público, sólo se rentó para ofrecer servicio de taxi y para ello se montó toda una infraestructura que incluía estaciones para cambios rápidos de batería y servicio.

El éxito de este vehículo como taxi en los EUA llamó la atención del presidente de la Electric Storage Battery Company, que era la compañía que dominaba el mercado de las baterías eléctricas en aquel tiempo. Rice compró la empresa de

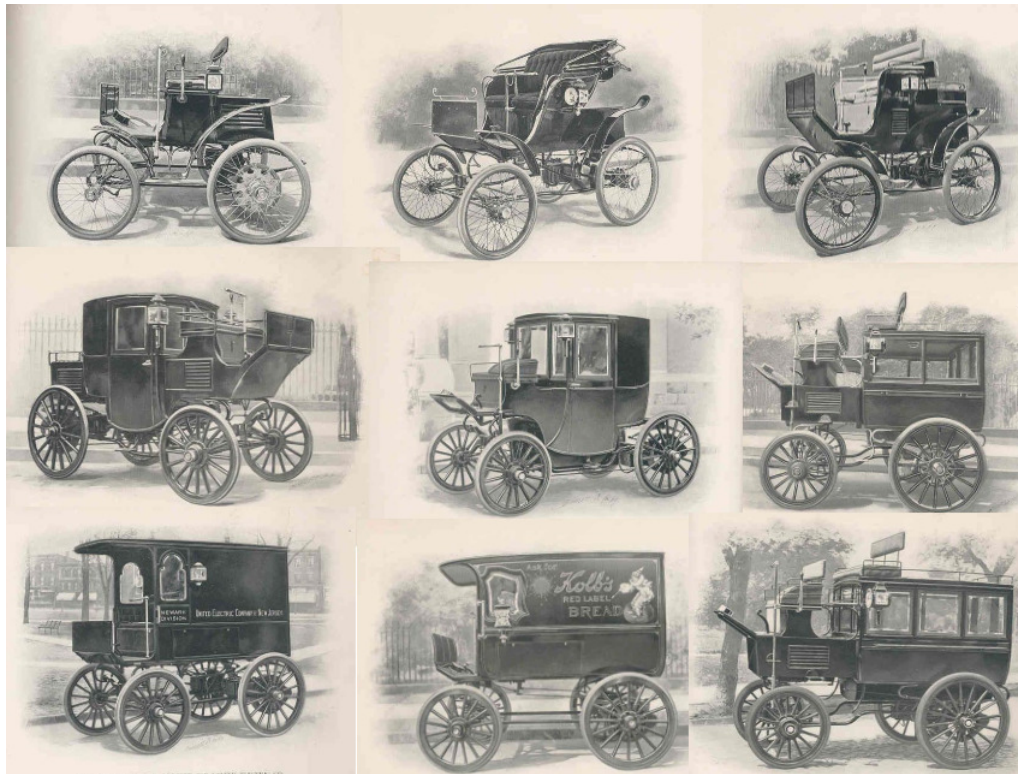


Figura 2.6: Algunos de los modelos vendidos por la compañía de Riker.

Figura 2.7: Carteles de venta y Fotos de Riker



Figura 2.8: El Electrobat de Morris y Salom.

Morris y Salom y el 27 de septiembre de 1897 The Electric Carriage and Wagon Company se convirtió en la Electric Vehicle Company. Bajo este nuevo nombre el negocio de los taxis eléctricos se extendió a otros estados de los EUA creando una competición de monopolios y demandas por patentes entorno a los vehículos eléctricos (Burton, 2013).

Pope Manufacturing Company. Llegó a ser una de las más grandes empresas dedicadas a la comercialización de vehículos eléctricos, su modelo más vendido fue el EV Columbia, figura 2.9, del cual se vendieron alrededor de 500 unidades hacia finales del año 1899. Colonel Albert Augustus Pope había creado un monopolio al adquirir diversas patentes de bicicletas con las que cobraba regalías a otros fabricantes. La compañía de Pope manufacturaba alrededor de 250,000 bicicletas anuales bajo la marca Columbia. Existe algunos rumores sobre el desapruebo de Pope hacia los VCI, sin embargo, también veía como un negocio potencial el transporte libre de bestias de carga, por lo que encargó a uno de sus ingenieros el diseño de un vehículo eléctrico, el primer diseño estuvo basado en el Electrobat. Después de terminar el prototipo en abril del año 1897 el vehículo empezó a comercializarse en mayo del mismo año (Burton, 2013).

The London Electrical Cab Company Fue inaugurada en Inglaterra en 1897 con una flota de 15 taxis. La empresa fue formada bajo la premisa de lograr el reemplazo de carruajes tirados por caballos por vehículos eléctricos. Una de las piezas claves de la empresa fue su gerente eléctrico, Walter C Bersey, quien poseía una patente de 1894 de un vehículo eléctrico.

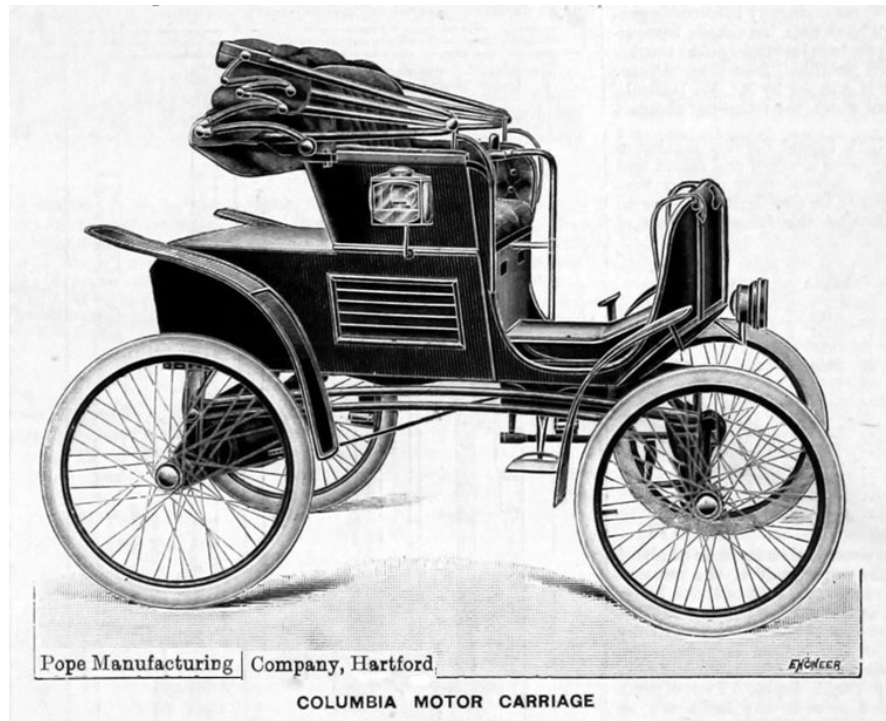


Figura 2.9: EV Columbia de Pope Manufacturing Company.

2.3.2. Los vehículos eléctricos de las grandes empresas.

2.3.2.1. General Motors Company.

El desarrollo de vehículos eléctricos en General Motor comenzó desde 1912, cuando la compañía tenía un departamento encargado del diseño y construcción de camiones eléctricos. En total se construyeron 682 camiones eléctricos hasta el año 1917, cuando se construyó el último. En la figura 2.10 se muestran una línea de tiempo incluyendo la gran mayoría de los VE y VH que fueron construidos tanto a nivel prototipo como para comercialización por GM.

El modelo Electrovair fue desarrollado en el año de 1964 como una conversión del popular Chevrolet Corvair, seleccionado por ser el vehículo más ligero de la empresa en aquella época (Burton, 2013), el tren motriz consistía de un motor de inducción de 67 (kW) enfriado por aceite y un banco de baterías de plata-zinc con 450 (V). En 1966 lanzaron la segunda versión de esta conversión, el Electrovair II, que había sido equipado con un motor más potente de 86 (kW) y las baterías seguían siendo de plata-zinc pero con un voltaje de 532 (V); la velocidad máxima de este modelo fue de 130 (km/h) mientras que la autonomía variaba en un rango entre los 65-130 (km)(GM, 2018) .

En el año de 1968, se construyó la Electrovan, que es considerado como el primer vehículo alimentado por una celda combustible de hidrógeno (GM, 2018). El tren motriz tenía un motor de inducción de 93 (kW). El sistema criogénico consistía en tanques enfriados de hidrógeno y oxígeno. La autonomía por carga de tanques era de 193 (km). Debido

a diferentes desventajas que iban desde seguridad hasta costos altos el modelo no fue llevado a producción (Burton, 2013). GM desarrolló otros conceptos de VCC, algunos de ellos fueron, Precept en 2000, Opel Zafira HydroGen1 en 2001, AUTOmomy y Hy-Wire en 2002 y HydroGen 3 en 2004.

En el año de 1968 construyeron un vehículo híbrido que utilizaba un motor Stirling, el modelo fue llamado Stir-Lec I. El prototipo fue desarrollado como una conversión del modelo 1968 Opel Kadett debido a su tamaño pequeño. La potencia del motor de tracción era de 15 (kW) con una velocidad máxima de 12500 rpm (Rajashekara, 1994).

La serie GM512 fue producida en 1969, consistió en una serie de vehículos pequeños de dos plazas con fines específicos de movilidad urbana. Se presentaron en dos versiones, una totalmente eléctrica y la otra híbrida (Rajashekara, 1994). El motor eléctrico de tracción en ambas versiones era motor de corriente directa de rotor devanado en serie capaz de producir una potencia de 6 (kW). La autonomía variaba de 8.4 (km) a 45 (km/h) a 14 (km) a 16 (km/h), la velocidad máxima era de 72 (km/h); el voltaje nominal de la batería era de 72 (V).

El 3 de enero de 1990, en el “Los Ángeles auto show” GM introdujo un modelo de vehículo totalmente eléctrico llamado Impact. Para compensar el peso de las baterías muchos de los componentes de la carrocería fueron construidos de materiales compuestos, lo cual ayudo al diseño a lograr el más bajo de los coeficientes aerodinámicos medidos en túnel de viento para un vehículo de GM, con un valor de 0.19. El tren motriz de este modelo funcionó como plataforma de pruebas para distintas conversiones eléctricas.

En 1997 Impact fue convertido en el EV1 el cual es considerado como el primer vehículo eléctrico de producción en masa en la era moderna por uno de los grandes productores de autos. Fue de diseño específico, es decir no fue concebido como la conversión de ningún otro vehículo. Más de 1,000 unidades fueron producidas y arrendadas para clientes en California. La discontinuación del EV1 ha sido uno de los sucesos más controversiales en la historia de los vehículos eléctricos; mientras los usuarios se mostraban muy satisfechos la revista Times lo incluyó en la lista de los peores 50 vehículos nunca construidos (Burton, 2013). GM finalizó el proyecto en 1999.

En el 2007 fue anunciado el siguiente concepto de vehículo eléctrico, el Chevrolet Volt, que fue diseñado como un vehículo eléctrico de rango extendido. La autonomía máxima de este modelo es de 610 (km), puede ser recargado desde un a toma doméstica de 110 (V) en aproximadamente 6 horas. Las mejoras del modelo del año 2016 incluyen una disminución de la masa total del vehículo de 45 kg, una autonomía en modo puramente eléctrico de 80 (km) y un rango extendido de más de 640 (km).

El modelo Chevrolet Spark EV fue presentado en junio del 2013 como una conversión del modelo con MCI y se considera como el primer vehículo totalmente eléctrico para pasajeros producido por GM. En el 2014, Cadillac lanzó la versión eléctrica de rango extendido Cadillac ELR, este modelo utilizó tecnología muy parecida a la usada en el Chevrolet Volt, pero fue dirigido para un nicho de mercado más lujoso.

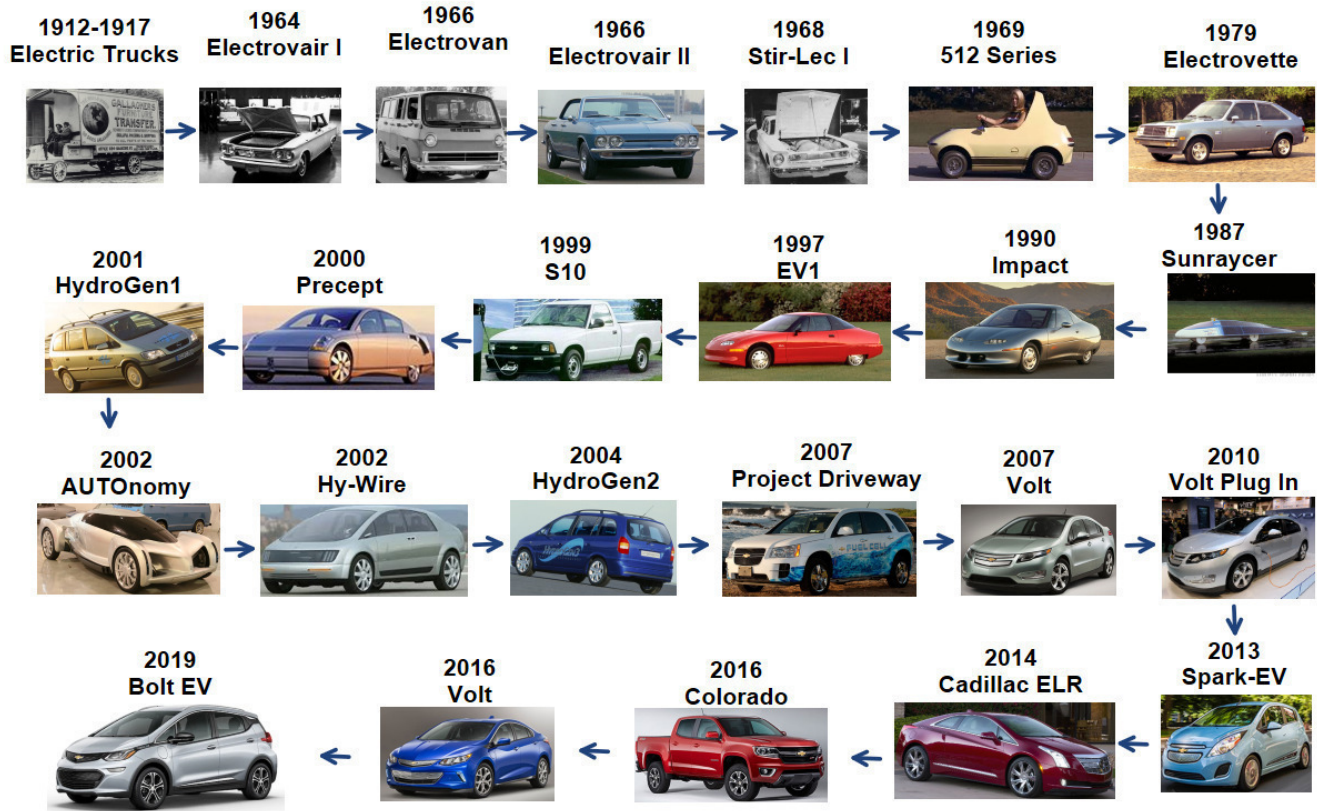


Figura 2.10: La Historia de los Vehículos Eléctricos de GM.

En el 2017 comenzó la comercialización del modelo Chevrolet Bolt EV. El modelo 2019 destaca por ser el primer vehículo totalmente eléctrico asequible y que proporciona una autonomía por carga de batería de más de 380 (km). Está equipado por un banco de baterías de litio de 60 (kW) y un motor de imanes permanentes de 150 (kW) y un par de 360 (Nm).

2.3.2.2. Nissan

Al comienzo de la década de los 60, Nissan se volvió más activo en el desarrollo de vehículos eléctricos y desde entonces ha lanzado y vendido distintos modelos (Nissan, 2018). Después de la guerra el petróleo escaseó, pero la electricidad era más abundante. Por esta razón, hubo una época en que el gobierno promovió la manufactura de VE, bajo esta motivación el primer vehículo eléctrico de esta compañía japonesa fue el modelo Tama lanzado en 1944 (Burton, 2013). El vehículo Tama E4S-47-1 fue equipado con un motor de corriente directa de devanados en serie de 36 (V) con una potencia nominal de 3.3 (kW), usaba una batería de plomo ácido de 36 (V). Las pruebas de desempeño realizadas por el Ministerio de Comercio e Industria superaron las especificaciones de catálogo, con un rango de 96.3 (km) y una velocidad máxima de 35.2 (km/h), rápidamente se volvió muy popular en Tokio y fue utilizado principalmente como

taxi y aplicaciones similares.

En año de 1949 fue lanzado el modelo Tama Senior EMS, una versión más grande de 5 plazas y equipado con un motor de corriente directa y 40 baterías de plomo ácido de 2 (V) cada una, las mejoras en el desempeño incluían un rango por carga de batería de 200 (km) y una velocidad máxima de 55 (km/h). En el evento de autos de Tokio en 1970, fue mostrado un concepto llamado Nissan 315X.

En 1973 fue terminado el modelo EV4-P, un camión con espacio para dos pasajeros, resultado de un proyecto nacional para el desarrollo de VE integrado por diferentes sectores. Este modelo era impulsado por un motor de CD de devanado en serie y una batería de plomo ácido. El rango por carga de batería reportado en las pruebas ejecutadas por el Agencia Industrial de Ciencia y Tecnología de 302 (km) a una velocidad constante de 40 (km/h), la velocidad máxima era de 87 (km/h) y aceleraba de a (km/h) en 6.9 (s).

En 1983 se construyó el modelo March EV, El primer prototipo en adoptar un motor de inducción. Posteriormente en 1985, el modelo EV Guide II fue exhibido en el evento de autos de Tokio, poseía una autonomía de 60 (km/h) a una velocidad de 16 (km/h), por mucho tiempo fue utilizado para transportar a visitantes de la realeza o a invitados especiales dentro de las plantas de Nissan. De igual forma en 1985 fue lanzado EV Resort, modelo del cual se vendieron alrededor de 40 unidades para transporte dentro de hoteles.

En 1991 se construyó el modelo President EV, una conversión basada en el modelo President JHG50 que fue construido para fines específicos de transporte en desfiles y caravanas por lo que nunca se comercializó en masa. Utilizaba una batería de zinc, ofrecía un rango por carga de batería de 100 (km) a una velocidad máxima de 40(km/h). En 1991 fue mostrado en Tokio el modelo FEV para rangos cortos. En 1993 fue construido el modelo Cedric EV, una conversión del sedán Classic. Fue equipado con una batería de plomo ácido y un motor de CA. En 1994 vendieron principalmente a empresas de energía el modelo Avenir EV. En 1995 mostraron en Tokio el concepto FEV II, el cual planteaba el uso de baterías de litio.

El primer vehículo comercial del mundo con baterías de iones de litio, en este caso fueron cilíndricas. Fue le modelo Prairie Joy EV. Fue vendido por flotas a diferentes entidades, en total un aproximado de 30 unidades se comercializaron, fue empleado por un equipo de investigadores en Noruega mostrando excelente desempeño y durabilidad de las baterías bajo condiciones ambientales severas.

En el año 1998 fue lanzado el modelo R'nessa EV. La tracción era proveída por un motor síncrono de 62 kW con imanes permanentes de Neodimio y una eficiencia nominal de 89%. El módulo de 12 baterías de iones de litio ofrecía un rango por carga de batería de 120 (km) en modo combinado, la velocidad máxima era de 120(km/h). Fue nombrado el vehículo más amigable con el medio ambiente y fue usado por diversas instituciones gubernamentales de los Estados Unidos.

En el año 2000 se comercializó el modelo Hypermini como un coche urbano de cercanías. Fue equipado con un motor síncrono de imanes de neodimio y un sistema de baterías de iones de litio de alta eficiencia. El rango por carga de batería era de 115 (km) y una velocidad máxima de 100 (km/h). Durante esta misma década Nissan presentó diversos conceptos en Tokio: en el 2005 Pivo, un concepto innovador cuya principal característica era el giro del habitáculo en 360°; en el 2007 Mixim, un concepto innovador que buscaba dirigirse a los jóvenes inmersos en una era digital; en ese mismo año PIVO 2, un concepto futurista que planteaba una totalmente nueva relación entre el vehículo y el conductor. Nissan desarrollo dos vehículos de pruebas que fueron construidos como parte de su plan para dominar el mercado de los vehículos eléctricos lanzando un modelo totalmente eléctrico para el año 2010 y realizar su comercialización a nivel mundial para el 2012. El primero de estos vehículos de prueba se construyó en el año 2008 y el segundo en el 2009, en ellos se probaron diferentes sistemas.

En el 2009 fue lanzado en Japón el modelo LEAF (Leading, Environmentally Friendly, Affordable Family Vehicle, por sus siglas en inglés). Es uno de los vehículos totalmente eléctricos más vendidos en todo el mundo, se han presentado nuevos modelos en los años 2012, 2015, 2017 y 2019.

2.3.2.3. Toyota

El desarrollo de vehículos eléctricos de esta compañía comenzó en el año 1971, cuando se unió a un programa patrocinado por el Ministerio de Industria y Comercio Internacional del gobierno de Japón. De 1983 a 1989 se construyeron una serie de VE que fueron desde el modelo EV-10 hasta el EV-40 (Chan and Chau, 2001). Con el desarrollo de dichos modelos en el año 1991 se lanzó TownAce EV, en 1992 Crown Majesta EV, en 1993 EV-50, el Coaster HEV en 1994 y en 1995 lanzo RAV4-EV el cual ganó una carrera de vehículos eléctricos llamada FIA-sanctioned Scandinavian Electric Car Rally.

En el evento de vehículos de Tokio en 1995 fue se reveló el modelo Prius, el cual comenzó a venderse en Japón en 1997. Desde el inicio del proyecto, Toyota mostró gran ambición y decidió que cada fase del nuevo vehículo, desde la conceptualización hasta el diseño de los sistemas críticos como el motor eléctrico, el motor de combustión interna y las baterías, serían creados por sus propios diseñadores e ingenieros. En la actualidad este modelo ha evolucionado a lo largo de diversas generaciones y es uno de los vehículos híbridos con mayor presencia en el mundo.

Toyota se ha planteado la meta de lanzar 10 nuevos modelos de VE y VEH para 2020. Hasta la fecha cuenta con el i-Road, un modelo ultra compacto pensado para la movilidad en las ciudades; iQ EV un modelo de vehículo totalmente eléctrico.



Figura 2.11: Vehículos eléctricos de Nissan.

2.3.2.4. Ford Motor Company

La compañía Ford comenzó a involucrarse en el desarrollo de vehículos eléctricos en el año 1960 cuando la división europea construyó el modelo de vehículo compacto llamado Conmuta, el cual disponía de espacio para dos adultos y dos niños (Burton, 2013). Posteriormente, a finales de esa década se desarrolló la conversión eléctrica llamada Cortina Station Wagon EV, En la década de 1970 se desarrollaron otros proyectos incluyendo Econoline Van Hybrid, Fiesta EV, Escort EV y ETX-I. En la década siguiente mostraron el modelo ETX-II, una conversión del modelo Aerostar y en 1990 otra conversión del modelo europeo Escort Van tuvo su prototipo eléctrico (Chan and Chau, 2001).

La siguiente conversión anunciada fue del modelo Ecostar, de la cual para el año de 1995 se habían puesto en servicio 103 unidades con un recorrido total de 800,000 (km). Ese mismo año se presentó otra conversión más basada en el modelo Ranger. A excepción del Conmuta, todos los proyectos mencionados anteriormente fueron conversiones de algún VCI, por lo que Ford no había desarrollado ningún modelo representativo de VE o VEH para la fecha.

Para inicios de la década 2000, Ford adquirió la marca de VE llamada Th!nk, la cual había sido fundada en Noruega y desarrolló un modelo de vehículo de vecindario biplaza equipado con un motor trifásico de inducción para tracción delantera y 19 paneles de baterías de níquel-cadmio que producían un aproximado de 11.5 (kWh), el rango de manejo por carga de batería fue de 80 (km) y la velocidad máxima de 90 (km/h). Como parte de la inversión que Ford hizo en esta marca, anunciaron la creación de un vehículo de vecindario con 4 plazas y dos modelos de bicicletas eléctricas. Se produjeron 1005 unidades antes cancelar la manufactura de esta línea (Burton, 2013).

Ford vendió Th!nk anunciando que estaba más interesado en los vehículos de celdas de combustible para lo que inició el programa llamado P2000, Otros desarrollos de dicha década fueron el modelo P2000, que fue un vehículo con celdas de combustible y el modelo híbrido de Escape.

2.3.2.5. Peugeot

Antes de la guerra Peugeot era uno de los más grandes constructores de vehículos en Francia, en el año de 1942 presentó un modelo de un micro carro de tres llantas totalmente eléctrico conocido como Voiture Legere de Ville. Este modelo usaba baterías de 12V, alcanzaba una velocidad máxima de 36 (km/h) y un rango por carga de batería de 80 (km), pesaba 350 (kg) de los cuales 160 (kg) correspondían a las baterías. Durante la guerra fue muy popular y se utilizó para la distribución de medicamentos, fueron construidos 377 unidades hasta antes de que los alemanes prohibieran la producción de todos los modelos eléctricos (Burton, 2013).

En el año de 1990 lanzó la conversión eléctrica del Peugeot J5 dirigido al mercado de vehículos utilitarios. En el año de 1995 lanzó Peugeot 106 y fue dirigido al mercado de los vehículos sedan compactos al igual que la conversión del Peugeot Ion. Una de las conversiones más sofisticadas fue la del modelo 205, el trabajo realizado por los ingenieros

implicó la adaptación de una suspensión más grande para soportar el peso extra del banco de baterías, pese a todos los cambios los usuarios se mostraban satisfecho y la sensación de manejo les parecía idéntica a la versión de gasolina.

El primer modelo eléctrico diseñado desde cero fue el Tulip, presentado como un nuevo concepto de vehículo eléctrico urbano, este modelo fue rentado a los usuarios (Chan and Chau, 2001),

En el 2011, Peugeot fue la primera compañía en lanzar al mercado un vehículo híbrido con una combinación de motor a diésel y motor eléctrico con el modelo 3008 Hybrid4. Actualmente algunos de los modelos eléctricos que ofrece esta compañía son: Peugeot e-208, Peugeot 3008 SUV HYBRID4, Peugeot 508 HYBRID.

2.3.2.6. Renault

La gama de VE ofrecidos actualmente por Renault se compone de cinco vehículos; Twizy, Renault Zoe, Kangoo Z.E., RSM SM3 Z.E. y RSM SM3 Z.E; sin embargo, la compañía tiene como objetivo vender 8 modelos de VE y 12 de VH, para el 2020.

El modelo Twizy es un VE compacto con capacidad máxima de dos pasajeros, fue pensado para uso en las ciudades y es impulsado por un motor de inducción con una potencia máxima de 13 (kW) y un par pico de 57 (Nm). En cuanto al modelo Renault Zoe, se ha reportado un rango de recorrido por carga de batería de hasta 300 (km). El motor en el modelo 2018 fue denominado R110, un motor Síncrono de imanes de rotor devanado con una potencia máxima de 80 (kW), un par pico de 225 (Nm) y una velocidad máxima de 10980 (rpm).

2.3.2.7. BMW

BMW tiene en el mercado a los modelos híbridos BMW i8 Coupé y BMW i8 Roadster y el modelo eléctrico BMW i3. El chasis de estos vehículos fue construido en fibra de carbono de plástico reforzado disminuyendo el peso del vehículo con lo que se mejora la eficiencia y desempeño. El modelo BMW i3 cuenta también con una versión de rango extendido, el motor de tracción es síncrono de imanes permanentes con una potencia máxima de 125 (kW) y un par pico de 250 (Nm) con una velocidad máxima de 11500 (rpm).

2.3.2.8. Tesla Motors.

El objetivo de la compañía Tesla Motors, es impulsar y acelerar la transición a los vehículos eléctricos. El primer de los vehículos diseñados por esta empresa fue el modelo Tesla Roadster, un vehículo de lujo con altas especificaciones técnicas alcanza los 100 (Km/h) en 1.9 segundos y posee tracción en todas las ruedas. El siguiente modelo fue el Tesla Model S, dicho modelo es conocido por su motor de inducción con alta eficiencia y un par pico de 400 (Nm). El siguiente

modelo lanzado al mercado fue el Tesla Model X y el modelo más reciente es el Tesla Model 3, este último posee un motor síncrono de imanes permanentes. Cada modelo ha sido más barato que el anterior y el objetivo de la compañía es diseñar un vehículo a un precio accesible para la mayoría de los interesados. Cabe mencionar que a pesar de las ventas al alza y lo novedoso de estos vehículos, Tesla no es considerado como una empresa automotriz por la SAE.

2.4. Conclusiones del capítulo.

Existen dos ideas centrales referentes a los vehículos eléctricos que son altamente debatidas. La primera es considerar que los vehículos eléctricos son una tecnología novedosa; en realidad han sido utilizados desde hace mucho tiempo, se puede considerar que son más antiguos que los vehículos de combustión interna e incluso se han tenido tres periodos donde la industria ha mostrado gran interés en éstos. Actualmente nos encontramos en la tercera de dichas etapas y debido al entorno ambiental, político, económico y tecnológico que estamos experimentando podemos asegurar que esta vez los vehículos eléctricos desplazarán a los vehículos de combustión interna.

En cuanto a la van Kangoo Z.E., es impulsado por un motor síncrono de rotor devanado con una potencia máxima de 44 (kW) y un par pico de 226 (Nm).

El componente que representa mayores retos para lograr la comercialización los vehículos eléctricos es la batería. Algunos datos de usuarios de los vehículos eléctricos actuales muestran que en realidad no se requiere de mayor capacidad de las baterías para los recorridos efectuados diariamente en una ciudad, sin embargo, para trayectos más largos se requiere dotar a los vehículos eléctricos de un rango por carga de batería que sea al menos igual a la de los vehículos de combustión interna. Otro tema relacionado con la recarga de las baterías es el cambio de paradigma en el consumo de energía eléctrica, con los vehículos eléctricos conectados a la red los usuarios podrán suministrar energía eléctrica en los picos de consumo, aunque la practicidad con la que se recarga un tanque de gasolina nunca será la misma.

Algunos expertos en el tema han señalado que se debe de contemplar otro tipo de tecnología para lograr los objetivos comerciales que se han planteado. Es muy probable que la mayor parte de los vehículos en el futuro posean una celda de combustible de hidrógeno, sin embargo, es importante considerar que debido a la flexibilidad de los vehículos eléctricos probablemente aparecerán diversos tipos de medios de transporte con los que se busque solucionar los problemas de movilidad en las ciudades, dependiendo del tamaño y la distancia de operación de estos nuevos vehículos, las baterías actuales pueden ser suficientes.

El segundo tema en debate se relaciona con el verdadero impacto de los vehículos eléctricos. Dependiendo del autor y del análisis realizado se puede considerar que el impacto de los vehículos eléctricos es incluso mayor al de los vehículos actuales. Sí bien es cierto que aunque los vehículos eléctricos no producen emisiones en sitio, un aumento en el uso de

este tipo de vehículos conlleva a una mayor quema de combustibles fósiles para producir la energía que requerida. Con relación a este tema he llegado a la conclusión de que no se debe considerar que el vehículo eléctrico sea la solución a los problemas de contaminación, se debe de pensar que diversas áreas de la ciencia e ingeniería están desarrollando herramientas que eventualmente podrán ser integradas en soluciones sustentables.

Por otro lado, los vehículos eléctricos e híbridos de empresas automotrices que han tenido un impacto en el mercado son pocos: Nissan LEAF, Toyota Prius y Chevrolet Bolt EV se encuentran entre los más sobresalientes, mientras que el vehículo más representativo de esta década pertenece a Tesla Motors.

Capítulo 3

Teoría de los motores eléctricos

Todos los tipos de motores poseen características comunes, un elemento externo y un elemento interno que se encuentran separados por un entrehierro, ambos elementos se componen de un núcleo de material ferromagnético. A través del entrehierro un flujo magnético principal, conecta ambos elementos y como resultado de la interacción se produce movimiento relativo entre ellos (Adkins and Harley, 1975). Los componentes principales de un motor son el estator, el rotor el eje, un par de tapas extremas, rodamientos y la carcasa. (Tong, 2014).

De forma general se puede decir que los motores utilizan aluminio o cobre para transportar corrientes eléctricas, materiales ferromagnéticos como el acero para dirigir el flujo útil y aire como medio para almacenar la energía (Ong, 1998). La gran mayoría de los núcleos ferromagnéticos tanto del estator como del rotor se construyen de láminas delgadas apiladas, esto para reducir ciertas pérdidas que de lo contrario serían muy grandes. A continuación, se describen de forma general los principales conceptos teóricos en los que se fundamenta la operación de los ME.

3.1. Conceptos de la teoría electromagnética.

Los motores eléctricos son transductores que convierten la energía eléctrica en una salida de potencia mecánica. Por lo anterior la comprensión de los principios teóricos tanto electromagnéticos como mecánicos es fundamental. Aunque se presenta el estudio de dicha teoría de forma separada, electromagnetismo y principios mecánicos, en realidad las partes eléctricas y mecánicas no pueden ser separadas físicamente y ser operadas independientemente una de otra (Gourishankar, 1969).

La electricidad es una de las características de la materia, la carga es una medida de esta característica (Gourishankar, 1969). El electrón es la carga negativa elemental mientras que el protón es la carga positiva elemental. La carga del

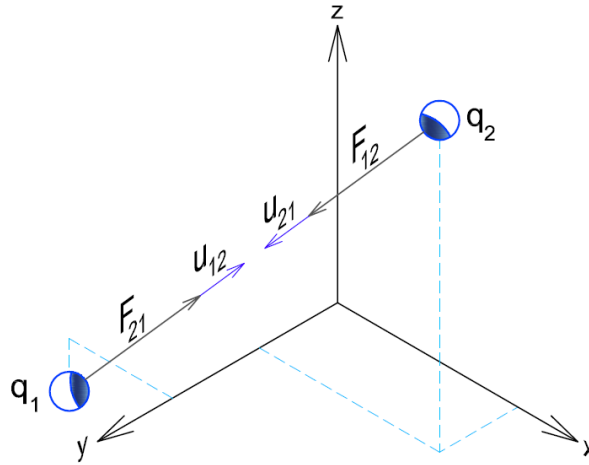


Figura 3.1: Fuerza de Coulomb entre dos cargas estáticas.

electrón es de $q_e = -1.6 \times 10^{-19}(C)$, la carga del protón es de la misma magnitud pero con signo opuesto. Otras dos propiedades fundamentales en la estructura eléctrica de la materia son la conservación y la cuantización de la carga (Purcell and Morin, 2013).

3.1.1. Fuerza Eléctrica.

La ley de Coulomb, ecuación 3.1, establece que existe una fuerza $F_{12}(N)$ entre dos cargas eléctricas estáticas $q_1(C)$ y $q_2(C)$. La magnitud de dicha fuerza es proporcional a las cargas presentes e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas, $r_{12}(m)$. La dirección de la fuerza es determinada por un vector unitario tal como se muestra en la figura 3.1. Para determinar el sentido tenemos que cargas con el mismo signo experimentan una fuerza de repulsión mientras que cargas con signos contrarios se atraen.

$$\bar{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{u}_{12} \quad (3.1)$$

Cuando se presentan más de dos cargas, la fuerza total que cada una de ellas experimenta debido a la presencia de las demás puede ser obtenida por una superposición lineal. La fuerza total que una carga q_k experimenta debido a la presencia de n cargas está dada por la ecuación 3.2.

$$\bar{F}_{nk} = \frac{1}{4\pi\epsilon} q_k \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{r_j^2} \hat{u}_{jk} \quad (3.2)$$

La constante ϵ es la permitividad del medio en el que interactúan las cargas. También es llamada capacidad o constante dieléctrica del medio. El valor de ϵ para el vacío es $1/36\pi \times 10^9$ y es usualmente representado como ϵ_0 .

3.1.2. Campo eléctrico.

Cada carga q produce un campo eléctrico que actúa como medio para ejercer su fuerza sobre otras cargas colocadas bajo su influencia. Si se supone que la carga q_2 de la figura 3.1 es suficientemente pequeña para no distorsionar el campo eléctrico producido por la carga q_1 , la intensidad de éste puede ser representada por el vector definido por la ecuación 3.3.

$$\bar{E}_1 = \frac{\bar{F}_{12}}{q_2} \quad (3.3)$$

El campo eléctrico también cumple con el principio de superposición, de modo que el campo total producido por más de una carga es obtenido por medio de la ecuación

$$\bar{E}_n = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{r_j^2} \hat{u}_j \quad (3.4)$$

La fuerza de Coulomb de la ecuación 3.1 se puede expresar en términos del campo eléctrico causado por la carga q_1 , ecuación 3.5, tal como se muestra en la ecuación 3.6

$$\bar{E}_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon r^2} \hat{u}_{12} \quad (3.5)$$

$$\bar{F}_{12} = q_2 \bar{E}_{12} \quad (3.6)$$

3.1.3. Potencial Eléctrico.

Así como el campo eléctrico es la fuerza por unidad de carga, el potencial eléctrico es la energía potencial por unidad de carga. La fuerza eléctrica es conservativa, por lo tanto, podemos hablar de la energía potencial de un sistema de cargas, esto es el trabajo realizado sobre un sistema para mover una carga de un punto P_1 a un punto P_2 dentro de un campo eléctrico E . Esta cantidad se representa en la ecuación y es llamada la diferencia de potencial eléctrico, $\phi(V)$ (Purcell and Morin, 2013).

$$\phi = - \int_{P_1}^{P_2} \bar{E} \cdot d\bar{S} \quad (3.7)$$

En los motores eléctricos, la energía potencial por unidad de carga suministrada desde una fuente al motor es convertida en energía mecánica. Otra aplicación de este concepto en los motores se puede apreciar en la inducción de un potencial eléctrico entre las láminas de los núcleos laminados, se debe asegurar que el aislante entre las láminas no sea dañado por el potencial inducido.

3.1.4. Corriente eléctrica y densidad de corriente.

Una corriente eléctrica, I (A), se define como cargas en movimiento. En un cable, la corriente eléctrica es la cantidad de carga que pasa por un punto fijo del mismo por unidad de tiempo Purcell and Morin (2013). El concepto de densidad de corriente eléctrica, J (A/m²) surge como necesidad de describir la corriente de forma más general, por ejemplo, en un espacio tridimensional. La densidad de corriente puede expresarse en términos de la carga, el número de portadores de carga y la velocidad a la que estos se mueven por medio de la ecuación 3.8.

$$J = \sum_k N q_k \bar{v}_k \quad (3.8)$$

3.1.5. Fuerza Magnética

Cuando las cargas se mueven con respecto a un punto de referencia, se origina una fuerza magnética, la cual es descrita por la ecuación 3.9. La constante μ se conoce como la permeabilidad magnética del medio donde se encuentran interactuando las cargas. Las velocidades de las cargas en movimiento están representadas por \bar{v}_1 y \bar{v}_2 respectivamente.

$$F_{m12} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{q_1 q_2}{r^2} \bar{v}_2 \times (\bar{v}_1 \times \hat{u}_{12}) \quad (3.9)$$

3.1.6. Campo magnético.

El campo magnético es representado por dos cantidades vectoriales: la densidad de flujo magnético \bar{B} e intensidad de campo magnético \bar{H} . La ecuación 3.10 representa la densidad de flujo magnético, una función existente alrededor de la carga q_1 a donde sea que ésta se mueva con respecto al marco de referencia. De este modo, se puede representar a la fuerza magnética descrita en la ecuación 3.9 en términos de la densidad de flujo magnético y de la carga, ecuación 3.11.

$$\bar{B}_1 = \frac{\mu}{4\pi} \frac{q_1}{r^2} \bar{v}_1 \times \bar{u}_{12} \quad (3.10)$$

$$F_{m12} = q_2 \bar{v}_2 \times \bar{B}_1 \quad (3.11)$$

3.1.7. Fuerza de Lorentz.

La fuerza total que experimentan las cargas en movimiento está dada por la ecuación 3.12, la cual es conocida como fuerza de Lorentz y se puede expresar en términos del campo eléctrico y de la densidad de flujo magnético tal como en la ecuación 3.13. A velocidades mucho más bajas que la velocidad de la luz, la magnitud de la fuerza magnética es bastante más pequeña que la magnitud de la fuerza eléctrica, sin embargo, cuando se trata de electrones en movimiento, como es el caso de los motores eléctricos, la fuerza magnética es la principal componente.

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{u}_{12} + \frac{\mu}{4\pi} \frac{q_1 q_2}{r^2} \bar{v}_2 \times (\bar{v}_1 \times \hat{u}_{12}) \quad (3.12)$$

$$\bar{F}_{12} = q_2 (\bar{E}_1 + \bar{v}_2 \times \bar{B}_1) \quad (3.13)$$

3.1.8. Flujo Magnético

Para cualquier superficie dentro de un campo magnético, una función escalar denotada como Φ (Wb) define el flujo magnético a través de la superficie, ecuación 3.14. Para ayudar a visualizar el campo magnético se usan líneas de flujo y tubos de flujo; las líneas de flujo se dibujan tangencialmente a B en todos los puntos y la densidad de las líneas de flujo es proporcional a la magnitud de la densidad de flujo. Los tubos de flujo se componen de líneas de flujo y el flujo en cualquier sección transversal de un tubo es constante.

$$\phi = \int_S \bar{B} \cdot d\bar{S} \quad (3.14)$$

En el diseño de motores eléctricos es de particular interés el análisis del flujo producido por la corriente en las bobinas del estator y por los imanes permanentes. En general, el flujo producido por cada bobina puede ser separado en dos componentes; una componente concatenada, Φ_L y una componente de magnetización Φ_M .

El flujo total no participa en la conversión de energía electromagnética. El flujo que participa es el flujo en el entrehierro, llamado flujo principal. La otra componente es el flujo disperso. El flujo principal conecta magnéticamente al rotor y al estator. El flujo principal se crea a partir del flujo concatenado.

Flujo disperso. Existen tres componentes del flujo disperso, la primera es el flujo que no cruza en entrehierro, la segunda es el flujo que cruza el entrehierro, pero no participa en la formación del flujo concatenado y por último los armónicos del flujo magnético principal se consideran parte del flujo disperso. Contribuye a las pérdidas de la máquina debido a que por el flujo disperso se requiere de una mayor corriente de magnetización; aumentan las pérdidas en el cobre debido al efecto pelicular. Una ventaja del flujo disperso es que se puede usar para filtrar la corriente en un inversor de PWM.

3.1.9. La permitividad, permeabilidad y conductividad del medio.

Las ecuaciones 3.15-3.17 caracterizan a un medio en específico en términos de la permitividad, ϵ , la permeabilidad, μ , y la conductividad, σ . Dichas ecuaciones son empleadas para describir a los materiales. Aquellos materiales que pueden ser caracterizados por valores constantes, se determinan isotrópicos, lo que indica que los valores de ϵ , μ , y σ son los mismos en diferentes direcciones; de lo contrario los materiales que presentan distintos valores dependiendo de la dirección son llamados anisotrópicos y deben ser tratados como tensores. Además, muchos de los materiales presentan características no lineales, como es el caso de los materiales ferromagnéticos.

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (3.15)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (3.16)$$

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (3.17)$$

3.2. Leyes de Maxwell.

La teoría electromagnética ha sido conjuntada en las ecuaciones de Maxwell que dictan que los fenómenos eléctricos y magnéticos no pueden ser tratados de forma separada. Las ecuaciones de Maxwell pueden ser presentadas en dos formas: integral y diferencial; para ser independientes de la forma o posición del área en observación es conveniente expresarlas en forma diferencial.

3.2.1. Ley de Faraday.

El cambio en flujo magnético crea un campo eléctrico entorno a este. La ecuación que representa este fenómeno se expresa en forma diferencial en la ecuación 3.18 y en forma integral en la ecuación 3.19.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad (3.18)$$

En su forma diferencial, ecuación 3.19, la ley de Faraday establece que la razón de cambio de un flujo magnético que penetra una superficie abierta S

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \Phi \quad (3.19)$$

Cuando el flujo magnético cambiante en el tiempo pasa a través de una superficie cerrada, se genera una fuerza electromotriz en el conductor de la superficie. Sí el cable es puesto en corto circuito o conectado a una carga, una corriente fluye a través del cable. La dirección de esta corriente será tal que el flujo magnético que su vez induce se opone al flujo magnético que lo creó.

$$e = -k_w N \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = -k_w N \frac{d}{dt} \Phi = \frac{d}{dt} \Psi \quad (3.20)$$

Estas ecuaciones son utilizadas para determinar los voltajes inducidos en los embobinados de un motor

3.2.2. Ley de Ampere.

El principio básico de producción de un campo magnético debido a una corriente es la ley de Ampere. En su forma diferencial, ecuación 3.21, describe la situación donde una corriente y un flujo eléctrico cambiante en el tiempo producen un campo magnético alrededor de ellos (Pyrhönen et al., 2008). La dirección del flujo magnético puede deducirse con la regla de la mano derecha, donde el pulgar apunta en la dirección de la corriente y el resto de los dedos muestran la dirección del campo magnético.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} \quad (3.21)$$

En su forma integral, ecuación 3.22, se indica la corriente penetrando una superficie S y la razón de cambio de un flujo eléctrico deben ser iguales a la integral de línea de la intensidad de flujo magnético a lo largo de la línea l.

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{S} + \frac{d}{dt} \int_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = i(t) + \frac{d}{dt} \psi_e \quad (3.22)$$

Los términos relacionados con el flujo eléctrico cambiante en el tiempo son parte de las contribuciones de Maxwell a la teoría electromagnética, sin embargo, para los fenómenos presentes en los motores eléctricos se puede despreciar este efecto. La ecuación 3.23 muestra la ley de Ampere en su llamada forma cuasi estática.

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{S} = \sum i(t) = \Theta(t) = k_w Ni \quad (3.23)$$

El diseño magnético de una máquina eléctrica se basa en la ley de Ampere. Esta ecuación es empleada para determinar los voltajes magnéticos en una máquina eléctrica, estimar la corriente concatenada, calcular las perdidas por corriente de Eddy, determinar el efecto de piel en los conductores, (Pyrhönen et al., 2008).

Despreciando el término del desplazamiento de Maxwell, en la ecuación se muestra la ley de conservación de la carga, conocida como la ecuación de la continuidad de la corriente eléctrica.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (3.24)$$

3.2.3. Ley de Gauss para campos eléctricos.

La divergencia de un flujo eléctrico, ecuación 3.25, establece que el flujo siempre será desde cargas positivas hacia cargas negativas.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.25)$$

Esta ley indica en su forma integral, ecuación 3.26, que la carga dentro de una superficie cerrada con un cierto volumen crea una densidad de flujo eléctrico. En las máquinas eléctricas esta ley se utiliza para modelar los diferentes aislantes, pero también sirve para interpretar que no para los campos magnéticos presentes en los motores, no existe un punto de origen y otro de destino, por lo que cualquier flujo que penetre una superficie de igual forma está saliendo de esta.

$$\int_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho_V dV \quad (3.26)$$

3.2.4. Ecuación de Gauss para campos magnéticos.

La ley de Gauss para campos magnéticos en su forma diferencial, ecuación 3.27, describe que un flujo magnético siempre circula sin puntos de inicio o fin, Por otro lado en su forma integral, ecuación 3.28, esta ley establece que la suma de los flujos magnéticos que penetran una superficie cerrada es cero, es decir que un flujo que entra en la superficie también debe dejar la misma Pyrhönen et al. (2008). En las máquinas eléctricas esta ley nos indica que el flujo magnético principal encierra al circuito magnético sin puntos de inicio o fin.

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (3.27)$$

$$\oint_S \bar{B} \cdot d\bar{S} = 0 \quad (3.28)$$

3.2.5. Potencial vector.

El campo, \bar{B} , no puede ser expresado como el gradiente de un potencial escalar. Por lo anterior se define el potencial vector, ecuación 3.29, dicho concepto es utilizado para formular los problemas de elemento finito, las ecuaciones de Maxwell pueden ser expresadas en términos de potencial vector para facilitar los cálculos.

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad (3.29)$$

La ley de inducción de Faraday expresada en términos del potencial vector se expresa en la ecuación 3.30.

$$\nabla \times \bar{E} = -\nabla \times \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (3.30)$$

A partir de la ecuación 3.30, se puede expresar al campo eléctrico en términos del potencial vector, ecuación. Se observan dos componentes de \bar{E} , una rotacional causada por el cambio en el tiempo y otra creada por la polarización de los materiales dieléctricos.

$$\bar{E} = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \phi \quad (3.31)$$

La ley de Ampere en términos del potencial vector se puede ser expresada en dos formas, la ecuación, la cual es válida para las áreas donde las corrientes parásitas pueden ser inducidas y la ecuación válida en áreas con densidad de corriente causadas por una fuente como los embobinados (Pyrhönen et al., 2008).

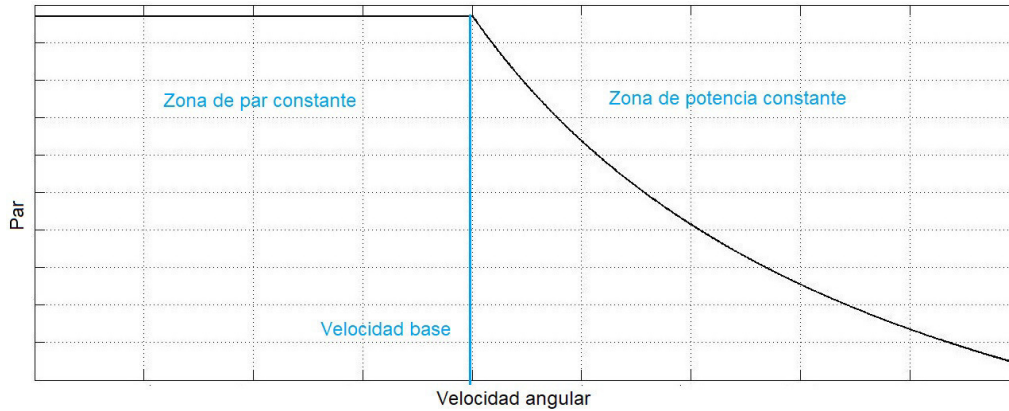


Figura 3.2: Curva par-velocidad ideal de un MET.

3.3. Definición de conceptos para los MET

3.3.1. Curva par-velocidad.

Esta gráfica representa la capacidad del motor para entregar par en función de la velocidad. La curva de par velocidad es creada controlando el voltaje y la frecuencia buscando obtener el máximo par posible (Ansys, 2019). Por lo tanto, depende totalmente de la combinación de motor y controlador.

La curva ideal de los motores de tracción se muestra en la figura 3.2. Se compone de dos regiones; en la primera región el motor entrega un par constante para proporcionar una aceleración suave y rápida, en esta área el voltaje aplicado al motor aumenta hasta llegar a su valor nominal mientras que el flujo se mantiene constante, al mismo tiempo en esta sección la potencia aumenta de forma lineal hasta su valor nominal. En la segunda zona el par comienza a disminuir de forma hiperbólica, el voltaje se mantiene constante, pero se implementa debilitamiento del flujo para extender el rango de velocidad, por lo que el par también disminuye mientras que la potencia se mantiene constante.

Algunos autores como Yilmaz (2015) describen una tercera región donde se presenta una operación a velocidades por encima de la máxima velocidad con mínimos requerimientos de potencia. Debido a que esta curva proporciona la mayor información sobre el desempeño de un motor de tracción en esta sección se describen los conceptos involucrados y más usados en el análisis del desempeño de los MET.

3.3.2. Par.

El par es una medida de la fuerza de giro sobre un objeto (Tong, 2014), es una cantidad vectorial definida por la ecuación 3.32 y la dirección es definida perpendicular tanto a r como a F . El par de un motor eléctrico puede ser clasificado en par estático y par dinámico: el par estático se refiere a la cantidad de par que el motor puede entregar a una velocidad

angular nula, mientras que el par dinámico es el par producido con una velocidad diferente de cero con una carga aplicada.

$$T = \bar{r} \times \bar{F} \quad (3.32)$$

Para un sistema rotatorio con un eje fijo, el par dinámico a lo largo del eje de rotación se define como la razón de cambio del momento angular, M_a (N-m-s) que a su vez puede ser expresado como el producto del momento polar de inercia, J_p , y la velocidad angular, ecuaciones 3.33 y 3.34.

$$T = \frac{d}{dt} M_a \quad (3.33)$$

$$M_a = J_p \times \omega \quad (3.34)$$

Par continuo. Definido por la velocidad y potencia nominal (Tong, 2014). Este par es el proporcionado por el motor para poder mover cargas de forma continua y suave. El par continuo que un motor puede proporcionar está limitado por la capacidad de enfriamiento del motor y la eficiencia (Tang, 2010).

Par pico. Está asociado con la corriente pico, es el par máximo que un motor puede producir por periodos cortos sin exceder la temperatura límite o el par de operación segura. El par pico posee dos componentes, el par de aceleración y par constante. El par de aceleración es causado por las fuerzas de inercia con la aceleración angular máxima. El par constante se debe a fuerzas no inerciales como gravedad, fricción cargas previas y otras (Tong, 2014).

Rizado del par. Cuando un motor está operando en estado permanente el par de salida no es totalmente constante, se presentan oscilaciones cíclicas que se denominan rizado del par. El rizado de par se puede clasificar en cuatro tipos dependiendo de la fuente que lo origine: el par pulsante, el par fluctuante, el par de reluctancia y el par de los sistemas mecánicos y de inercia. El par pulsante se origina de la forma trapezoidal inherente de la fuerza contraelectromotriz. El par de fluctuación es provocado por alteraciones en la magnitud de las corrientes de fase; el par de reluctancia es la componente del par que no se relaciona con la corriente suministrada y el par mecánico se presenta por la dinámica de la carga.

El par de reluctancia se origina por la reluctancia variable como función de la posición del rotor. Cuando el rotor gira, los imanes permanentes pasa sucesivamente a través de los dientes y las ranuras del estator, ocasionando variaciones en el campo magnético. El rotor tiende a bloquearse en la posición donde se alcanza la máxima permeabilidad. Cuando

el rotor se desfasa de dicha posición de equilibrio se generan fuerzas tangenciales entre los dientes del estator y el rotor que intentan llevar al rotor de nuevo al equilibrio, ya sea tratando de conservar la posición previa o empujando el rotor a la próxima posición de equilibrio (Tong, 2014), originando así el rizado del par.

$$T(t) = T_o + T_p(t) \quad (3.35)$$

Un rizado excesivo causa ruido y vibraciones que se transmiten al tren motriz afectando la durabilidad de los componentes (Yang et al., 2017).

Métodos para reducir el par de reluctancia. El método más efectivo puesto en práctica consiste en sesgar ya sea los dientes del estator con respecto al centro del rotor o sesgar los imanes permanentes o barras conductoras con respecto a los dientes del estator (Tong, 2014). Otro método es utilizar un devanado con número fraccionario de ranuras por polo, con este método no solo se reduce el par de reluctancia, también se disminuyen el orden de los armónicos debido a que se rompe la periodicidad en el arreglo del devanado logrando una distribución más sinusoidal. Se debe tener en cuenta que al implementar estas técnicas, la proyección de polos del motor disminuye por lo que, aunque la operación se vuelve más suave el par neto disminuye.

Otras terminologías para el par. A lo largo de la curva del par se presentan características importantes, incluyendo: el par a rotor bloqueado es el par que un motor puede producir a velocidad angular nula, con la potencia de salida igual a cero (Tong, 2014), El mínimo valor de par que el motor entrega en cualquier posición del rotor en reposo al aplicarse el voltaje nominal a la frecuencia nominal (Toliyat and Kliman, 2004), también es conocido como el par de arranque. El par máximo de rotura es el máximo par que el motor puede entregar con el voltaje y la frecuencia nominales antes de que se produzca una caída abrupta en la velocidad (Toliyat and Kliman, 2004). El par máximo de desviación. es el par más alto que el motor puede entregar sin bloquearse.

Densidad de par y par específico. Dos métricas importantes para determinar qué tan conveniente es un motor para ser utilizado como sistema de tracción son la densidad de par y el par específico. La densidad de par es la relación entre el par nominal y el volumen del motor, es una medida de la capacidad de par de torsión por unidad de volumen, un motor con alta densidad de par será un motor compacto. El par específico es un parámetro más universal y es la relación entre el par nominal y la masa del motor, un par específico alto implica una potencia específica alta y también una capacidad de aceleración más alta (Miller, 2004), un motor con un par específico alto será un motor ligero.

Relación de par Es descrito cómo la relación del par de reluctancia absoluto, que es el valor de pico a pico del rizado del par, entre el valor nominal del par. Este valor se usa para describir de forma cuantitativa el nivel de rizado del par.

3.3.3. Potencia.

La potencia, P (kW), se define como la cantidad de trabajo realizado por unidad de tiempo. De tal modo que la potencia generada por un motor en un intervalo de tiempo se define por la ecuación 3.36, si el trabajo dU es expresado en términos de la fuerza y distancia, y a su vez la fuerza es expresada en términos del par, La potencia de salida de un motor, es expresada como el producto del par del motor y la velocidad angular, ecuación 3.37.

$$P = \frac{dU}{dt} \quad (3.36)$$

$$dU = F \cdot dr = \frac{T}{R} \cdot dr$$

$$P = \frac{T}{R} \cdot \frac{dr}{dt} = T \cdot \frac{V}{R}$$

$$P_s = T \cdot \omega \quad (3.37)$$

En términos de cantidades electromagnéticas, la potencia nominal teórica, P_{nt} , está dada por la ecuación 3.38, donde B_{eh} (T) es el flujo magnético en el entrehierro, C_E (A/m) es la carga eléctrica, l_r (m) es el largo del rotor, d_{eh} es el diámetro del entrehierro y n (rpm) es la velocidad angular (Toliyat and Kliman, 2004).

$$P_n = \frac{\pi^2}{60} B_{eh} C_E l_r d_{eh}^2 n_m \quad (3.38)$$

Contemplando la geometría de las ranuras, la carga eléctrica se puede expresar en términos del área de la sección transversal del total de conductores en cada ranura, bh (m²), de la densidad de corriente, J (A/m²) y de la distancia entre cada ranura, y_{ra} , tal como se indica en la ecuación 3.39.

$$A = J \frac{bh}{y_{ra}} \quad (3.39)$$

Para el análisis de motores alimentados por CA, se requiere definir distintas cantidades relacionadas con la potencia.

Potencia real Es el valor instantáneo de la potencia dado por el producto del voltaje y la corriente instantáneos, ecuación 3.40. La potencia real es de gran importancia porque el valor máximo de esta debe ser limitado para evitar que el límite de operación segura sea sobrepasado.

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (3.40)$$

Potencia activa (promedio). Para el caso de los motores eléctricos, que son alimentados por corrientes de CA que muestran comportamientos periódicos, la potencia promedio, P (W), se obtiene como un medio del producto del valor máximo del voltaje por el valor máximo de la corriente y por el coseno de la diferencia de los ángulos de fase entre el voltaje y la corriente. la ecuación 3.41, donde V_m es el valor máximo del voltaje sinusoidal, I_m es el valor pico de la corriente sinusoidal. Es importante notar que para cargas puramente reactivas la potencia activa es cero.

$$P = \frac{1}{2}V_m I_m \cos(\theta - \phi) \quad (3.41)$$

Valores efectivos Los valores efectivos de los voltajes y las corrientes sinusoidales son una medida de la efectividad de una fuente para entregar potencia a una carga resistiva. El valor efectivo de cualquier corriente periódica es igual al valor de la corriente directa que al fluir por un a resistor de R (Ohm) entrega la misma potencia promedio que la corriente de alterna. Para el caso de un corriente de alterna con una amplitud I_m el valor efectivo I_{ef} , está dado por la ecuación 3.42

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (3.42)$$

El uso de valores efectivos simplifica ligeramente la expresión para la potencia promedio al hacer uso de la definición de valores efectivos, mostrada en la ecuación para el caso de la corriente. En la ecuación, se expresa la potencia promedio en términos de los valores efectivos. Dicha expresión es útil ya que en el campo de la transmisión de potencia y máquinas eléctricas los valores de uso común son los valores eficaces en lugar de la amplitud, la cual suele usarse en el campo de la electrónica.

$$P = V_{ef} I_{ef} \cos(\theta - \phi) \quad (3.43)$$

Potencia Aparente y factor de potencia. Es la potencia que se obtiene al emplear valores eficaces, ecuación, las unidades de la potencia aparente se miden en VA para evitar cualquier confusión. El factor de potencia es una medida de cuanta de la corriente suministrada al motor produce campo magnético comparada con la corriente de las pérdidas más la potencia de salida.

$$FP = \frac{P}{P_{ap}} \quad (3.44)$$

3.3.4. Velocidad

Velocidad síncrona La velocidad síncrona se obtiene como la correspondencia entre la velocidad angular eléctrica y la velocidad angular mecánica, la cual se relaciona por medio del número de polos en el estator (Gourishankar, 1969). Las ecuaciones 3.45 y 3.46 describen dicha relación. Esta es la velocidad a la que se encuentra girando el campo magnético rotatorio, por lo que es la velocidad a la que giran los motores síncronos.

$$f_{sin} = \frac{np}{120} \quad (3.45)$$

$$n_{sin} = n_m p_p \quad (3.46)$$

Velocidad base y velocidad máxima. En la curva de par-velocidad de los MET, se conoce como velocidad base a aquella donde termina la zona de par constante y comienza la zona de potencia constante. La velocidad máxima es el valor más grande que puede alcanzar el motor durante la operación segura.

Velocidad Crítica. Velocidad a la que ocurre resonancia mecánica. Cada componente mecánico puede entrar en resonancia en la llamada frecuencia de resonancia característica de cada elemento. Sin embargo, en un tren motriz debido a la conexión de diferentes elementos, se forma una nueva frecuencia de resonancia.

3.3.5. Eficiencia

La eficiencia es una medida de que tan efectiva es la conversión de energía eléctrica en energía mecánica. Es definida como la razón entre la potencia de entrada y potencia de salida.

Mapa de eficiencia. El mapa de eficiencia de un motor es una representación del valor de la eficiencia en cada punto de operación limitado por la curva de par-velocidad. Se obtiene por medio de un análisis repetitivo del motor variando a frecuencia, voltaje y corriente bajo una de las técnicas de control utilizadas en este tipo de motores.

Los motores de CA sin escobillas pueden ser controlados por distintas técnicas: máximo par por ampere (MTPA, por sus siglas en inglés), máxima eficiencia, factor de potencia unitario, ángulo de fase constante (es decir, corriente en el eje directo igual a cero y la corriente en el eje en cuadratura es variable: $I_d=0$ I_q =variable), pérdidas de potencia contante. El método más utilizado es el de MTPA y los valores límites del convertidor de potencia se puede calcular con la curva par-velocidad para todo el rango de velocidad (Rosu et al., 2018).

3.3.6. Transformaciones en otros ejes.

En el estudio de sistemas de potencia las transformaciones matemáticas son usadas comúnmente para desacoplar variables, para facilitar la solución de ecuaciones difíciles con coeficientes que varían en el tiempo o para manipular todas las variables en el mismo marco de referencia.

El análisis en la proyección sobre los ejes d y q se simplifica debido a que algunas cantidades que en los ejes de referencia abc son dependientes de la posición y del tiempo.

Transformada de Park El objetivo es transformar las cantidades de una máquina síncrona a un sistema de referencia fijo en el motor, ecuación 3.47. Este marco de referencia, denominado por los nombres de sus ejes directo y en cuadratura como marco d-q, el eje d está alineado con el eje magnético del campo y el eje q se define 90° eléctricos adelante del eje d. La matriz de transformación se define en la ecuación 3.48 (Ong, 1998).

$$f_{dq0} = T_{dq0}(\theta_d) [f_{abc}] \quad (3.47)$$

$$T_{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_d) & \cos(\theta_d - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta_d + \frac{2}{3}\pi) \\ \text{sen}(\theta_d) & -\text{sen}(\theta_d - \frac{2}{3}\pi) & -\text{sen}(\theta_d + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

El eje directo es el eje del campo del rotor. El eje en cuadratura es el eje perpendicular al campo del embobinado.

3.3.7. Valores unitarios.

El sistema de valores unitarios se obtiene al dividir los valores reales por un valor de referencia. Típicamente y por simplicidad los valores de referencia son los valores nominales, por lo que una cantidad por unidad se define como lo indica la ecuación 3.49. Este modo de análisis es muy útil cuando se requieren comparar motores con diferentes valores nominales, debido a que los resultados son normalizados. Este sistema también es muy útil en las etapas de diseño donde no tienen la información definitiva de los parámetros del motor (Toliyat and Kliman, 2004).

$$Cantidad\ por\ unidad = \frac{Valor\ real}{Valor\ nominal} \quad (3.49)$$

3.4. Campos magnéticos giratorios y devanados trifásicos.

Una forma de producir campos magnéticos en los núcleos laminados es por medio conductores portadores de corriente paralelos al eje de la máquina. Los conductores son dispuestos en bobinas conectados en los extremos fuera de los núcleos, a su vez las bobinas son conectadas para formar el devanado que consisten en un número pequeño de circuitos eléctricos que portan corriente de forma independiente (Adkins and Harley, 1975). El más simple devanado de AC que produce un campo magnético rotatorio es el bifásico (Chapman, 2005, Pyrhönen et al., 2008). De acuerdo con la forma en que las bobinas se encuentran dispuestas en los polos o ranuras de los núcleos, los devanados se clasifican como devanados concéntricos y devanados distribuidos.

Por la función que cumplen los devanados se clasifican como, devanados de armadura, devanados de campo. Los devanados de armadura cumplen con la función principal es efectuar la conversión de potencia eléctrica. Un devanado de campo es usado para proveer flujo de excitación. Otras clasificaciones de los devanados estas dadas por: devanados imbricados y devanados ondulados; devanados de paso corto y paso completo, etc.

Debido a la localización discreta de las ranuras la fuerza magnetomotriz en el entrehierro posee escalonamientos en cada posición de las espiras. La velocidad de propagación de los armónicos creados por el devanado es diferente a la velocidad de la componente fundamental.

Al reducir el paso el extremo de la bobina es más corto y la cantidad de cobre requerido es menor. El flujo concatenado se reduce y el número de vueltas tiene que aumentarse El paso también influye en el contenido armónico de la densidad de flujo en el entrehierro. Un embobinado de paso corto produce una distribución de corriente más sinusoidal que una de paso completo (Pyrhönen et al., 2008).

Una relación fundamental para entender las interacciones entre los campos magnéticos giratorios y la velocidad del motor es la equivalencia entre grados eléctricos y grados mecánicos que se denota en la ecuación 3.50,

$$\theta_e = p_p \theta_m \quad (3.50)$$

3.4.1. Devanados.

El número de zonas se define por el número de fases, m , y el número de polos, p , tal como lo indica la ecuación 3.51. Posteriormente el número de ranuras por cada zona, q , se expresa como el número de ranuras por fase y por polo, ecuación 3.52.

$$zonas = pm \quad (3.51)$$

$$q = \frac{Q}{pm} \quad (3.52)$$

3.5. Materiales usados en los motores eléctricos de tracción.

Las propiedades ferromagnéticas de un material están asociadas con los momentos atómicos producidos por las propiedades de giro y la órbita de los electrones [Ong1997]. En un material ferromagnético los dominios se encuentran en posiciones aleatorias, cuando el material interactúa con un campo magnético externo, los polos tienden a alinearse con dicho campo en forma proporcional a la intensidad del campo magnético. Cuando la mayoría de los polos se han alineado se dice que el material está magnéticamente saturado.

Los materiales ferromagnéticos se dividen en materiales magnéticos suaves y magnéticos duros. En los materiales suaves, las paredes de los dominios del material son fáciles de mover, La intensidad de campo de coercitividad es baja y son fáciles de magnetizar. Por el contrario los materiales magnéticos duros presentan una coercitividad alta y en su estructura hay irregularidades como dislocaciones o inclusiones de materiales no magnéticos.

Los dominios de Weiss son imanes elementales en los materiales ferromagnéticos. Dichos dominios son separados por las paredes de Bloch, los cuales son regiones en los límites de las fronteras de cada dominio (Pyrhönen et al., 2008). Normalmente la saturación toma parte en tres diferentes fases. En un campo magnético débil, los dominios de Weiss están posicionados en dirección del incremento del campo. En un campo magnético fuerte los dominios magnéticos En el diseño de máquinas eléctricas la información más valiosa es tomada de la curva B-H del material en cuestión.

En general el estator y el rotor se construyen del mismo material, sin embargo existen ciertas consideraciones que pueden llevar al uso de distintos materiales para cada elemento; la principal función del estator es generar el campo magnético giratorio, en este sentido los requerimientos electromagnéticos del material para el estator son más demandantes que los

requerimientos del rotor; de forma similar el rotor está sujeto a mayores fuerzas centrífugas, por lo que las propiedades mecánicas para el rotor son más exigentes que para el estator.

3.5.1. Acero al silicio.

Alear el acero con silicio incrementa la resistividad del material y por lo tanto reduce las pérdidas por corrientes parásitas. Además, se modifica la estructura del grano logrando menores pérdidas por histéresis.

El acero al silicio posee una estructura cúbica centrada que durante el proceso de rolado estos cristales son alargados y aplanados en la dirección del rolado. Si el material se conserva en esa condición las propiedades magnéticas son maximizadas en dicha dirección, este tipo de material se conoce como grano orientado. Se puede tomar ventaja de esta característica si se aplica el material en la misma dirección en la que se espera el flujo magnético. Por lo general se utiliza este tipo de material en los transformadores, donde se conoce la dirección del flujo que siempre es la misma.

El acero al silicio de grano no orientado se obtiene al aplicar un tratamiento térmico de recocido, normalmente entre 850 (°C) - 1100 (°C). Se elimina la estructura de grano y se obtiene isotropía de las propiedades magnéticas. Este tipo de material es comúnmente usado en los motores eléctricos, donde debido al movimiento rotatorio el flujo magnético cambia de dirección. El contenido de silicio es de 1.5 % a 3.5 % pero en general el acero al silicio de grano no orientado posee un mayor contenido de silicio de 3.0 % a 3.5 %; un contenido por encima del 4.0 % de silicio bajaría la densidad de flujo a la que se satura el material. El contenido de carbono es bajo, alrededor del 0.003 %, es por lo que se conocen como materiales suaves. Las impurezas tales como óxidos, nitruros y sulfuros deben ser controladas para disminuir las pérdidas por histéresis.

Una aleación rica en silicio hace al material frágil. El acero eléctrico posee cantidades alrededor del 6 % El aluminio en un 16 % hace un material muy duro (250 HV), Un contenido del 17 % de aluminio vuelve al material paramagnético.

El Instituto estadounidense del hierro y acero (AISI por sus siglas en inglés) designa a los aceros eléctricos de acuerdo con las pérdidas en el núcleo. Para designar a un acero eléctrico se utiliza la letra M seguida de un número de designación, entre más bajo sea el número menores son las pérdidas en el núcleo. De todos los grados existentes en la norma AISI, el grado M19 es uno de los más comunes en el uso de motores eléctricos.

Otra norma que designa a los aceros al silicio es EN 10106. Los grados de la norma EN 10106 son clasificados de acuerdo con el valor máximo pérdidas específicas en (W/Kg) y el espesor del material. La designación de las láminas de acero al silicio se compone de la siguiente manera: La letra M se utiliza para designar a un acero eléctrico. El valor multiplicado por cien de las pérdidas específicas máximas en (W/Kg) medidas a 50 (Hz) y 1.5 (T). El valor multiplicado por cien del espesor nominal en (mm). La letra A para distinguir al grano no orientado. Se pueden consultar las hojas técnicas

de los productores de acero al silicio para obtener los datos que caracterizan al material y utilizarlos en análisis de motores.

Un ejemplo de la caracterización de este material es el acero M235-35A el cual presenta pérdidas en el núcleo bajas y el espesor de 0.35 (mm) es ampliamente utilizado en los últimos MET. En la figura se puede observar la curva B-H de este material. mientras que en la figura se muestran las pérdidas en el núcleo, los datos fueron obtenidos de las hojas técnicas.

3.5.2. Imanes permanentes.

Los imanes permanentes resultan convenientes para las aplicaciones en los MET debido a que favorecen el diseño de motores más livianos y compactos y además mejoran la eficiencia (Tong, 2014, Pyrhönen et al., 2008). La relación más importante que caracteriza a los IP es la curva no lineal entre la densidad de campo magnético, B y la intensidad del campo magnético, H. Una curva típica de estos materiales es mostrada en la figura 3.3.

Un imán sin magnetizar se compone de una gran cantidad de polos magnéticos orientados de tal modo que se cancelan unos con otros, es decir que el material se encuentra en el origen de la curva B-H. Durante el proceso de magnetización, dichos dominios son forzados en la dirección de campo magnético aplicado, siguiendo la relación de la curva 1 en la figura 3.3. En la zona de saturación magnética, cualquier incremento en H representa un incremento muy pequeño de B; cuando H se fija nuevamente en cero el imán conserva una cantidad considerable de magnetización debido a la histéresis del material, este fenómeno se denomina magnetismo residual, B_r . Para llevar de nuevo B a cero H tiene que ser aplicado en la dirección contraria de acuerdo con la curva 3, este proceso se conoce como coercitividad, $-H_c$.

El comportamiento de los imanes está altamente influenciado por la temperatura de operación; un aumento en la temperatura aumenta la energía cinética de los átomos, causando movimientos vibratorios en torno a los dominios ocasionando que estos pueden perder alineación. El aumento de temperatura modifica el ancho del ciclo de histéresis, la amplitud de inducción, máxima permeabilidad y otras propiedades magnéticas. Además, con el aumento de temperatura la densidad de flujo remanente disminuye, repercutiendo en la disminución de par medio y par de reluctancia pero incrementando el rizado de par. La temperatura en la que los imanes pierden sus propiedades magnéticas se denomina temperatura de Curie.

Se puede clasificar los efectos de la temperatura sobre los imanes en tres categorías: pérdidas reversibles, donde el imán recuperará sus propiedades originales una vez que regrese a la temperatura normal de operación; pérdidas irreversibles pero recuperables, donde la única manera de obtener las propiedades originales es con un nuevo proceso de desmagnetización y pérdidas irreversibles e irrecuperables, donde el material alcanzado o excedido la temperatura de Curie y ha perdido todas sus propiedades magnéticas debido a al cambio en la estructura cristalina, en este caso no se puede

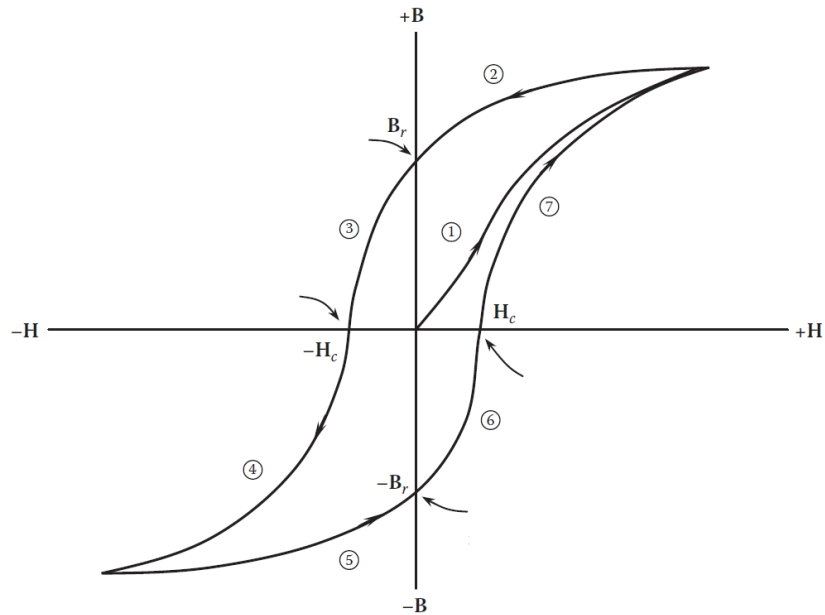


Figura 3.3: Curva típica para imanes permanentes, densidad-intensidad de campo.

recuperar las propiedades del material al magnetizar nuevamente Tong (2014).

Los imanes permanentes han sido utilizados en los motores eléctricos desde el siglo pasado, sin embargo, la historia moderna de los IP comenzó en 1930 con la introducción del alnico. Para aquella época este tipo de imanes dominaron el mercado de las máquinas eléctricas debido que presentaban una excelente remanencia

Imanes de ferrita. Los IP de ferrita están hechos de algunos óxidos como SrO, BaO o Fe_2O_3 . Debido al bajo costo de la materia prima y de los procesos de manufactura este tipo de imanes son considerablemente económicos. La resistencia a la corrosión es considerada excelente y no se requiere de tratamientos superficiales por lo que este tipo de imanes pueden operar en condiciones ambientales severas en presencia de polvo y humedad e incluso en temperaturas relativamente altas.

Imanes de alnico. Los imanes de alnico son aleaciones de aluminio, níquel, cobalto, cobre, hierro y otros materiales, se producen por sinterización o fundición. La gran ventaja de este tipo de imanes es que poseen rango más amplio de estabilidad térmica y el más bajo coeficiente térmico. La temperatura máxima de operación está en el rango entre los 450°C y 550°C , debido a resistencia a la corrosión no se requieren de tratamientos superficiales.

Imanes de tierras raras. Los elementos de tierras raras son más comunes de lo que su nombre indica, estos elementos son, neodimio Nd, samario Sm. Comparado con otros tipos de imanes, los imanes de tierras raras poseen una

densidad de flujo residual mayor y una mucho mayor coercitividad, sin embargo, la temperatura de Curie es mucho menor.

Los imanes elaborados con samario y cobalto, Sm-Co, pueden trabajar a temperaturas relativamente altas, pudiendo alcanzar hasta los 350 (°C), además poseen una resistencia a la corrosión considerablemente buena, sin embargo, las reservas mundiales de este elemento son limitadas, lo cual encarece este tipo de imanes permanentes (Tong, 2014).

Imanes de neodimio (NdFeB) Dentro de los imanes elaborados de tierras raras, los imanes de NdFeB ofrecen el producto de energía más alto de cualquier material disponible para temperaturas por debajo de los 200 (°C). Estos imanes pueden cargar hasta 600 veces su peso. Poseen características altas de densidad de flujo remanente, fuerza de coercitiva y producto de energía magnética. También presentan las mejores propiedades mecánicas, lo que facilita la producción de formas complejas. Las desventajas que presentan estos tipos de materiales son, la baja resistencia a la corrosión, lo que hace necesario tratamientos superficiales como el revestimiento con níquel, zinc, oro, cromo o alguna resina epóxica; la temperatura de operación es relativamente baja, con procesos especiales se pueden alcanzar hasta los 220 (°C) y las pérdidas a altas temperaturas son relativamente altas (Tong, 2014).

Tendencias en los imanes permanentes. En las últimas dos décadas se han investigado imanes innovadores que permitan acelerar el desarrollo de motores cada vez más potentes y livianos. Algunas de estas tendencias que pueden desarrollarse en futuros imanes comerciales son: imanes de nano-aleaciones, donde los imanes presentan diversos patrones de magnetización que están íntimamente relacionados con el desempeño deseado. Basados en el conocimiento de que las propiedades magnéticas de los imanes mejoran con la disminución del tamaño de grano y el aumento de la relación superficie-volumen, se han desarrollado imanes nano cristalinos de itrio-samario-cobalto los cuales pueden presentar mejores características magnéticas inusuales y causadas por una extremadamente larga área superficial (Tong, 2014).

La universidad japonesa Tohoku University en colaboración con la compañía Toda Kogyo Corporation, produjeron imanes elaborados de polvo de Fe_{16}N_2 con un 91% de pureza. Aunque este tipo de imanes se ha investigado por los últimos 40 años, con el proceso de sinterización desarrollado Toda Kogyo se espera la comercialización de estos materiales para el año 2023.

3.5.3. Aislantes.

La principal función de los aislantes es separar zonas con diferentes potenciales eléctricos o diferentes circuitos. Los aislantes determinan la máxima temperatura de operación. El tipo de aislante debe ser definido en las etapas conceptuales del diseño. Un incremento de 10 °C por encima del valor nominal disminuye la vida útil del aislante en más del

50 % (Pyrhönen et al., 2008, Toliyat and Kliman, 2004). Los tipos de aislantes son: aislantes para bobinas, aislantes para fases, aislantes entre tierra y fase, aislantes para ranuras.

3.6. Pérdidas en los motores eléctricos.

3.6.1. Pérdidas en los núcleos.

Para cualquier tipo de motor las pérdidas en el núcleo consisten en pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas.

Existen diversos métodos para obtener las pérdidas en el núcleo de los motores. Para lograr un cálculo muy preciso, se deben de incorporar al análisis por elemento finito modelos magneto-dinámicos que representen el comportamiento de magnetización de los materiales sometidos a flujos sinusoidales y rotatorios (Dlala, 2009). Aunque el análisis de la magneto-dinámica de los motores eléctricos garantiza los resultados más exactos la integración en el AEF resulta muy complicada y puede conllevar a problemas de divergencia.

Para evitar esta complejidad, las pérdidas en los núcleos laminados son calculadas con el procesamiento posterior de la solución del flujo magnético. La ecuación 3.53 es un modelo empírico ampliamente utilizado donde se dividen las pérdidas en el núcleo en pérdidas debidas a la histéresis, las cuales varían linealmente con la frecuencia, y pérdidas en el núcleo causadas por corrientes parásitas, las cuales varían con el cuadrado de la frecuencia (Meeker, 2017).

$$P_{nucleo} = P_h + P_e = C_h \omega B^2 + C_p \omega^2 B^2 \quad (3.53)$$

3.6.2. Pérdidas por corrientes parásitas.

Cuando un núcleo laminado es sometido a un campo eléctrico alternante, se inducen corrientes parásitas tanto en cada lámina como entre láminas. En general las corrientes parásitas varían con el cuadrado del espesor de las láminas y debido a la tendencia de utilizar láminas cada vez más delgadas las pérdidas dentro de cada lámina son muy bajas. Para disminuir las pérdidas interlaminares cada lámina debe ser aislada por ambos lados, se pueden usar distintos recubrimientos pero el método más común es crear una capa de óxido por medio de un tratamiento térmico de recocido.

3.6.3. Pérdidas térmicas.

La resistencia de CD depende del largo de la bobina, el número de ramas paralelas y el área de sección y la conductividad del material (Pyrhönen et al., 2008).

$$R_{DC} = \frac{l_c}{\sigma_c a S_c} \quad (3.54)$$

Efectos de la temperatura. Cuando la temperatura excede el valor permitido, puede causarse degradación de los materiales aislantes, desmagnetización irreversible de los IP.

El diseño de un buen sistema de enfriamiento es de vital importancia para el diseño exitoso de un MET.

Las corrientes parásitas en los imanes disminuyen la eficiencia, pero el mayor inconveniente es el aumento de temperatura en los imanes que puede causar una degradación de sus propiedades. Por eso es importante predecir las pérdidas por corrientes parásitas en los imanes y si estas resultas fuera de los niveles aceptables los imanes se pueden seccionar.

3.7. Procesos de ensamble y manufactura.

3.7.1. Manufactura y ensamble de los núcleos laminados.

En general el estator y el rotor se construyen del mismo material, sin embargo existen ciertas consideraciones que pueden llevar al uso de distintos materiales para cada elemento; la principal función del estator es generar el campo magnético giratorio, en este sentido los requerimientos electromagnéticos del material para el estator son más demandantes que los requerimientos del rotor; de forma similar el rotor está sujeto a mayores fuerzas centrífugas, por lo que las propiedades mecánicas para el rotor son más exigentes que para el estator.

Corte de las láminas. Existen principalmente dos procesos de manufactura usados para la producción de las láminas, troquelado y corte por láser. Para largos volúmenes de producción el método más conveniente es el troquelado debido a su eficiencia y bajos costos. Algunas líneas de producción pueden operar a 250 golpes por minuto con una fuerza de 1250 toneladas. Para disminuir el desperdicio de material se opta por troquelar tanto el rotor como el estator de forma simultánea. Se debe cuidar la formación de rebabas en las orillas de las láminas, ya que pueden contribuir a las pérdidas por corrientes parásitas.

El corte por láser se utiliza para los motores grandes en los que el troquelado no se puede efectuar, este método también es conveniente para la construcción rápida de prototipos debido a su flexibilidad, precisión dimensional y tiempo corto de ejecución. Efectuando este proceso con parámetros especiales, se logran láminas con una calidad mayor presentando rebabas mucho más pequeñas, baja deformación, bajos esfuerzos residuales y el manejo de tolerancias dimensionales muy cerradas; además durante el proceso de cortado se forma naturalmente una película de óxido en las rebabas,

reduciendo la conductividad en el contacto entre rebabas y disminuyendo las pérdidas interlaminares. Las desventajas de este proceso son el costo alto, baja productividad y la necesidad de personal técnico muy especializado.

Las láminas del estator son las más grandes y pueden ser construidas en dos configuraciones principales: láminas en una sola pieza y láminas seccionadas. Las láminas en una sola pieza tienen la ventaja de poder ser estampadas junto con las láminas del rotor en un solo proceso de troquelado múltiple, este es el caso en el que se tendrá el rotor y el estator del mismo material, abatiendo tiempos de construcción y facilitando el ensamble de los núcleos. Cuando se ha tomado la decisión de usar distintos materiales para el estator y para el rotor se puede seccionar las láminas del estator; el seccionar las láminas pueden traer beneficios en el ahorro de acero al silicio.

Se utilizan distintos procesos de manufactura para la formación de los laminados, el más común para producción en serie es el corte por troquelado. Con este proceso se obtienen buenas propiedades mecánicas y buenas tolerancias; para nuestro caso la principal desventaja de utilizar este método es el volumen de producción; dado que buscamos construir dos unidades del prototipo, los costos por la fabricación del troquel resultan bastante elevados.

Recocido de las láminas. Después de cortar las láminas por cualquier de los métodos descritos previamente, generalmente se lleva a cabo un tratamiento térmico de recocido. El recocido de las láminas es usado para restaurar las propiedades magnéticas térmicas y mecánicas del material. Durante el proceso de estampado deformaciones y plásticas concentración de esfuerzos y tensiones son producidos en el borde del corte causando efectos desfavorables en las propiedades magnéticas del material. En el proceso de corte por láser las deformaciones plásticas son menores pero debido a la gran temperatura de corte se generan esfuerzos térmicos o se degradan las propiedades magnéticas del material.

Otro uso del recocido es la formación de una película de óxido en la superficie de las láminas, dicho óxido actúa como un aislante interlaminar debido a que se aumenta la resistividad del material. De este modo cuando se ensamblan las láminas para formar el núcleo, se disminuye las pérdidas por corrientes parásitas interlaminares. El proceso de recocido se efectúa normalmente a una temperatura de 830 (°C) a 890 (°C)

Ensamble del núcleo laminado Anteriormente el ensamble de los núcleos laminados se efectuaba utilizando adhesivos o pasadores, sin embargo, ahora resultan procesos poco rentables que han sido sustituidos por métodos como el soldado de las láminas en las superficies externas en dirección axial,

Las láminas del estator y del rotor deben ser ensambladas para formar el núcleo laminado. Algunos de los procesos utilizados para el ensamble son: pegado con adhesivos y prensado en la misma carcasa del motor, el uso de cuñas dobladas en los extremos de los núcleos para asegurar la compactación entre láminas y el soldado entre las láminas a lo largo de ranuras construidas en la superficie exterior del estator y dispuestas en forma paralela al eje.

3.7.2. Magnetización de los imanes

El desempeño adecuado de los imanes solo puede ser asegurado si son magnetizados correctamente a la saturación. La magnetización de los imanes permanentes puede ser efectuado tanto previamente como posteriormente al ensamble en el rotor. Cada uno de los métodos tiene sus ventajas y desventajas.

En la magnetización previa la principal ventaja es que se puede alcanzar de forma sencilla una magnetización completa, sin embargo, la desventaja principal reside en el transporte y manipulación de los imanes durante el proceso de ensamble, ya que se corre el riesgo de desmagnetización por golpes. En una línea de producción en serie se requiere de bandas transportadoras y equipo especial para el transporte y manejo de los imanes, ya que pueden ser atraídos por elementos ferromagnéticos de los equipos de la línea ocasionando golpes o dificultando la manipulación para el ensamble. En el caso de los motores que son muy grandes y el rotor ensamblado no puede ser colocado en un magnetizador, este proceso es la única opción.

La magnetización posterior evita todos los inconvenientes antes mencionados, dado que durante el ensamble los imanes están desmagnetizados, no se atraen o repelen entre ellos, ni tampoco atraen piezas ferromagnéticas ni partículas de polvo o rebaba. Sin embargo, la principal desventaja es que la magnetización será ligeramente inferior, a la magnetización completa. Para los rotores con múltiples capas de imanes permanentes, los imanes que más internos en el rotor pueden ser magnetizados parcialmente o incluso pueden no ser magnetizados, por lo que se requieren de procesos especiales, como el uso de bobinas de magnetización colocadas en el rotor.

3.7.3. Ensamble de la flecha

Un método de ensamble de la flecha con el núcleo laminado es por medio de interferencia mecánica. El valor de la interferencia radial es optimizado para proveer de un contacto adecuado para transmitir par para las condiciones de plena carga y velocidad máxima.

Uno de los factores críticos en el diseño del rotor son las altas fuerzas centrífugas y tangenciales, el ensamble por interferencia mecánica añade cargas que aumentan los esfuerzos en el núcleo del rotor, por lo que es importante no sólo seleccionar el material basados en las propiedades magnéticas y considerar al mismo tiempo las propiedades mecánicas.

3.8. Análisis de Elemento Finito aplicado a máquinas eléctricas.

El método de análisis de elemento finito (AEF) es una herramienta importante en el diseño y análisis de MET. El método de elemento finito es un modelo matemático del motor que se está analizando, existen otros métodos para modelar

ME, sin embargo, el AEF ha sido favorecido debido a la exactitud de los resultados obtenidos. Aunque la principal desventaja del AEF es el tiempo de cómputo que se requiere, existen ciertas técnicas que pueden ser implementadas para reducir o acelerar el análisis.

En el diseño de los MET, este método se emplea para analizar a detalle el desempeño del motor y estudiar el efecto de un parámetro en específico, inclusive se pueden realizar algunas pruebas que no son viables en el laboratorio.

Existen al menos otros dos tipos de modelos para los motores eléctricos, los modelos basados en ecuaciones analíticas y el modelo de circuito magnético equivalente.

3.8.1. Ansys.

Ansys es un paquete de ingeniería asistida por computadora en la que se pueden simular distintos fenómenos físicos. A través de la interfaz central llamada Ansys Workbench, se pueden integrar distintas simulaciones para verificar los componentes mecánicos, térmicos y magnéticos del motor. El paquete de Ansys con el que se resuelven problemas electromagnéticos se llama Ansys Electromagnetics Suite. De las diversas herramientas que incluye este paquete, para el diseño y análisis de motores usamos principalmente: Rmxprt, Ansys Maxwell 2D y Ansys Maxwell 3D.

Aunque Ansys Maxwell es una herramienta general de análisis por elemento finito, sus capacidades permiten a los diseñadores personalizar y aplicar análisis muy específicos para máquinas eléctricas como lo son soluciones en los ejes d-q o algunos algoritmos complejos como el par máximo por unidad de ampere (MTPA, por sus siglas en inglés) empleado para obtener el mapa de eficiencia (Rosu et al., 2018).

3.8.2. FEMM y Octave.

Ansys es un paquete costoso, por lo tanto, en la NTUA se ha optado por implementar una combinación de programas de licencia libre. FEMM es un paquete que permite resolver problemas electromagnéticos por medio de elemento finito. Octave es un programa general de cálculos similar a Matlab. Se pueden programar códigos en FEMM (o Matlab) que permiten el manejo de FEMM para crear análisis. La principal ventaja es que se requiere de un mayor conocimiento tanto de elemento finito como de la teoría electromagnética para poder realizar los cálculos deseados.

3.8.3. Simetría de los motores eléctricos.

Se requiere de bastante tiempo de cómputo para obtener los resultados por medio del AEF. Un método que es ampliamente utilizado para reducir el tiempo es el uso de geometrías parciales que se obtienen de la simetría. Los motores eléctricos son muy simétricos por lo que se puede hacer uso de esta propiedad. Para determinar la mínima sección que

se puede simular para obtener los mismos resultados se obtiene el máximo común divisor de las ranuras en el estator y los polos en el rotor. La mínima sección que se puede simular es el inverso del máximo común divisor.

3.8.4. Ecuaciones gobernantes.

3.8.4.1. Ecuaciones gobernantes en el análisis electromagnético.

Las ecuaciones que describen todo el fenómeno electromagnético son las ecuaciones de Maxwell descritas previamente, sin embargo, para cada análisis a resolver se deben formular dichas ecuaciones para poder obtener los cálculos esperados. Algunos ejemplos de formulaciones utilizadas son: a) potencial escalar magnético definido como, $\bar{H} = -grad\varphi$. b) potencial vector magnético, definido por $\bar{H} = rot\bar{A}$. c) formulación directa usando la intensidad de campo magnético, \bar{H} . Para el segundo caso las ecuaciones gobernantes son:

$$\nabla^2 \bar{A} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2} = -\mu\bar{J} \quad (3.55)$$

$$\nabla^2 \bar{V} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3.56)$$

$$\nabla \cdot \bar{A} = \mu\varepsilon \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3.57)$$

donde V es el potencial eléctrico.

3.8.4.2. Ecuaciones gobernantes en el análisis mecánico.

El principio físico del que se derivan las ecuaciones que Ansys resuelve es el equilibrio de un elemento infinitesimal sometido a los esfuerzos internos que se muestran en la figura 3.4. A partir de dicho análisis se obtienen las ecuaciones 3.58-3.60. Sin embargo, al contar el número de ecuaciones y de incógnitas, resulta obvio que se requieren de más ecuaciones para poder completar el modelo.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0 \quad (3.59)$$

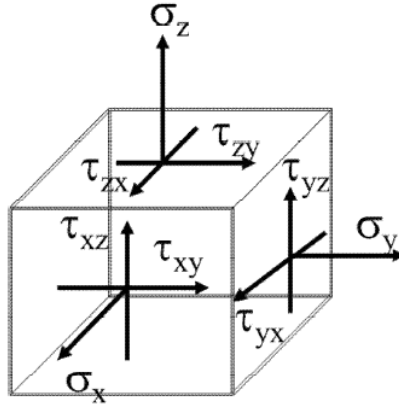


Figura 3.4: Elemento infinitesimal sometido a esfuerzos (Cornell, 2018) .

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \quad (3.60)$$

La ecuación 3.61 describe la ley de Hooke en el mismo elemento diferencial, a su vez las ecuaciones 3.62 y ?? son las relaciones entre desplazamientos y deformaciones; con dichas ecuaciones se completa el modelo con un total de 15 incógnitas y 15 ecuaciones Cornell (2018).

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.62)$$

3.9. Conclusiones del Capítulo.

La teoría electromagnética que describe los fenómenos que intervienen en el funcionamiento de un motor eléctrico es bastante compleja, en este capítulo se describieron de forma general los principios básicos y las ecuaciones más importantes. De este modo futuros alumnos que se involucren en esta línea de desarrollo dentro de la UAT puede acceder tanto a la teoría básica para recordar lo aprendido en sus cursos de licenciatura o consultar las ecuaciones que

resuelve el paquete de cómputo ANSYS. Siempre que se requiera una consulta más detallada de algún ed los temas se podrán consultar las fuentes citadas.

El entendimiento de los fenómenos físicos es muy importante debido a que el uso de programas de computadoras pueden viciar el diseño y análisis de motores al ser utilizados de forma inconsciente sin saber el impacto de cada parámetro con el sistemas real, los nuevos usuarios de dichos programas pueden conformarse a simplemente oprimir los diferentes comando en el programa, pero en realidad debe de entenderse que el programa solo es una herramienta para resolver una gran cantidad de ecuaciones no lineales que serían prácticamente imposible resolver a mano o llevaría muchos años programar un algoritmo propio.

Capítulo 4

Motores usados en los vehículos eléctricos.

El ME es altamente eficiente en un rango amplio de par y velocidad, en general, un ME ofrece una mayor aceleración y una operación más silenciosa que un MCI de tamaño similar. Seleccionar el sistema de propulsión adecuado para un vehículo es una tarea compleja y se rige por tres factores principales: eficiencia, costo y peso. De los diferentes tipos de motores, son cuatro los más utilizados en aplicaciones de tracción: el motor de corriente directa, el motor síncrono de imanes permanentes, el motor de inducción y el motor síncrono de reluctancia (Yilmaz, 2015).

4.1. Motores síncronos de imanes permanentes.

Los motores síncronos de imanes permanentes (MSIP) se encuentran en la mayoría de los vehículos eléctricos disponibles comercialmente. Se ha favorecido el uso de estos debido a su mayor desempeño incluyendo, mayor eficiencia, alto densidad de par, volumen reducido y peso ligero (Yilmaz, 2015).

Se emplean imanes de tierras raras debido que su uso mejora la densidad de potencia y densidad de par (Yang et al., 2017). Sin embargo, el precio actual de los imanes permanentes no representa el valor real dado que no considera la escasez del recurso ni el daño ambiental causado por la extracción de la materia prima. China provee el 96% de los imanes de tierras raras en el mercado, aunque sus reservas de materia prima representan poco menos del 40% de total mundial (Riba et al., 2016), por lo que la fluctuación en el precio de estos metales depende totalmente de los proveedores chinos causando una dependencia económica y tecnológica.

Existen muchas clasificaciones de los MSIP, una de las clasificaciones más generales, de acuerdo con la configuración del entrehierro, consiste en dos categorías: polos salientes y polos no salientes. Los polos salientes generan un entrehierro irregular, mientras que en los polos no salientes la longitud del entrehierro es constante. Los polos salientes en general

son preferidos para aplicaciones de baja velocidad, mientras que los polos no salientes se emplean con mayor frecuencia en las aplicaciones de alta velocidad donde la relación diámetro-largo tiene que ser pequeña para mantener los esfuerzos mecánicos de las fuerzas centrífugas en niveles aceptables (Ong, 1998).

En las aplicaciones de tracción se implementan ambos tipos de motores. Otra configuración es por la ubicación de los imanes en el rotor; los imanes montados en la superficie y los imanes permanentes embebidos dentro del rotor. De estos dos, la segunda es preferida para las aplicaciones de tracción debido a ventajas tales como: Los imanes están protegidos mecánicamente por las ranuras en el rotor, se disminuye el riesgo de desmagnetización debido a que los imanes no están expuestos directamente al campo del estator, se aumenta la proyección de polos con lo que se incrementa el par de reluctancia.

4.1.1. Principio de funcionamiento.

En un motor síncrono existen dos campos magnéticos; el primero ocasionado por los imanes en el rotor, B_s y el segundo es el campo rotatorio ocasionado por las corrientes trifásicas en el embobinado del estator, B_E . A medida que B_E avanza, B_R tiende a alinearse con la nueva posición de éste. En la acción de alineación de los campos magnéticos se produce par útil conocido como par inducido y definido por la ecuación 4.1. La velocidad angular de los motores síncronos es constante sin importar la carga (Chapman, 2005)

$$\tau_{ind} = k B_R B_N \sin(\delta) \quad (4.1)$$

El arranque de los motores síncronos representa un problema. Al inicio del movimiento, el campo magnético del estator, B_s , iniciará con la velocidad síncrona pero la velocidad inicial del rotor es cero. Aunque en los primeros instantes el motor intentará alcanzar la velocidad síncrona produciendo un par en el sentido del movimiento, debido a la diferencia de velocidades la desalineación de B_E y B_R ocasionará que eventualmente el par inducido se oponga al movimiento, posteriormente el par volverá ser cero y después nuevamente en el sentido del movimiento, todo esto ocurre durante un ciclo eléctrico. Físicamente se puede apreciar vibraciones y eventualmente el motor puede quemarse.

4.1.2. Estado del arte de los MSIP para tracción.

A continuación, se describen y analizan seis motores que han sido usado en algunos de los vehículos eléctricos e híbridos más vendidos. Los motores analizados en esta sección son los presentes en los modelos: Honda Accord 2005, Toyota Prius 2004, Nissan LEAF 2012, BMW i3 2016, Chevrolet Bolt EV 2018 y Tesla Model S. Los primeros cinco son motores síncronos de imanes permanentes internos en el rotor (Olszewski, 2005, 2006, Ozpineci, 2016, Staton, 2016,

Staton and Goss, 2017) mientras que el último es un motor de inducción. El orden en que son presentados corresponde a la configuración de los imanes, comenzando por el arreglo más simple de una sola capa de imanes en línea, después la configuración en V seguido por la configuración en delta, y terminando con el arreglo de doble capa para imanes en línea y arreglo doble V.

La mayoría de los motores analizados han sido ampliamente documentados y los resultados de las simulaciones realizadas en esta sección son comparados con los resultados publicados de pruebas en laboratorio, en el caso de que no se tenga dicha información se compara con alguna simulación presente en algún artículo o manual. De igual forma, no todas las dimensiones para todos los motores son reportadas, por lo que algunas fueron aproximadas. Para algunas aproximaciones se utilizaron las plantillas de Ansys Maxwell con el fin de poder modelar dichos motores de forma rápida.

4.1.2.1. Honda Accord 2005.

Este MET posee una potencia nominal de 12 (kW) a 840 (rpm) y un par nominal de 136 (Nm). El estator está compuesto de secciones ensambladas para conformar las ranuras; el devanado es del tipo concéntrico y el rotor posee 16 polos con imanes permanentes internos en una configuración lineal. La geometría de las laminaciones del rotor y del estator se pueden observar en la figura 4.1, las principales dimensiones se encuentran en la tabla 4.1.

Análisis del desempeño electromagnético utilizando AEF. Las simulaciones para este motor se llevaron a cabo en Ansys Maxwell 2D. Se simuló sólo un octavo de la geometría del motor correspondiente al máximo común divisor del número de ranuras en el estator y el número de polos, para este motor son 24 y 16 respectivamente. Debido a la distribución de los polos en la sección simulada, se utilizaron condiciones de frontera simétricas. En la figura 4.2 se aprecia la geometría simulada, incluyendo materiales, bobinas y condiciones de frontera.

Análisis a rotor bloqueado. En la figura 4.3 se muestra la gráfica de la prueba a rotor bloqueado. En esta prueba una corriente trifásica es aplicada al devanado mientras que el rotor se mantiene en reposo. Se analiza un ciclo de la corriente sinusoidal. Se puede observar que el par oscila entre un máximo positivo un máximo negativo pasando por cero; el ángulo de la corriente donde se alcanza el máximo par corresponde a un ángulo de 90° entre los campos magnéticos del estator y del rotor.

Se realizó esta simulación para diferentes valores de la amplitud de la corriente, se puede observar que para alcanzar el valor de par nominal se necesita una corriente de 200 (A).

En la figura 4.4 se muestra la gráfica de corriente contra par máximo, se observa una relación bastante lineal. Los resultados obtenidos en esta simulación presentan una buena correlación con los datos obtenidos por el laboratorio

Cuadro 4.1: Principales dimensiones del motor en Honda Accord 2005.

Desempeño	Velocidad nominal (rpm)	840
	Potencia nominal (kW)	12
	Par nominal (Nm)	136
Estator	Diámetro exterior (mm)	315.5
	Diámetro interior (mm)	232
	Longitud del núcleo (mm)	41.2
	Número de ranuras	24
	Espesor de la lámina (mm)	0.343
	Masa del núcleo del estator (kg)	7.704
Rotor	Diámetro exterior (mm)	230
	Diámetro interior (mm)	188
	Longitud del núcleo (mm)	40.1
	Número de polos	8
	Masa del núcleo del rotor (kg)	8.02
	Espesor de la lámina (mm)	0.343
Devanado	Vueltas por bobina	52
	Circuitos en paralelo por fase	8
	Vueltas en serie por fase	0
	Alambres en paralelo por fase	0
	Largo del extremo (mm)	35
	Diámetro del alambre (mm)	1.55
	Masa del devanado (kg)	3.01
Imanes permanentes	Imanes por polo	2
	Ancho (mm)	18.45
	Espesor (mm)	4.46
	Largo (mm)	40.4
	Masa total de los imanes (kg)	400

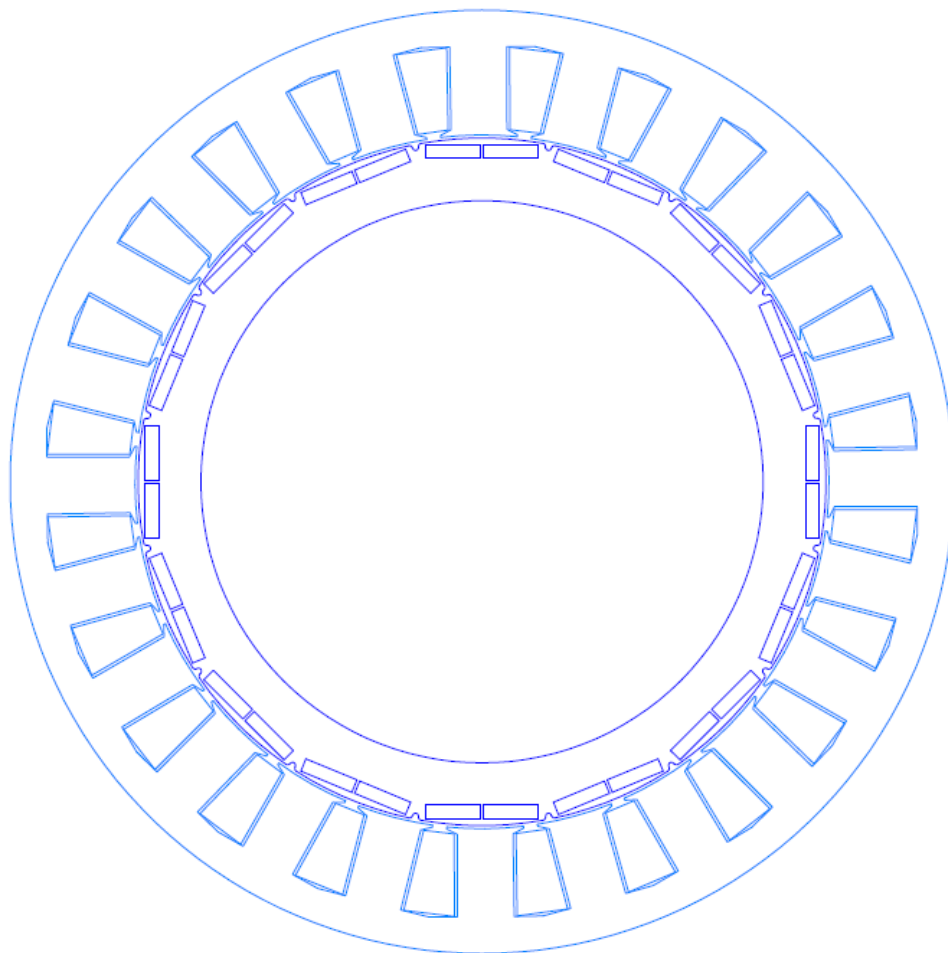


Figura 4.1: Geometría del motor en Honda Accord 2005

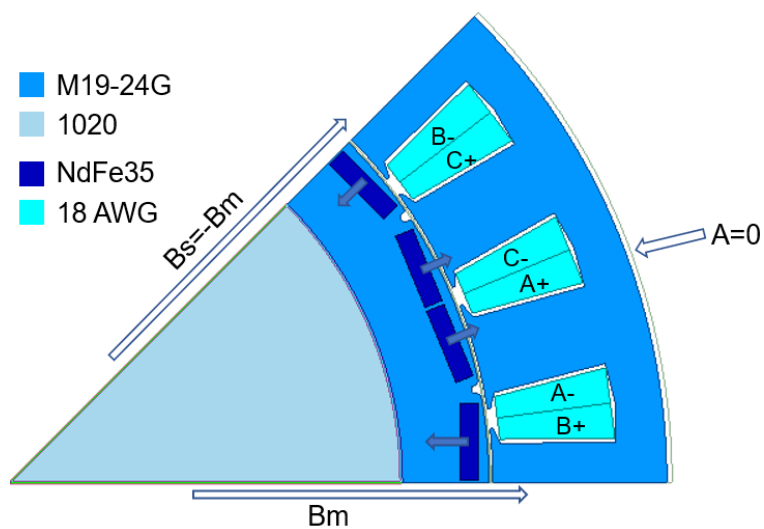


Figura 4.2: Geometría parcial utilizada en la simulación.

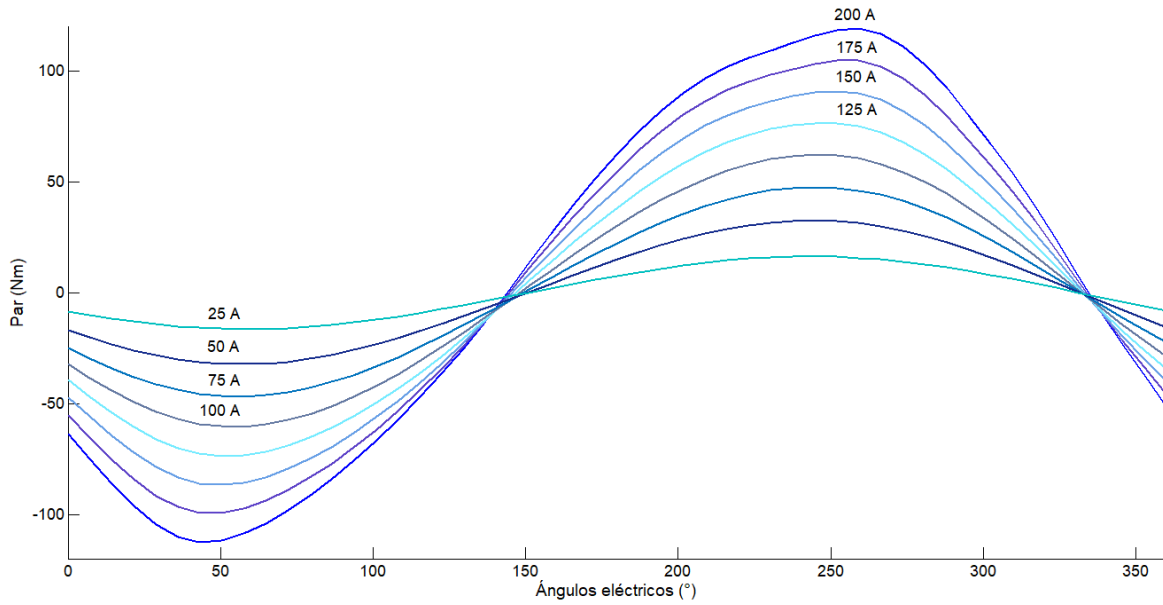


Figura 4.3: Simulación de la prueba a rotor bloqueado, Accord 2005.

Corriente (A)	Par experimental (Nm)	Par simulado (Nm)	Error relativo %
25	18.3	16.2	11.5
50	33.3	32.4	2.7
75	48.1	47.5	1.2
100	64.9	62.1	4.3
125	79.4	76.4	3.8
150	94.5	90.7	4
175	111	105	5.4
200	123	119	3.2
Error relativo promedio:			4.5

Cuadro 4.2: Error relativo en la prueba a rotor bloqueado.

ORNL (Ozpineci, 2016), el error entre los datos obtenidos por la simulación y los valores experimentales se muestran en la tabla 4.2.

Rizado del par. En la figura 4.5 se muestra la gráfica del par a los valores nominales, se puede observar que el par presenta un rizado cuya variación máxima es de 17.7 %

Densidad de flujo magnético. La figura 4.6 muestra una distribución del flujo magnético para una operación a 3000 (rpm) con una corriente de 200 (A). Se observa que no hay saturación en este punto de operación, lo cuál contradice a los resultados experimentales que indican saturación para corrientes por encima de 175 (A) (Olszewski, 2006).

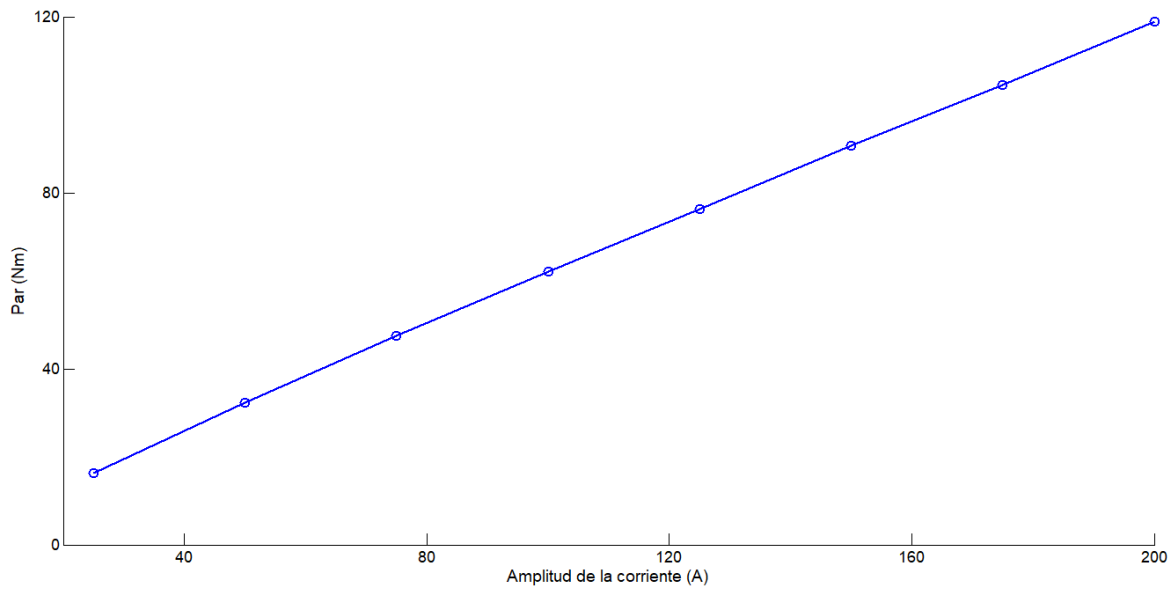


Figura 4.4: Corriente en la simulación de la prueba a rotor bloqueado del Accord.

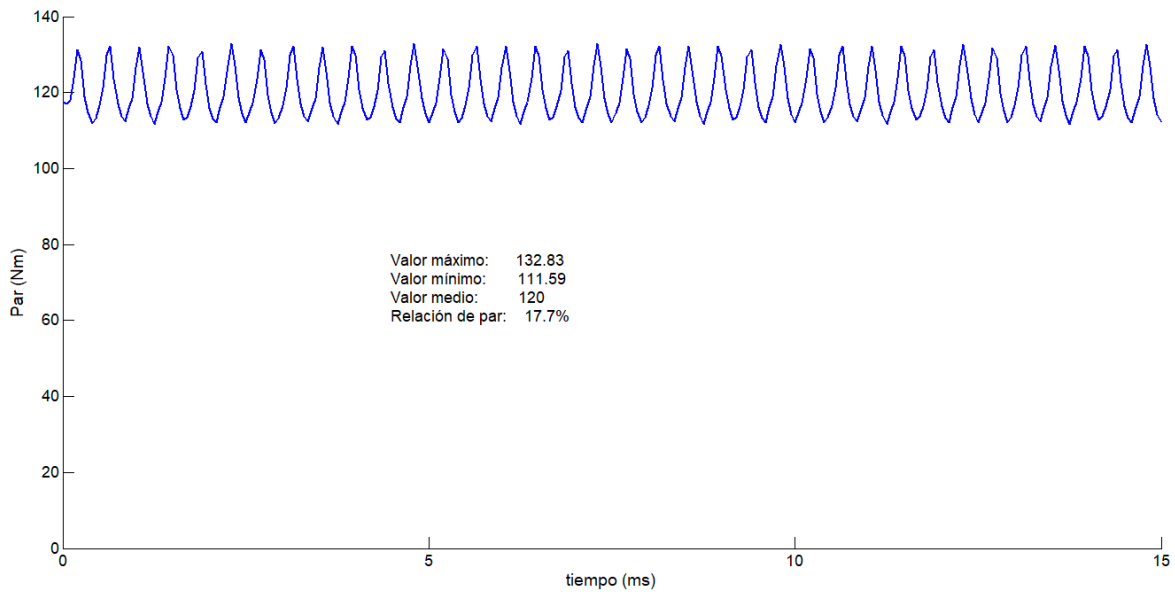


Figura 4.5: Rizado en el par continuo del motor en el Honda Accord 2005.

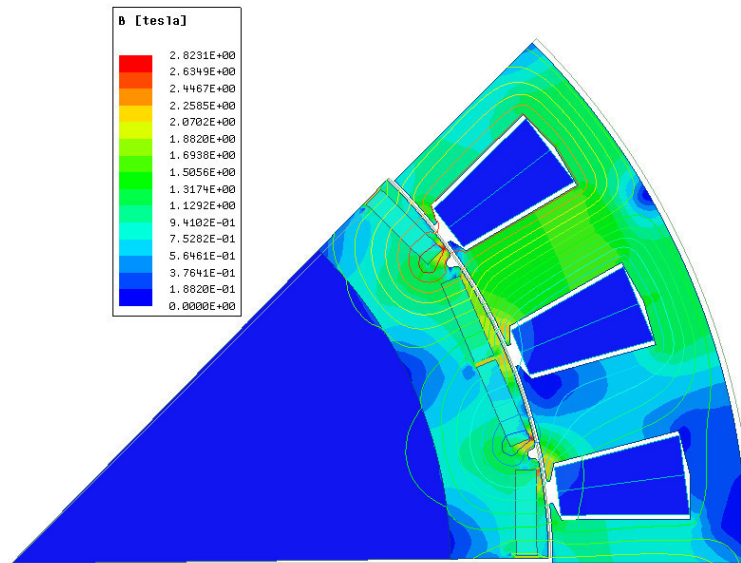


Figura 4.6: Magnitud de la densidad de flujo magnético en Accord 2005.

4.1.2.2. Toyota Prius 2004.

Este modelo de vehículo eléctrico utilizó dos MSIP en su tren motriz. La geometría del motor principal de tracción se muestra en la figura 4.7. La potencia máxima es de 50 (kW), el par máximo es de 400 (Nm) y la velocidad máxima es de 6,000 (rpm). La masa del ensamble del rotor incluyendo al eje es de 10.2 (kg), la masa del ensamble del estator es de 25.9 (kg) de los cuales 19.05 (kg) son debido al núcleo laminado (Olszewski, 2005).

En la tabla se muestran las principales dimensiones del motor simulado. Los imanes se encuentran distribuidos en 8 polos en el rotor y cada polo tiene un arreglo en forma de V compuesto de dos imanes. El estator cuenta con 48 ranuras en la que se dispone un embobinado trifásico con 9 vueltas por bobina y 8 bobinas conectadas en serie por cada fase.

Análisis del devanado del estator. En la figura se muestra la distribución de las bobinas en el devanado del estator. Primero se definen el número de ranuras por zona utilizando la ecuación 3.52, para este caso en específico se tiene:

$$q = \frac{Q}{pm} = \frac{48}{8 \cdot 3} = 2$$

posteriormente se define a la ranura 1 como se indica en la figura 4.8, consecuentemente la ranura adyacente forma parte de la misma zona y ambas quedan definidas como A+, representando al lado positivo de una de las bobinas de la fase A. Para determinar la ranura en la que se encontrará el lado negativo de dicha bobina se cuenta el número de ranuras que equivalen a 180° eléctricos; utilizando la ecuación 3.50 se tiene que:

Cuadro 4.3: Principales dimensiones del MSIP en Toyota Prius 2004.

Parámetro	Estator	Rotor
Diámetro Externo (mm)	269	160.5
Diámetro Interno (mm)	161.9	111
Largo del núcleo (mm)	84	83.6
Espesor de la lámina (mm)	0.33	0.33
Masa del ensamble (kg)	25.9	10.2
Devanado trifásico		
Ranuras en el estator	48	
Profundidad de la ranura (mm)	33.5	
Apertura de la ranura (mm)	1.93	
Vueltas por bobina	9	
Alambres en paralelo	13	
Conexión de las bobinas por fase	8	serie
Calibre del alambre (AWG)	19	
Resistencia por fase a 21°C (Ohm)	0.069	
Masa total del cobre (kg)	6.8	
Imanes permanentes de NdFeB		
Número de polos en el rotor	8	
Dimensiones de un imán (mm)	83.1 x 18.9 x 6.5	
Masa de un imán (g)	77	
Masa total de los imanes (kg)	1.232	

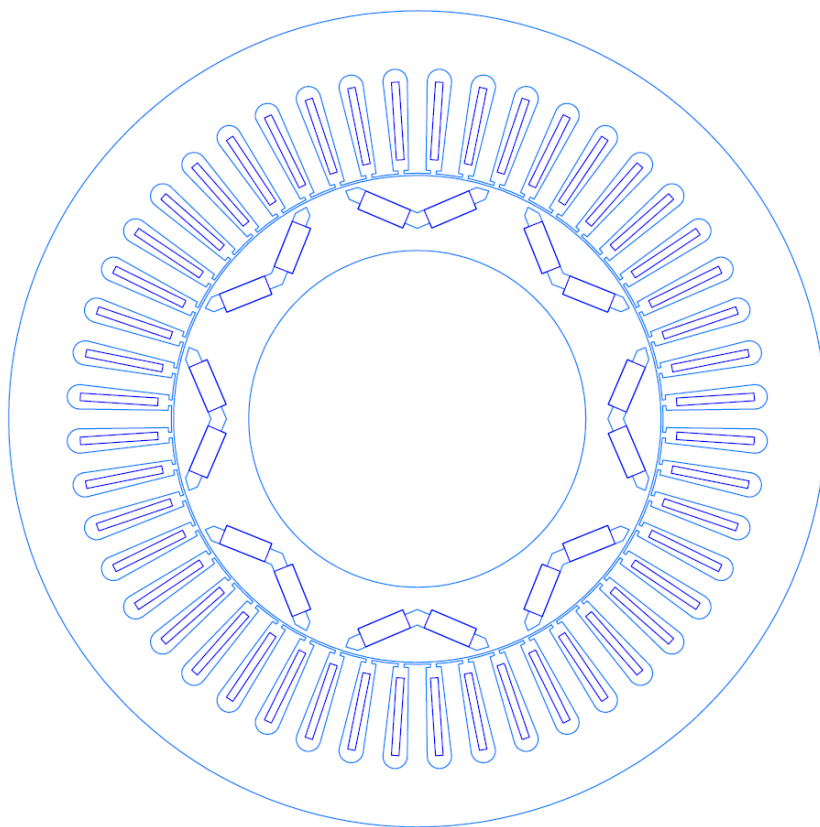


Figura 4.7: Geometría interna del MSIP en Toyota Prius

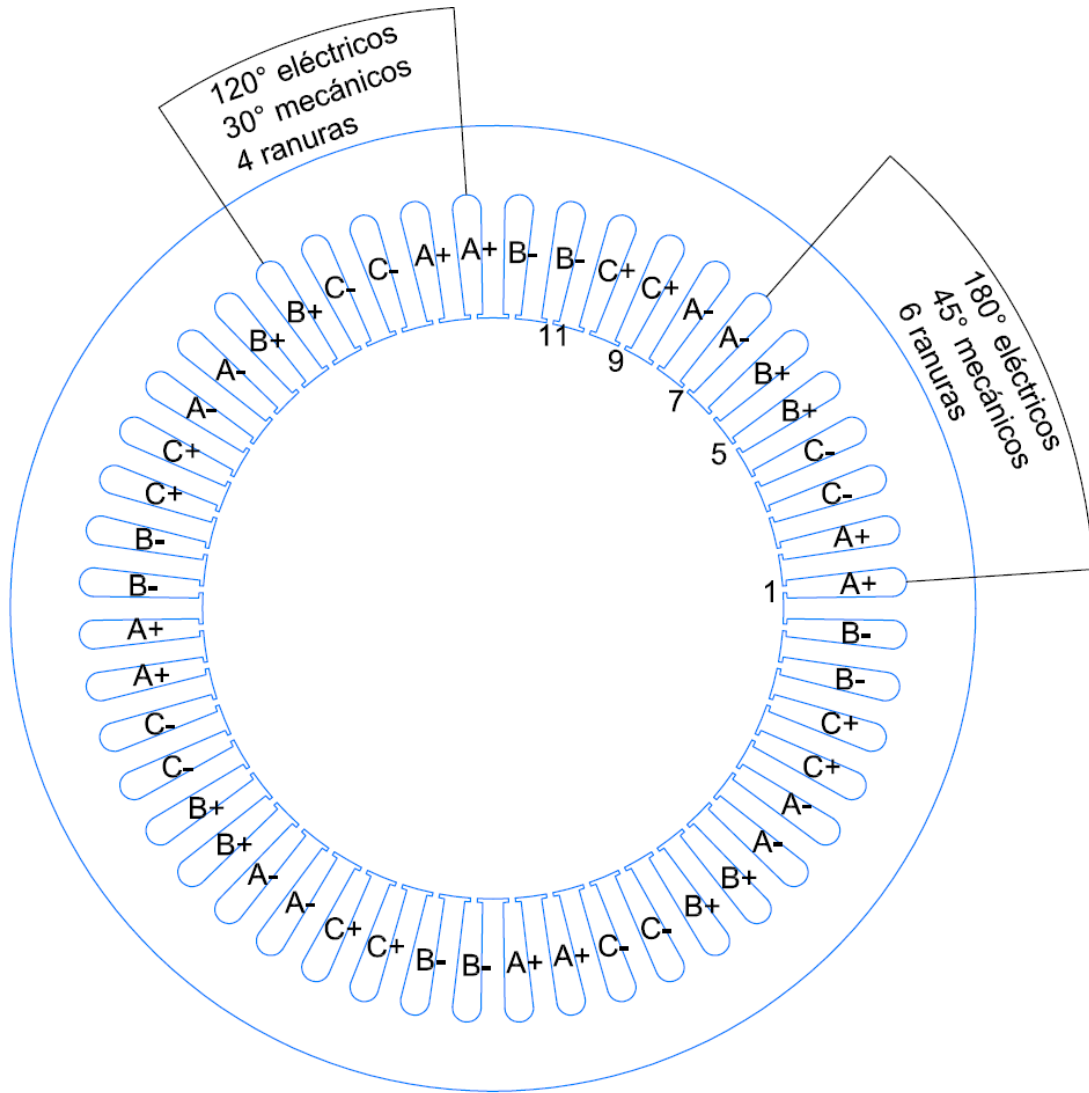


Figura 4.8: Devanado del MSIP en el Toyota Prius 2004.

$$\theta_m = \frac{\theta_e}{p_p} = \frac{180^\circ}{4} = 45^\circ$$

por lo tanto, el equivalente mecánico son 45° o 6 ranuras, debido a que cada ranura ocupa 7.5° , de esta manera la zona A- es ocupada por las ranuras 7 y 8. Posteriormente se define el lado positivo de la primera bobina de la fase B, la cual debe estar a 120° eléctricos de la bobina A+. El equivalente mecánico son 30° o 4 ranuras, por lo que la zona B+ queda definida en las ranuras 5 y 6. Se define el lado negativo de esta bobina a 180° eléctricos en las ranuras 11 y 12. Para el lado positivo de la bobina C se coloca a 120° eléctricos de la bobina B+ y C- a 180° eléctricos de C+. El resto de las ranuras se completan siguiendo el patrón establecido.

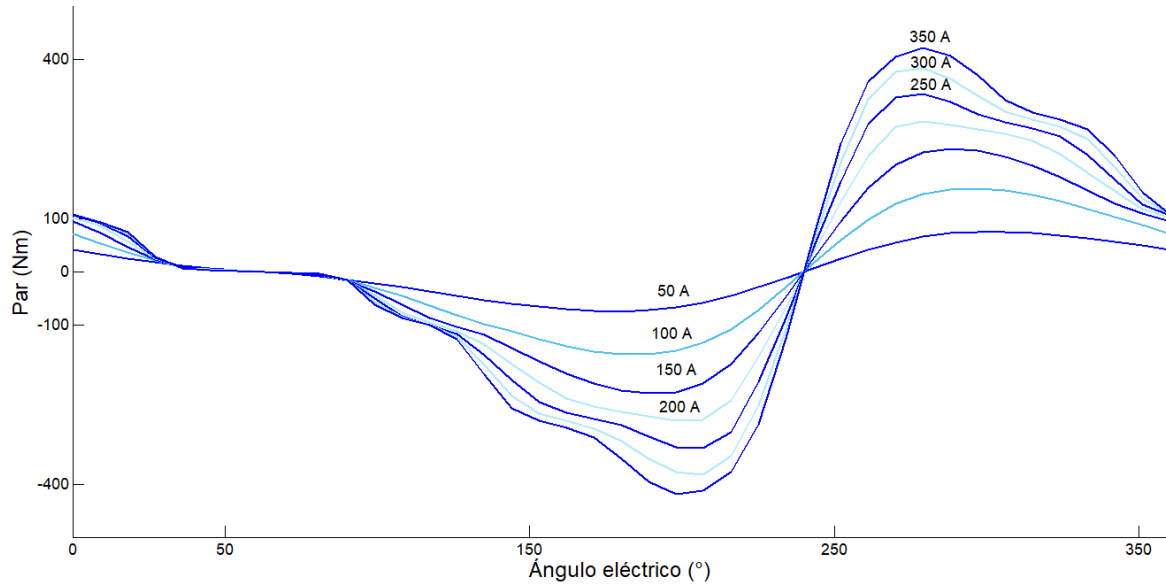


Figura 4.9: Análisis a rotor bloqueado para Toyota Prius 2004.

Las excitaciones correspondientes a cada fase ya sean corrientes o voltajes, se definen de tal forma que el campo magnético del estator gire en sentido levógiro, por ejemplo las corrientes quedan definidas de la siguiente manera:

$$Fase_A \rightarrow I_{max} \text{sen}(\omega t + \theta)$$

$$Fase_B \rightarrow I_{max} \text{sen}(\omega t + \theta - \frac{2}{3}\pi)$$

$$Fase_C \rightarrow I_{max} \text{sen}(\omega t + \theta + \frac{2}{3}\pi)$$

Análisis a rotor bloqueado. En la figura 4.9 se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones a rotor bloqueado, se observa que para alcanzar el par nominal de 400 (Nm) se requiere de una corriente de 300 A. En la tabla 4.4 se muestra el error relativo al comprar los resultados de esta simulación con los datos reportados por el ORLN (Olszewski, 2005), se puede apreciar que para esta prueba las simulaciones presentan una buena predicción del par para diferentes valores de corriente.

Rizado del par. En la figura 4.11 se muestra el par entregado por el motor a 3000 rpm y una corriente con valor pico de $I_{max} = 250$ (A). Se observa que el valor que el porcentaje de variación máximo es del 15 %, el par medio es de 246 (Nm) lo cual corresponde a lo reportado en.

La gráfica de la figura 4.11, se obtuvo al analizar por medio de AEF la geometría completa del motor, sin embargo debido a que el máximo común divisor del total de las ranuras en el estator y del número de polos en el rotor es 8,

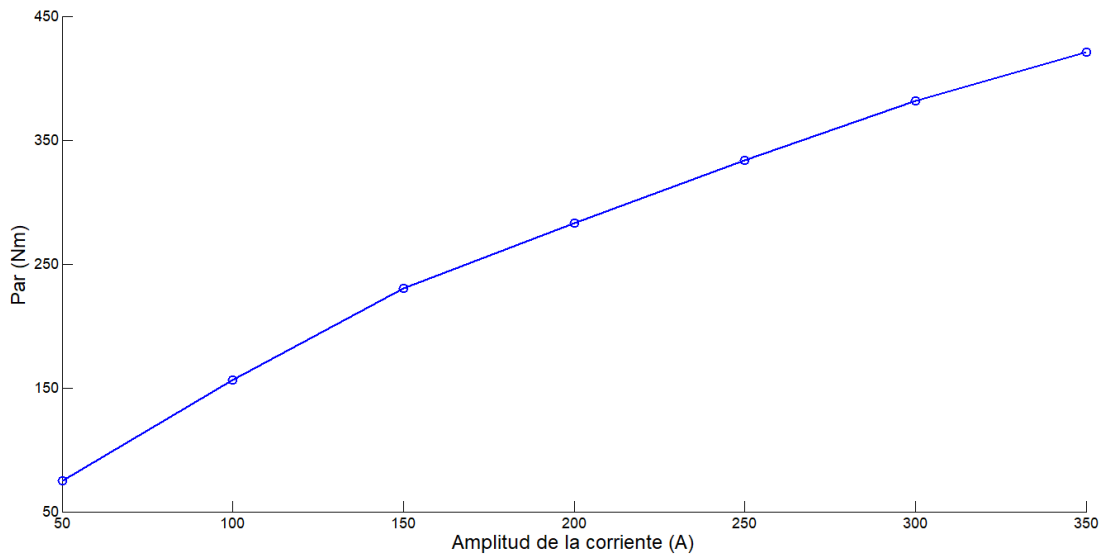


Figura 4.10: Corriente en la simulación de la prueba a rotor bloqueado en Prius.

Corriente (A)	Par experimental (Nm)	Par simulado (Nm)	Error relativo %
50	74	75	1.4
100	154	156	1.2
150	221	230	4.0
200	286	283	1.0
250	337	334	1.0
300		381	
350		420	
Error relativo promedio:			1.2

Cuadro 4.4: Error relativo en la prueba a rotor bloqueado.

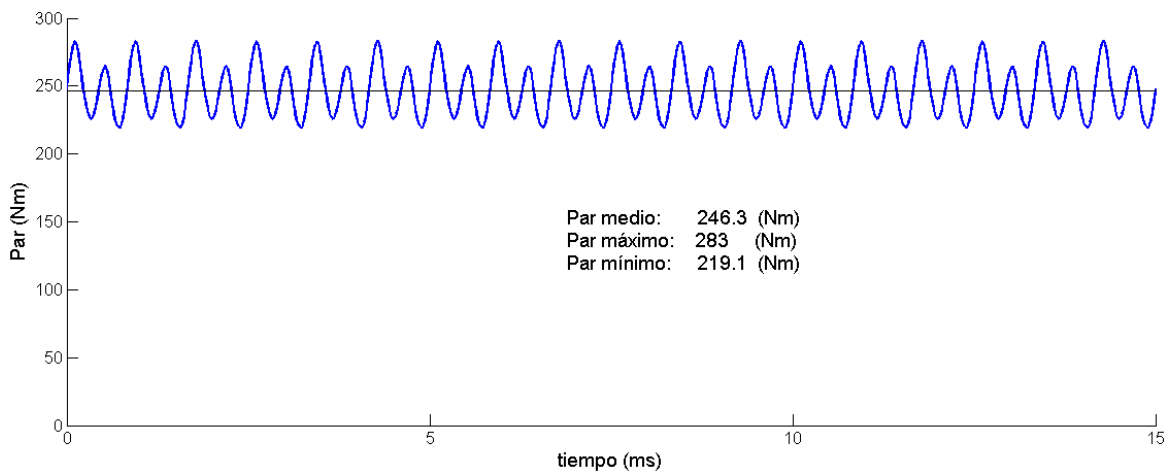


Figura 4.11: Par continuo del MSIP del Toyota Prius 2004.

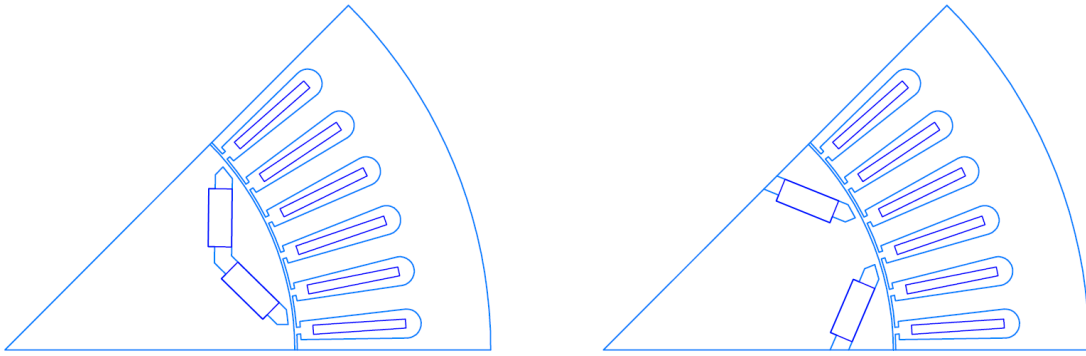


Figura 4.12: Dos geometrías parciales AEF.

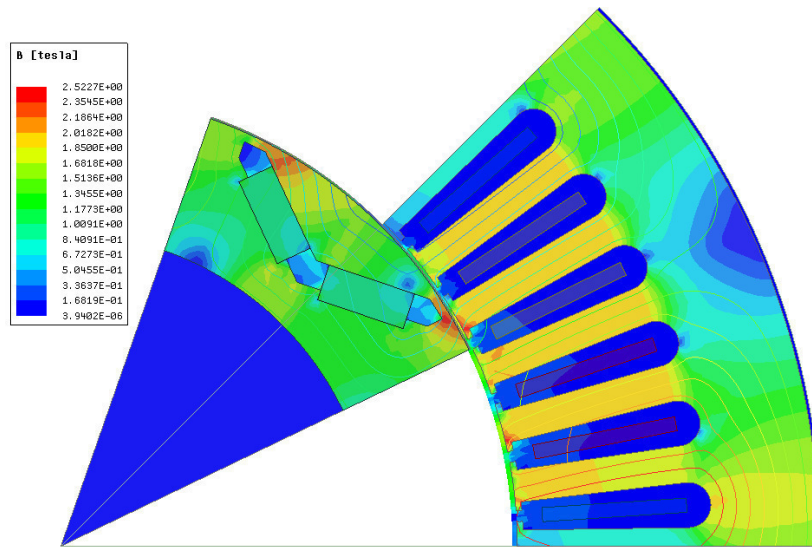


Figura 4.13: Densidad de flujo en los valores nominales para Pruis 2004.

se puede utilizar hasta un solo polo para realizar los cálculos por medio del MEF. Además, siempre que se definan de forma correcta las condiciones de frontera, la polaridad de los imanes y el sentido de las bobinas se pueden seleccionar distintas partes del motor. En la figura 4.12 se muestran dos distintas geometrías parciales que pueden ser tomadas para los cálculos.

Densidad de flujo magnético. En la figura se muestra la densidad de flujo magnético de un polo del motor, se observa que hay pocas zonas saturadas, principalmente alrededor de los puentes de flujo. También se pueden observar las líneas de flujo.

Mapa de eficiencia. En la figura 4.14 se muestra el mapa de eficiencia obtenido con Ansys Maxwell, el mapa muestra buena correspondencia con aquel reportado en el laboratorio (Olszewski, 2005) .

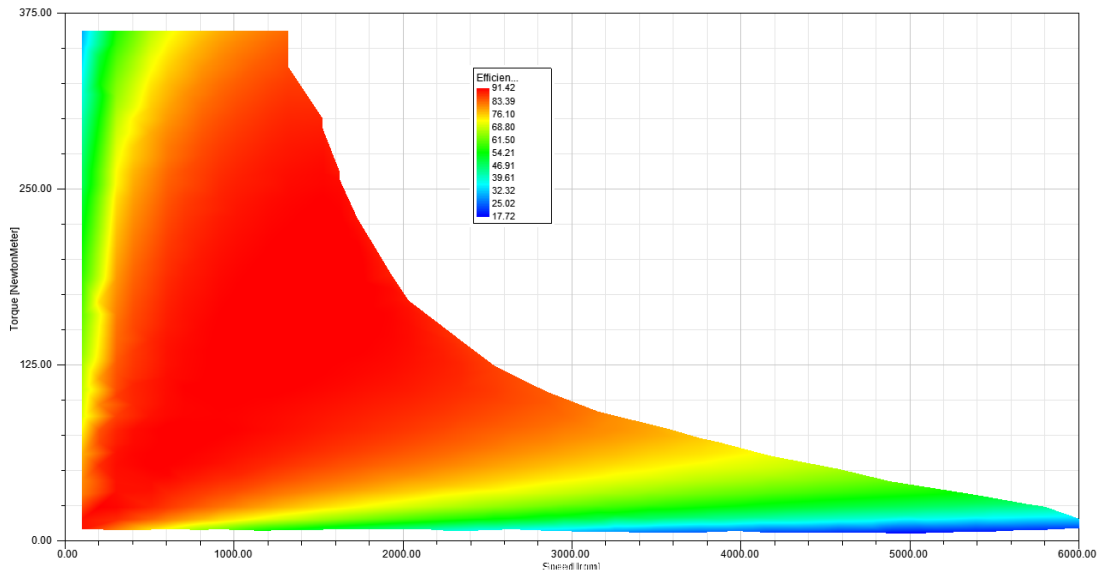


Figura 4.14: Mapa de eficiencia del motor en Prius 2004.

4.1.2.3. Nissan Leaf 2012.

El motor utilizado en el tren motriz de este modelo es un motor síncrono de imanes permanentes internos. La potencia nominal de este motor es de 80 (KW), un par máximo de 280 (Nm) y una velocidad angular máxima de 10390 (rpm). El peso aproximado del motor es de 58 (Kg) y es enfriado por medio de una camisa por donde circula refrigerante.

En la tabla 4.5 se muestran las principales dimensiones del motor. Los imanes se encuentran distribuidos en 8 polos en el rotor y cada polo tiene un arreglo triangular conocido como delta, figura 4.15. El estator cuenta con 48 ranuras en las que se encuentra un embobinado trifásico de 8 polos y una sola capa, el conductor utilizado en dicho embobinado es alambre magnético de calibre 20 AWG.

En la figura 4.16 se muestra la geometría utilizada para las simulaciones y cálculos la cual corresponde a un octavo de la geometría completa, se pueden observar las condiciones de frontera, los embobinados, el sentido de magnetización de los imanes y los materiales.

Prueba a rotor bloqueado. En la figura 4.17 se muestran diversas curvas de par para un ciclo de corriente trifásica en la prueba a rotor bloqueado aplicado al motor en Nissan Leaf. En la figura 4.18 se muestra la corriente contra el par máximo en la misma prueba a rotor bloqueado. Podemos observar que para alcanzar el par nominal de 280 (N) se requiere de una corriente de aproximadamente 230 (A)

Rizado del par y efecto del ángulo de carga. El ángulo de carga es un parámetro muy importante en la operación del motor, muchas técnicas de control consisten mantener este ángulo constante en la zona por debajo de la velocidad

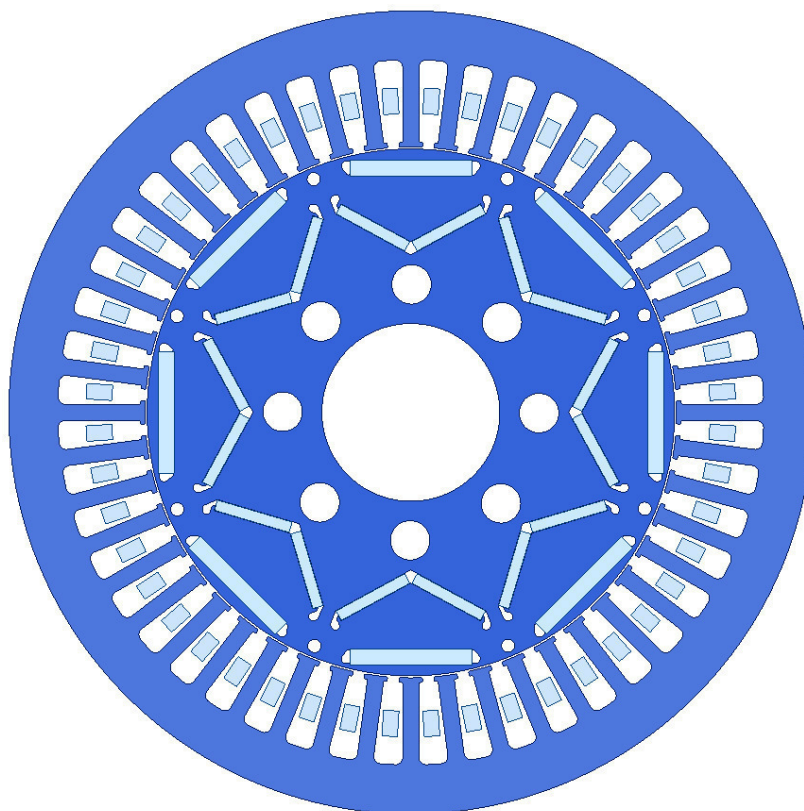


Figura 4.15: Geometría interna del MSIP en Nissan LEAF 2012.

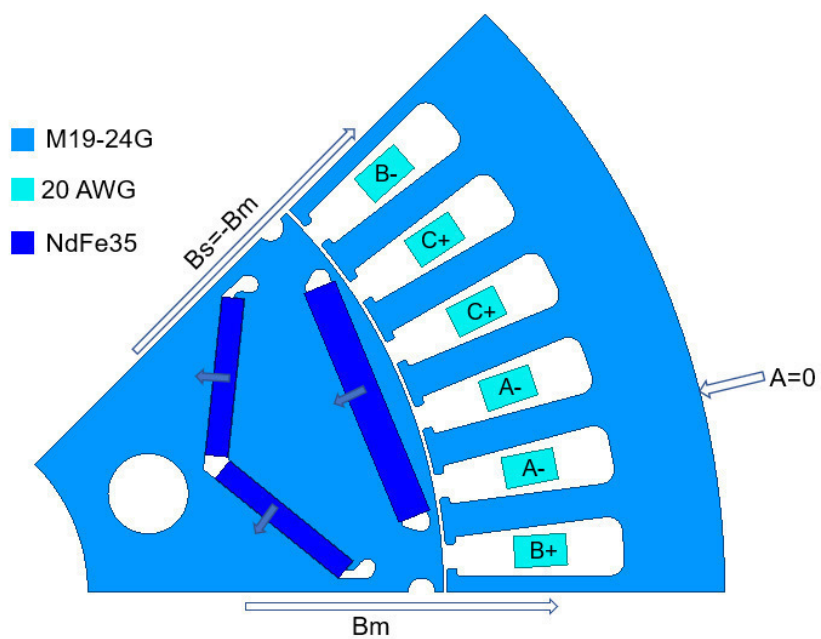


Figura 4.16: Geometría parcial del motor en Nissan Leaf.

Cuadro 4.5: Principales dimensiones del motor en Nissan Leaf 2012.

Desempeño	Velocidad máxima (rpm)	10390
	Potencia nominal (kW)	80
	Par nominal (Nm)	280
Estator	Diámetro exterior (mm)	198.12
	Diámetro interior (mm)	130.96
	Longitud del núcleo (mm)	151.38
	Número de ranuras	48
	Espesor de la lámina (mm)	0.343
	Masa del núcleo del estator (kg)	7.704
Rotor	Diámetro exterior (mm)	129.97
	Diámetro interior (mm)	50
	Longitud del núcleo (mm)	151.16
	Número de polos	8
	Masa del núcleo del rotor (kg)	16.432
	Espesor de la lámina (mm)	0.343
Devanado	Vueltas por bobina	8
	Circuitos en paralelo por fase	4
	Vueltas en serie por fase	2
	Alambres en paralelo por fase	15
	Largo del extremo (mm)	35
	Masa del devanado (kg)	5.616
Imanes permanentes	Imanes por polo	3
	Ancho (mm)	2 x 8.34 y 1 x 8.36
	Espesor (mm)	2 x 2.29 y 1 x 3.79
	Largo (mm)	2 x 21.3 y 1 x 28.9
	Masa total de los imanes (kg)	1.895

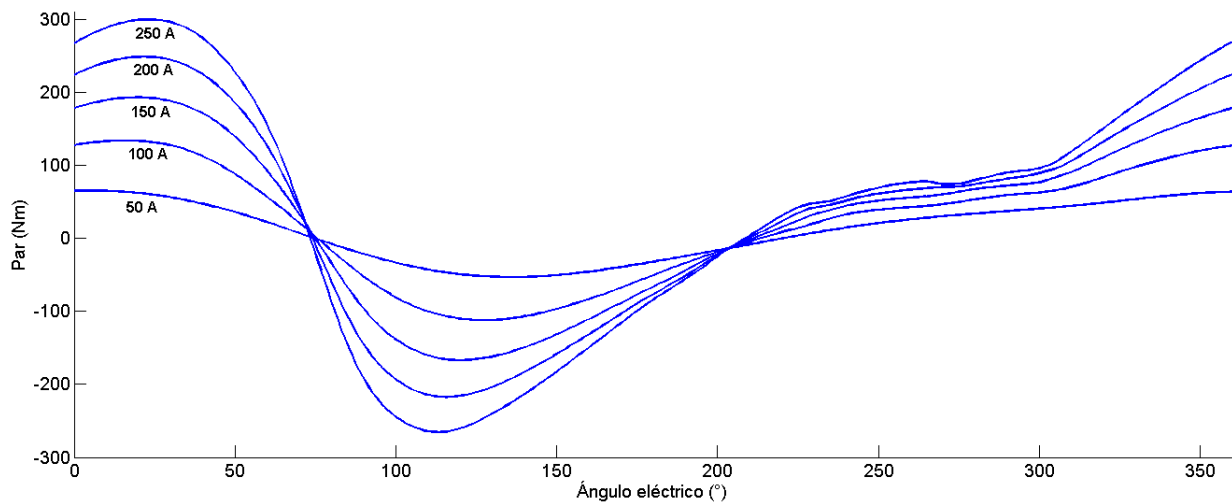


Figura 4.17: Prueba a rotor bloqueado para motor en Nissan Leaf.

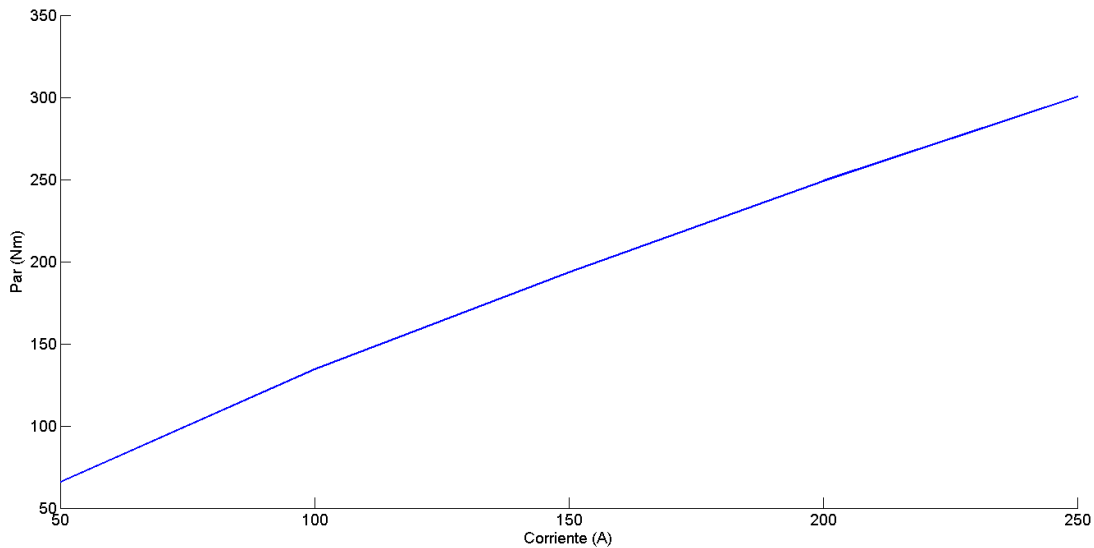


Figura 4.18: Corriente en la prueba a rotor bloqueado.

base, mientras que se varía para mantener los niveles seguros de voltaje en la zona de debilitamiento de flujo.

En la figura 4.19 se muestran las gráficas de par para distintos ángulos de carga. Se puede observar que entre mayor es el ángulo de carga mayor es el par. Las simulaciones realizadas son en una operación a 3000 (rpm) y amplitud de corriente trifásica de 250 (A) el porcentaje de rizado es considerablemente alto para las aplicaciones de tracción, por ejemplo Yang et al. (2017) reportaron un rizado de par optimizado del 10 % para una geometría de rotor tipo delta.

Finalmente, en la figura 4.20 se muestra la variación del par promedio entregado por el motor con respecto al ángulo de carga, se verifica que el máximo par se obtiene a los 90°.

Densidad de flujo magnético. En la figura se muestra la densidad de flujo magnético para este motor, podemos observar que no hay saturación.

Mapa de eficiencia. En la figura 4.22 se muestra el mapa de eficiencia obtenido por medio de simulaciones de AEF. Se puede observar que el contorno del mapa presenta buena relación con los reportado en el mapa de Nissan mostrado en Staton and Goss (2017). La máxima eficiencia en ambos mapas es alrededor del 95 %, sin embargo el mapa, obtenido presenta una distribución diferente de las curvas de eficiencia, mostrando una zona mayor en la que el motor operaría en alta eficiencia.

4.1.2.4. BMW i3 2016.

El motor presente en el modelo BMW i3 es una máquina síncrona de imanes permanentes embebidos en el rotor. Los datos publicados (Ozpineci, 2016) indican que dicho motor tiene una potencia nominal de 125 (kW) y un par nominal

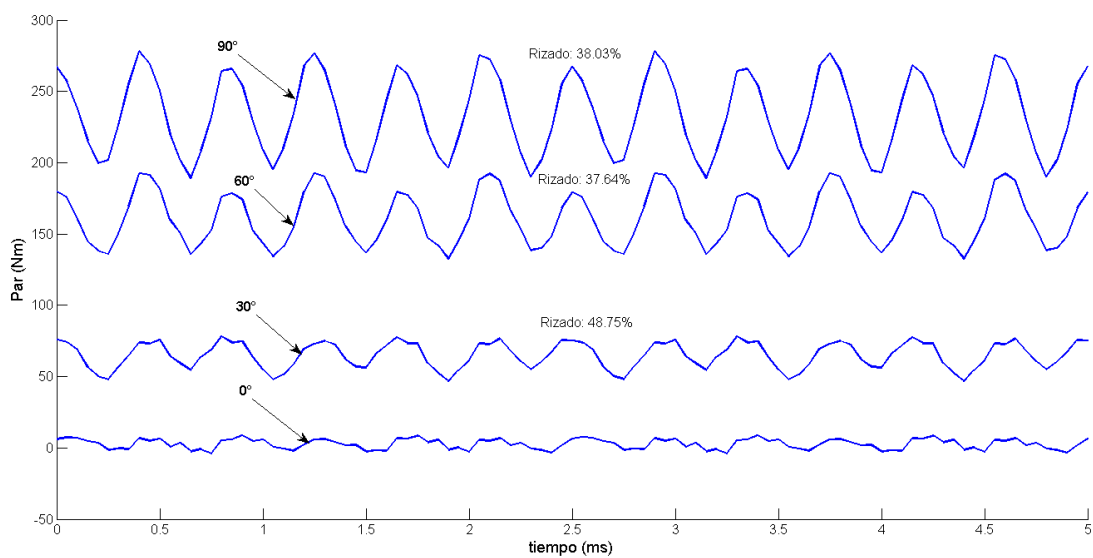


Figura 4.19: Rizado del par en el motor de Nissan Leaf 2012.

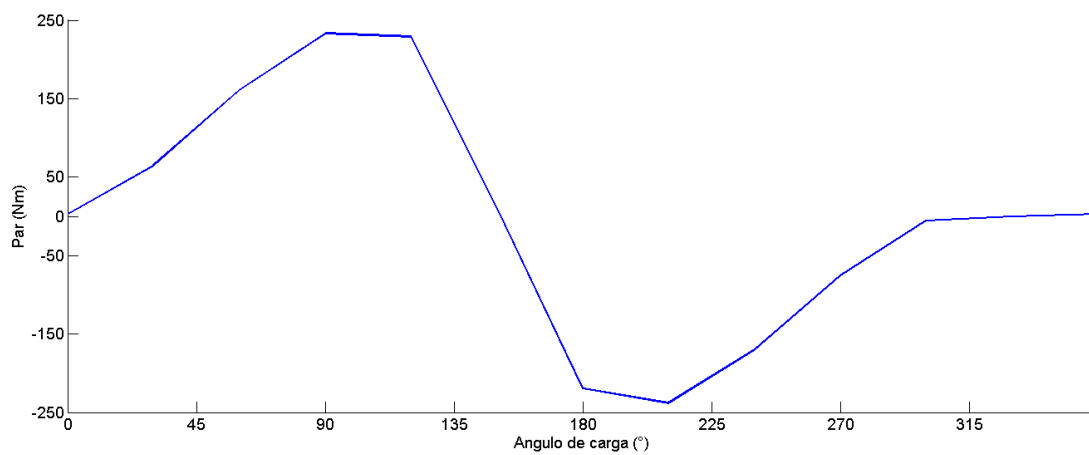


Figura 4.20: Variación del par promedio con respecto al ángulo de carga.

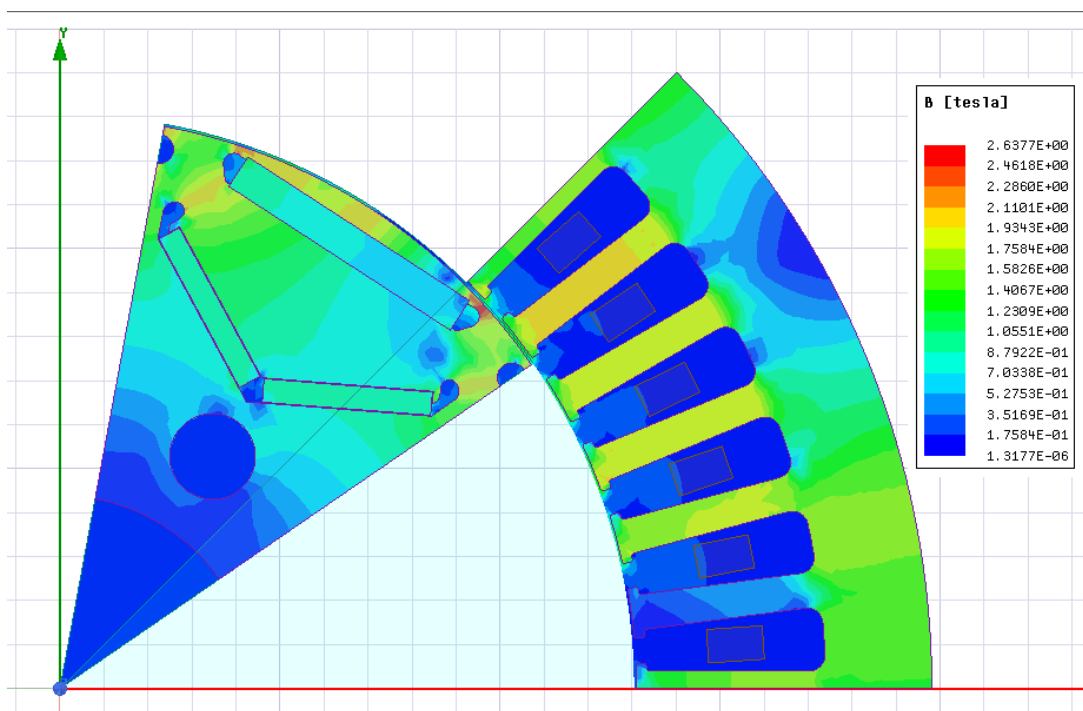


Figura 4.21: Densidad de flujo magnético en el motor del Nissan Leaf.

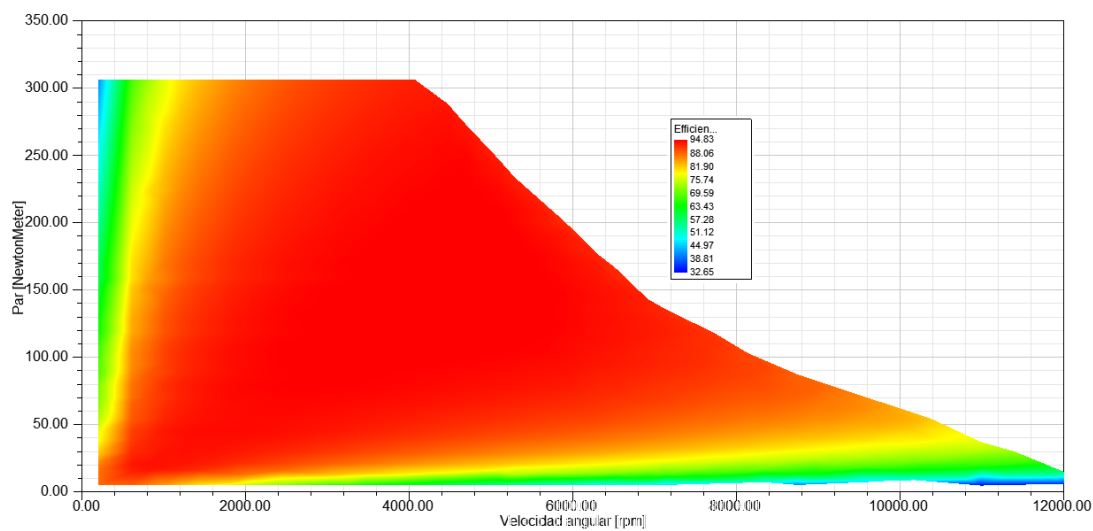


Figura 4.22: Mapa de eficiencia del motor en Nissan Leaf.

Cuadro 4.6: Principales dimensiones del motor en BMW i3.

Desempeño	Velocidad máxima (rpm)	11500
	Potencia nominal (kW)	125
	Par nominal (Nm)	250
Estator	Diámetro exterior (mm)	242
	Diámetro interior (mm)	180
	Longitud del núcleo (mm)	132
	Número de ranuras	72
	Espesor de la lámina (mm)	0.343
	Masa del núcleo del estator (kg)	13.7
Rotor	Diámetro exterior (mm)	178.6
	Diámetro interior (mm)	43.5
	Longitud del núcleo (mm)	132
	Número de polos	12
	Masa del núcleo del rotor (kg)	14.2
	Espesor de la lámina (mm)	0.343
Devanado	Vueltas por bobina	9
	Circuitos en paralelo por fase	6
	Vueltas en serie por fase	1
	Alambres en paralelo por fase	12
	Masa del devanado (kg)	7.1
Imanes permanentes	Imanes por polo	2
	Ancho (mm)	12.7 y 23.6
	Espesor (mm)	2.2 y 5
	Largo (mm)	22
	Masa total de los imanes (kg)	1.895
	Masa total de los imanes (kg)	1.895

de 250 (Nm) con una velocidad máxima de 11500 (rpm). El voltaje nominal del banco de baterías de litio es de 360 (VCD) y 22 (kWh). La geometría de este motor se muestra en la figura 4.23.

El motor está empaquetado en su propia carcasa de forma separada a los otros componentes del tren motriz. La masa del ensamble del motor es de 42 (kg). El diámetro exterior del estator es de 242.1 (mm) la longitud total del núcleo laminado es de 132.3 (mm) tiene 72 ranuras y doce polos (6 ranuras por polo). El estator está formado de secciones unidas, con lo que se logra una reducción en el desperdicio del material. El devanado concéntrico es de paso completo con 12 alambres en mano de calibre 21 AWG. Cada polo es embobinado en paralelo, resultando en seis ramas paralelas y nueve vueltas por ranura,

La masa del rotor es de 14.2 (kg), El diámetro exterior del rotor es de 178.6 (mm). El arreglo de los imanes consiste en un imán pequeño y uno grande en cada polo. El rotor está ensamblado con un segado de seis secciones para disminuir el rizado del par. En la tabla 4.6 se muestran las dimensiones utilizadas para las simulaciones en AEF y en la figura 4.24 se muestran los embobinados, sentido de magnetización, condiciones de frontera y materiales usados en la simulación por AEF.

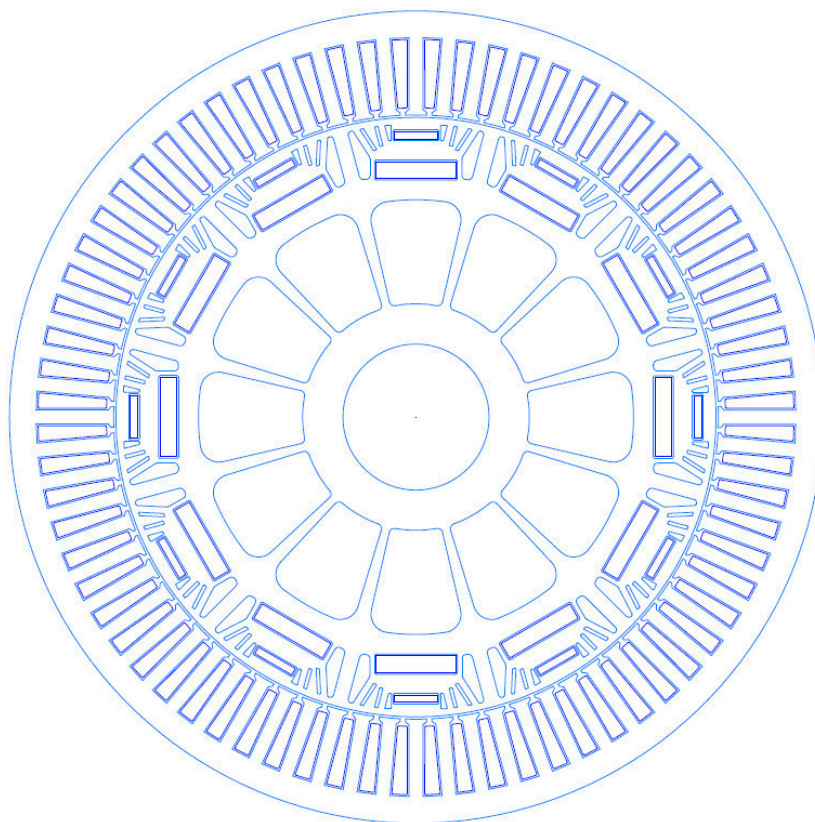


Figura 4.23: Geometría completa del motor en el modelo BMW i3 2016.

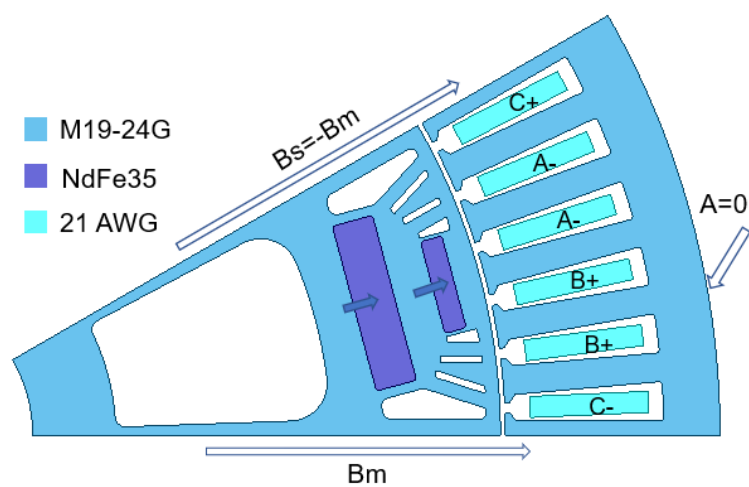


Figura 4.24: Geometría parcial del motor en BMW i3.

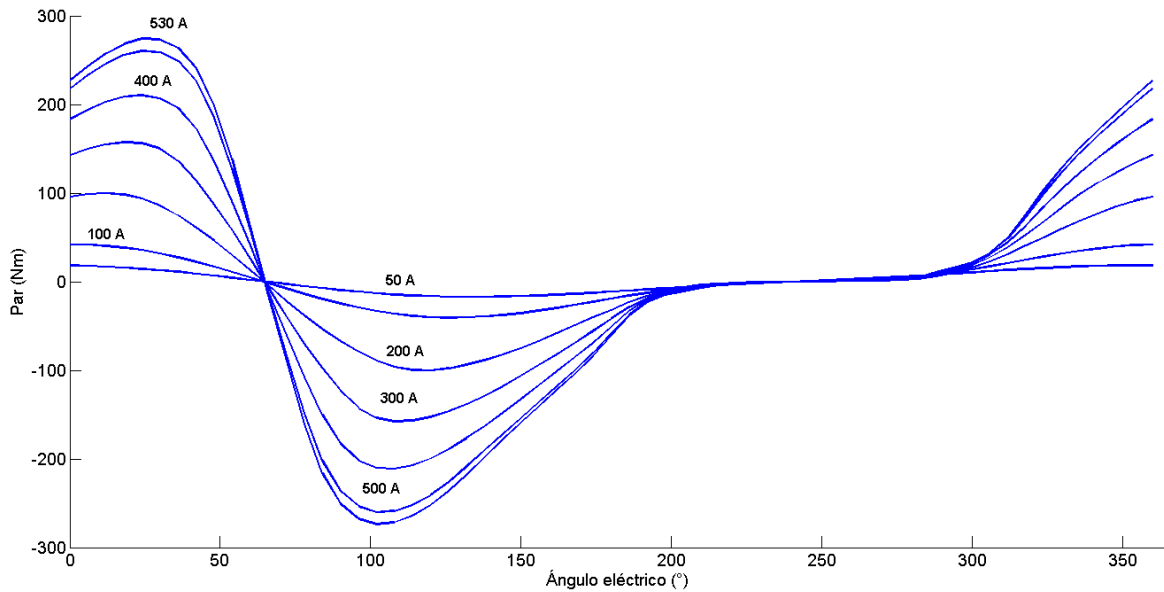


Figura 4.25: Prueba a rotor bloqueado para el motor en BMW i3.

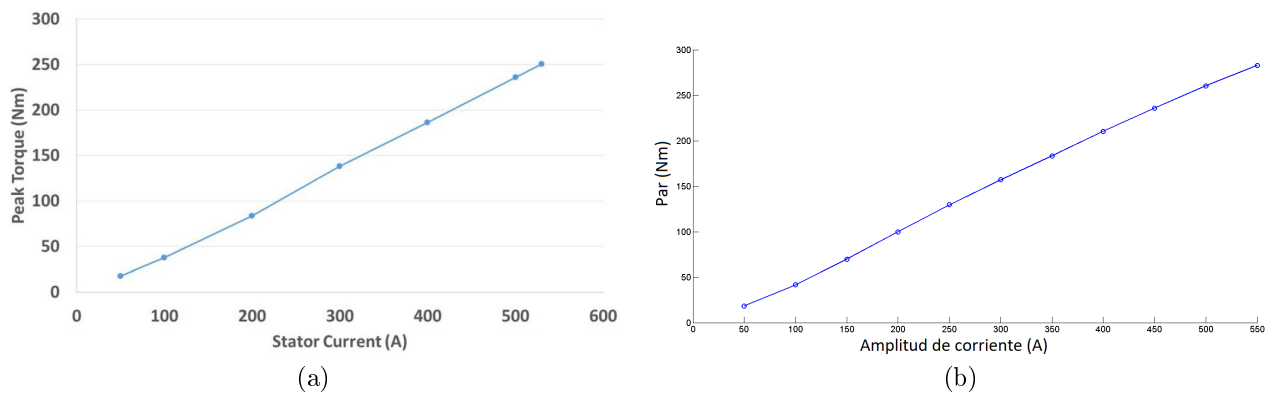


Figura 4.26: Corriente en la prueba a rotor bloqueado. (a) datos de ORNL (b) simulación FEM

Análisis a rotor bloqueado. En la figura 4.25 se muestran los resultados de la prueba a rotor bloqueado obtenidos mediante AEF en Ansys Maxwell. Según lo reportado por el ORNL (Ozpineci, 2016), la corriente requerida para alcanzar el par nominal de 250 (Nm) es de 530 (A), mientras que en la simulación llevada a cabo el par entregado por el motor para dicha corriente es de 274 (Nm) lo cual representa un error relativo de 9.6%. En la figura se comparan los resultados de laboratorio reportados por ORNL y la simulación, se puede apreciar una buena correspondencia.

Rizado del par En la figura 4.27 se muestra el par continuo para una operación del motor a 3000 (rpm), se puede observar que la relación de rizado de par es de 20%. Este motor fue construido con un sesgado en el rotor para reducir el rizado de par, aunque se tomó en cuenta este sesgado en la simulación de 2D, Ansys Maxwell 2D aproxima los efectos del sesgado, para resultados más precisos acerca de este fenómeno se podría realizar un análisis tridimensional.

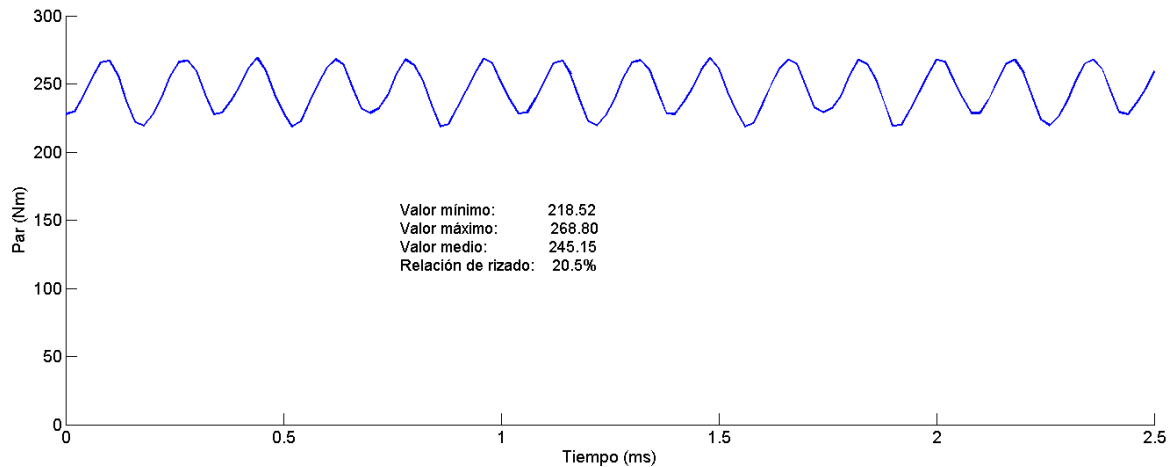


Figura 4.27: Rizado de par en el motor de BMW i3.

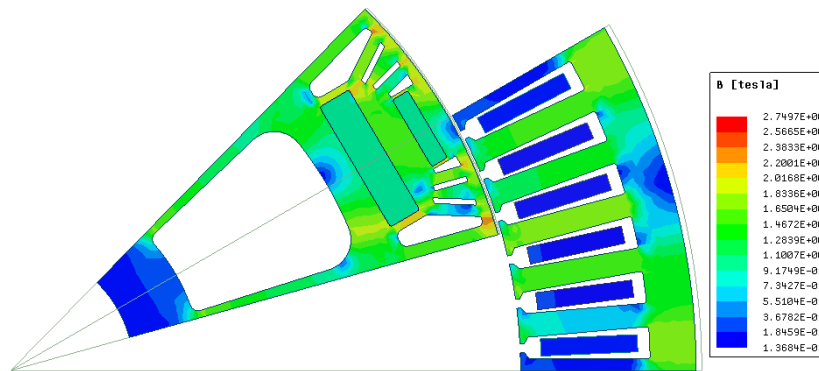


Figura 4.28: Densidad de flujo magnético, BMW i3.

Densidad de flujo magnético. En la figura 4.28 se aprecia la magnitud del flujo magnético para la operación del motor mostrada en la figura 4.27, se observa que las zonas alrededor de las barreras de flujo se encuentran en saturación, lo cual coincide con lo esperado ya que dichas barreras de flujo se utilizan para dirigir el flujo magnético.

Mapa de eficiencia. En la figura 4.29 se muestra el mapa de eficiencia obtenido que fue obtenido por medio de AEF.

4.1.2.5. Chevrolet Bolt EV 2018.

El vehículo eléctrico más reciente de la compañía General Motors es el modelo Chevrolet Bolt EV. De acuerdo con Harpster (2018), General Motors ha invertido en el diseño del tren motriz de dicho modelo con la visión de que se convierta en la base para sus futuros vehículos eléctricos. En la figura 4.30 se puede observar que el arreglo general de dicho tren motriz es muy compacto en comparación con algún tren motriz con motor de combustión interna.

La máquina de tracción presente en este tren motriz es un motor síncrono de imanes permanentes. Las características

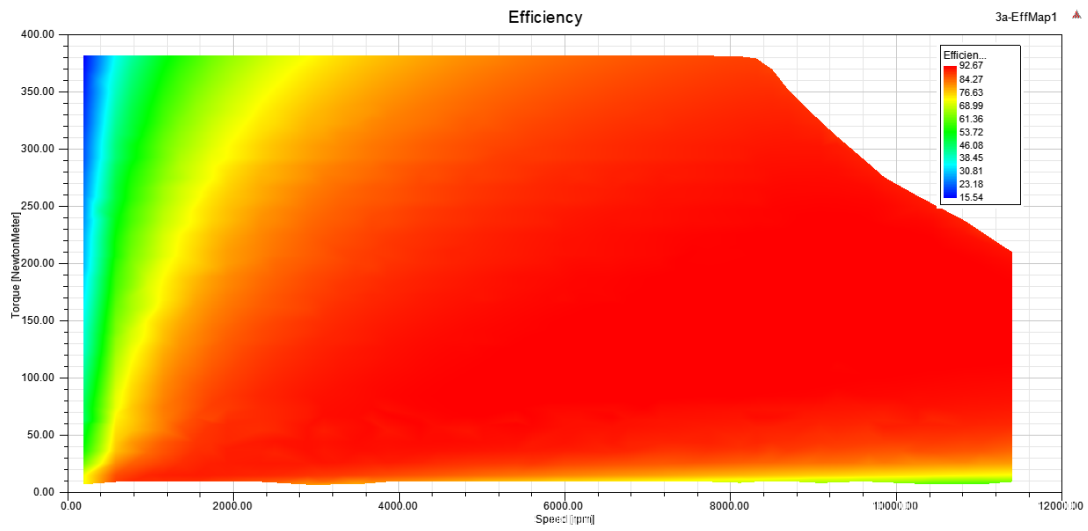


Figura 4.29: Mapa de eficiencia para motor en BMW i3.

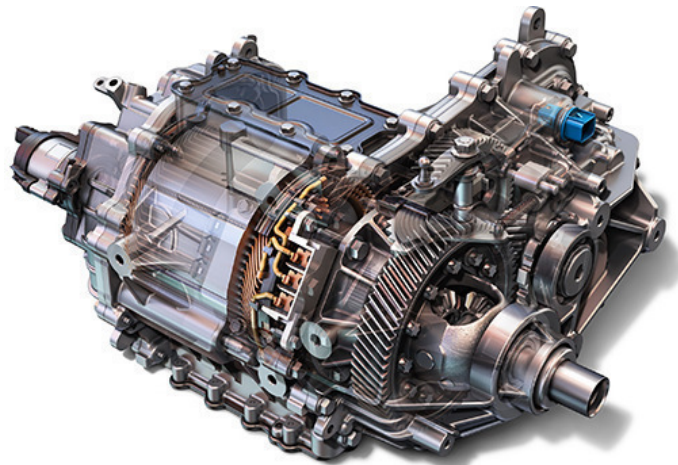


Figura 4.30: Tren motriz del modelo Bolt EV 2018.

Cuadro 4.7: Principales dimensiones del motor en Chevrolet Bolt EV 2018.

Desempeño	Velocidad máxima (rpm)	8810
	Potencia pico (kW)	150
	Par pico (Nm)	360
Estator	Diámetro exterior (mm)	204
	Diámetro interior (mm)	139
	Longitud del núcleo (mm)	125
	Número de ranuras	72
Rotor	Diámetro exterior (mm)	138.2
	Diámetro interior (mm)	50
	Longitud del núcleo (mm)	125
	Número de polos	
Devanado	Conductores por ranura	6
Imanes permanentes	Imanes por polo	4

principales de dicho motor se muestran en la tabla 4.7. El estator se diferencia de los motores previamente descritos porque está compuesto de seis barras sólidas de cobre por ranura, en contraste con los devanados de alambre magnético. El rotor posee un diseño especial de un arreglo de doble capa de imanes en V, figura 4.31. Lo más novedoso de este motor es que la geometría de cada polo fue optimizada de forma independiente para aumentar la eficiencia y disminuir el rizado de par (Momen et al., 2016).

En la figura 4.32 se observa la sección simulada en el método de elementos finitos. Debido a la dificultad de obtener las dimensiones exactas de cada polo se consideró que la geometría mostrada en Momen et al. (2016) era la mínima posible para simular debido a la simetría. Para este caso la condición de frontera cambia de ser antisimétrica, como en los motores anteriores, a ser simétrica; también se observan los materiales y sentidos de magnetización.

4.2. Motores de inducción.

El motor de inducción se ha usado en las aplicaciones de tracción debido a su simplicidad, bajo costo, amplio rango de velocidades, robustez y buen desempeño dinámico (Yilmaz, 2015). Otra característica que hace del motor de inducción uno de los principales tipos de motores para aplicaciones de tracción es que al no requerir de imanes permanentes no hay dependencia de los elementos de tierras raras, además de ser el motor más conocido por su gran desarrollo desde hace mucho tiempo. La eficiencia más alta en los MI se observa en las regiones de velocidades por encima de la velocidad base y par menor al par nominal debido a que las pérdidas en el cobre y pérdidas en el núcleo son menores a altas velocidades.

La eficiencia y el factor de potencia por lo general son más bajos en los MI que en los MSIP debido a las pérdidas en el rotor, por lo que normalmente los MI son más grandes cuando se comparan con los MSIP de la misma potencia nominal. Los MI presentan un control del flujo muy flexible que puede ser aprovechado para optimizar el frenado

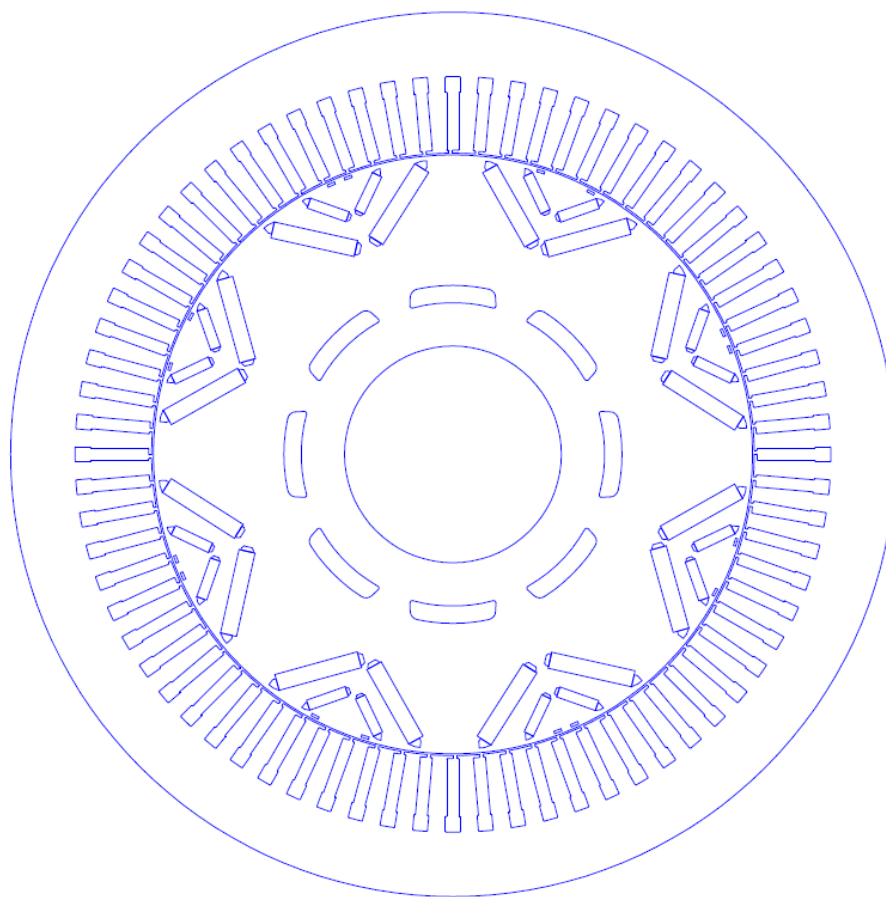


Figura 4.31: Geometría del motor en Chevrolet Bolt EV 2018.

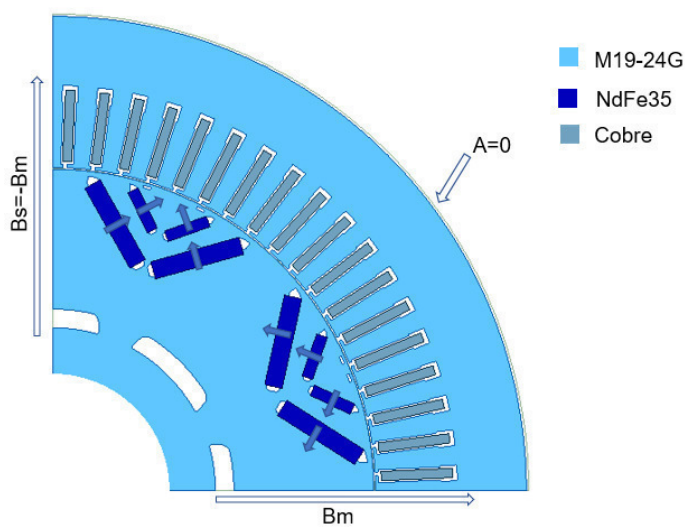


Figura 4.32: Configuración para análisis de elemento finito Bolt EV.

regenerativo.

Un MI para aplicaciones de tracción debe resolver varios conflictos entre los requerimientos. Un motor de inducción que no ha sido diseñado para tracción de vehículos, se saturará con los requerimientos de carga de un ciclo de manejo. Los motores que resisten la saturación presentan otras desventajas como, alto costo, poca confiabilidad, peso excesivo y dificultad para efectuar debilitamiento del flujo en altas velocidades.

4.2.1. Principio de funcionamiento.

El principal tipo de motor usado en aplicaciones de tracción se conoce como motor de inducción con rotor de jaula. El campo magnético rotatorio generado por el estator induce un voltaje en las barras del rotor.

El campo magnético viaja de un polo hacia el otro en la mitad de un ciclo, por lo tanto en un ciclo eléctrico el campo se desplaza un par de polos o 360 grados eléctricos. El número de ciclos eléctricos requeridos para completar una revolución es igual al número de pares de polos (Toliyat and Kliman, 2004). Esta velocidad se conoce como velocidad síncrona, n_0 en la ecuación 4.2 donde, f es la frecuencia en Hz y pp son los pares de polos en el motor.

$$n_0 = \frac{60f}{pp} \quad (4.2)$$

La diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del eje del motor, n , se conoce como desplazamiento, S , ecuación 4.3. Para la mayoría de los motores de inducción el desplazamiento a carga nominal es de menos del 5% (Toliyat and Kliman, 2004)(Toliyat and Kliman, 2004).

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (4.3)$$

La eficiencia más alta es observada a velocidades altas y pares más bajos que el nominal debido a que las pérdidas en el cobre y en los núcleos se reducen a velocidades altas. A velocidades bajas la eficiencia cae debido a las pérdidas en el rotor.

4.2.2. Estado del arte de los MI para tracción.

4.2.2.1. GM EV1.

Este vehículo es considerado por algunos autores como el primer vehículo eléctrico comercial de la era moderna. La unidad de tracción fue desarrollada por la compañía Delphi, en la figura 4.33 se muestra un esquema del tren motriz el

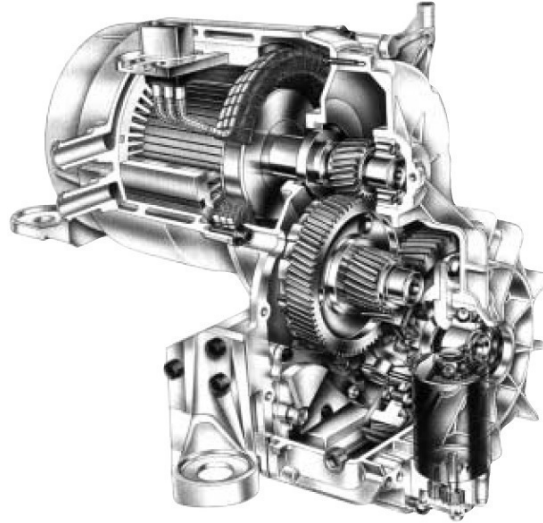


Figura 4.33: Tren motriz en el modelo GM EV1.

cual consistía en un motor trifásico de inducción con un reductor de engranes integrado. Las características principales del motor de inducción eran: potencia nominal de 103 (kW) a una velocidad angular de 7000 (rpm), par máximo 149 (Nm) velocidad máxima de 13,000 (rpm). La unidad de tracción contaba con frenado regenerativo y tenía una masa de 68 (kg). El estator contaba con una jaula fundida en aluminio.

4.2.2.2. Tesla Model S.

El motor de inducción utilizado en el vehículo de la empresa estadounidense Tesla Motors, presenta una mejora en la capacidad de par que puede generar en un rango amplio de velocidades. Este motor presenta ventajas en el tamaño y peso, puede proporcionar picos de par de aproximadamente cinco veces el par continuo por cortos periodos.

Con respecto a los MI convencionales, el diseño del motor en el Model S presenta las siguientes diferencias: el entrehierro es más grande, la longitud los núcleos laminados es menor, las ranuras del estator son más amplias, los dientes del estator son más estrechos, los dientes del rotor son más estrechos y cortos, la culata de las laminaciones del estator es más gruesa que la longitud de los dientes del estator, la culata de las laminaciones del rotor es más gruesa que la longitud de los dientes del rotor, tiene un mayor número de ranuras el estator por polo y por fase y un mayor número de ranuras en el rotor.

En la figura 4.34 se muestra la geometría de los núcleos del rotor y del estator. Las principales dimensiones que se emplearon en las simulaciones realizadas se muestran en la tabla. La geometría parcial que se utilizó debido a la simetría del motor, así como los materiales, embobinados y condiciones de frontera, se muestran en la figura.

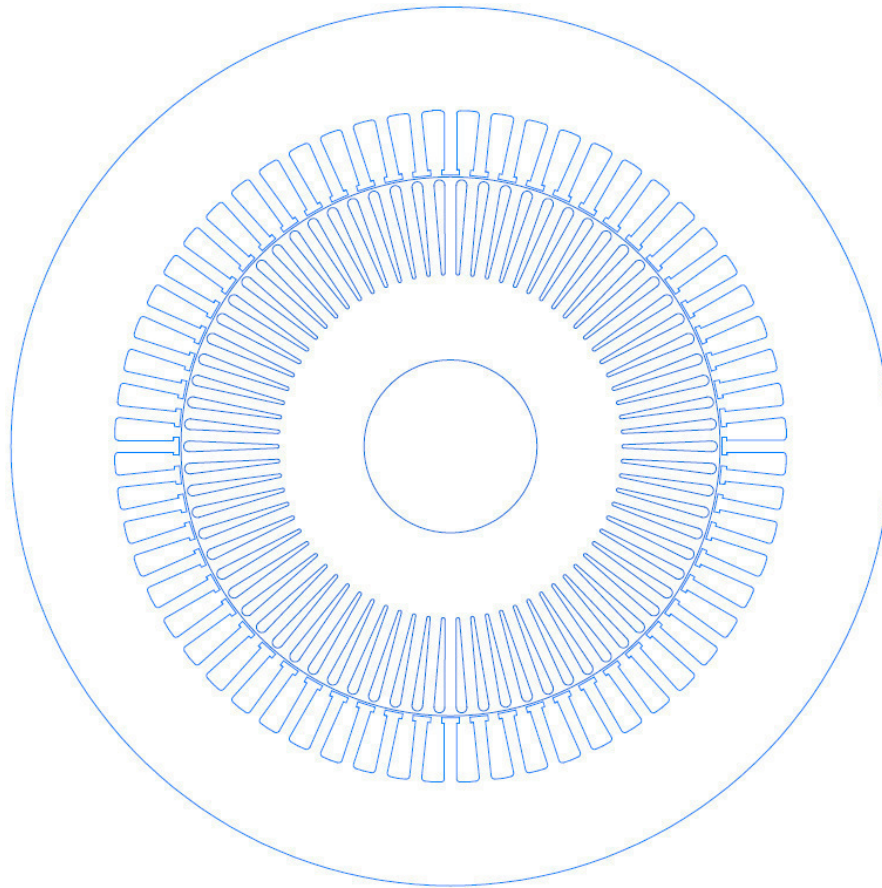


Figura 4.34: Geometría interna del motor en Tesla Model S.

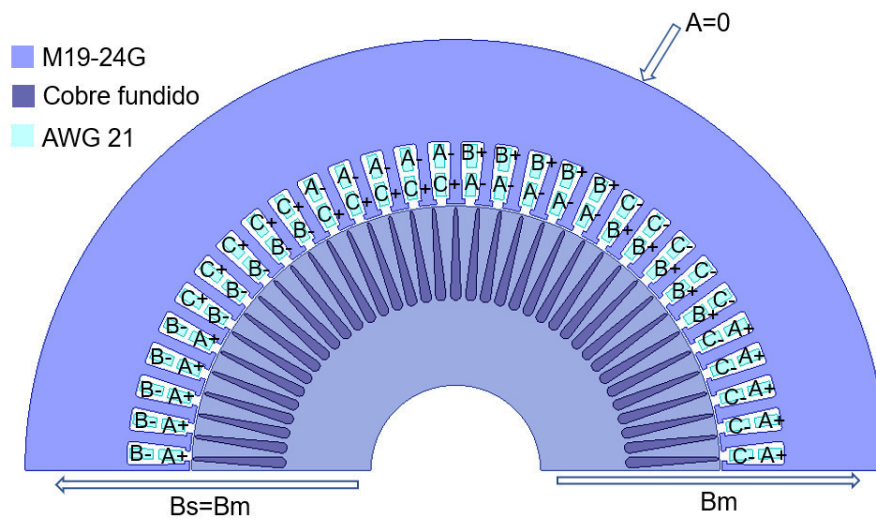


Figura 4.35: Geometría parcial del motor en Model S para AEF.

4.3. Motores de reluctancia.

Los motores síncronos de reluctancia (MSR), pueden convertirse en candidatos excelentes para las aplicaciones de tracción debido a la simplicidad y robustez del rotor y a su inherente capacidad de tolerancia a fallas, no requieren de imanes ni devanados en el rotor, solo se requiere de una fuente de excitación para el estator, son fáciles de controlar, los requerimientos de enfriamiento son bajos, son confiables bajos costos de manufactura, pocos requerimientos de mantenimiento, la respuesta dinámica del par es rápida, Yilmaz (2015).

Entre los principales inconvenientes de los MSR se encuentran su eficiencia baja y densidad de par baja, el circuito del inversor es más complejo, presentan vibración y ruido, el ruido por interferencia electromagnética es alto, el comportamiento del par es altamente no lineal,

Los motores de reluctancia conmutada se componen de un estator con un devanado que produce un campo magnético rotatorio y un rotor que no posee ni imanes ni devanados. El principio de funcionamiento se basa en el diseño del rotor con una saliencia. Estos motores son más caros que los MI pero más económicos que los MSIP. Presentan un desempeño adecuado para las aplicaciones de tracción, aunque las desventajas como vibraciones y ruido mecánico, alto rizado del par y difícil control lo siguen colocando como un candidato a futuro.

El motor síncrono de reluctancia posee una estructura simple y robusta, alta capacidad de operación en sobre carga y un rango amplio de velocidad. Se componen de un rotor similar al de los MSIP o los MI pero el rotor no posee ningún imán ni devanado. El principio de operación se basa en la gran saliencia del rotor provocada por distintas barreras de flujo colocadas estratégicamente. Las ventajas de este tipo de motor son que debido a la ausencia de conductores en el rotor no hay pérdidas resistivas y aumenta la eficiencia y robustez al tiempo que disminuyen los costos de manufactura y ensamble, Adicionalmente el rotor no tiene que ser laminado. Las principales desventajas son el control, alto rizado del par y bajo factor de potencia.

4.4. Motores de corriente directa.

Los motores de corriente directa fueron ampliamente usados para transporte a principios del siglo XX. Este tipo de motor posee un alto par a velocidades bajas para aceleración de vehículo, es una tecnología madura, es robusto y fácil de controlar por lo que no se requiere componentes electrónicos complejos, posee una relación lineal de par-velocidad, bajas pérdidas de par, un rango amplio de potencia constante y una eficiencia razonable a velocidades de crucero (Yilmaz, 2015).

Sin embargo, la mayor desventaja de los MCD es que requieren de un acople mecánico para conmutar el sentido de la corriente en la armadura, por lo que el mantenimiento requerido de estos motores se hace muy frecuente, además que la

fricción del conmutador limita la velocidad máxima del motor, también poseen una densidad potencia baja, eficiencia baja y son poco confiables.

4.5. Tendencia en el diseño de MET

Debido al creciente interés en la electrificación del transporte y a la importancia de los MET para lograr este fin, diversas configuraciones poco convencionales han sido propuestas y están bajo investigación. Algunas de ellas son: motores de imanes permanentes en el estator, el principio de funcionamiento se basa en una excitación híbrida en el estator y un diseño de rotor con una gran saliencia. Algunas de las variantes de este motor incluyen al motor síncrono con doble excitación híbrida, el motor de imanes permanentes con doble saliencia, motor de imanes permanentes con flujo conmutado.

Las configuraciones de motor de flujo transversal y motores de imanes permanentes sin núcleo son relativamente nuevas propuestas. Todas estas propuestas buscan satisfacer los requerimientos de un MET sin depender de los imanes permanentes de tierras raras; adicionalmente las siguientes propuestas se muestran muy prometedoras como futuros candidatos, aunque aún requieren de bastante desarrollo para su uso comercial.

Los motores de reluctancia asistidos por imanes mejoran las desventajas de los MSR al agregar imanes permanentes, los cuales se buscan que sean en pequeñas cantidades e incluso se pueden emplear imanes sin elementos de tierra rara como aquellos de ferrita. Los imanes son colocados en el interior de las barreras de flujo aumentando la densidad de par. Presentan un buen desempeño para las aplicaciones de tracción y son mucho menos susceptibles a fallas por desmagnetización.

Otro tipo de motor que es de gran interés para la electrificación son los motores de flujo axial. Distintos prototipos han sido construidos promoviendo la ventaja de ser montados directamente en las llantas de tracción. Poseen mayor densidad de potencia y de par, excelente eficiencia, construcción compacta bajo rizado del par. Las principales desventajas los altos costos de manufactura, inductancia del devanado baja y limitada zona de potencia constante.

4.6. Conclusiones del capítulo.

De los distintos tipos de motores eléctricos que existen sólo se han utilizado tres para la tracción de vehículos. Los motores de corriente directa, los motores de inducción y los motores síncronos de imanes permanentes. Cada uno de ellos presenta sus ventajas y desventajas, por lo que determinar cuál es el mejor depende mucho de la aplicación y desempeño deseado.

Los motores de corriente directa fueron los únicos usados en los primeros vehículos eléctricos, hoy en día se siguen implementando en algunos vehículos de reparto y utilitarios, la principal desventaja es el mantenimiento requerido y el desempeño. Los motores de inducción han sido implementados en vehículos demostrando un buen desempeño, las principales desventajas son la gran corriente en el arranque y las pérdidas resistivas en el rotor originadas por las corrientes inducidas. Los motores eléctricos más usados para la tracción de vehículos son los motores síncronos de imanes permanentes de tierras raras embebidos en el rotor, la principal desventaja es el uso de los elementos de tierras raras.

Seguramente los motores síncronos de imanes permanentes seguirán dominando el mercado por algunos años, sin embargo, existe la clara necesidad de desarrollar otros tipos de motores donde se utilice una mínima cantidad de imanes de tierras raras. Las propuestas realizadas para atender esta necesidad implican configuraciones complejas que aún no han sido implementadas en modelos comerciales. Sin embargo, para desarrollar un motor de estos tipos, se requiere una mayor experiencia en el campo de motores de tracción. Es importantes observar la tendencia en investigación y desarrollo de nuevos motores a la par de estudiar las mejoras en las metodologías de diseño y análisis que permiten crear mejores motores de inducción y motores de imanes permanentes.

Capítulo 5

Metodología de diseño.

5.1. Descripción de la metodología.

En el presente trabajo se proponen una serie de actividades para el diseño de MET. Las etapas de la metodología general propuesta son: análisis de la aplicación, diseño electromagnético, diseño mecánico e ingeniería de detalle, figura 5.1, en las siguientes secciones se describe de forma general cada uno de estos pasos.

5.1.1. Análisis de la aplicación.

En el diseño de MET no existe el motor que sea universalmente perfecto para todas las aplicaciones de tracción. Sin embargo, si se conocen ciertos datos como, principales dimensiones del vehículo a impulsar, las condiciones de manejo y el parámetro a optimizar, entonces se puede diseñar el motor más adecuado para dicha aplicación.

El tipo de vehículo que será impulsado puede ser un vehículo de pasajeros, un camión de carga, un tren o incluso una bicicleta; las dimensiones y parámetros principales del vehículo que se requieren conocer incluyen, masas, distancia entre ejes, área frontal, coeficiente aerodinámico, etc.; las condiciones de manejo se refieren principalmente a dos categorías: manejo en la ciudad o manejo en la carretera; las características que se desean maximizar, puede ser la eficiencia, la densidad de par o la potencia.

Por lo anterior, la metodología propuesta inicia con el análisis de la aplicación; en esta etapa se obtienen o estiman las principales dimensiones del vehículo que será impulsado por el motor a diseñar; se selecciona el ciclo de manejo que mejor represente las condiciones en las que será operado el vehículo y se determinan los parámetros prioritarios en el desempeño del motor, es decir, si se tienen un mayor interés en aumentar la eficiencia, sí se desea un motor muy

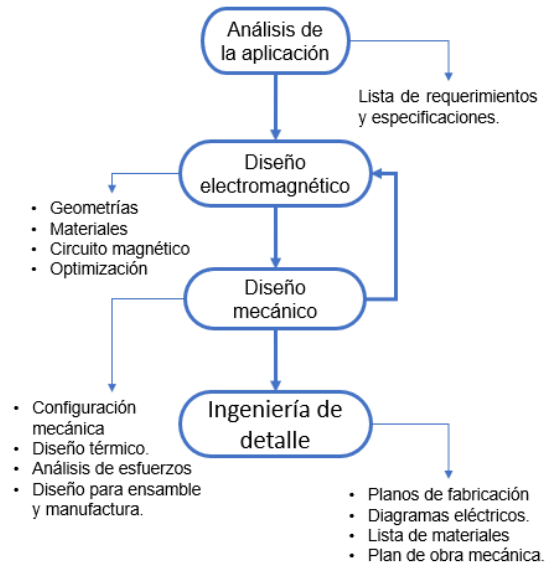


Figura 5.1: Metodología general de diseño de MET.

potente, las restricciones de costo y de producción, etc. Esta etapa es comparable con la adquisición de requerimientos y especificaciones del producto de la metodología general de diseño.

5.1.2. Diseño electromagnético.

El siguiente paso es el diseño electromagnético, donde en una primera iteración se definen: algunas especificaciones generales del motor tales como, potencia nominal, par máximo, velocidad base y velocidad máxima. Posteriormente se requiere definir en detalle el diseño del circuito magnético, es decir todos los aspectos de las piezas que están involucradas en la conversión de energía eléctrica a energía mecánica incluyendo: geometrías de los núcleos laminados, número de polos y de ranuras, posiciones y dimensiones de las barreras de flujo, posiciones y dimensiones de los imanes barras conductoras; materiales de todos los diferentes elementos, tipo de acero al eléctrico, calibre del alambre de cobre, tipo de imanes y aislantes, etc.

5.1.2.1. Diseño del circuito magnético

De las actividades anteriores una de las más difíciles de efectuar es la definición de la geometría de los núcleos laminados. Las dimensiones y parámetros por definir son muchos y se tiene que decidir cuáles de ellos van a ser asignados y cuáles van a ser calculados o restringidos. Por otro lado, se cuentan con muy pocas ecuaciones que pueden ser usadas para definir la geometría y muchas de ellas fueron obtenidas de modelos empíricos y están basadas en la experiencia de algunos constructores o normas de diseño. Además, en el proceso de optimización, muchas de las geometrías propuestas pueden converger a máximos locales en lugar de máximos absolutos como es deseado.

Considerando que este es el primer motor que se diseña en la UAT, evitaremos los inconvenientes antes mencionados seleccionando una de las geometrías analizadas en el capítulo anterior. Dichas geometrías han sido sometidas a procesos complejos de optimización y son resultado de un largo proceso de investigación y desarrollo. Los vehículos que utilizan dichos motores son ampliamente comercializados en distintas ciudades, por lo que podemos asegurar que al basarnos en uno de ellos obtendremos un motor con un desempeño adecuado para satisfacer los requerimientos de tracción.

5.1.2.2. Optimización.

El siguiente paso en el diseño electromagnético es la optimización. Los métodos de optimización son muy complejos, algunas de las metodologías reportadas en la literatura para la optimización de MET son: optimización de evolución diferencial (DE por sus siglas en inglés) de objetivos múltiples, efectuada para maximizar el par y minimizar el rizado de par y las pérdidas en el cobre y núcleos (Carraro et al., 2014); diseño y optimización automáticas por medio de algoritmos genéticos (Nakata et al., 2017), optimización del debilitamiento de flujo (Dang et al., 2017) entre otros. El proceso de optimización es un área de desarrollo que implica por sí misma una gran cantidad de investigación y desarrollo

Por otro lado, los grandes constructores tienen instaladas líneas completas de producción en serie y conocen los factores de fábrica inherentes a los procesos de manufactura y ensamble, de modo que pueden realizar simulaciones más precisas que tomen en cuenta estos factores. Sin embargo, en nuestro caso buscamos construir dos unidades de este prototipo, se contratarán diversos proveedores y se integrarán los componentes, por lo que desconoceremos el factor de fábrica y las simulaciones tendrán este error, adicionado a los errores propios del método numérico. Por lo anterior en este trabajo decidimos limitar los alcanzables de optimización a un análisis sensitivo.

5.1.3. Diseño mecánico.

El diseño mecánico contempla el análisis y dimensionamiento de la estructura del motor, del sistema de enfriamiento, mecánica de los materiales seleccionados y el diseño para manufactura y ensamble. Dentro del análisis de la mecánica de materiales se verifica que con la geometría obtenida y materiales seleccionados todos los componentes soporten las cargas esperadas, esto incluye los núcleos laminados sometidos a las fuerzas tangenciales en el entrehierro. En el diseño para ensamble y manufactura se analizan los posibles procesos para producir cada una de las piezas así, como la secuencia de ensamble, el diseño detallado de cada componente contempla características especiales de acuerdo con los procesos seleccionados.

Una de las dificultades en el diseño de MET tracción es la interacción existente entre los diferentes sistemas; por ejemplo, el desempeño del motor está fuertemente influenciado por la temperatura: la máxima corriente de magnetización y por

lo tanto el par máximo del motor están limitados a que no se supere la máxima temperatura de operación del aislante de los conductores en el estator. Dado lo anterior diseñar primero el sistema electromagnético y posteriormente el sistema de refrigeración resulta poco eficiente debido a que cualquier cambio en uno de los sistemas afecta directamente al otro. En lugar de un diseño secuencial, lo que se propone en el presente trabajo para el diseño de dos prototipos es el análisis simultaneo de los diferentes fenómenos físicos a través de simulaciones de elemento finito para evaluar los esfuerzos a los que son sometidos cada uno de los componentes del motor y las distribuciones de temperatura.

5.1.4. Ingeniería de detalle.

Con el resultado obtenido de las etapas anteriores se procede a realizar la documentación necesaria para la construcción del motor, esto incluye planos de fabricación, lista de materiales y componentes. plan de trabajo, plan de obra mecánica entre otros. Para el presente trabajo se realiza dicha documentación considerando que se busca construir solo dos prototipos y los procesos de manufactura con los que se cuenta para dicho fin, esto incluye proveedores externos.

5.2. Diseño de dos prototipos.

Debido a que se busca la fabricación de solo dos unidades del prototipo, muchas de las etapas de la metodología propuesta se tiene que acoplar por medio de actividades específicas dependiendo de las limitaciones o consideraciones que se tomaron para cada una de las etapas descritas en las secciones anteriores. Como resultado los pasos seguidos para el diseño del MET del presente trabajo se muestra en la figura 5.2, donde cada grupo de actividades corresponde a una de las etapas del esquema en la figura 5.1.

5.2.1. Análisis de la aplicación.

5.2.1.1. Datos del vehículo.

Para nuestro proyecto, los datos del vehículo se obtuvieron del estudio de mercado presentado en la última sección del capítulo 2; de los vehículos comercialmente disponibles en la actualidad, se seleccionó el modelo Nissan LEAF debido a que ya es implementado como taxi en la CDMX. Los principales parámetros de este vehículo se muestran en la tabla 5.1, una lista más detallada de los parámetros se puede encontrar en el apéndice en la sección del código llamada: datos del vehículo.

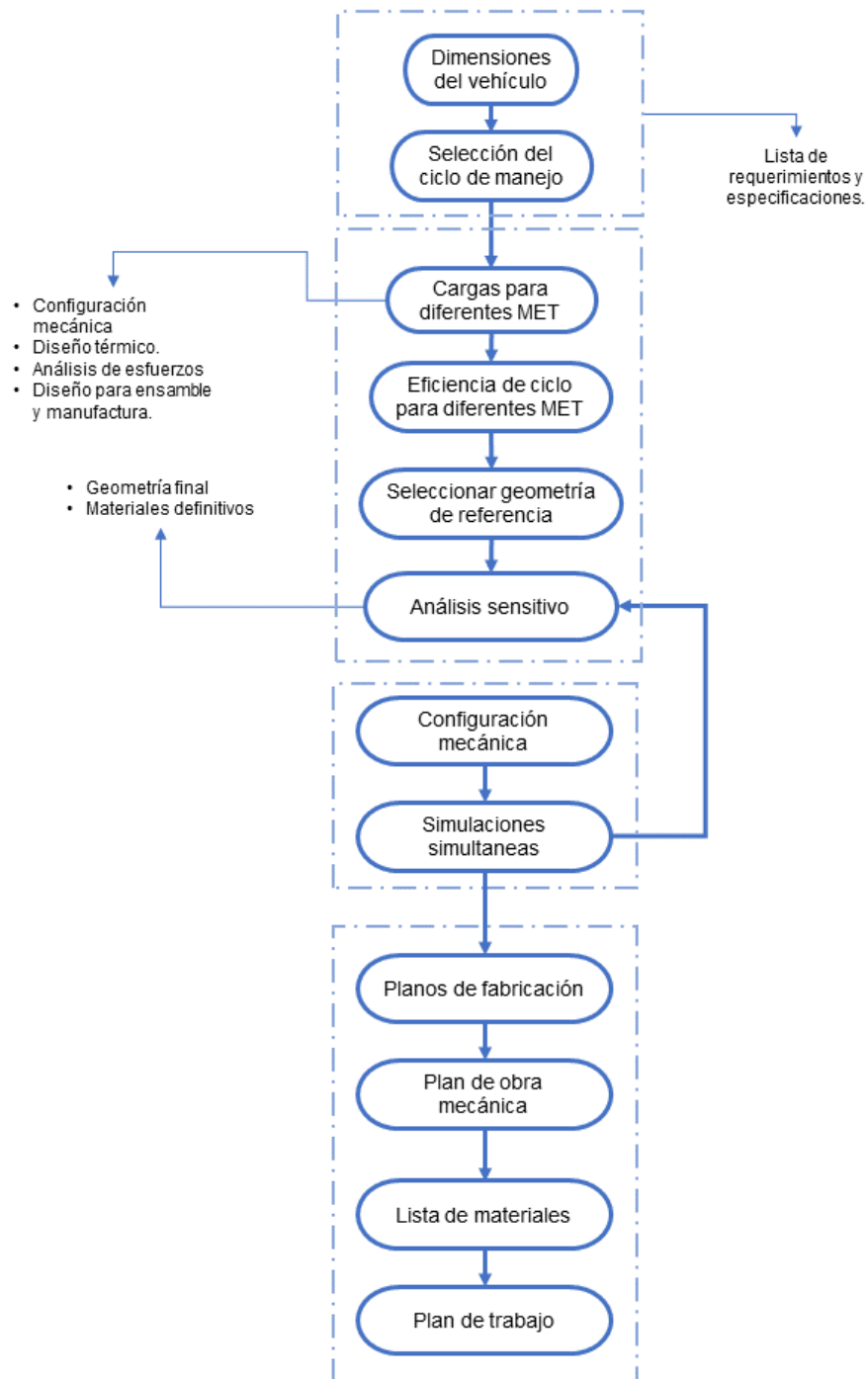


Figura 5.2: Metodología específica para el diseño para construcción de dos prototipos.

Cuadro 5.1: Datos y dimensiones del vehículo propuesto.

Descripción	Valor	Descripción	Valor
Masa	1563.2 (Kg)	Altura	1.48 (m)
Cargo	100 (Kg _f)	Ancho	1.695 (m)
Peso frontal	58 %	Distancia entre ejes	2.6 (m)
Peso trasero	42 %	Coefficiente aerodinámico	0.28
Plazas	5	Llanta	1865R15

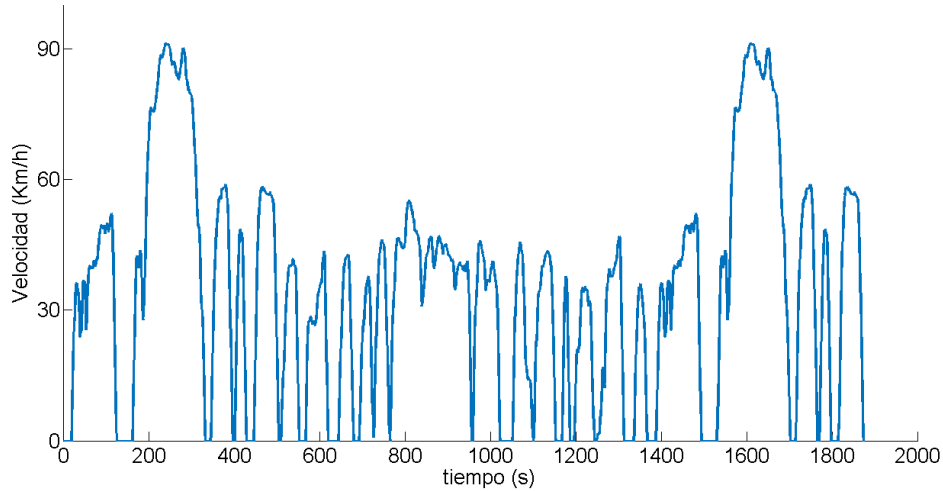


Figura 5.3: Ciclo de manejo FTP.

5.2.1.2. Ciclo de manejo seleccionado.

Para definir las especificaciones del motor se requiere conocer las cargas a las que estará sometido. Diversos ciclos de manejo han sido desarrollados para la simulación de las condiciones reales de manejo (Ehsani et al., 2005). Los ciclos de manejo generalmente son representados por la velocidad del vehículo a lo largo de un tiempo relativo de manejo. En la figura 5.3 se muestra el ciclo de manejo FTP el cual es una extensión del ciclo UDSS (Prueba de manejo urbano en dinámometro, por sus siglas en inglés). El ciclo UDSS representa las condiciones de manejo en la ciudad, posee 1369 segundos de duración y recorre una distancia de 12 (Km) a una velocidad promedio de 31.5 (km/h) (EPA, 2019). En esta sección se usarán estos datos para realizar los cálculos requeridos.

5.2.2. Evaluación de distintas geometrías de circuitos magnéticos.

Esta etapa corresponde al diseño electromagnético de la metodología propuesta en la sección anterior. Debido a que es el primer diseño realizado y dada la complejidad de proponer una geometría nueva, se selecciona un circuito magnético de los motores analizados en el capítulo anterior.

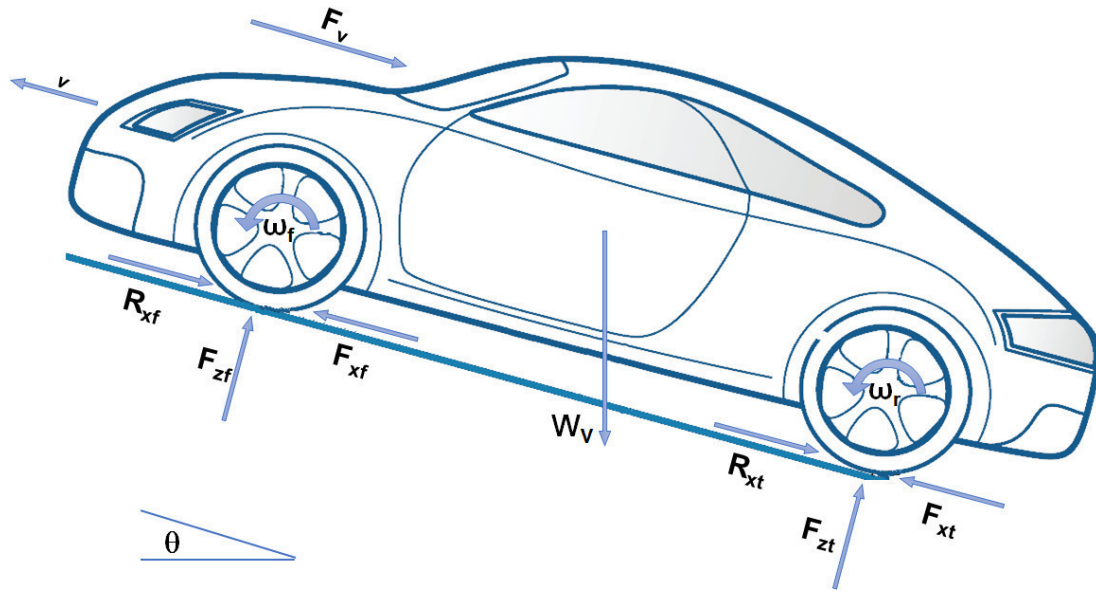


Figura 5.4: Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas en el vehículo (Emadi, 2014, Gillespie, 2000).

5.2.2.1. Cálculo de las cargas en el motor.

Con los valores nominales y máximos publicados para cada uno de los motores se puede obtener la curva ideal par-velocidad y el mapa de eficiencia. En esta sección se utiliza dicha curva y los datos del ciclo de manejo para calcular las cargas estimadas en el motor. Aunque un vehículo se mueve en un espacio tridimensional, un análisis simplificado que es usado ampliamente considera un movimiento recto en dos dimensiones. Al aplicar la segunda ley de Newton en el diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura 5.4, se obtiene la ecuación 5.1:

$$m\bar{a} = \bar{F}_t - \bar{F}_V - \bar{F}_g - \bar{F}_r \quad (5.1)$$

donde m_v es la masa del vehículo, F_t es la fuerza total de tracción, F_V es la fuerza de resistencia aerodinámica causada por el viento, F_g es la componente del peso que actúa en la misma dirección que la velocidad del vehículo y F_r es la fuerza de resistencia al rodamiento.

La fuerza de resistencia aerodinámica La resistencia aerodinámica del vehículo está compuesta de dos componentes una ocasionada por la presión del aire sobre la forma del vehículo y la otra debido a la fricción del aire sobre el vehículo. Debido a la complejidad para modelar el flujo de aire en torno al vehículo (Gillespie, 2000), se ha utilizado un modelo empírico ampliamente representado por la ecuación 5.2:

$$F_V = \frac{1}{2} \rho_a A C_D (v + v_v)^2 \quad (5.2)$$

donde ρ_a es la densidad del aire, A es el área frontal efectiva del vehículo, C_D es el coeficiente aerodinámico v_v es la velocidad del viento y v es la velocidad del vehículo .

Resistencia al ascenso. Cuando el vehículo viaja cuesta arriba, la acción de la gravedad produce una fuerza dirigida hacia abajo y oponiendo al avance del vehículo conocida como resistencia al ascenso, F_g en la figura 5.4. La ecuación 5.3 representa a esta fuerza, es función del ángulo de inclinación del camino, θ_c , de la masa del vehículo, m_v y de la constante de aceleración gravitacional, g .

$$F_g = m_v g \sen(\theta_c) \quad (5.3)$$

El grado de inclinación de un camino se define como la elevación en un cierto avance horizontal Gillespie (2000). Dicha razón es la tangente del ángulo de inclinación del camino y generalmente se expresa como porcentaje. Los caminos de alta velocidad están limitados a una pendiente del 4 %, mientras que en ciudad de México el grado de inclinación más alto se encuentra en la Zona del Ajusco, donde se alcanzan el 15 %.

Resistencia al rodamiento. A bajas velocidades la resistencia al rodamiento es la principal fuerza que se opone al avance del vehículo (Gillespie, 2000). Esta fuerza es resultado de la histéresis en las llantas como resultado de la distorsión que sufre al hacer contacto en el camino. La ecuación muestra que esta fuerza es función de la fuerza normal, F_z y del coeficiente de resistencia al rodamiento f_r .

$$F_r = F_z f_r \quad (5.4)$$

El coeficiente de resistencia a la rodadura es afectado por diversos factores relacionados entre ellos. Por lo anterior, es prácticamente imposible obtener una ecuación analítica que modele este coeficiente, sin embargo, diversos modelos basados en experimentos son ampliamente usados. Para velocidades por debajo de los 160 (Km/h), el coeficiente incrementa de forma aproximadamente lineal con la velocidad, la ecuación ha sido ampliamente usada para el cálculo en este rango de velocidades.

$$f_r = 0.01 \left(1 + \frac{v}{100} \right) \quad (5.5)$$

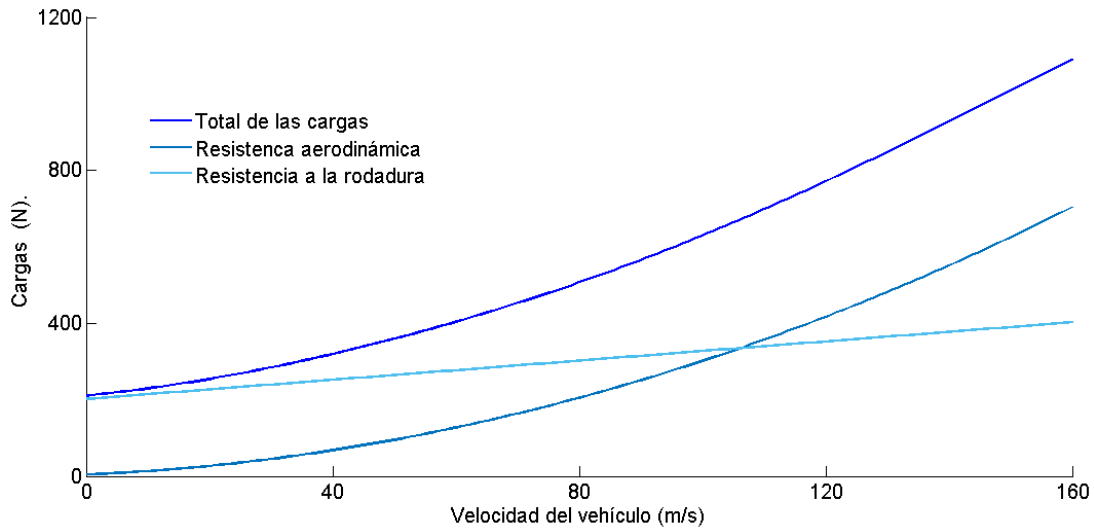


Figura 5.5: Cargas en el avance del vehículo en un camino sin pendiente.

Fuerza de tracción. La fuerza de tracción generada por el motor se puede calcular empleando la ecuación 5.6. El par que entrega el motor, T_M , es amplificado por la relación de transmisión de tren motriz,

Dependiendo de la configuración del tren motriz los elementos presentes en el pueden variar desde una caja de reducción de engranes con una sola relación de transmisión, una caja de velocidades con múltiples relaciones de transmisión e inclusive se puede tener un diferencial al final del tren motriz. Para fines de los cálculos presentados en este trabajo, se asume que el tren motriz del vehículo posee una caja de engranes cuya relación de transmisión es N_R y un diferencial con una relación de transmisión N_D . La inercia de estos componentes se representa por I_{RD}

$$F_{TM} = \frac{T_M N_{RD} \eta_{tm}}{r_{ll}} - \left\{ (I_M + I_{RD}) N_{RD}^2 + I_{eje} N_D^2 + I_{ll} \right\} \frac{a_x}{r^2} \quad (5.6)$$

Para cada uno de los motores analizados se realizaron los cálculos de las fuerzas de oposición que el motor tiene que superar para poder mover el vehículo. En la tabla 5.2 se resumen los datos de las características del tren motriz para cada motor analizado. En la figura 5.6 se muestra una de los desempeños para cada motor, las curvas de fuerza de tracción contra velocidad del vehículo ideales del tren motriz son sobrepuestas a las fuerzas de oposición para distintas inclinaciones del camino. Las ecuaciones descritas anteriormente en esta sección fueron resultas utilizando el código del apéndice 3.

De la figura 5.6, se puede apreciar que el motor que presenta el menor desempeño es el del Honda Accord 2005, con el cual el vehículo podría subir una inclinación del 20% a una velocidad menor a los 18 (km/h) y la velocidad máxima que el vehículo podría alcanzar en un camino sin inclinación es de aproximadamente 70 (km/h). De forma similar al utilizar el motor de Nissan Leaf 2012, el vehículo podría subir pendientes del 30% a velocidades por debajo de los 40

Cuadro 5.2: Datos del tren motriz seleccionado para cada motor.

Motor	Par máximo (Nm)	Potencia máxima (kW)	Velocidad máxima (rpm)	relación de transmisión
Honda Accord 2005	136	12.4	6000	10:1
Nissan Leaf 2012	280	80	10390	7.5:1
Toyota Prius 2004	400	50	6000	5:1
BMW i3	250	125	11400	8:1
Chevrolet Bolt 2018	350	150	8810	6:1
Tesla Model S	440	270	9500	4:1

(km/h) y la velocidad máxima que alcanzaría en un camino sin inclinación es alrededor de los 160 (km/h). También se puede observar que el desempeño ofrecido por el motor del Tesla Model S es muy superior al desempeño deseado, lo cual puede ser no conveniente para esta aplicación.

Otra gráfica que se obtiene de este análisis son los puntos de operación de los motores de acuerdo con cada punto del ciclo de manejo. En la figura 5.7 se observa la comparación de esta gráfica para los distintos tipos de motores seleccionados sobrepuestos a las curvas de par-velocidad. Se observa que el motor del Accord 2005 la mayoría de los puntos caen fuera de la curva, por lo que no cumple con muchos de los puntos de operación del ciclo y este motor resulta inviable para esta aplicación. En motor del Toyota Prius 2004, deja algunos puntos del ciclo fuera de la curva par velocidad, sin embargo, la gran mayoría de los puntos están dentro de la curva concentrados en una de las zonas con alta eficiencia. Los demás motores cubren totalmente los puntos del ciclo, aunque la distribución no es la ideal, como en el caso del Tela Model S donde no se aprovecha todo el rango del motor.

Hasta ahora se ha analizado solo los valores nominales y la curva ideal de los diferentes motores sin incluir información detallada de la geometría y material de los diferentes motores analizados. En la siguiente sección se toma en cuenta dichos detalles para calcular las pérdidas del motor y la eficiencia del ciclo.

5.2.2.2. Eficiencia de ciclo de manejo.

La evaluación de la eficiencia para cada motor se realiza de la siguiente manera conociendo los datos del vehículo, el ciclo de manejo y la curva par velocidad de los diferentes motores se calculan las cargas del motor; las cargas se dividen en dos rangos de par y tres rangos de velocidad que se definen como par bajo y alto y velocidad baja, media y alta resultando en un total de seis zonas, figura 5.8; para cada una de las zonas se calcula un par equivalente, T_{eq} , utilizando la ecuación 5.7(Carraro et al., 2014), una velocidad equivalente, ω_{eq} , por medio de la ecuación 5.8 y un factor de peso c_{eq} que representa el tiempo relativo en el que el motor ha operado en dicha zona.

$$T_{eq,ij} = \frac{\sum_k T_{k,ij}}{p_{t,ij}} \quad (5.7)$$

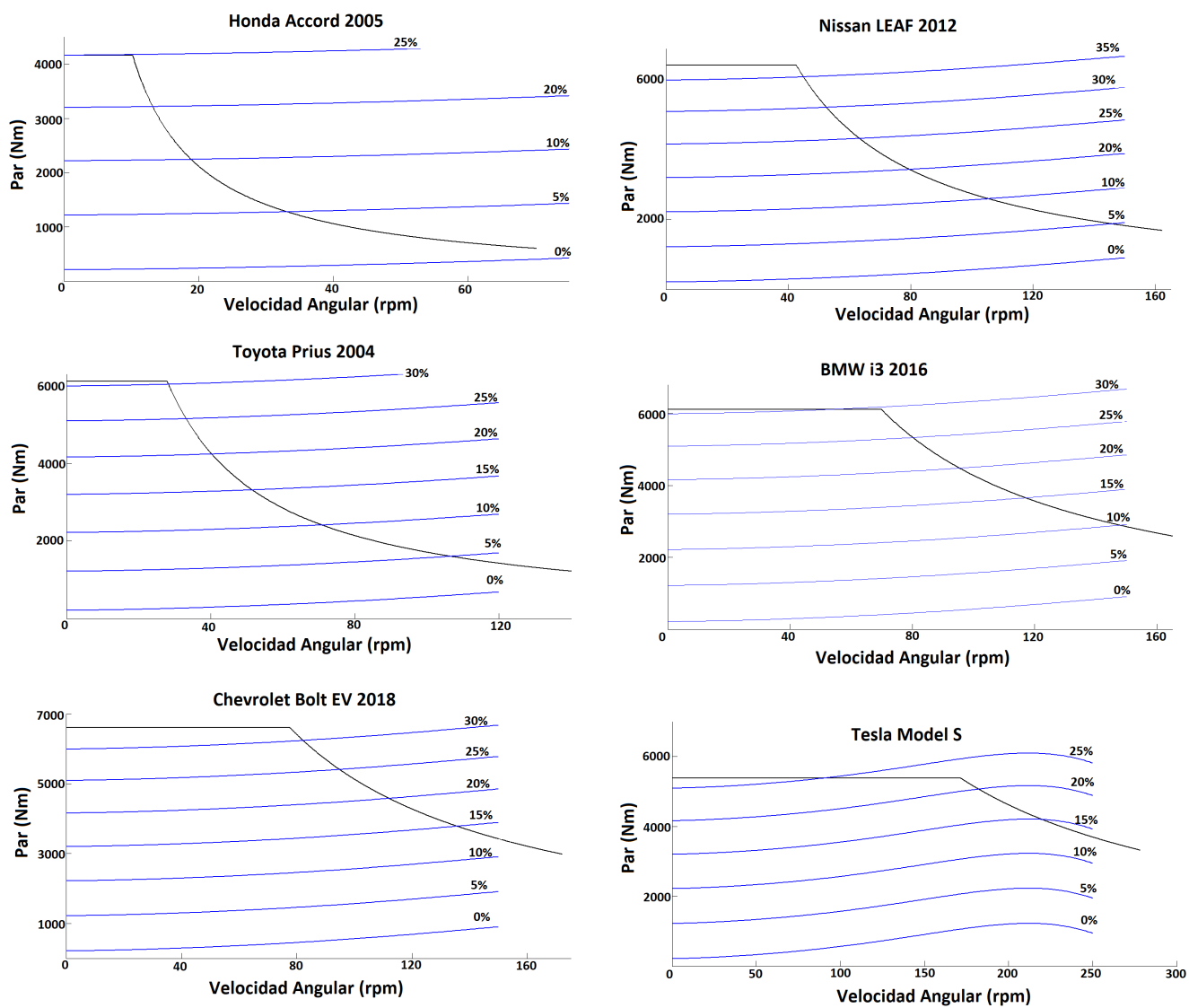


Figura 5.6: Gráficas de la fuerza de tracción contra las cargas para los motores analizados

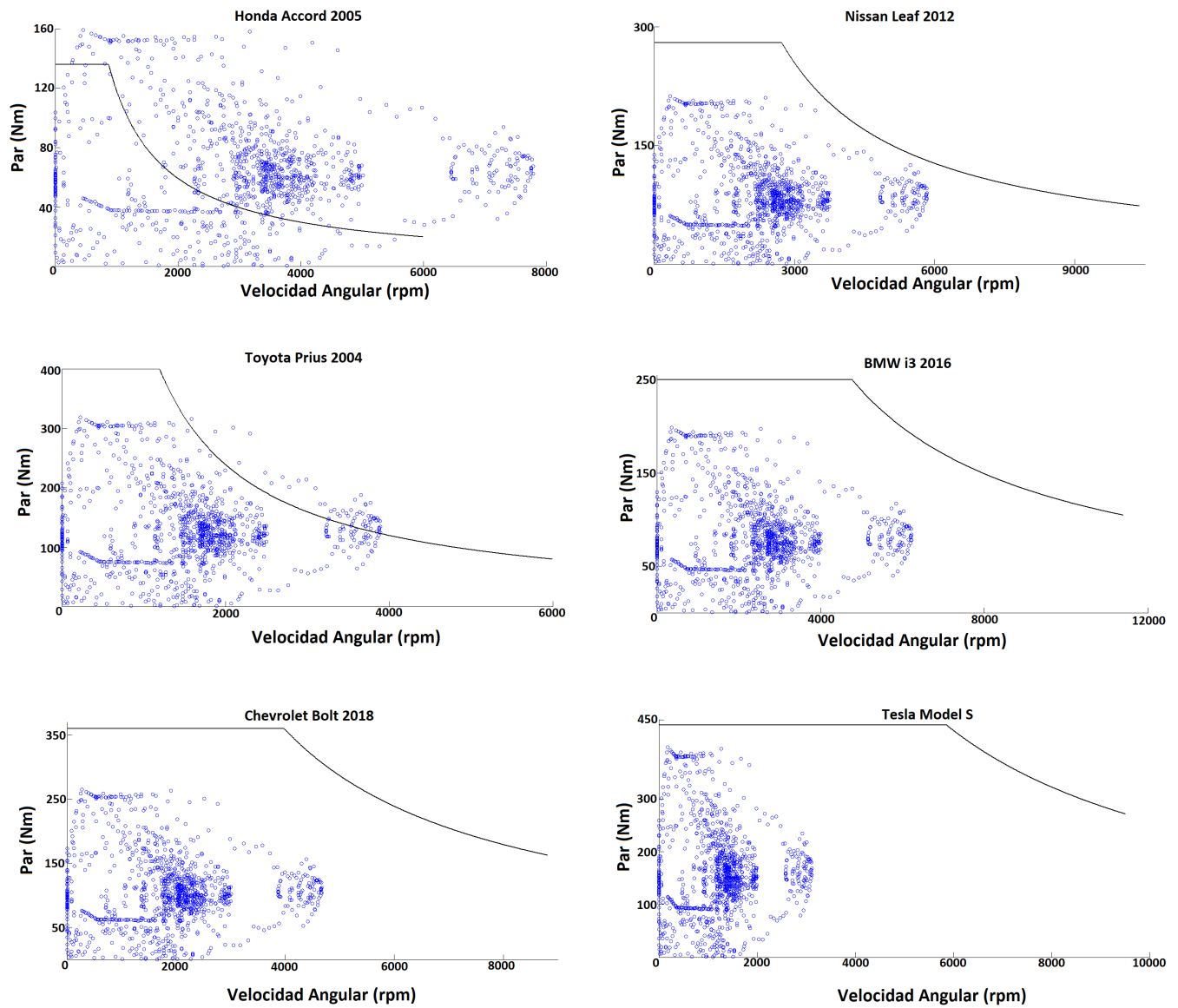


Figura 5.7: Gráficas de los puntos de operación del ciclo para cada uno de los motores

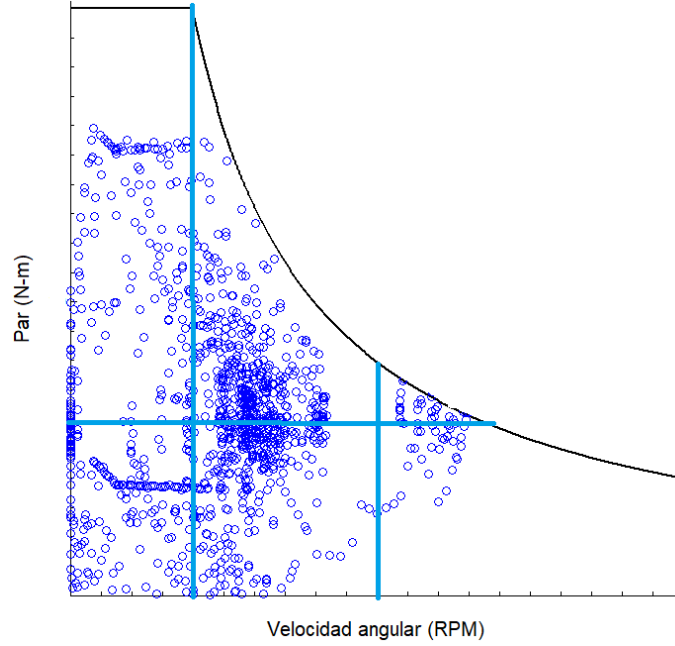


Figura 5.8: División de las cargas en seis zonas.

$$\omega_{eq,ij} = \frac{\sum_k \omega_{k,ij}}{p_{t,ij}} \quad (5.8)$$

$$c_{eq,ij} = \frac{p_{t,ij}}{p_t} \quad (5.9)$$

Finalmente, se obtiene una eficiencia de ciclo utilizando la ecuación 5.10, donde $P_{eq}(W)$ representa a las pérdidas en el motor. Como se puede observar esta eficiencia es un promedio del tiempo relativo en la que el motor opera en cada uno de los puntos par-velocidad equivalentes. Las pérdidas fueron calculadas de acuerdo con lo descrito en la sección 3.6 y el código con el que se realizaron los cálculos se muestra detallado en el apéndice 6.4. En tabla 5.3 se resumen los resultados de las eficiencias de ciclo obtenidas para los motores analizados, se puede observar que el motor con la mejor eficiencia de ciclo es el Toyota Prius.

$$\eta_{e,ciclo} = \frac{\sum_h (\omega_{eq,h} \cdot T_{eq,h} \cdot c_{eq,h})}{\sum_h ((\omega_{eq,h} \cdot T_{eq,h} + P_{leq,h}) \cdot c_{eq,h})} \quad (5.10)$$

Cuadro 5.3: Eficiencias de ciclo para los motores analizados.

Motor	Eficiencia de ciclo
Honda Accord 2005	90
Nissan Leaf 2012	94
Toyota Prius 2004	96
BMW i3	94
Chevrolet Bolt 2018	95
Tesla Model S	91

5.2.3. Análisis sensitivo.

El análisis sensitivo, busca cubrir en cierto modo a la etapa de optimización, identificando algunas tendencias en la eficiencia del ciclo de manejo al variar algunas de las dimensiones del modelo seleccionado. Aunque no es un proceso formal de optimización, es importante realizar esta etapa ya que en la industria es una de las técnicas más utilizadas en la práctica, debido a que los constructores de MET están interesados en saber se afecta el rendimiento del motor al variar diversos parámetros como dimensiones y tipos de material, de tal modo que pueden reaccionar rápidamente ante algún cambio en el material que les es suministrado.

Se realizaron algunas variaciones geométricas y de material para analizar cómo es afectada la eficiencia de ciclo. Dichas variaciones se realizaron sobre la geometría del motor en Toyota Prius 2004. Las variaciones que presentaron resultados más claros fueron en la geometría del puente de flujo y el ángulo entre los imanes de cada polo. También se realizaron algunas variaciones de materiales.

5.2.3.1. Variaciones Geométricas.

Geometría del puente. En la figura 5.9 se muestran las diferentes variaciones a la geometría del puente de flujo. Las diferentes geometrías se obtuvieron al variar la dimensión marcada con la letra “a” y conservando condiciones de perpendicularidad. La primera variación corresponde a la ausencia del puente de flujo magnético, es decir que los imanes están embebidos en el rotor y el único corte en los núcleos laminados son las ranuras con la geometría del rotor.

En la figura 5.10 se observa el resultado de la variación de la eficiencia de ciclo para cada una de las geometrías. Podemos observar que la ausencia del puente de flujo magnético tiene un impacto negativo en la eficiencia de ciclo en más de un punto porcentual, sin embargo, el resto de las variaciones tienen prácticamente el mismo valor de eficiencia de ciclo, por lo que se conservará para la geometría final el valor original del motor de referencia. Es importante considerar que este análisis únicamente muestra cómo se afecta la eficiencia de ciclo, pero no el impacto de las variaciones en otras características del motor como el rizado del par.

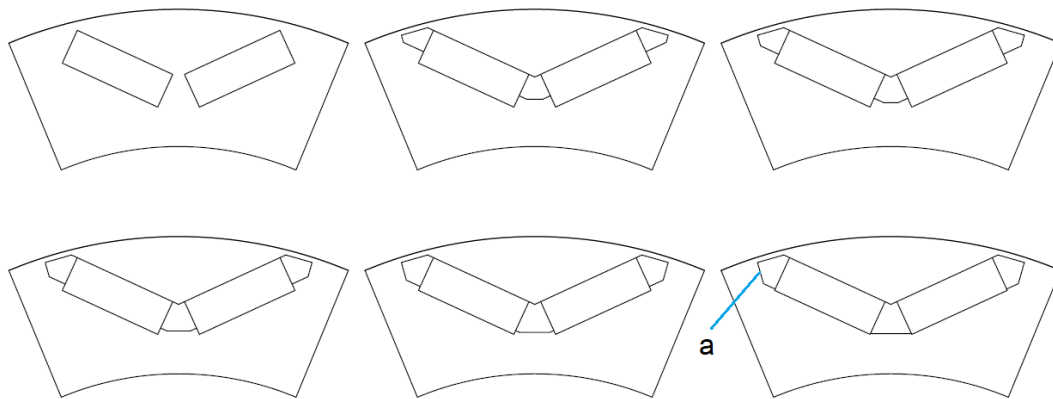


Figura 5.9: Análisis sensitivo de la geometría del puente de flujo.

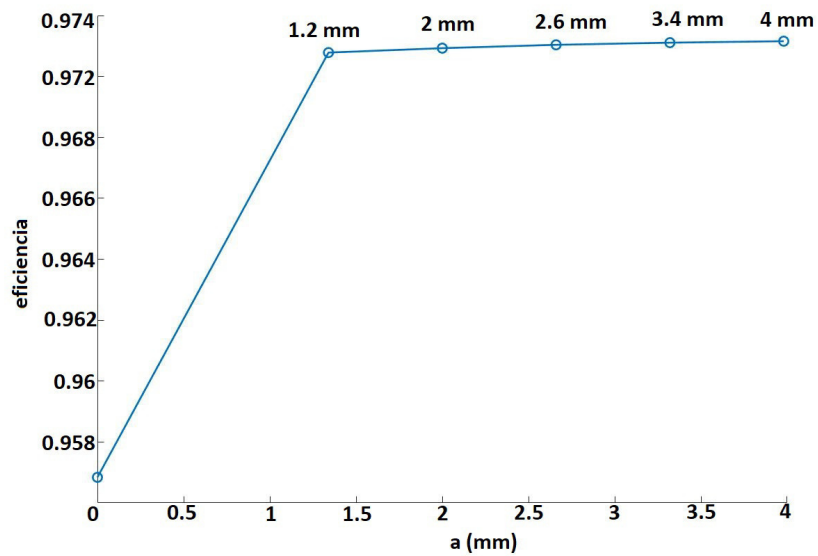


Figura 5.10: Resultado del análisis sensitivo de la geometría del puente.

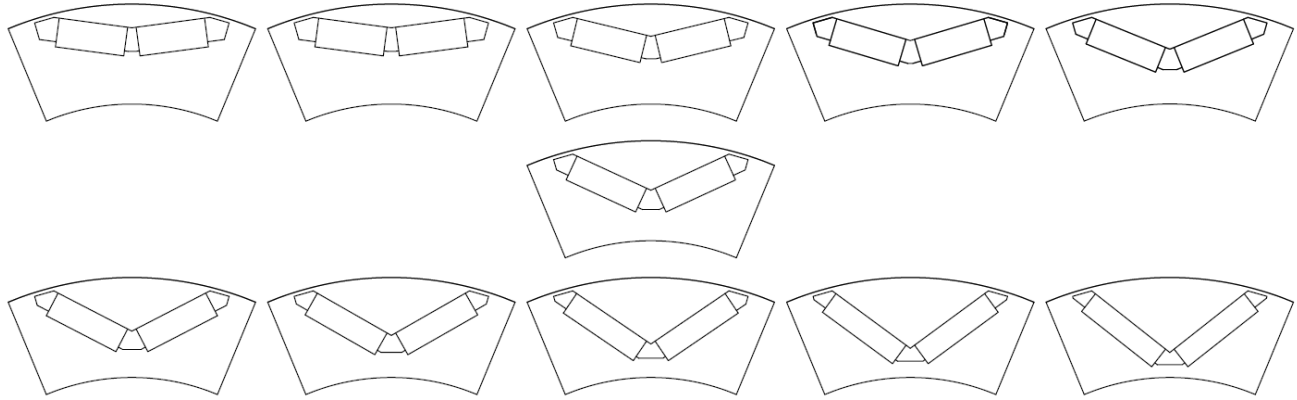


Figura 5.11: Ángulo entre los imanes del polo

Ángulo en V. El siguiente análisis realizado consistió en variar el ángulo entre los imanes del polo, la figura 5.11 muestra las variaciones generadas. Para generar las diferentes geometrías se restringió el uso de imanes permanentes para ser igual a la geometría inicial, de igual forma se fijaron las distancias entre los extremos del imán y los bordes del puente de flujo, como resultado cada una de las geometrías tiene diferentes anchos y espesores en los imanes permanentes.

En la figura 5.12 se muestra el resultado de la variación de la eficiencia de ciclo contra el ángulo de los imanes. Se puede observar que la mayor eficiencia se obtiene para ángulos más cerrados, sin embargo, la mejora en la eficiencia entre los extremos es de menos de medio punto porcentual.

Otras variaciones geométricas. Se realizaron en análisis de algunas otras variaciones geométricas que no mostraron una tendencia contundente en la mejora de la eficiencia de ciclo. Por ejemplo en la figura 5.13 se muestra las modificaciones realizadas al espesor del labio de los dientes del estator, en la figura 5.14 se muestra el resultado a dicho análisis. Se puede observar que la variación en la eficiencia es muy pequeña por lo que no se puede concluir que se haya encontrado una mejora.

5.2.3.2. Variaciones de material.

Tipos de imanes permanentes. En la figura se muestra el resultado de la variación de la eficiencia de ciclo respecto de los diferentes tipos de imanes permanentes. La coercitividad es el principal factor que varía entre dichos tipos de imanes. La variación en la eficiencia del ciclo es menor al punto porcentual, por lo que la selección del imán definitivo se efectuó considerando aquel que opera a las temperaturas altas.

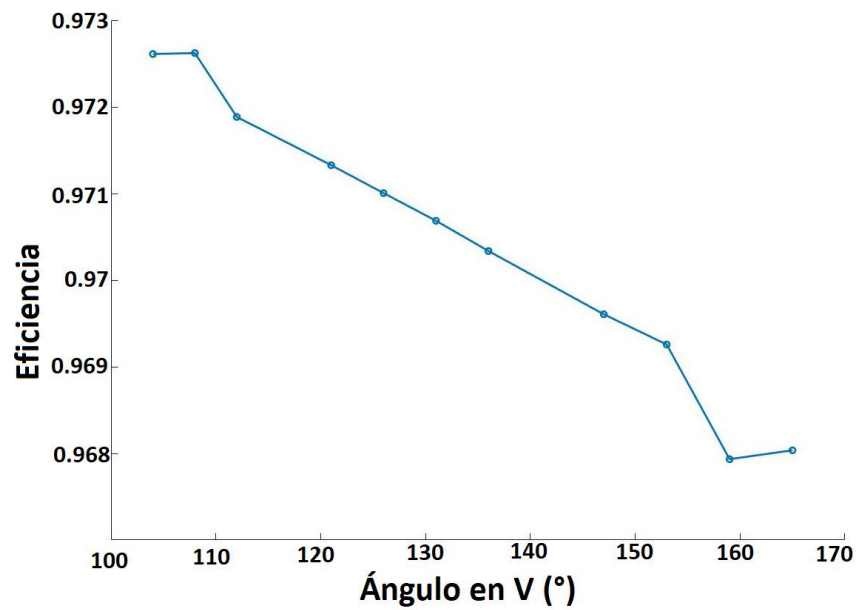


Figura 5.12: Análisis sensitivo del ángulo entre imanes del polo.

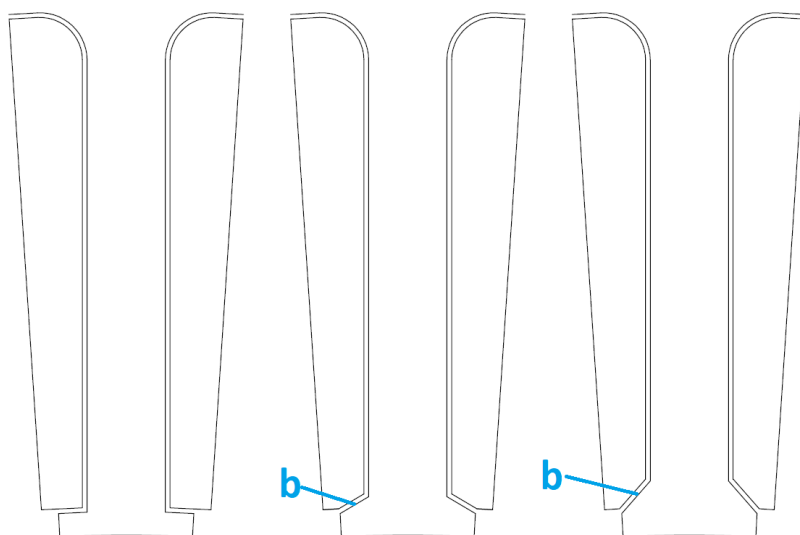


Figura 5.13: Variaciones al labio del diente en el estator.

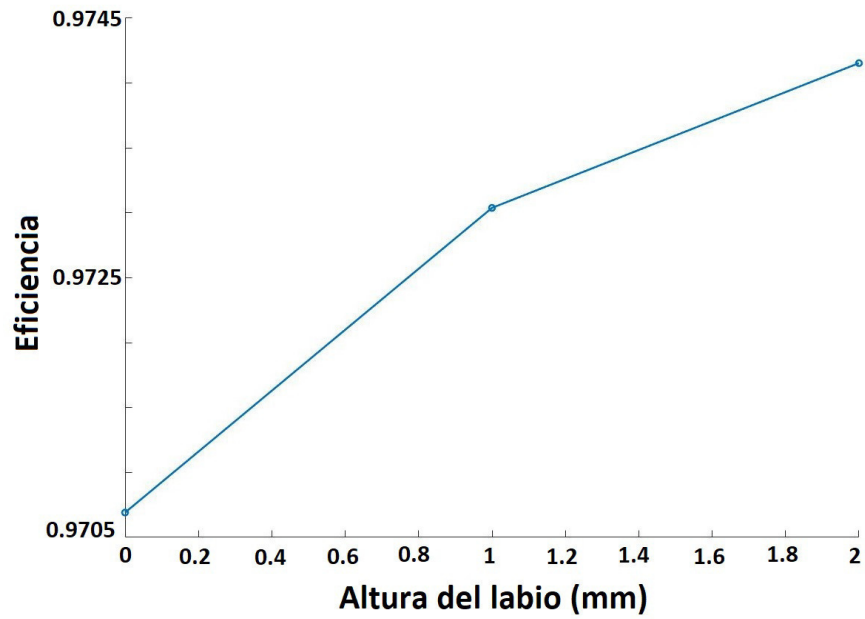


Figura 5.14: Resultados de la variación de la geometría del diente en el estator.

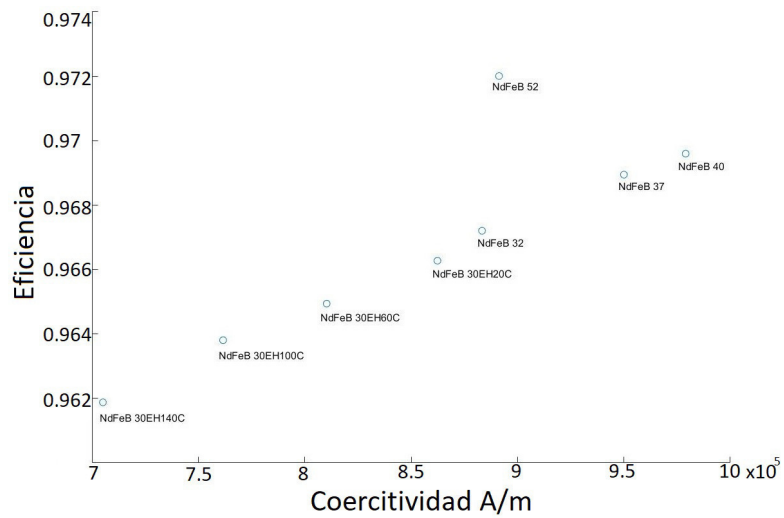


Figura 5.15: Análisis sensitivo del tipo de imanes permanentes.

5.2.4. Diseño Mecánico.

5.2.4.1. Diseño para ensamble y manufactura del estator.

La geometría del estator se obtuvo de la documentación existente del motor en el modelo Toyota Pruis (Olszewski, 2005), sin embargo, es necesario completar el diseño mecánico para la manufactura y ensamble de este componente. Los componentes que debemos de diseñar son: El diseño detallado de los núcleos del estator y del rotor, la flecha del rotor, el estructura principal y el sistema de refrigeración; por otro lado los componentes comerciales que debemos seleccionar son: los rodamientos para el estator, los diferentes aislantes de las ranuras, alambre magnético, el encoder, los sensores de temperatura, las conexiones eléctricas y los sellos.

Manufactura de las láminas. Tal como se mencionó en la sección 3.7, existen diversos procesos de manufactura que pueden ser empleados para la construcción de las láminas que conforman el estator. Para el caso específico de la construcción de dos motores el método más conveniente es corte por láser debido a que no se requiere la construcción de ningún herramental especial como en el caso de troquelado Tong (2014), aunque para producciones en serie este método puede resultar poco rentable, las tolerancias y demás requerimientos mecánicos se satisfacen con dicho proceso de manufactura.

Unión de las láminas. Las láminas tienen que ser unidas entre ellas para conformar propiamente el estator, en la sección 3.7.1 se mencionan algunos de los métodos de unión; en la figura 5.16 se observan tres de estos métodos de unión típicamente utilizados en los motores de alta potencia; la imagen superior corresponde al método de soldadura, se realizan ranuras en la periferia de las láminas y después se apilan y se prensan para después rellenar con material de aporte a lo largo del núcleo laminado. La ventaja de este método es la unión permanente y resistente desde el punto de vista mecánico. La desventaja de este método son las pérdidas en el núcleo que se generan alrededor de cada cordón de soldadura, por lo tanto es necesario un correcto diseño de la geometría y colocar los cordones en zonas lejanas a las trayectorias principales del flujo Tong (2014), un mal diseño de este método de unión puede resultar en un incremento del rizado de par.

La imagen intermedia corresponde a uso de elementos mecánicos en el que se enrolla tiras en forma de V y luego se aplanan en ranuras de cola de milano en el diámetro exterior de las laminaciones del estator. La principal desventaja de este método es el espacio necesario para acomodar los elementos mecánicos de unión, debido a que se incrementa la complejidad del diseño de la estructura del motor. (Tong, 2014). La imagen inferior muestra el uso de tornillos axiales sobre barrenos en los núcleos que al ser atornillados obligan a las laminaciones a permanecer unas contra otras. La principal desventaja en este método es que las cabezas de los tornillos y las tuercas pueden estorbar para acomodar el embobinado.

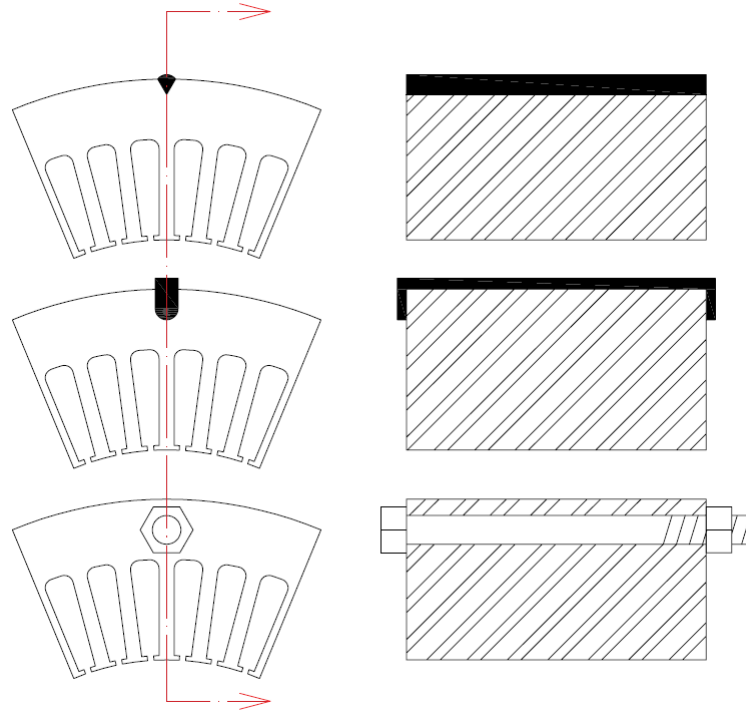


Figura 5.16: Conceptos de unión del estator.

El proceso seleccionado para aplicar en los prototipos a construir es el método de unión por soldadura. Entre las principales razones se encuentra que de los proveedores consultados para construir este núcleo nos proporcionan el ensamble completo considerando soldar las láminas y un tratamiento térmico.

Ensamble de las láminas con la estructura. Posteriormente el ensamble del núcleo del estator y el cuerpo principal de la estructura del motor debe ser efectuado. En la figura 5.17 se muestran algunas posibles configuraciones para dicho ensamble. En la imagen superior al estator se le añaden unas pestañas con el espacio suficiente para albergar tornillos orientados radialmente a lo largo del estator y posteriormente ser atornillados en la estructura del motor; la desventaja de esta opción es que se desperdicia acero al silicio debido a la geometría de las láminas.

La imagen media muestra el uso de cuñas y cuñeros para garantizar que el rotor no gira dentro de la estructura, sin embargo, la principal desventaja es que no se resuelve el posicionamiento en la dirección axial. La imagen inferior muestra nuevamente el uso de un tornillo a lo largo del estator, pero en esta configuración no se añade material extra al estator, sin embargo, el barrenado en la culata del estator y la interacción del campo con el tornillo modificaría el desempeño del motor, además podría estorbar para colocar las bobinas.

La opción seleccionada es la de la imagen superior debido a que presenta el más fácil ensamble por el amplio espacio para manipular el tornillo, además las pestañas se alejan de la geometría principal y pueden ser colocadas lejos de las trayectorias de flujo, aprovechando lo anterior los cordones de soldadura se pueden colocar en dichas pestañas sin

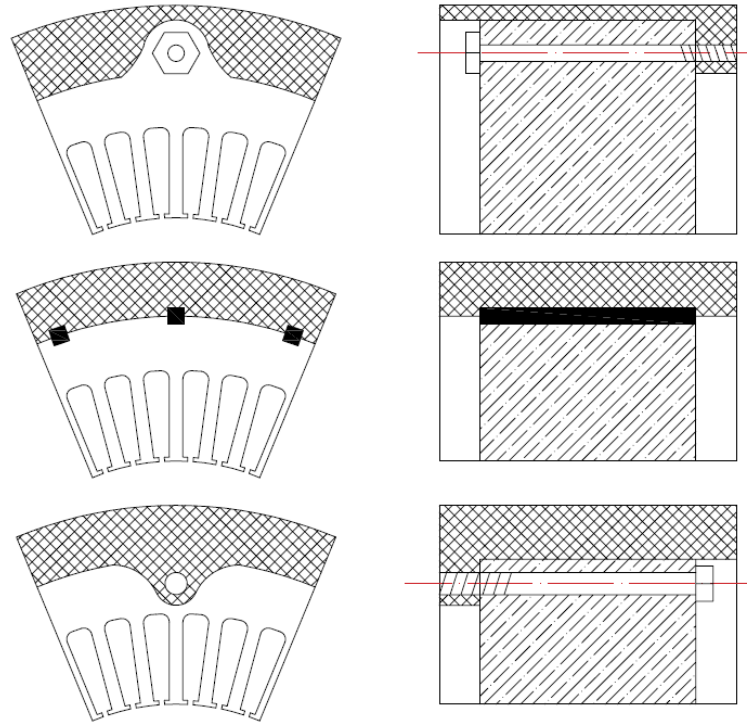


Figura 5.17: Posibles configuraciones para el ensamble estator-estructura.

afectar considerablemente el desempeño.

5.2.4.2. Diseño para ensamble y manufactura del rotor.

A su vez el rotor se compone del núcleo laminado, los imanes permanentes y la flecha. Aquí se establece las configuraciones generales de los componentes y la forma de ensamblarlos.

Diseño de la flecha. Los pasos que se siguieron para el diseño de los elementos mecánicos son: determinación de la geometría, composición y configuración de los elementos para cumplir con la función; asignación de dimensiones generales comenzando por aquellas dimensiones que ya se encuentran fijas; asignación de material conforme a los requerimientos mecánicos de la pieza y por último se verifica que la pieza soporte las cargas presentes. Lo anterior es un proceso iterativo.

Para este caso la configuración que será utilizada se muestra en la figura 5.18, consiste en un cuerpo central construido de una barra hueca y dos espigas solidas en los extremos unidas a la barra hueca por soldadura. Esta configuración ofrece un diseño más ligero y es ampliamente usada en el diseño de flechas.

El dimensionamiento de la flecha se comenzó contemplando que la dimensión fija que ya se tiene es el diámetro interno de los bujes de transmisión de potencia (véase sección 5.2.4.2 y sección 5.2.4.5) y el diámetro interno de los rodamientos;

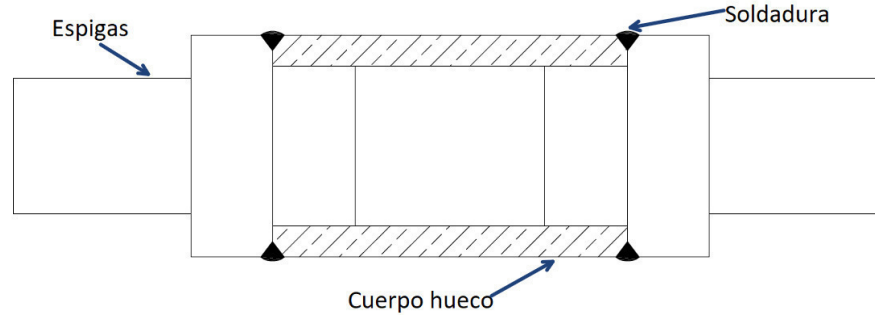


Figura 5.18: Configuración para el diseño de la flecha.

los cuales son elementos comerciales.

La selección de material se realizó contemplando un acero grado maquinaria con buenas propiedades mecánicas (sobre todo que el esfuerzo máximo cortante sea mayor a 200 MPa) y que pueda ser soldado ya que así se unirán las espigas y el cuerpo hueco. Otro factor importante es la disponibilidad del material con proveedores locales.

Finalmente se corrobora que la flecha pueda transmitir el par máximo de 400 (Nm). El esfuerzo cortante máximo, τ_{max} , en un elemento sometido a torsión, como es el caso de la flecha, está determinado por la ecuación 5.11 (Beer et al., 2006) donde, T es el par aplicado a la flecha, c es el radio de la flecha y J es el momento polar de inercia determinado por las ecuaciones 5.12 y 5.13 para el caso de un eje sólido y un eje hueco respectivamente.

$$\tau_{max} = \frac{Tc}{J} \quad (5.11)$$

$$J = \frac{1}{2}\pi c^4 \quad (5.12)$$

$$J = \frac{1}{2}\pi (c_{ext}^4 - c_{int}^4) \quad (5.13)$$

Para cada iteración realizada se comprueba que en la flecha diseñada no se exceda el esfuerzo cortante permisible del material.

Ensamble del rotor. En el rotor se tienen que ensamblar los imanes permanentes al núcleo laminado y la flecha al núcleo laminado. Para el ensamble del núcleo y los imanes la opción más conveniente es que sean ensamblados por el mismo proveedor especializado que construirá los núcleos ya que cuentan con la experiencia en el manejo de los imanes debido a que son muy delicados.

Para el ensamble de la flecha al núcleo la opción más sencilla sería unir directamente ambas piezas ya sea por medio de soldadura o ensamble a presión, sin embargo, el diámetro interno del rotor es de 111 (mm) y resultaría inconveniente tomar este valor como el diámetro de la flecha por que las reducciones de diámetro requeridas para colocar los rodamientos y el sello mecánico sería muy grandes e implicaría gran concentración de esfuerzos.

Otra desventaja de tener todo el rotor integrado fijamente se presentaría en caso de tener que reconstruir o modificar alguna pieza por algún inconveniente. Estamos seguros que la geometría de rotor no cambiará, por lo que ante cualquier contratiempo, podemos cambiar las dimensiones de la flecha y reconstruir solo esta parte. Para el caso del ensamble de estos prototipos es necesario contar con ciertos grados de libertad en el ensamble para poder corregir cualquier defecto que se presente debido a los errores de manufactura.

Por las razones anteriores, se seleccionó el uso de bujes de transmisión de potencia para unir la flecha con núcleo, es claro que para realizar este ensamble se requerirá de algún herramental espacial y será muy conveniente que lo ejecute algún técnico con experiencia en el ensamble de componentes mecánicos.

La configuración final se muestra en la figura 5.19. Aparte de los componentes ya mencionados se muestra una camisa interna en el diámetro interior del rotor que sirve como medio de conexión entre el núcleo y el buje, dicha camisa es soldada al rotor y se solicitará que sea ensamblada por el proveedor que fabricará el núcleo de modo que sea soldado previo al tratamiento térmico. Otro componente adicional es una placa que se coloca a cada extremo del núcleo, en dichas placas se realizarán barrenos para quitar material durante el balanceo del rotor.

5.2.4.3. Diseño del sistema de enfriamiento.

Dependiendo de la aplicación el sistema de enfriamiento puede ser implementado por medio de convección o radiación. La mayoría de los vehículos eléctricos actuales utilizan medios de transferencia de calor por convección. Dicho proceso puede clasificarse en convección natural o convección forzada. La ecuación característica de la transferencia de calor por convección se expresa en la ecuación 5.14

$$R_T = \frac{1}{hA} \quad (5.14)$$

De la ecuación anterior podemos apreciar que para disminuir la resistencia térmica se debe buscar tener un alto coeficiente de transferencia de calor o maximizar el área de contacto. De los diferentes tipos de convección aplicada a los sistemas de enfriamiento se sabe que al utilizar convección natural con aire se alcanza un coeficiente h entre los 5-10 ($\frac{W}{m^2K}$), para la convección forzada con aire h se encuentra entre los 10-300 ($\frac{W}{m^2K}$) y para la convección forzada con líquidos el rango es de 50-20000 ($\frac{W}{m^2K}$) (?). Por lo anterior se decidió utilizar un sistema de convección forzada por líquidos.

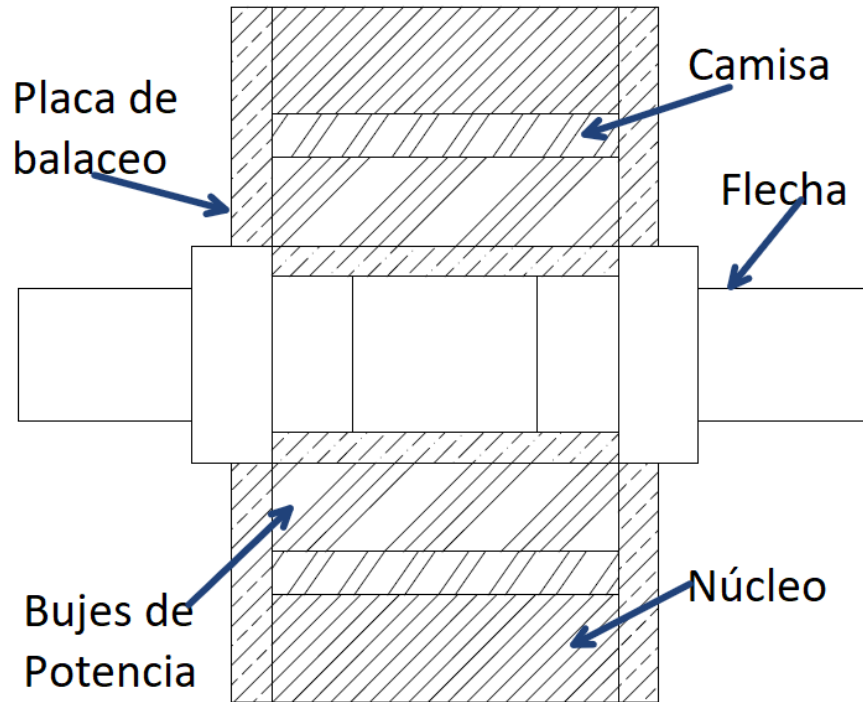


Figura 5.19: Configuración del ensamble del rotor.

Las posibles configuraciones para el diseño del sistema de refrigeración incluyen: camisas circunferenciales y axiales, tubos de cobre fundidos sobre la estructura, rocío esparcido sobre el rotor y estator, etc. (Tong, 2014). La configuración seleccionada son ductos maquinados sobre la estructura del rotor. La principal razón es la simplificación en el ensamble general, aunque la complejidad para manufacturar la estructura aumentará.

Del mapa de pérdidas obtenido en el análisis electromagnético se estima que las pérdidas máximas sean de 9.5 (kW). Por otro lado la temperatura máxima permitida para evitar daños a imanes permanentes y al aislantes del alambre de las bobinas es en promedio de 100 (°C) mientras que la temperatura a salida de un radiador convencional es en promedio de 60 (°C) (Bonnick and Newbold, 2005). Suponiendo que todas las pérdidas en forma de calor son transmitidas al fluido refrigerante y que el líquido usado es Glicol, el cual tiene una capacidad térmica específica $C_p = 3.04 \left(\frac{kJ}{Kg \cdot K} \right)$ y una densidad $\rho = 1108 \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$ (Tong, 2014); el gasto volumétrico de refrigerante requerido se puede aproximar utilizando las ecuaciones 5.15 y 5.16.

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (5.15)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (5.16)$$

Cuadro 5.4: Características del sistema de enfriamiento en VE comerciales

Vehículo	Tipo de enfriamiento	Gasto volumétrico ($\frac{L}{min}$)	Temp. de entrada del refrigerante ($^{\circ}C$)
Nissan Leaf 2012	Convección forzada	6	65
Toyota Prius 2004	Convección forzada	7	55
BMW i3	Convección forzada	10	55

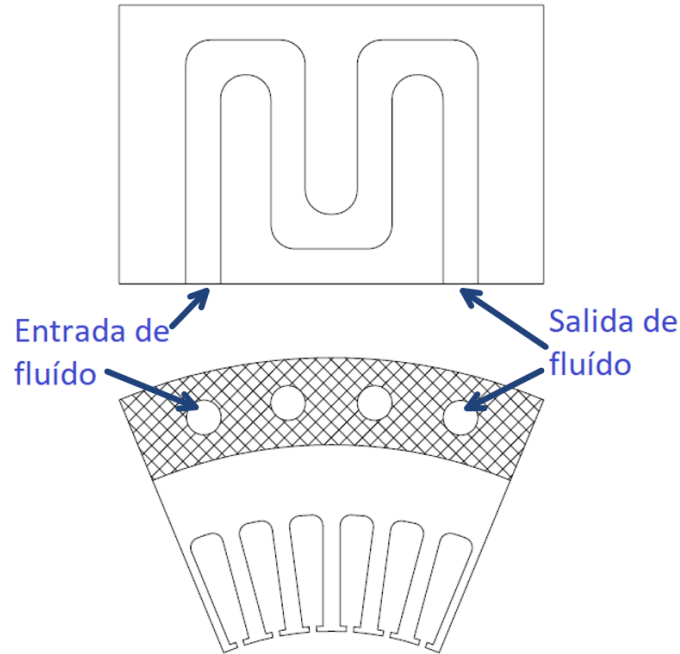


Figura 5.20: Configuración del sistema de enfriamiento.

Utilizando los datos anteriores y realizando las conversiones adecuadas el gasto volumétrico se estima en $4.23 \left(\frac{L}{min}\right)$. En la tabla 5.4 se muestran algunos datos de los sistemas de enfriamiento de los vehículos analizados, los cuales se encuentran próximos a los datos utilizados en el cálculo. En la figura 5.20 se muestra la configuración seleccionada, las dos dimensiones importantes por definir son el diámetro de los ductos y el largo total de los mismos. Dichas dimensiones fueron determinadas durante el proceso de ingeniería de detalle por las restricciones geométricas de la estructura, de este modo para futuros trabajos se deben calcular las velocidad y presiones del fluido y por lo tanto seleccionar el resto de los equipos como la bomba y el depósito para el refrigerante que no forman parte de este trabajo.

5.2.4.4. Diseño de la estructura.

La estructura se compone a su vez del cuerpo principal y de las tapas para cada extremo. La función principal del cuerpo principal es albergar al estator en la posición necesaria y con los ajustes adecuados, por otro lado, el cuerpo principal también posee integrado los ductos del sistema de enfriamiento y los espacios para las conexiones de sensores y de potencia eléctrica, por último el cuerpo principal contará con el mecanismo de fijación a tierra. En cuanto a las

tapas extremas cumplen con la principal función de soportar a los rodamientos en la posición adecuada para mantener al rotor centrado con respecto al estator.

El material seleccionado para la estructura es la aleación de aluminio 7075, la cual posee excelentes propiedades mecánicas y buenas características de maquinado, se ha planteado manufacturar estas piezas por medio de fundición, aunque este proceso debe ser verificado por un proveedor con la experiencia necesaria, debido a los tratamientos térmicos necesarios para otorgarle a la pieza fundida las propiedades esperadas del material.

5.2.4.5. Selección de los elementos comerciales

Selección de los rodamientos. Para el cálculo de los rodamientos se necesitan establecer los requerimientos de la aplicación, las cargas que deben soportar los rodamientos, la configuración a ser utilizada y el ciclo de vida esperado. Para un vehículo se deben seleccionar rodamientos que requieran el mínimo mantenimiento posible. De acuerdo con SKF (2018) el ciclo de vida esperado para vehículos comerciales es de 1.5 millones de kilómetros, utilizando el factor de conversión:

$$1(\text{millón de kilómetros}) = \frac{10^3}{\pi D}(\text{millones de revoluciones})$$

donde D es el diámetro de la llanta del vehículo, se puede estimar la vida del rodamiento utilizando la ecuación 5.17 o alguna de las variantes en SKF (2018).

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (5.17)$$

Durante las iteraciones en el diseño detallado se fueron verificando diversos rodamientos para asegurar que cumplieran con el criterio de vida útil, para lo cual se implementó la herramienta de cálculo de rodamientos de SKF. Además, se seleccionaron rodamientos de la línea eDrive de SKF debido a que han sido diseñados para aplicaciones de tracción ofreciendo una menor fricción, menos disipación de calor, mayor robustez mecánica a velocidades elevadas, etc.

Selección de los bujes de transmisión de potencia. El principal criterio de selección para los bujes de transmisión de potencia fueron el par que son capaces de transmitir y el diámetro externo, el cual debe ser menor al diámetro interno del rotor, una vez seleccionados se restringían las dimensiones para el diseño de la flecha.

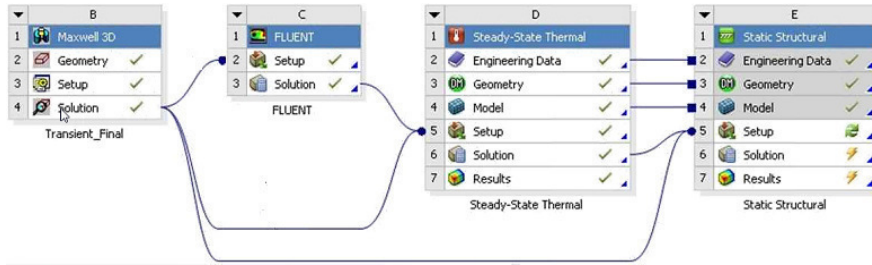


Figura 5.21: Simulaciones realizadas en el diseño del motor.

5.2.5. Simulaciones simultáneas.

El siguiente paso en la metodología es la ejecución de simulaciones de diversos fenómenos físicos involucrados en el funcionamiento del motor. La idea detrás de este paso es verificar que para las geometrías seleccionada, los esfuerzos se encuentren dentro de los rango adecuados para evitar la falla de los componentes, también se busca tener alguna predicción térmica elemental del motor.

La forma en que se ejecutaron estas simulaciones fue por medio del programa de computo Ansys Workbench. Dicha plataforma permite realizar simulaciones de distintos fenómenos físicos relacionando ciertos parámetros para relacionar los resultados. En la figura 5.21 se muestran las simulaciones que fueron realizadas en forma simultánea.

El primer bloque corresponde al análisis electromagnético tridimensional del motor. Se realizó este análisis en tres dimensiones para tener mejores resultados de los efectos magnéticos en los extremos de las bobinas. Por medio de Ansys Workbench se transmiten los resultados de las pérdidas en los núcleos y bobinas al resto de las simulaciones.

El segundo bloque es un análisis térmico por medio de CFD, donde las pérdidas del bloque anterior son transformadas en una fuente de energía volumétrica y se realiza un estudio de la distribución de la temperatura en los núcleos. El tercer bloque corresponde a un análisis térmico utilizando un enfoque mecánico, es decir los componentes son considerados como sólidos. Una de las principales diferencias entre ambos enfoques es que el primero se podría utilizar para predecir el desempeño del sistema de enfriamiento. El tercer bloque se utilizó para analizar las deformaciones en los dientes del estator debido a las fuerzas electromagnéticas en el entrehierro.

En la figura 5.22 se muestra la configuración realizada para el análisis mecánico. La condición de frontera de no desplazamiento se establece al fijar el estator en el diámetro interno de las pestañas de fijación, se utilizó solo un octavo del modelo para provechar la simetría y reducir el tiempo de cálculo.

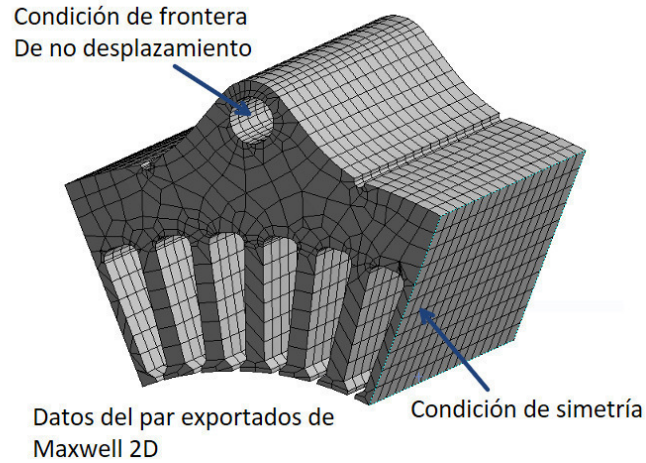


Figura 5.22: Configuración para análisis de deformación.

5.3. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se mostró toda la metodología implementada en el diseño de un prototipo de MET. Primero se describió de manera general los pasos requeridos para el diseño de MET, posteriormente se asignaron actividades específicas para seguir dichos pasos, pero aplicados al diseño de un prototipo del que se planean construir solo dos unidades. Muchas de las limitantes en las diferentes etapas de la metodología son los amplios conocimientos que se deben tener en cada uno de los campos de la ingeniería. Principalmente en el diseño del sistema de enfriamiento y en el diseño de los núcleos laminados.

Sin embargo, se ha contemplado lo mínimo necesario para que el prototipo sea funcional y permita obtener datos experimentales una vez que sea haya construido. De igual forma se han identificado las áreas en las que se requiere colaborar con gente interesada en especializarse.

Capítulo 6

Resultados y Conclusiones

En los resultados obtenidos se muestra el diseño final del prototipo y el análisis del desempeño de este. Se describe el arreglo general y los principales componentes y se muestran los resultados de las simulaciones que muestran el desempeño. Se puede consultar la documentación detallada, tales como planos y diagramas de ensamble en el apéndice. Se presenta una lista de guías de diseño recopilada y verificada por medio de las simulaciones realizadas. Posteriormente se discuten los trabajos a realizar en un futuro y las áreas de mejora en la metodología realizada. Se finaliza el capítulo con las conclusiones sobre este trabajo de investigación.

6.1. Arreglo general del diseño final.

Las principales características del diseño final se muestran la tabla 6.1. En la figura 6.1, se puede observar la propuesta final de diseño. Los componentes que se pueden apreciar en esta vista son a estructura del motor y la flecha del rotor. La estructura está compuesta por cuerpo principal y dos tapas extremas que albergan a los rodamientos. Las funciones de dichas cavidades son: sistema de enfriamiento, conexiones de potencia y conexiones de sensores.

El sistema de enfriamiento es un canal por el que circula refrigerante, en la imagen se aprecian las conexiones de entrada y salida. Las conexiones de potencia y de sensores son separadas para evitar ruido, en la imagen solo se aprecia las conexiones de potencia.

En la figura se muestra una vista de sección del arreglo general. Aquí se puede observar con más detalle el canal de circulación del sistema de enfriamiento. También se observa el estator con el devanado y los aislantes y el ensamble del rotor soportado por los rodamientos en cada extremo del motor.

Cuadro 6.1: Principales dimensiones del diseño final.

Desempeño	Velocidad máxima (rpm)	6000
	Potencia máxima(kW)	50
	Par nominal (Nm)	360
Estator	Diámetro exterior (mm)	269
	Diámetro interior (mm)	161.9
	Longitud del núcleo (mm)	84
	Número de ranuras	48
	Espesor de la lámina (mm)	0.3
	Masa del núcleo del estator (kg)	16.44
Rotor	Diámetro exterior (mm)	160.5
	Diámetro interior (mm)	111
	Longitud del núcleo (mm)	83.4
	Número de polos	8
	Masa del núcleo del rotor (kg)	5.28
	Espesor de la lámina (mm)	0.3
Devanado	Vueltas por bobina	9
	Circuitos en paralelo por fase	1
	Vueltas en serie por fase	0
	Alambres en paralelo por fase	9
	Largo del extremo (mm)	35
	Masa del devanado (kg)	5.616
Imanes permanentes	Imanes por polo	2
	Ancho (mm)	18.9
	Espesor (mm)	6.5
	Largo (mm)	27 (tres bloques por polo)
	Masa total de los imanes (kg)	1.895

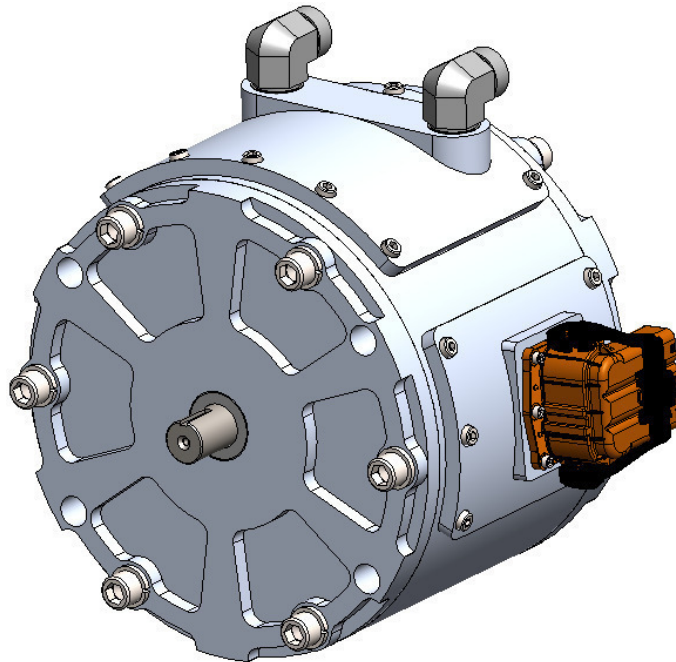


Figura 6.1: Arreglo general del diseño final.

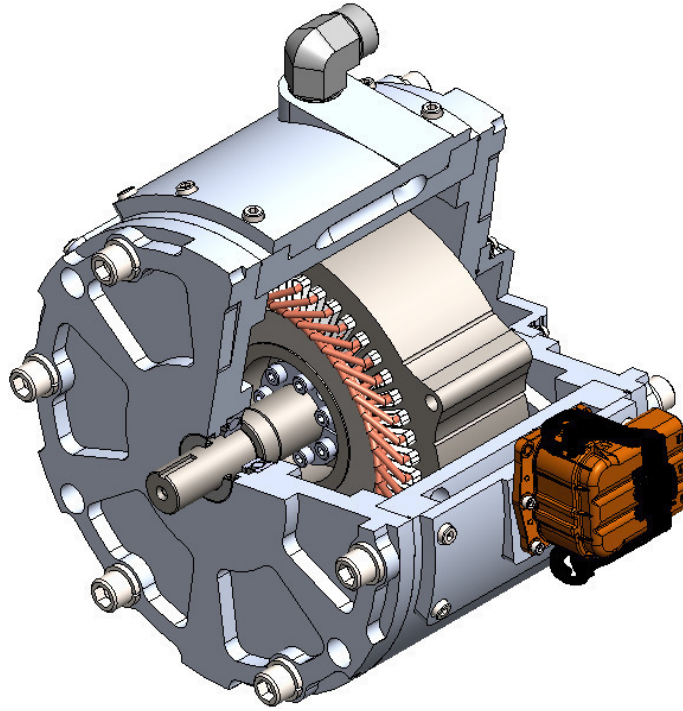


Figura 6.2: Arreglo general con vista de sección.

Característica	Valor	Unidades
Potencia máxima	50	kW
Par máximo	400	Nm
Velocidad base	1500	rpm
Velocidad máxima	6000	rpm
Eficiencia de ciclo	98	%
Voltaje nominal	400	V
Corriente máxima	300	A

Cuadro 6.2: Características principales del diseño final.

6.1.1. Desempeño esperado del motor.

Como resultado de todas las simulaciones efectuadas podemos predecir el desempeño del motor diseñado. En la tabla 6.2 se muestra un resumen de los parámetros esperados en los prototipos a construir.

Corriente y voltaje de alimentación. En la figura 6.3 se muestran los mapas de corriente y voltaje que se esperan para el motor a construir. Se observa que se espera un voltaje máximo de 375 (V) y una corriente máxima de 275 (A), ambos valores son las amplitudes de la fuente trifásica. Estos valores no son finales y pueden ser modificados si en el controlador se implementa una técnica diferente aquella utilizada para obtener dichos mapas, que para este caso fue el máximo par por ampere (MTPA, por sus siglas en inglés).

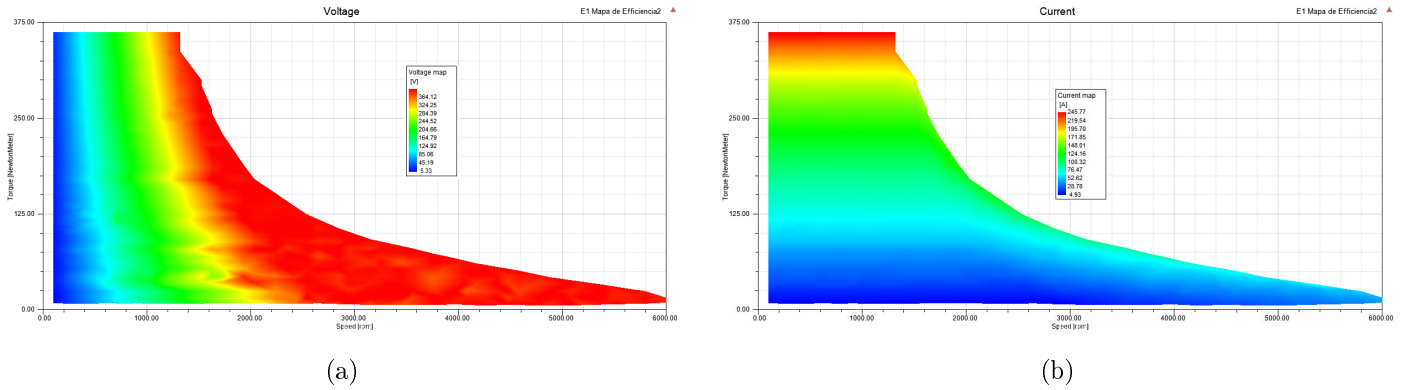


Figura 6.3: Valores de la amplitud para el voltaje (a) y corriente (b) trifásicos.

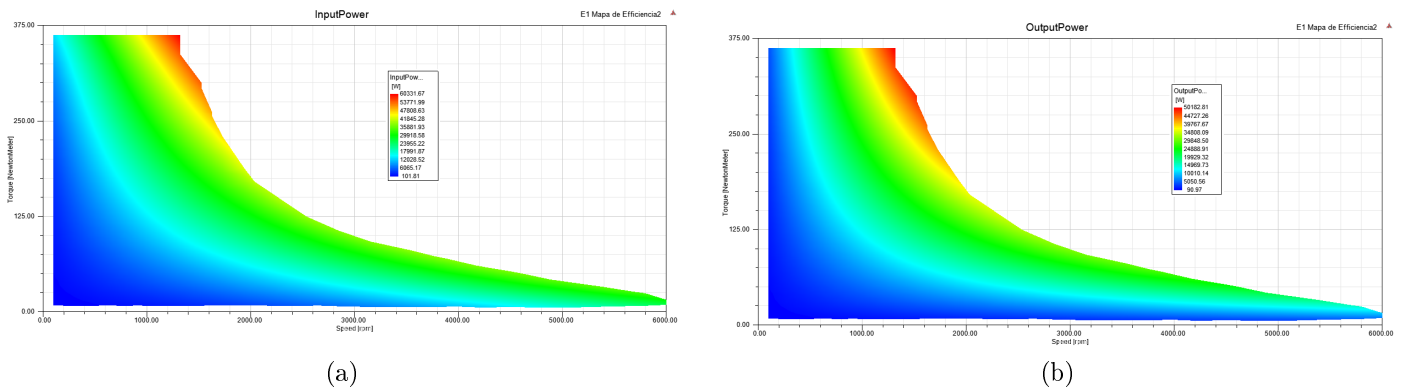


Figura 6.4: Valores de la potencia de entrada (a) y potencia de salida (b).

Potencia de entrada y potencia de salida. Para que el motor entregue una potencia pico de 50 (kW) la potencia de alimentación del motor debe ser mayor. En la figura 6.4 se muestran los mapas de potencia de entrada y de salida, se observa que la máxima potencia de entrada es de 60 (kW). En la figura 6.5 se muestra el mapa de las pérdidas totales, las pérdidas máximas ocurren a velocidades bajas y altos pares y alcanzan un valor máximo de 9 (kW).

Deformación en los dientes del estator. En la figura 6.6 se muestra el resultado del análisis de deformación en los dientes del estator. La densidad de fuerza en el entrehierro es transportada a Ansys Mechanical aplicando el concepto de tensor de esfuerzos de Maxwell. De acuerdo con los resultados la máxima deformación es de 0.004 (mm).

6.2. Guías de diseño.

Dada una potencia nominal, un motor de alta velocidad entrega un par menor, por lo que requiere menor acero y cobre por que opera con un menor flujo magnético; por lo tanto, los motores de alta velocidad poseen un menor peso y tamaño comparado con un motor del mismo par nominal de baja velocidad.

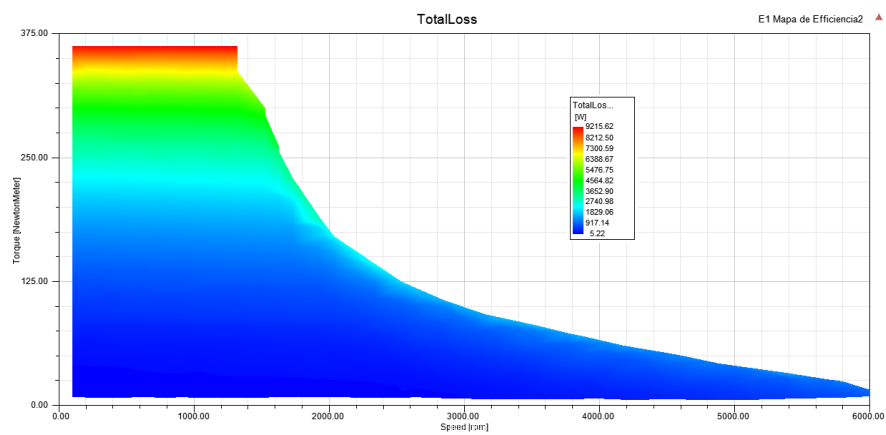


Figura 6.5: Mapa de pérdidas totales.

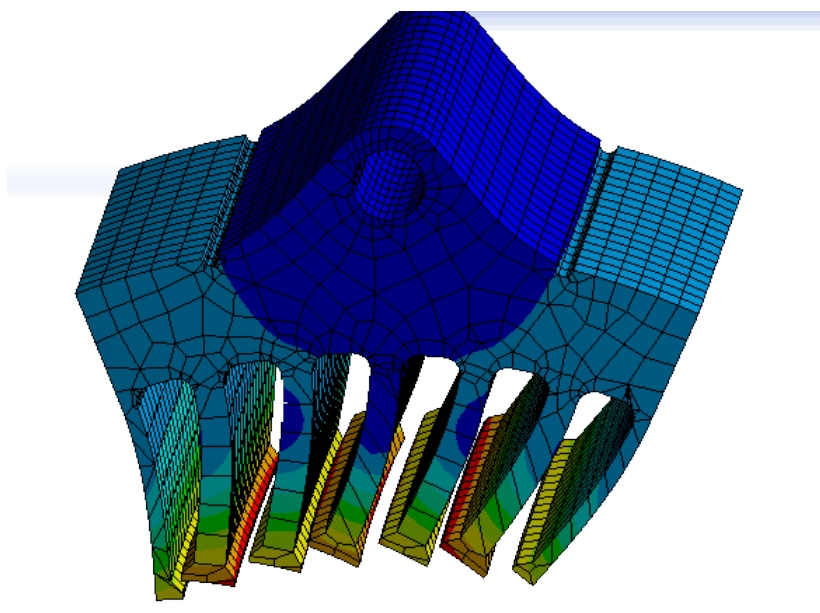


Figura 6.6: Deformación en los dientes del estator.

Una inercia baja en los elementos del tren motriz beneficia la sensación de manejo (Riba et al., 2016).

Un par suave (con un rizado bajo) reduce vibraciones y daños en los componentes mecánicos (Riba et al., 2016).

Una diferencia mayor entre las inductancias de los ejes d-q, contribuye a un mayor par de reluctancia, por lo que el par total aumenta, esto puede ser aprovechado en la zona de debilitamiento de flujo, la cual es muy necesaria en los MET (Yang et al., 2017).

Los motores con una zona amplia de potencia constante se desempeñan mejor a altas velocidades; mientras que los motores con una zona amplia de par constante se desempeñan mejor a bajas velocidades (Riba et al., 2016).

Una relación de velocidad máxima-velocidad base de 5-6 minimiza la potencia nominal y maximiza la capacidad regenerativa y el desempeño de aceleración (Riba et al., 2016)

Es aconsejable seleccionar unas laminaciones con alta resistencia. El valor de referencia de la resistencia de materiales ferromagnéticos es de unos cientos microohms por centímetro (Pyrhönen et al., 2008).

Minimizar la inercia del rotor maximiza la aceleración (Tong, 2014).

Consideraciones para el rizado del par. Una optimización de la geometría para reducir el rizado del par se relaciona con los siguientes parámetros.

- Dimensiones de los imanes: La relación largo ancho cambia la distribución de flujo, el par máximo y el rizado del par (Yang et al., 2017).
- Posición de los imanes: Entre más cerca están los imanes del diámetro externo del rotor mayor es el par y el rizado del par.
- Ángulo entre los imanes:
- Ancho del puente central de flujo: Cuando el flujo no puede pasar a los polos del estator se crea un flujo de dispersión circular alrededor de los imanes; ocasionando una reducción en el par total.
- Barreras de flujo alrededor de los imanes. ayudan a ajustar los armónicos del flujo en el entrehierro. Ayudan a generar un par promedio alto con un flujo concatenado limitado y bajo rizado de par.

Consideraciones para los motores de Inducción. Las siguientes guías de diseño pueden servir para dimensionar los motores de inducción (Tang, 2010):

- El diámetro externo del estator (D_{EE}), es mayor que la longitud del núcleo laminado del estator (L_{NE}), la razón es como mínimo 2:1.

- El ancho del diente del estator (A_{DE}), es menor o igual que la mitad del ancho del fondo de la ranura, (A_{RE}).
- La suma del espesor de la culata del estator, (E_{CE}) y la longitud del diente del estator, (L_{DE}), es igual a la suma del espesor de la culata del rotor, (E_{CR}) y la longitud del diente del estator, (L_{DR})
- Mayor número de ranuras en el rotor que en el estator.
- El ancho del diente del estator es aproximadamente igual al ancho del diente en el rotor.

Consideraciones para los devanados. Si dos tercios de la superficie es ranurada la tercera armónica y todos sus múltiplos (5ta, 7ma, etc.) desaparecen.

Topología del ranurado: $Q/p > 1$ $Q/mpb = Z$ (entero) Pares de polos/ramas paralelas $= 2k$, k es un entero Ranuras/fases/mcm (ranuras y pares de polos) = entero. Conexión estrella. Simple capa Paso corto.

Consideraciones para el diseño del rotor. Para las aplicaciones de tracción el motor de imanes permanentes presenta algunas ventajas: los imanes pueden ser rectangulares y por lo tanto de más fácil suministro y manufactura, mejor protección contra desmagnetización debido a fallas y altas temperaturas, permiten un debilitamiento de campo más eficiente en la zona de potencia constante.

Consideraciones para definir el número de polos. Con un mayor número de polos se obtiene una mayor densidad de volumen debido al flujo magnético concatenado. La culata del estator es más corta Se reducen las pérdidas por cobre y consumo de material. Mayores pérdidas por imanes permanentes. Un mayor número de polos requiere un devanado de paso corto, más fácil de implementar en un devanado concéntrico. El par de reluctancia es proporcional a la inductancia del devanado, la cual es proporcional al cuadrado del número de polos, por lo tanto, a mayor número de polos el par de reluctancia se reduce. A frecuencias altas se generan pérdidas en el núcleo.

Aumento de la eficiencia.

- Reducir pérdidas en el cobre, incrementando el área del conductor. A través de devanados, reduciendo el largo de las bobinas, especialmente en los extremos.
- Empleando mejores materiales para reducir los efectos de las corrientes de Eddy
- Usando laminaciones más delgadas.
- Reducir pérdidas por fricción aerodinámica.

- Mejorar el sistema de enfriamiento
- Mejorando las tolerancias.

6.3. Trabajo a futuro.

6.3.1. Diseño del banco de pruebas.

En la continuación del desarrollo de este proyecto el siguiente paso es la construcción de los dos prototipos. En el presente trabajo se desarrolló toda la ingeniería de detalle para dicha construcción, sin embargo, se requiere el diseño del banco de pruebas sobre el que será montado el prototipo a construir.

6.3.2. Áreas de mejora en la metodología.

Como resultado del proceso de diseño seguido en el presente trabajo se identificaron diversas áreas de oportunidad que deben ser integradas a la línea de investigación en el área de motores eléctricos automotrices de la UAT.

Diseño de nuevas geometrías de núcleos laminados. En el presente trabajo nos limitamos a evaluar y seleccionar una geometría existente, sin embargo, para lograr el desarrollo de un futuro producto es necesario la propuesta de nuevas geometrías. Como parte de esta actividad será necesario desarrollar habilidades para la optimización de dichas geometrías.

Diseño de controladores y electrónica de potencia. En la industria, los MET son diseñados en un proceso paralelo con el diseño del controlador y la electrónica de potencia. El desempeño de uno afecta directamente a los otros componentes. En el presente trabajo nos limitamos al diseño del motor eléctrico, sin embargo, esto crea cierto error en las predicciones obtenidas con AEF, porque el mapa de eficiencia y la curva de par velocidad están determinadas tanto por el motor como el controlador.

Integración de un equipo de trabajo multidisciplinario. El diseño de un MET requiere del análisis de diversos fenómenos físicos, en el presente trabajo estableció como parte de la metodología los cálculos simultáneos de dichos procesos, también se realizaron simulaciones electromagnéticas, mecánicas y térmicas de donde se obtuvieron algunos resultados. Sin embargo, para el diseño de un producto es necesario mejorar cada una de dichas áreas, lo anterior se logrará por medio de la integración de un equipo de diseño multidisciplinario de especialistas.

6.4. Conclusiones

Las tres principales aportaciones del presente trabajo son: la ingeniería de detalle de un prototipo de motor de tracción, el estudio del estado del arte de los motores de tracción comerciales y la metodología de diseño propuesta para el desarrollo de motores eléctricos de tracción.

Se logró desarrollar ingeniería detallada para la construcción de un motor eléctrico para la tracción de un vehículo. Dicha ingeniería de detalle incluye: planos de fabricación, lista de materiales y componentes, plan de trabajo y plan de integración mecánica. Con esta documentación demostramos que es viable la construcción de dos prototipos. La construcción de estos prototipos es necesaria para avanzar en la línea de investigación de diseño de trenes motrices que se ha planteado en la Unidad de Alta Tecnología. Con ellos se podrán realizar diversos experimentos y actividades académicas.

El estudio de mercado de los vehículos eléctricos nos mostró datos importantes; los vehículos eléctricos no son tan nuevos como podríamos pensar, de hecho, casi todas las automotrices cuentan con modelos eléctricos que han sido desarrollados principalmente durante tres periodos en los que se tomó interés por los vehículos eléctricos, ahora nos encontramos en el tercero de ellos que además es el definitivo: los vehículos eléctricos son el futuro de la transportación. Pesé a la controversia que existe en torno a la electrificación considero que los vehículos eléctricos son una herramienta que forman parte de una solución que integra diversas tecnologías sustentables.

En el estudio del estado del arte de los motores eléctricos de tracción se realizó un análisis profundo de seis de los motores que han sido utilizados comercialmente. De dicho estudio podemos concluir que los tipos de motores que hoy en día son viables para aplicaciones de tracción se limitan a: motores síncronos de imanes permanentes y motores asíncronos de jaula de cobre; aunque se está realizando mucha investigación para el desarrollo de otros tipos de motores eléctricos de tracción., lo cual representa un área de oportunidad bastante interesante.

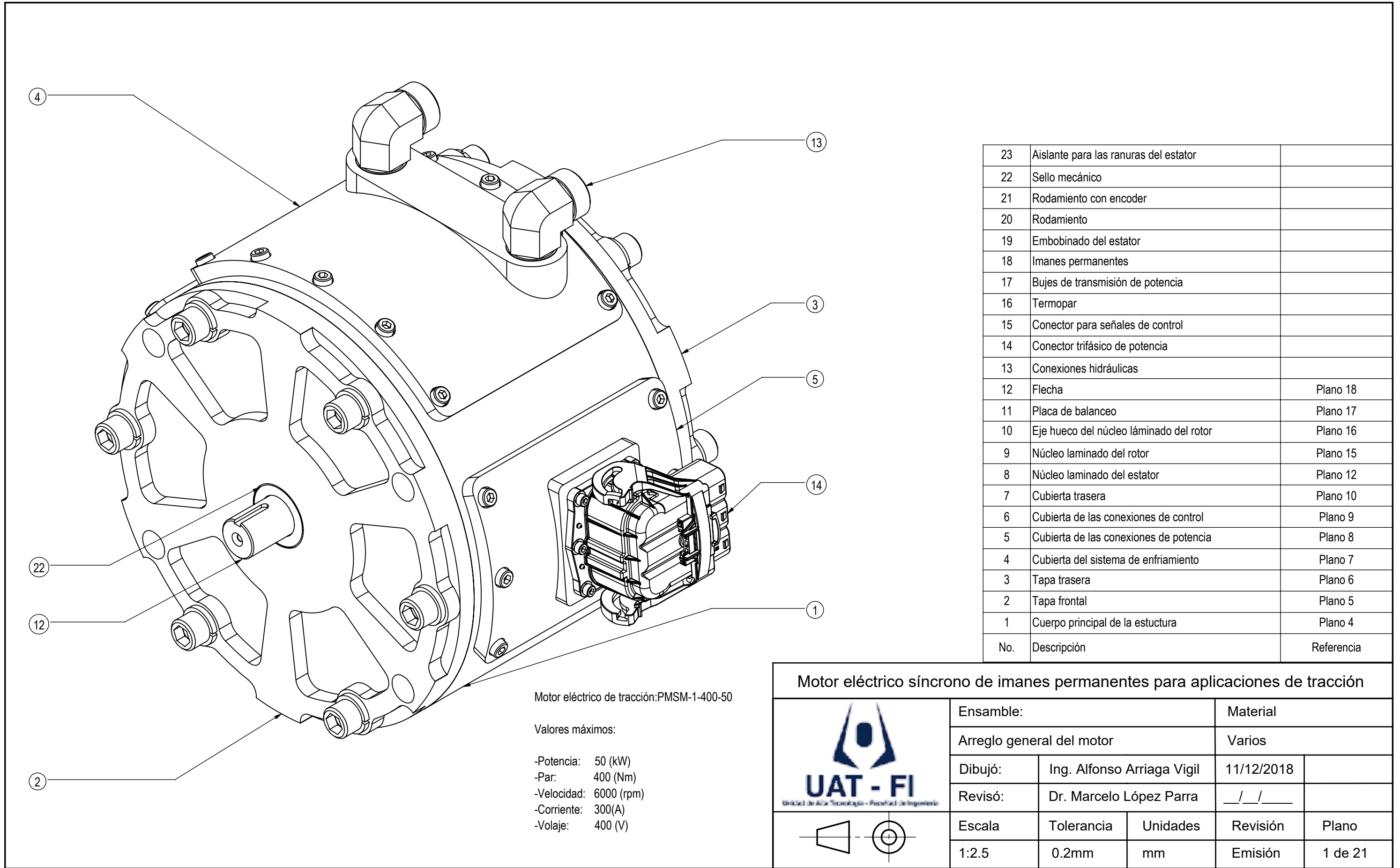
El análisis de dichos motores también nos permite concluir que el diseño de las geometrías de los núcleos laminados requiere de mucha experiencia y de sofisticados algoritmos de optimización. La disposición de las ranuras en el estator y de los imanes permanentes o barras conductoras en el rotor afectan fuertemente el desempeño del motor y dado el número infinito de combinaciones, se hace necesario el uso de métodos de optimización automatizados que permitan obtener la mejor configuración de acuerdo con la aplicación en cuestión. Otra conclusión importante es en relación con la metodología del análisis. Aunque en el presente trabajo se estableció que se requiere efectuar cálculos simultáneos de los diversos procesos físicos presentes en el motor, también se evidencia la necesidad de integrar un equipo de trabajo conformado de especialistas en las diversas áreas involucradas, lo cual nos permitirá obtener predicciones más precisas de futuros diseños.

Finalmente, se estableció una metodología de diseño sólida. En el presente trabajo se limitaron algunas de las fases

propuestas, por ejemplo, nos limitamos a utilizar uno de los motores analizados en lugar de proponer una nueva geometría y nos limitamos a realizar un análisis sensitivo en lugar de implementar un proceso de optimización. Sin embargo, la metodología propuesta considera los puntos más importantes que deben ser implementados en el diseño de un motor de tracción que pueda culminar en un producto.

Apéndice.

Planos para fabricación y ensamble.



23	Aislante para las ranuras del estator	
22	Sello mecánico	
21	Rodamiento con encoder	
20	Rodamiento	
19	Embobinado del estator	
18	Imanes permanentes	
17	Bujes de transmisión de potencia	
16	Termopar	
15	Conector para señales de control	
14	Conector trifásico de potencia	
13	Conexiones hidráulicas	
12	Flecha	Plano 18
11	Placa de balanceo	Plano 17
10	Eje hueco del núcleo laminado del rotor	Plano 16
9	Núcleo laminado del rotor	Plano 15
8	Núcleo laminado del estator	Plano 12
7	Cubierta trasera	Plano 10
6	Cubierta de las conexiones de control	Plano 9
5	Cubierta de las conexiones de potencia	Plano 8
4	Cubierta del sistema de enfriamiento	Plano 7
3	Tapa trasera	Plano 6
2	Tapa frontal	Plano 5
1	Cuerpo principal de la estructura	Plano 4
No.	Descripción	Referencia

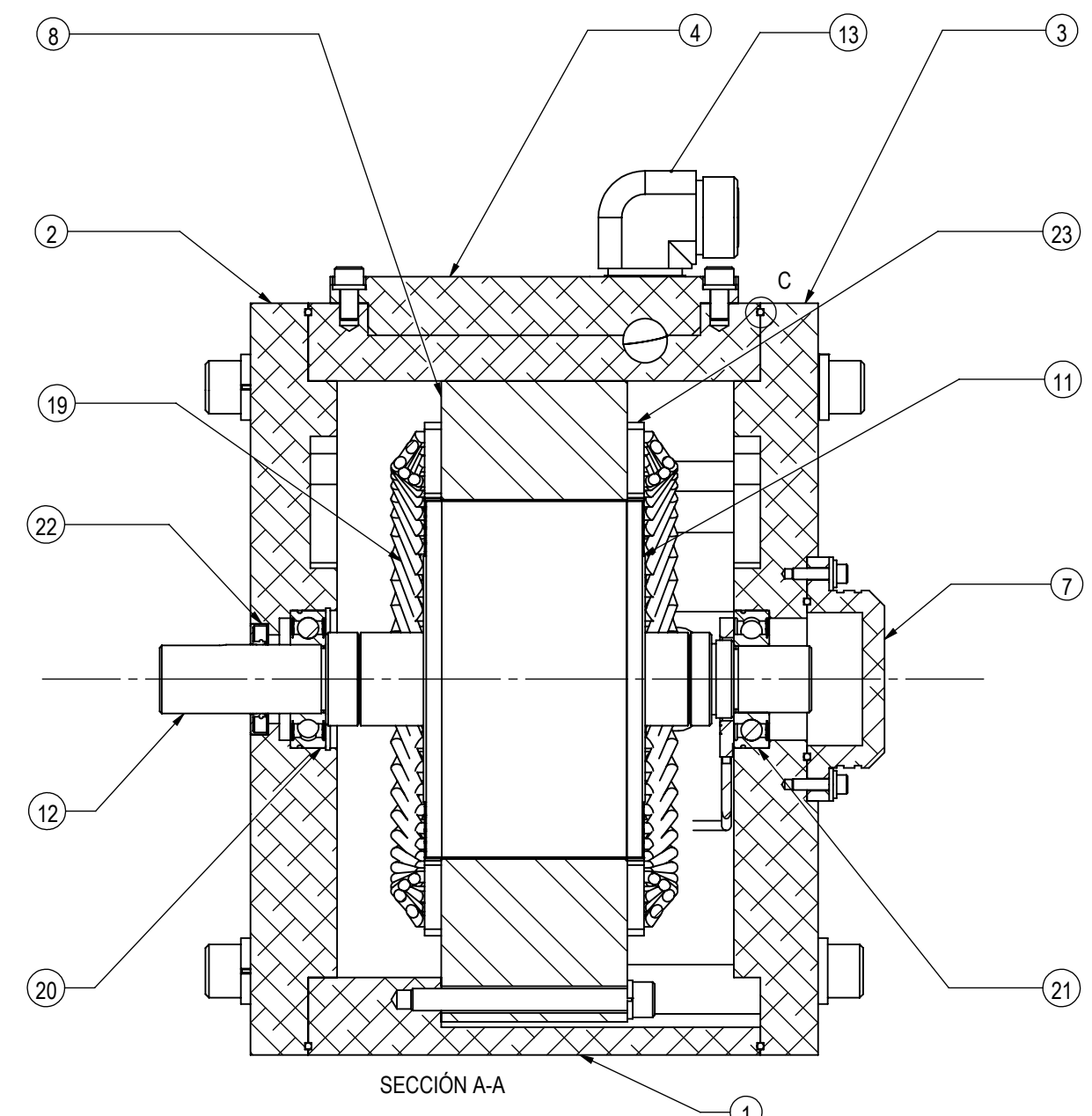
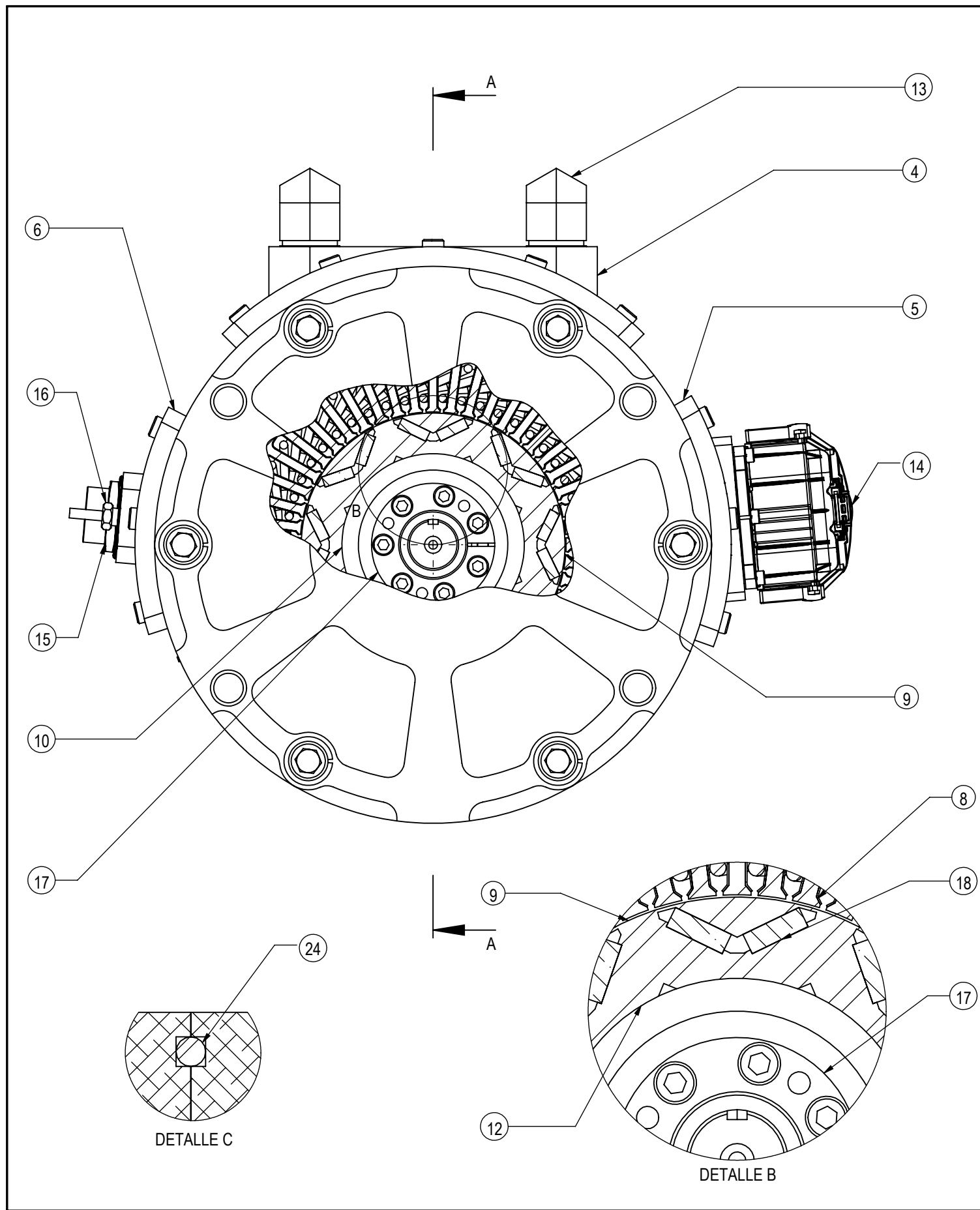
Motor eléctrico de tracción: PMSM-1-400-50


Valores máximos:

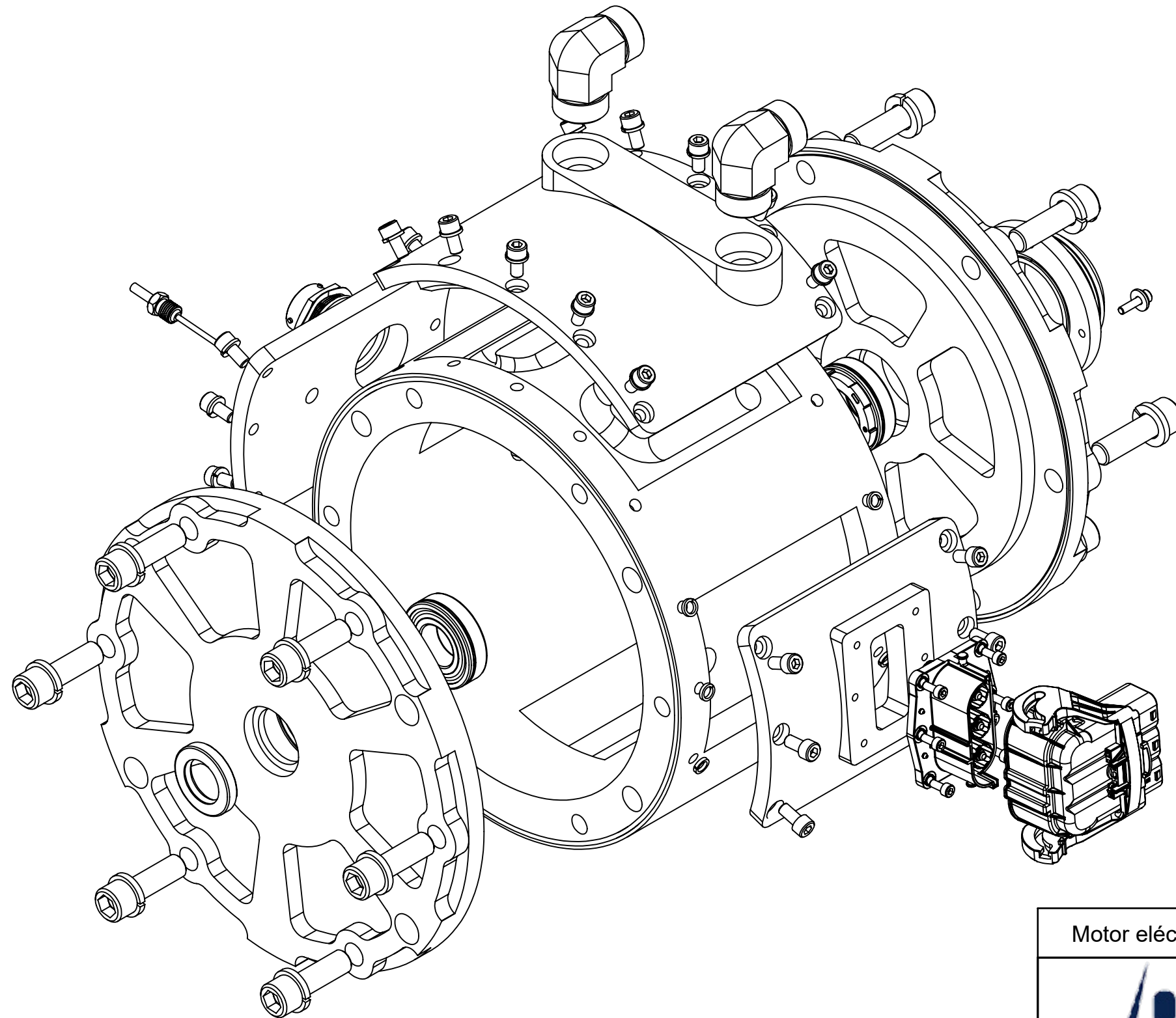
- Potencia: 50 (kW)
- Par: 400 (Nm)
- Velocidad: 6000 (rpm)
- Corriente: 300(A)
- Volaje: 400 (V)

Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción


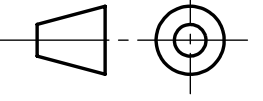
	Ensamble:		Material	
	Arreglo general del motor		Varios	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__	
Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión	Plano
1:2.5	0.2mm	mm	Emisión	1 de 21

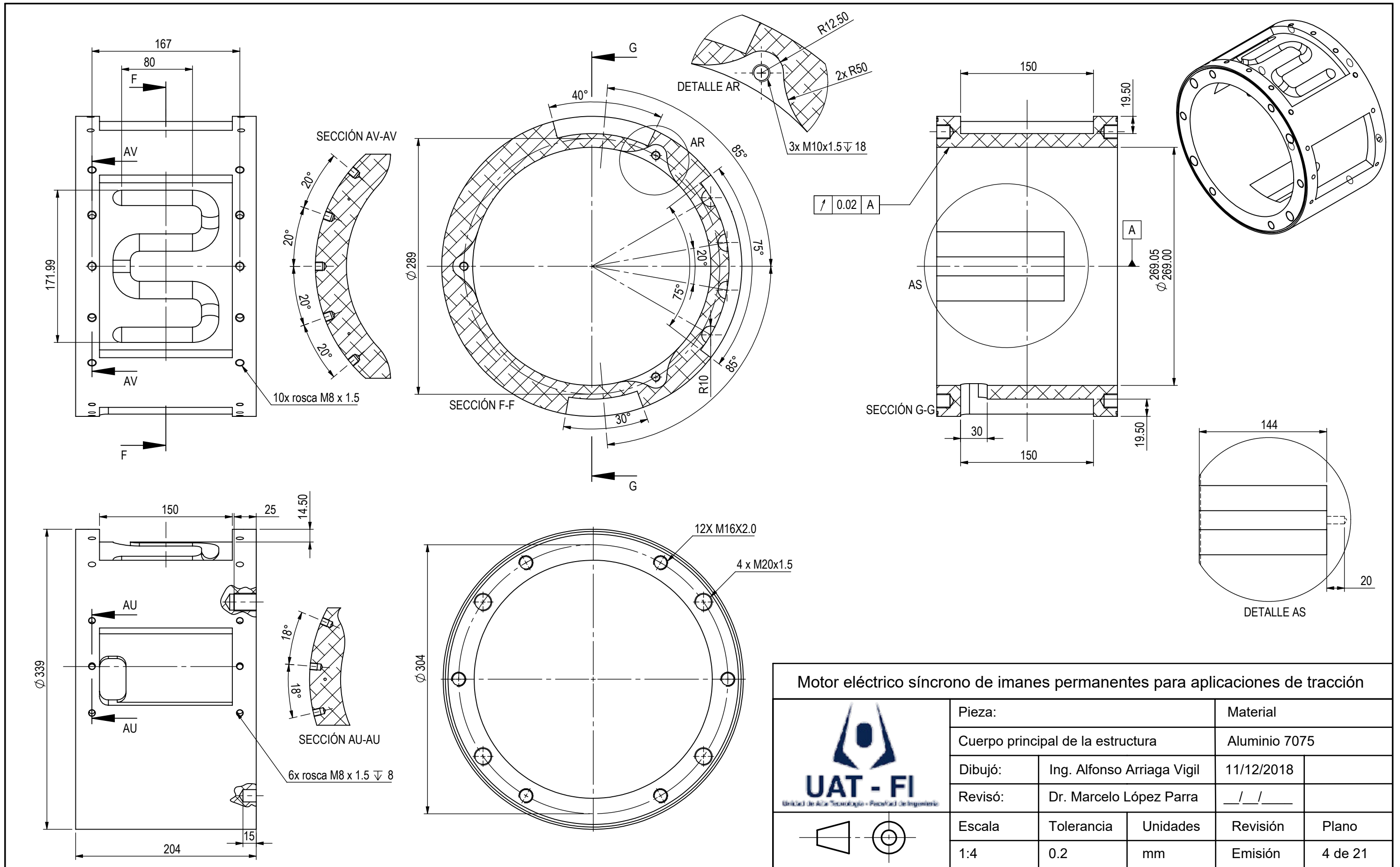


Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción				
	Ensamble:		Material	
	Arreglo general del motor		Varios	
Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018		
Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__		
Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión	Plano
1:3	0.2 mm	mm	Emisión	2 de 21



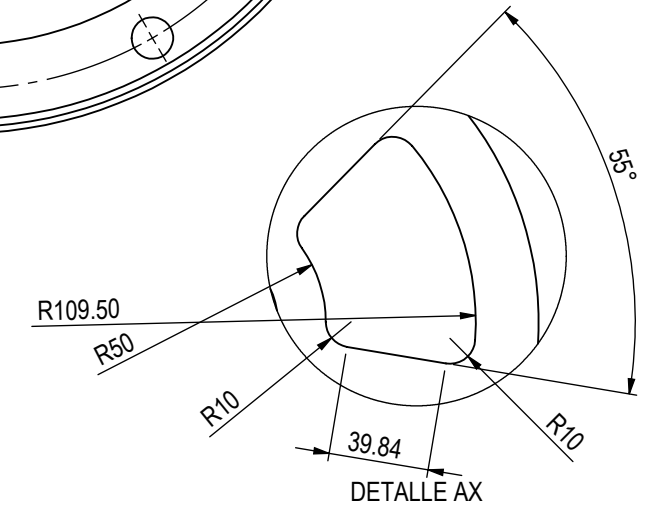
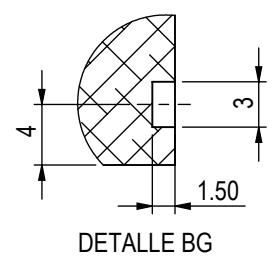
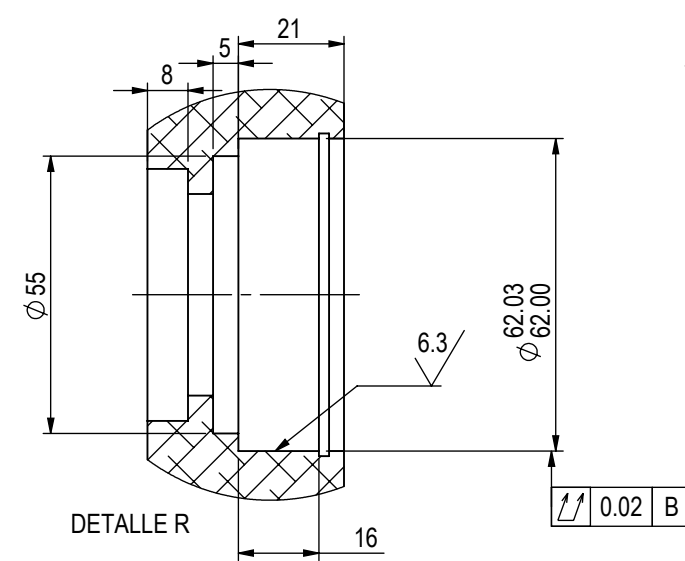
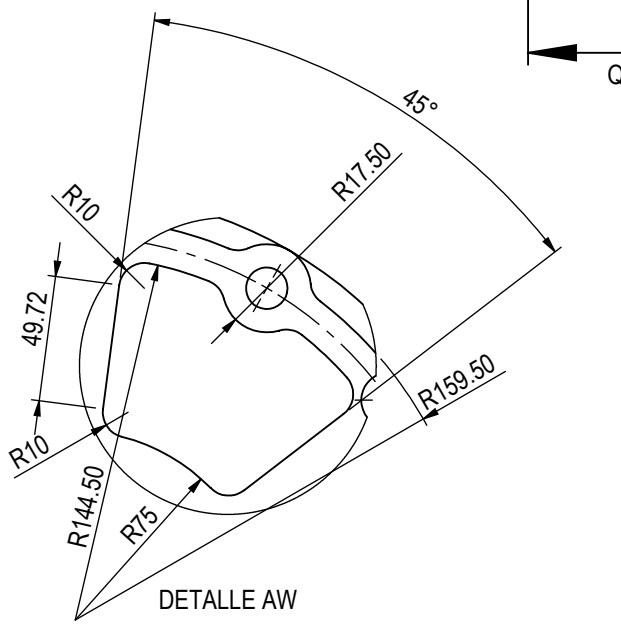
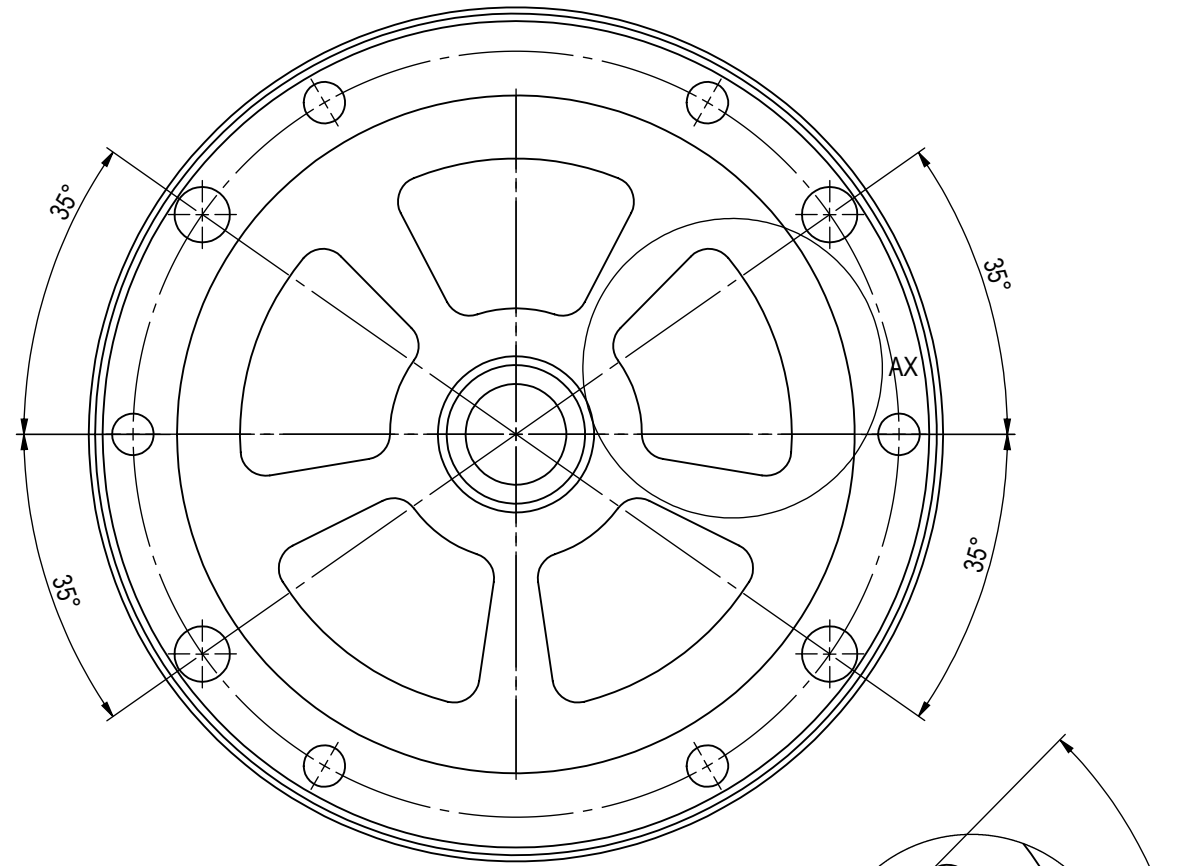
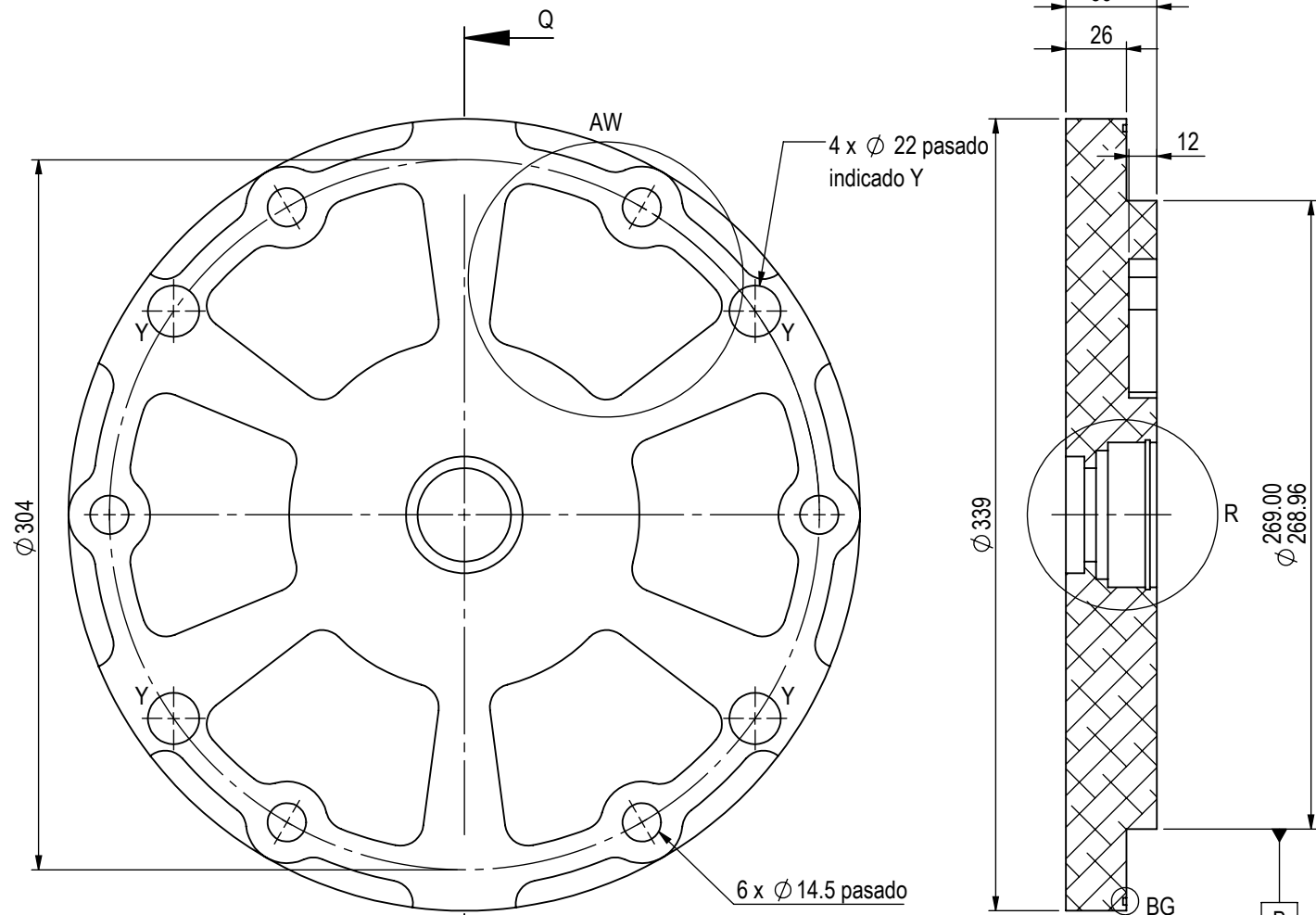
Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Ensamble:		Material		
	Explosivo de la estructura		Aluminio 7075		
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018		
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__		
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión	Plano
	1:3	0.2 mm	mm	Emisión	3 de 21




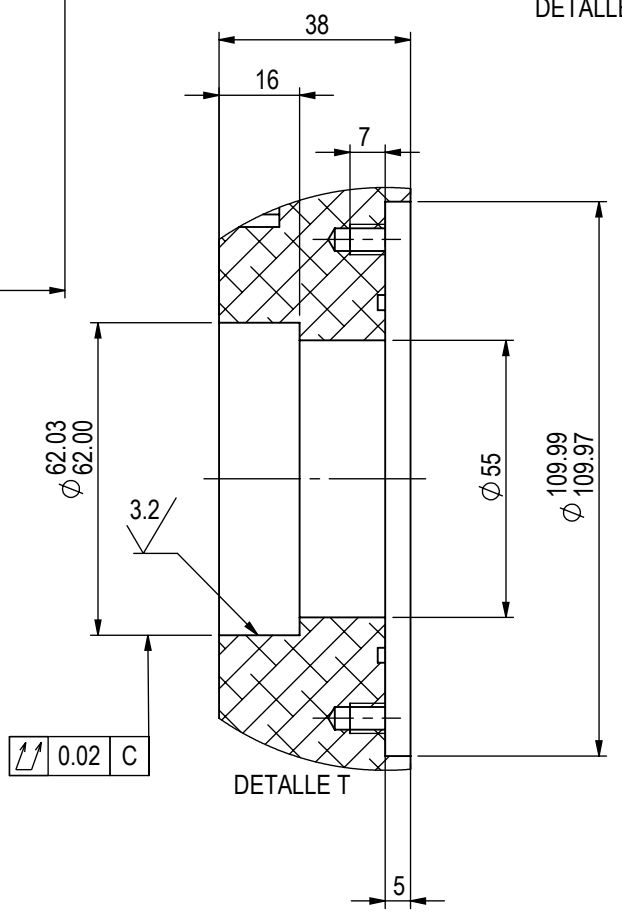
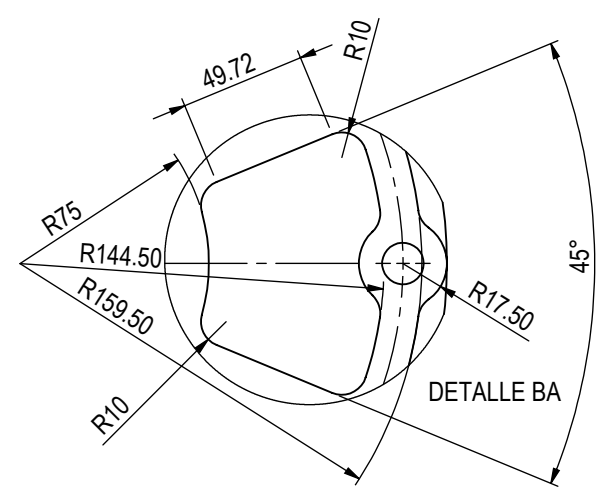
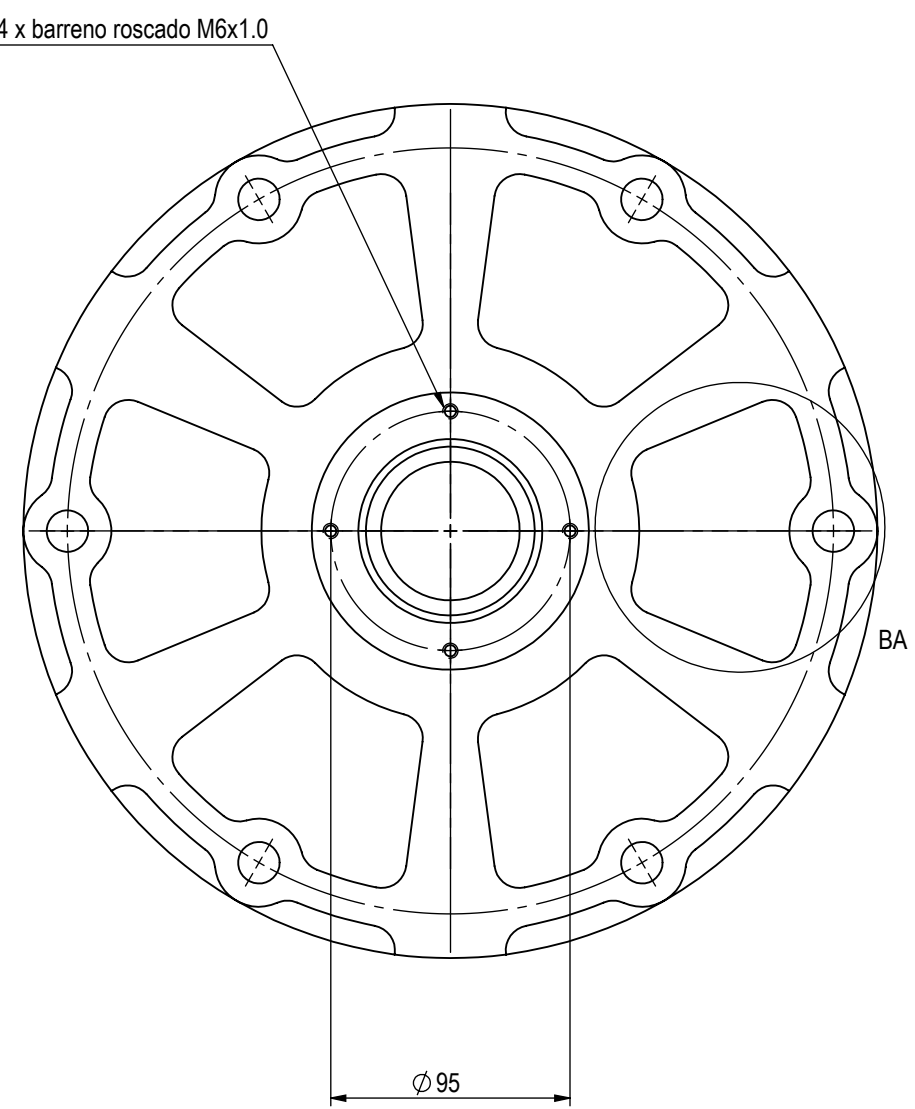
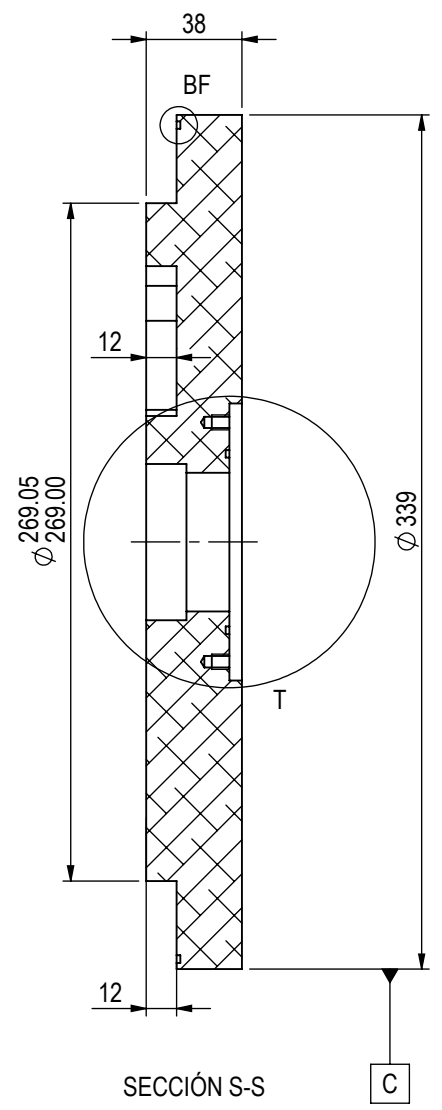
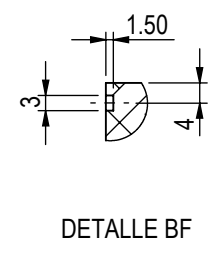
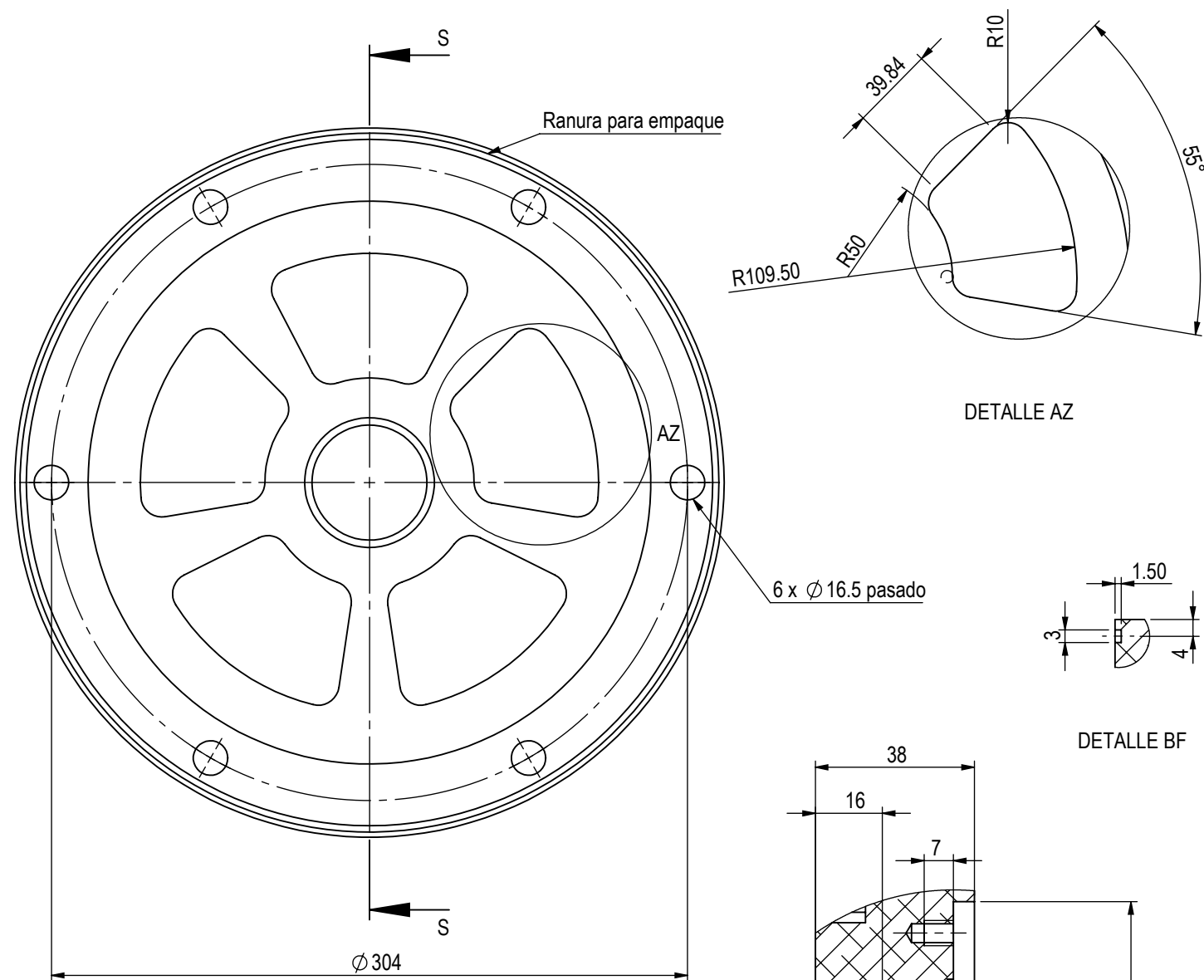
Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Pieza:		Material	
	Cuerpo principal de la estructura		Aluminio 7075	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	_/_/	
Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión	Plano
1:4	0.2	mm	Emisión	4 de 21

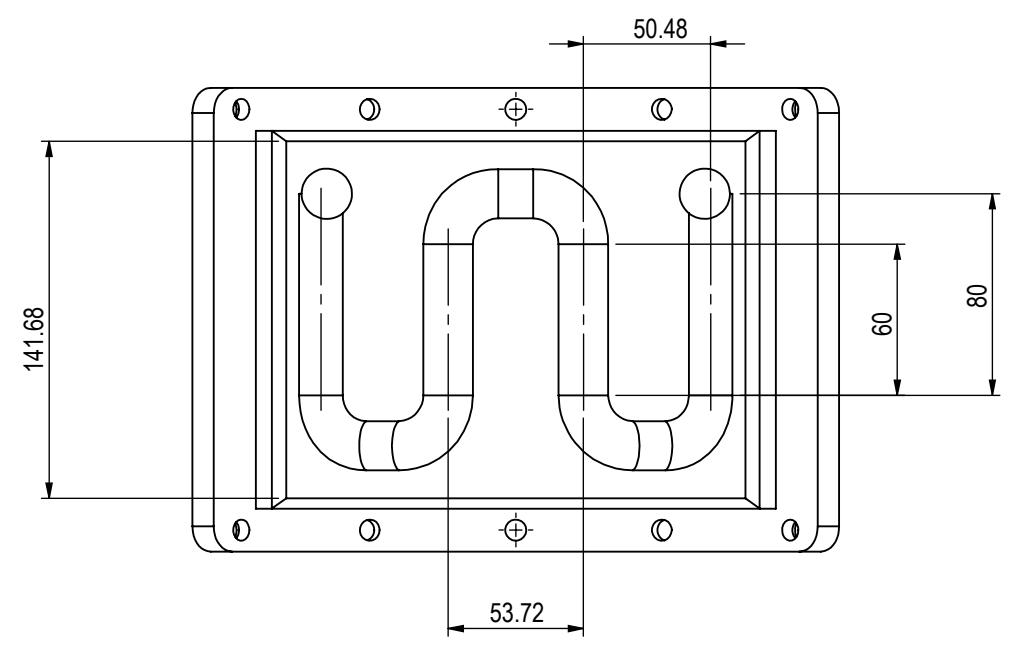
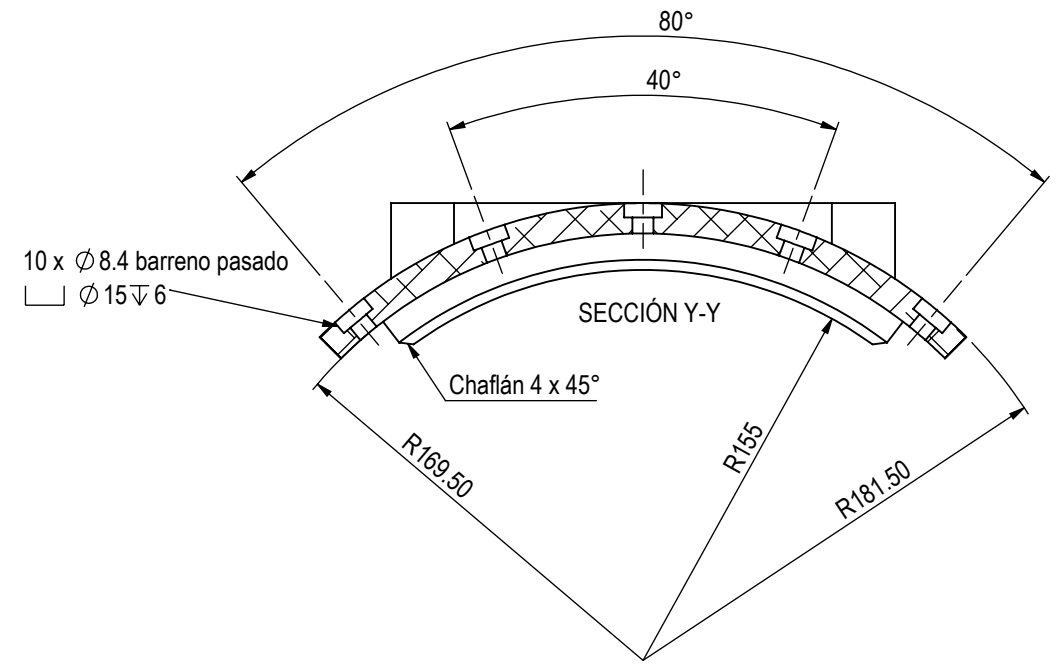
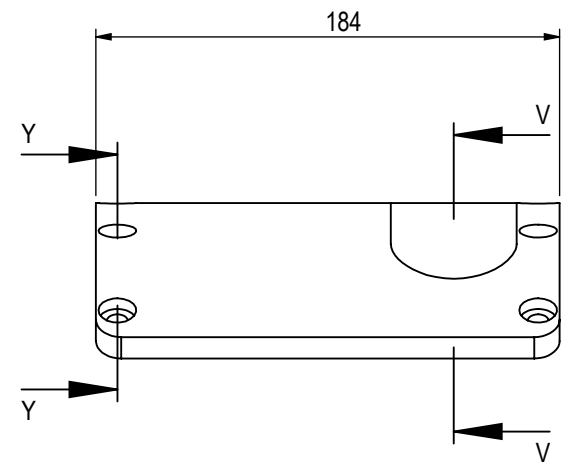
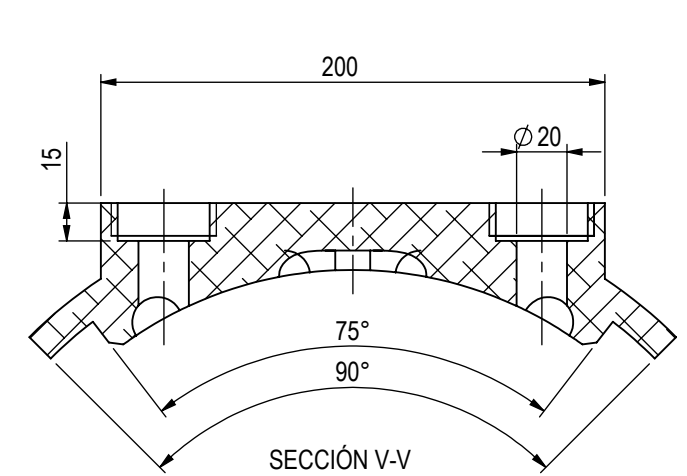
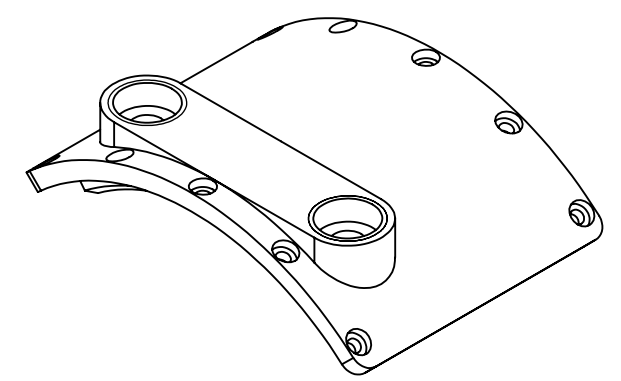
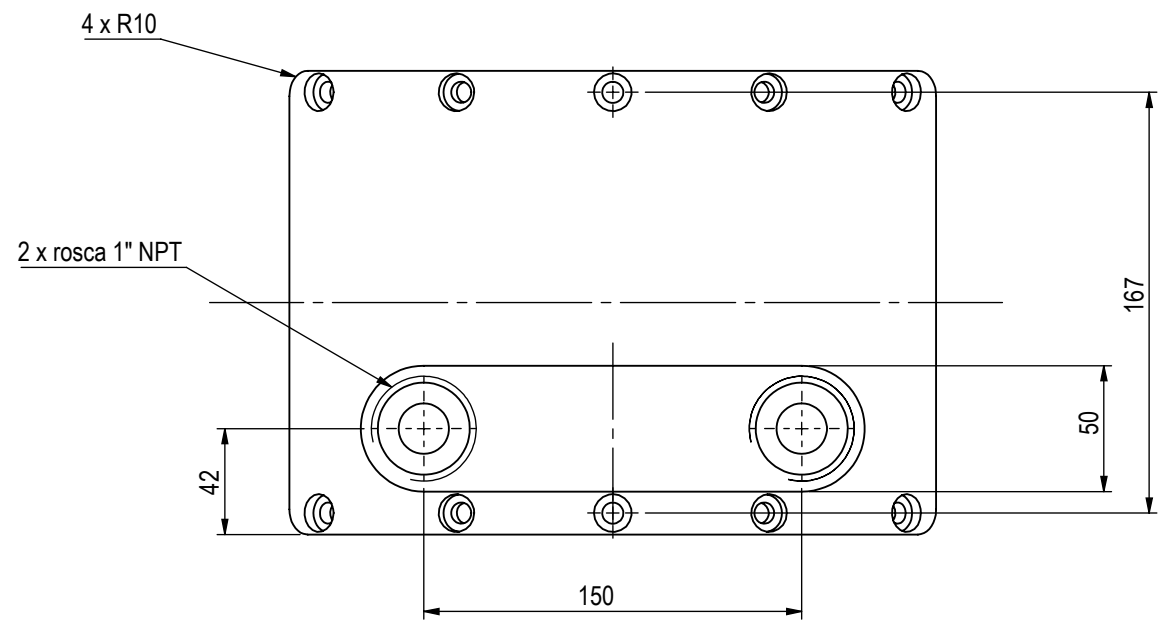


Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

 <p>UAT - FI</p> <p>Unidad de Alta Tecnología - Facultad de Ingeniería</p>	Pieza:		Material	
	Tapa frontal de la estructura		Aluminio 7075	
Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018		
Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__		
Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión	Plano
1:3	0.2 mm	mm	Emisión	5 de 21

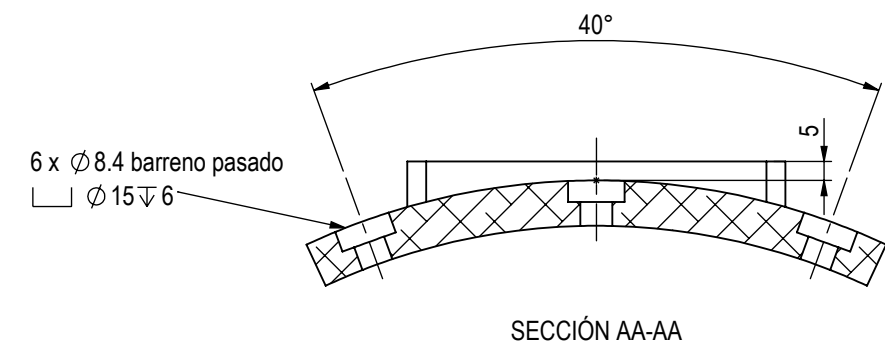
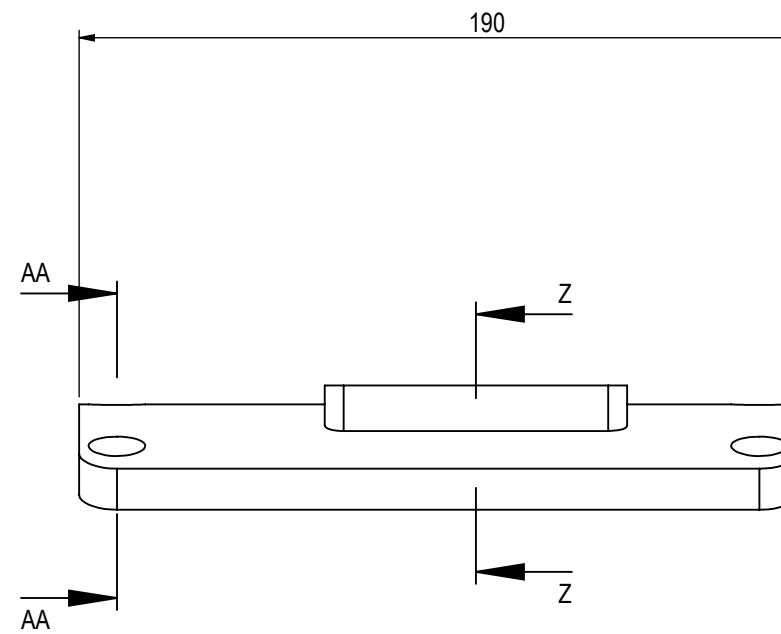
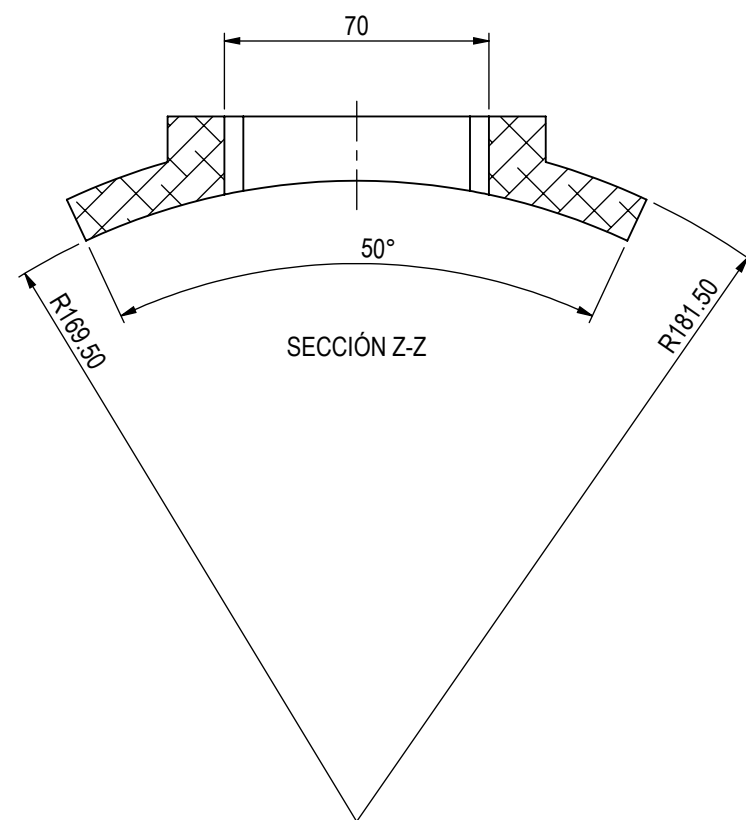
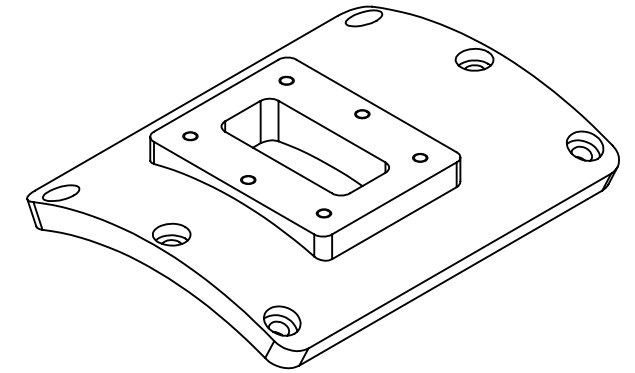
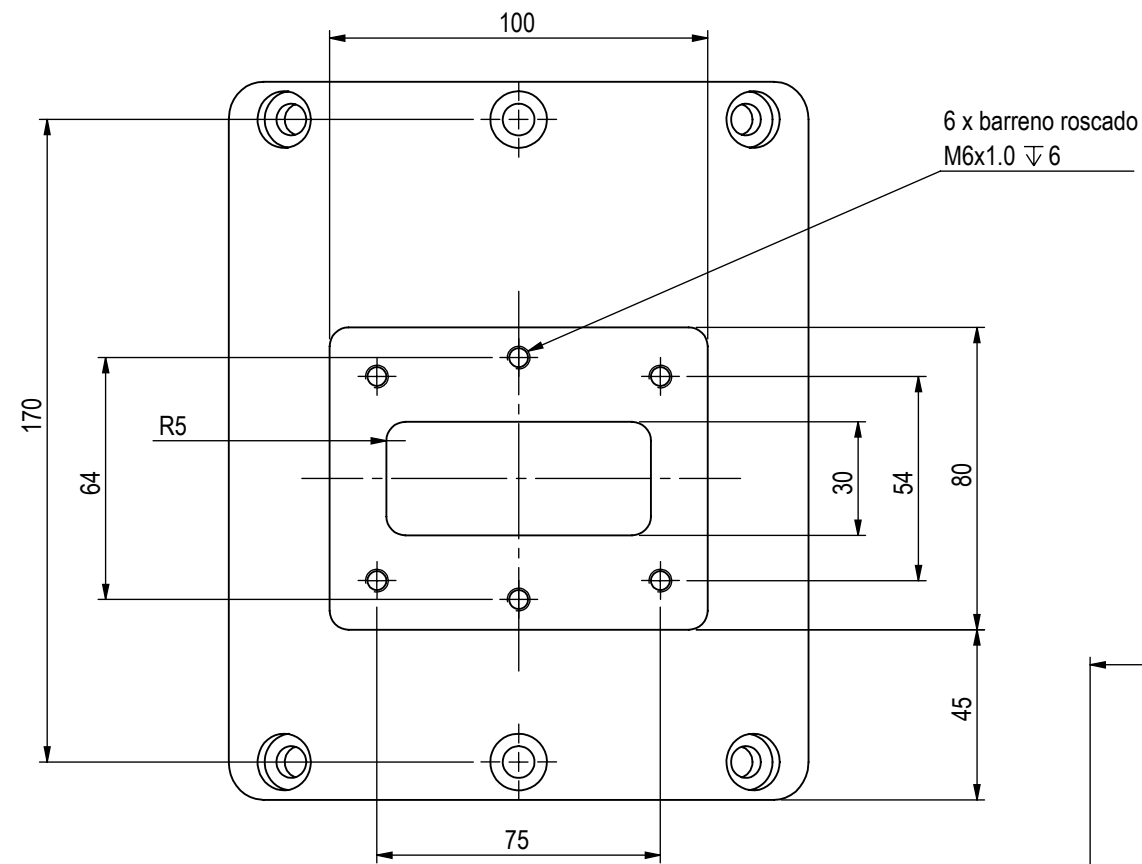


Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción				
	Pieza:		Material	
	Tapa trasera de la estructura		Aluminio 7075	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	_/_/	
Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión	Plano
1:1	0.2 mm	mm	Emisión	6 de 21


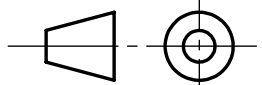


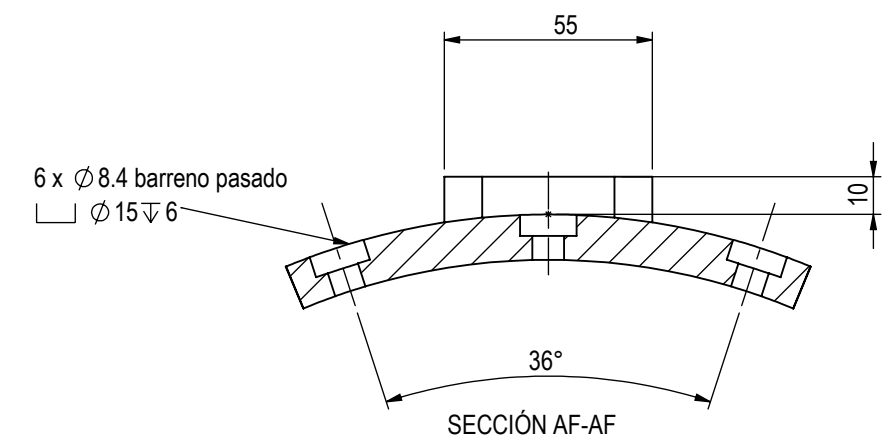
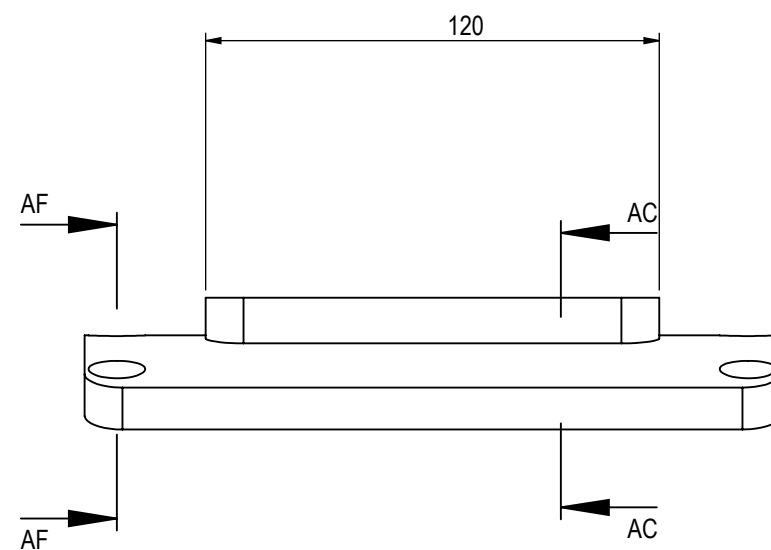
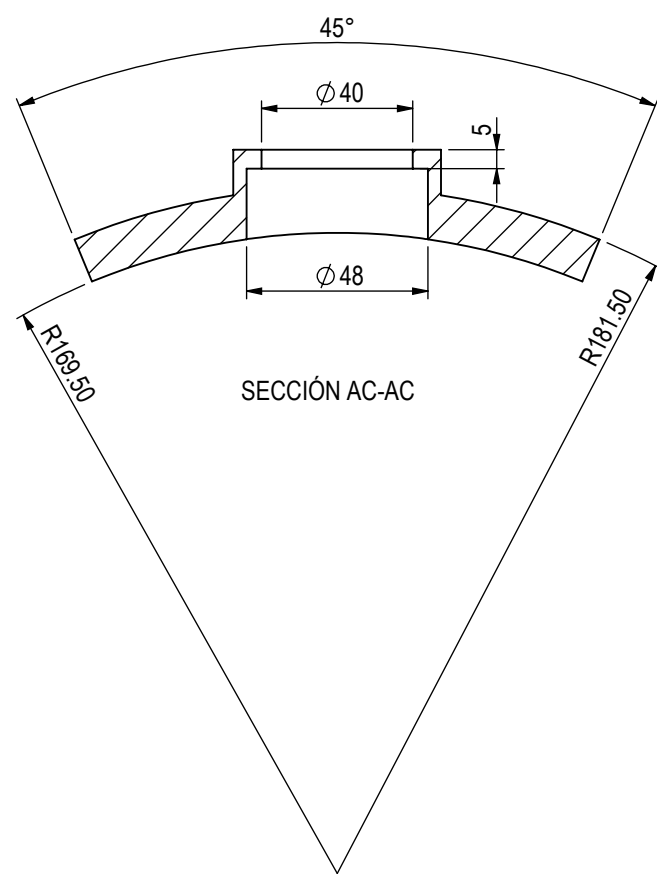
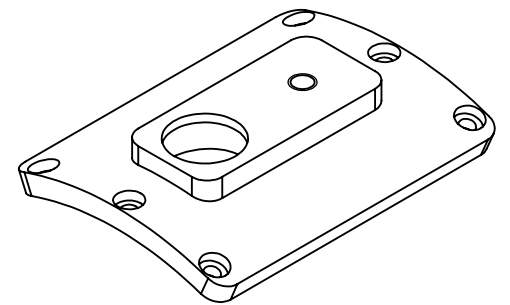
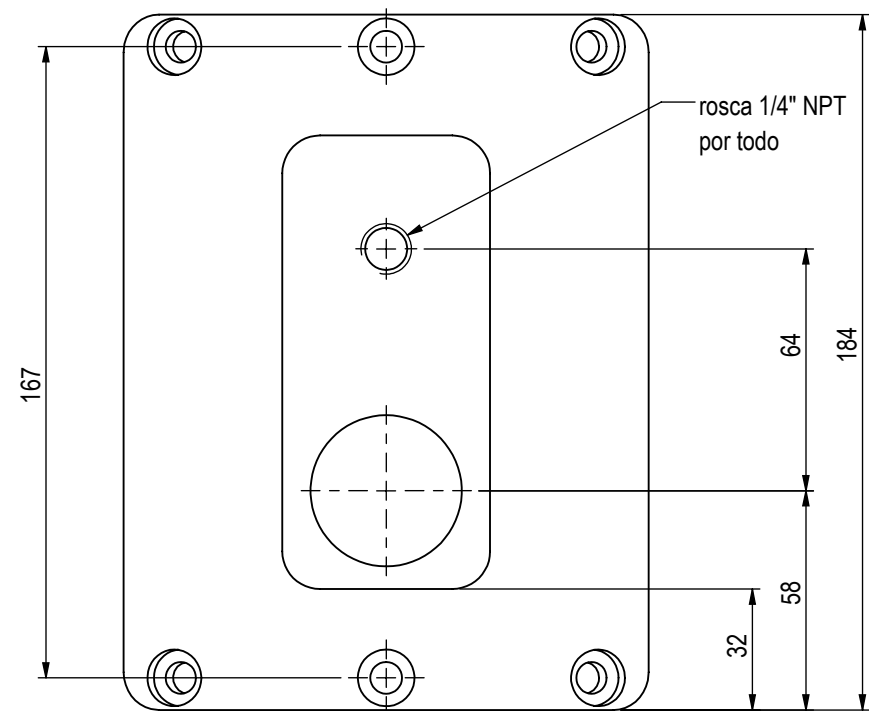
Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Pieza:		Material	
	Cubierta del enfriador		Aluminio 7075	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__	
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión
	1:3	0.1 mm	mm	Emisión
				Plano
				7 de 21



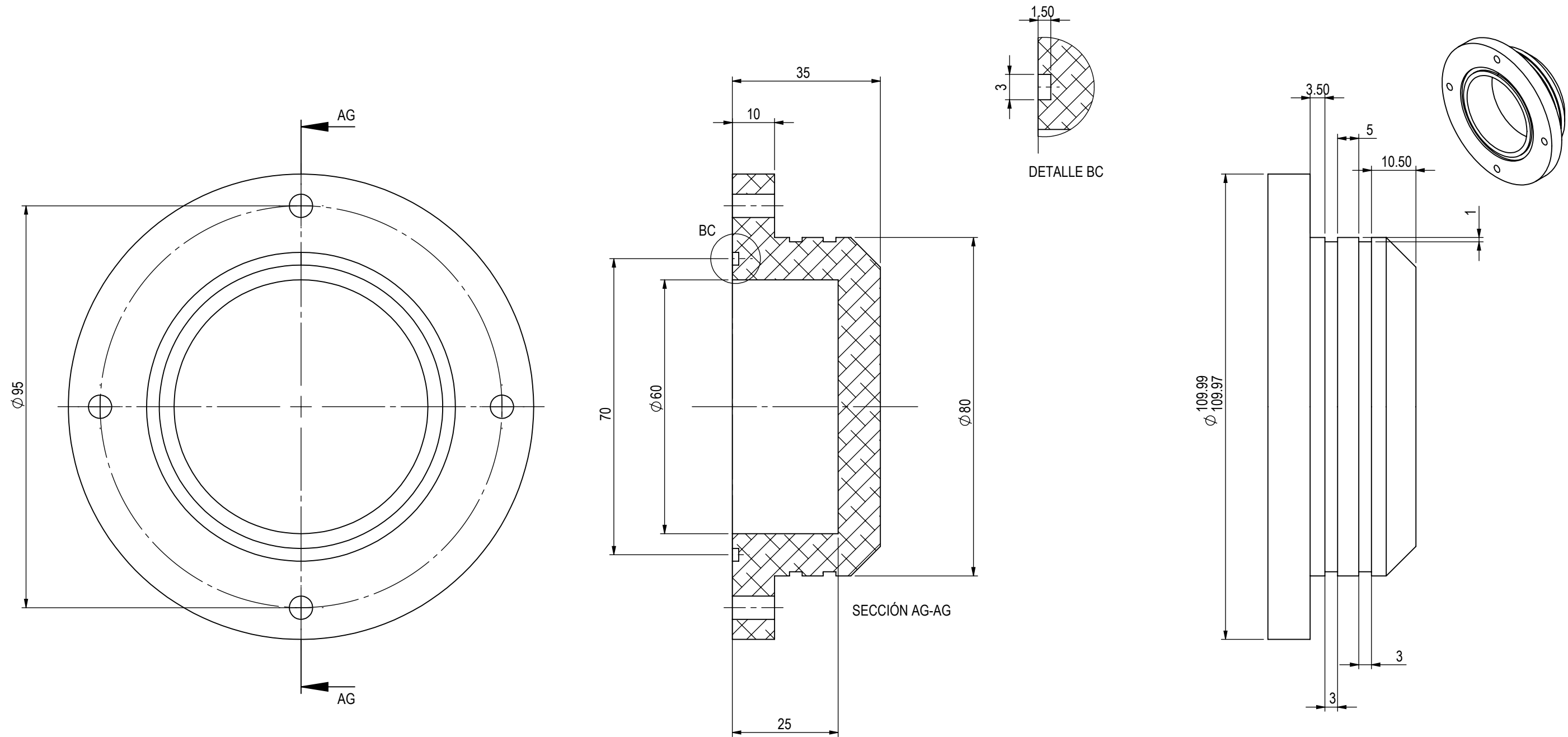
Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Pieza:		Material		
	Cubierta de conexiones de potencia		Aluminio 7075		
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018		
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__		
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión	Plano
	1:3	0.1 mm	mm	Emisión	8 de 21



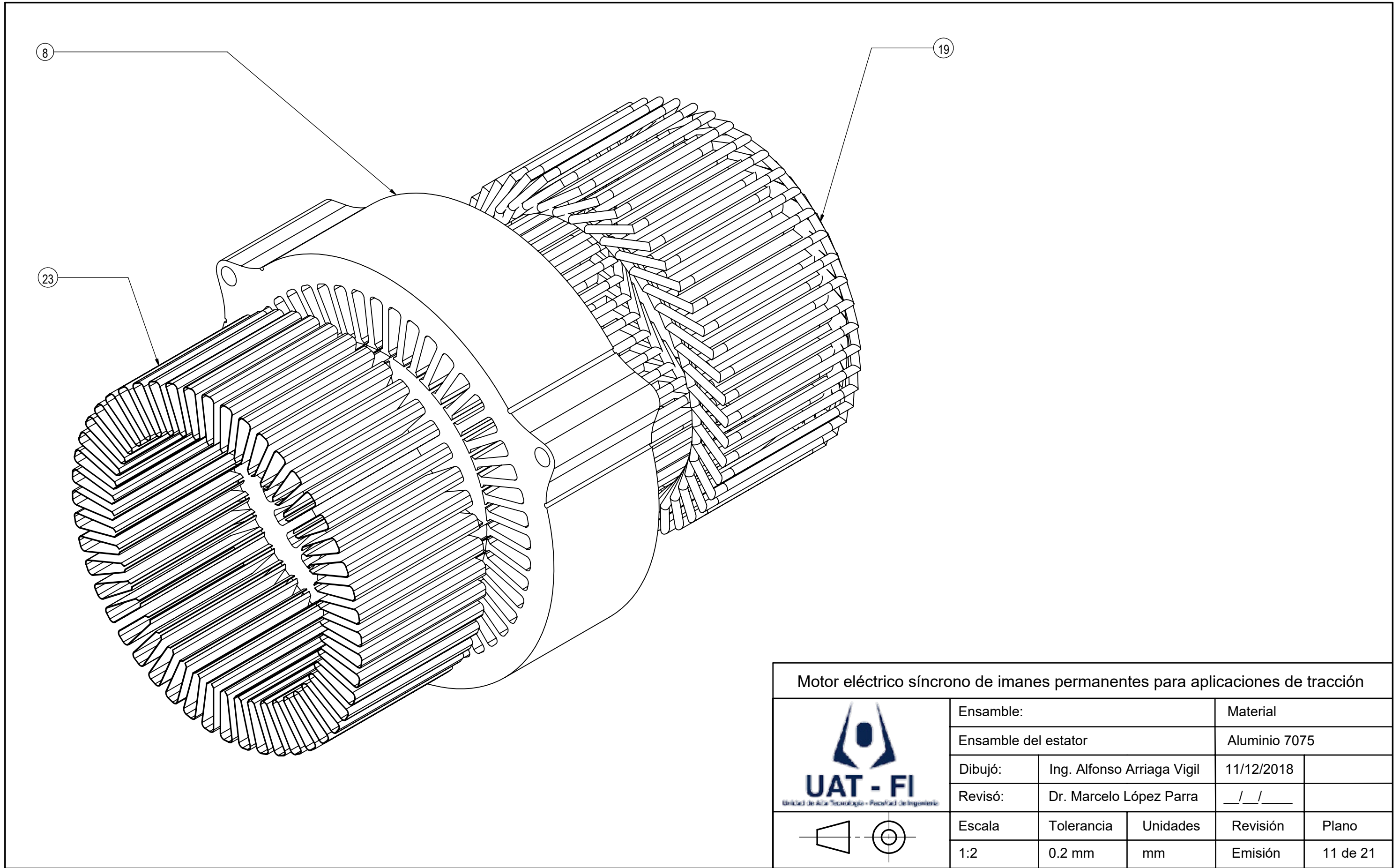
Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Pieza:		Material	
	Cubierta de las conexiones de control		Aluminio 7075	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__	
Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión	Plano
1:3	0.1 mm	mm	Emisión	9 de 21


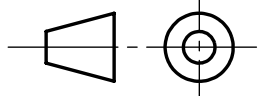


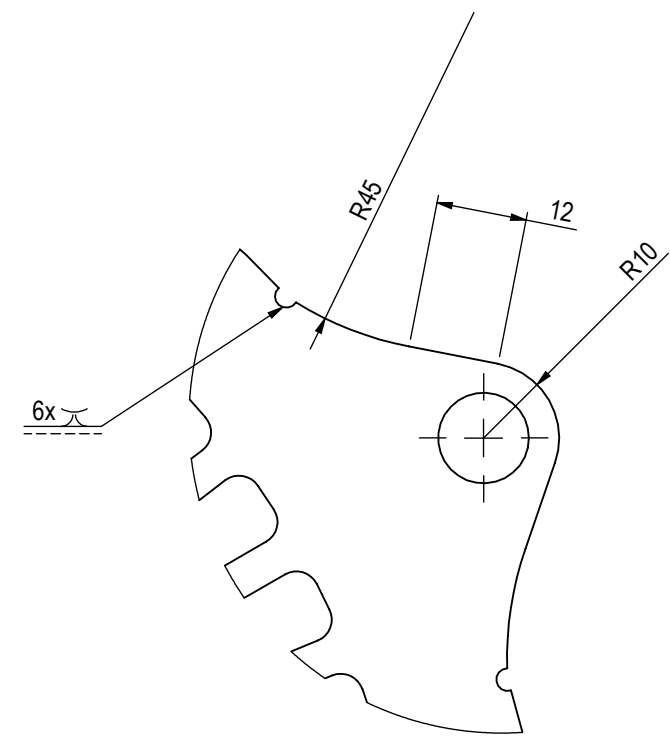
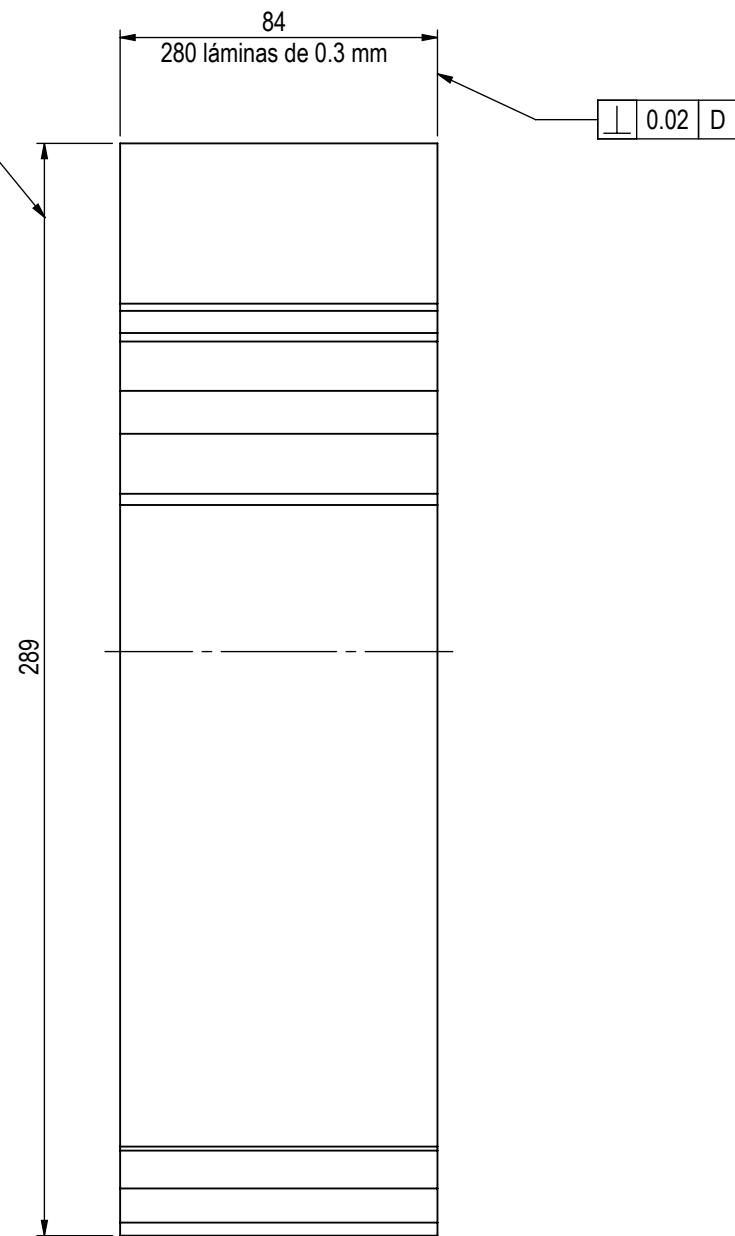
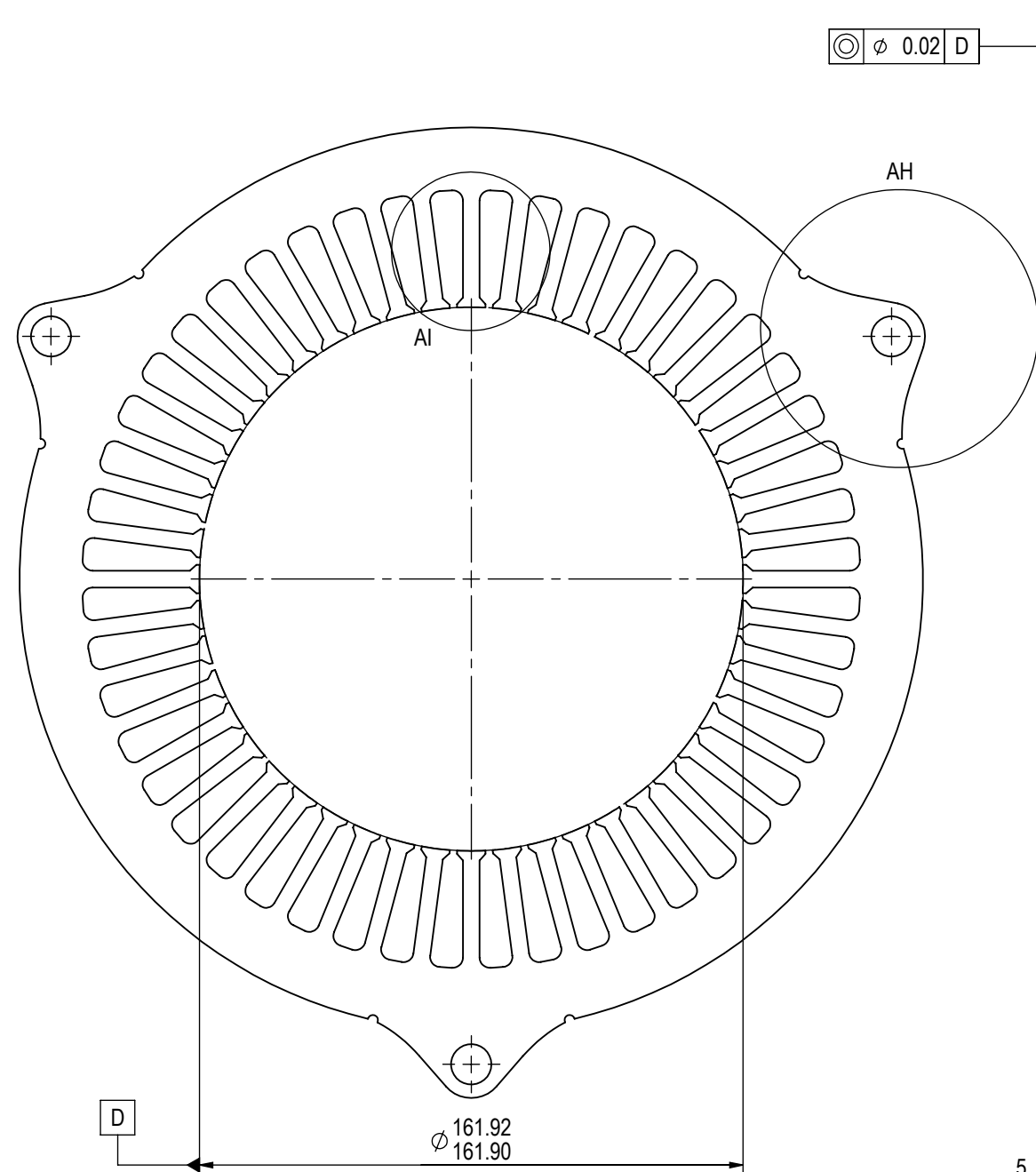
Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Pieza.		Material	
	Cubiertartrasera de la estructura		Aluminio 7075	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__	
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión
	1:1	0.2 mm	mm	Plano
			Emisión	10 de 21

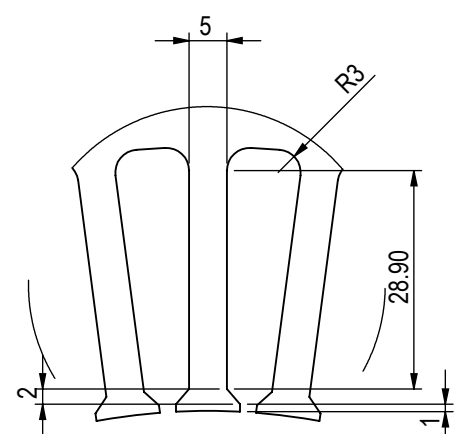


Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Ensamble:		Material	
	Ensamble del estator		Aluminio 7075	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__	
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión
	1:2	0.2 mm	mm	Plano
			Emisión	11 de 21




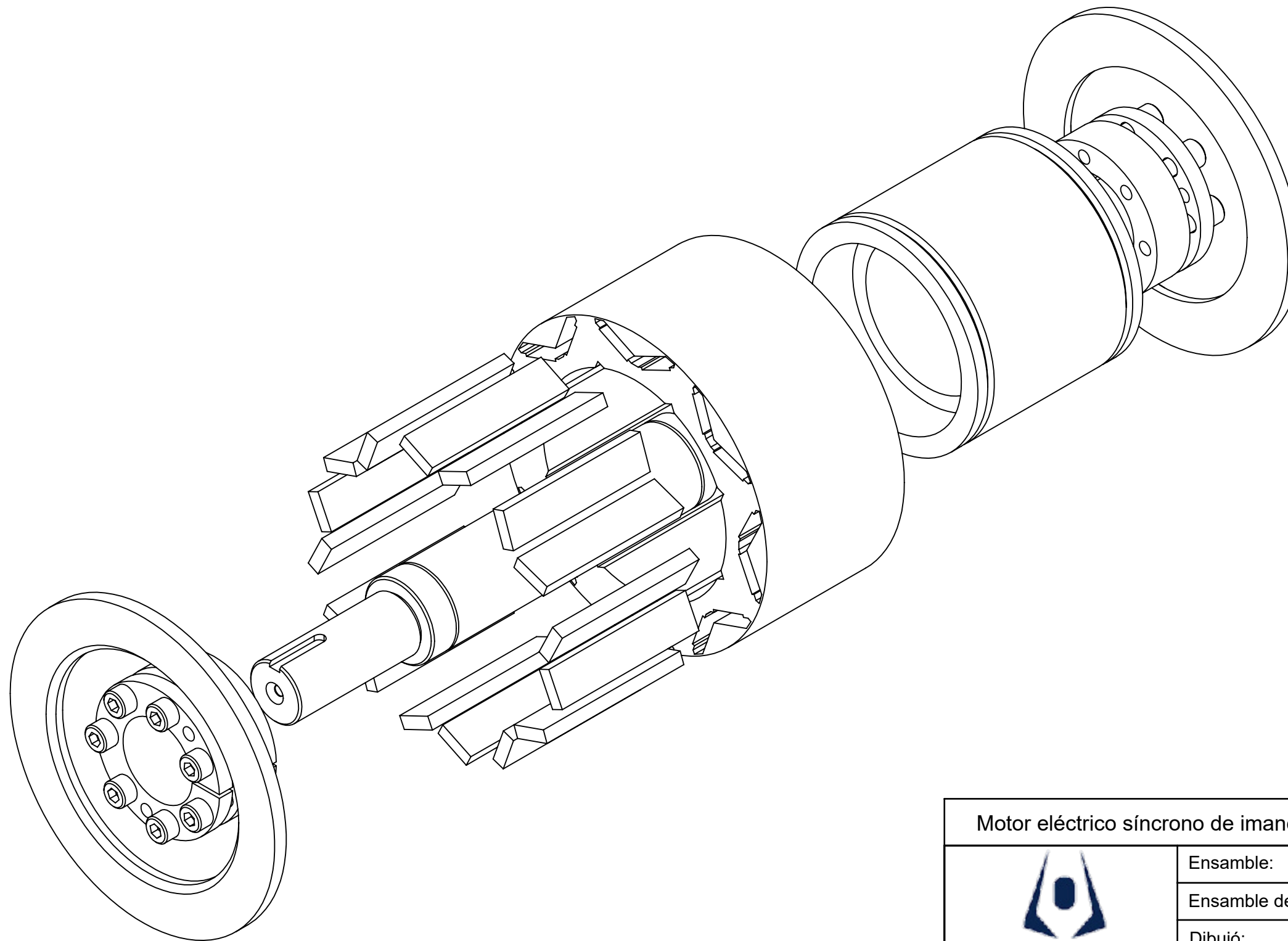
DETALLE AH




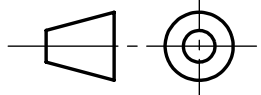
DETALLE AI

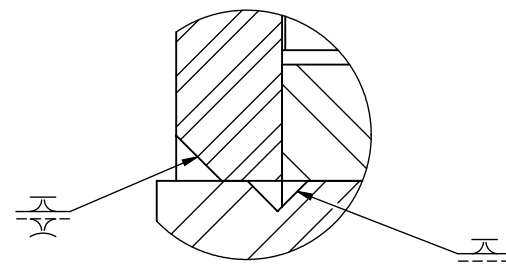
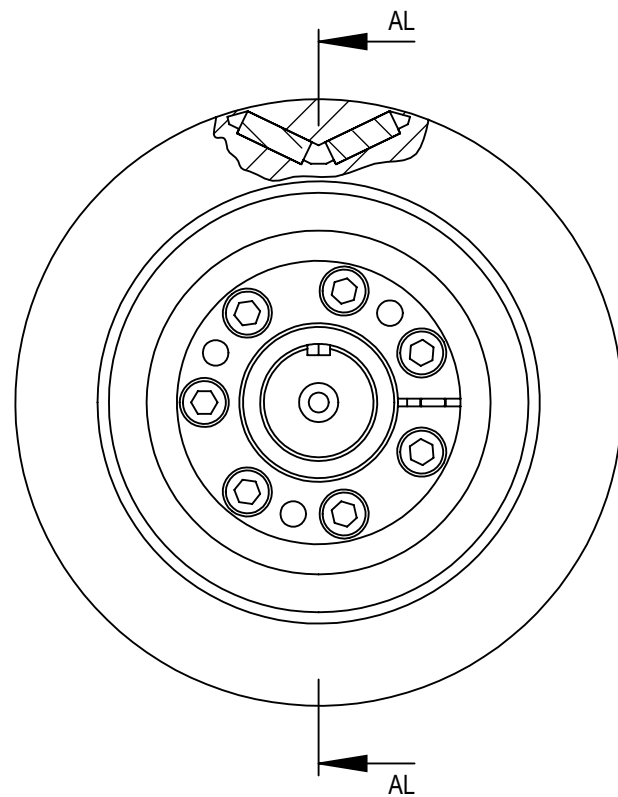
Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Ensamble:		Material	
	Núcleo laminado del estator		Acero al silicio M15	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	_/_/	
Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión	Plano
1:2	0.1 mm	mm	Emisión	12 de 21

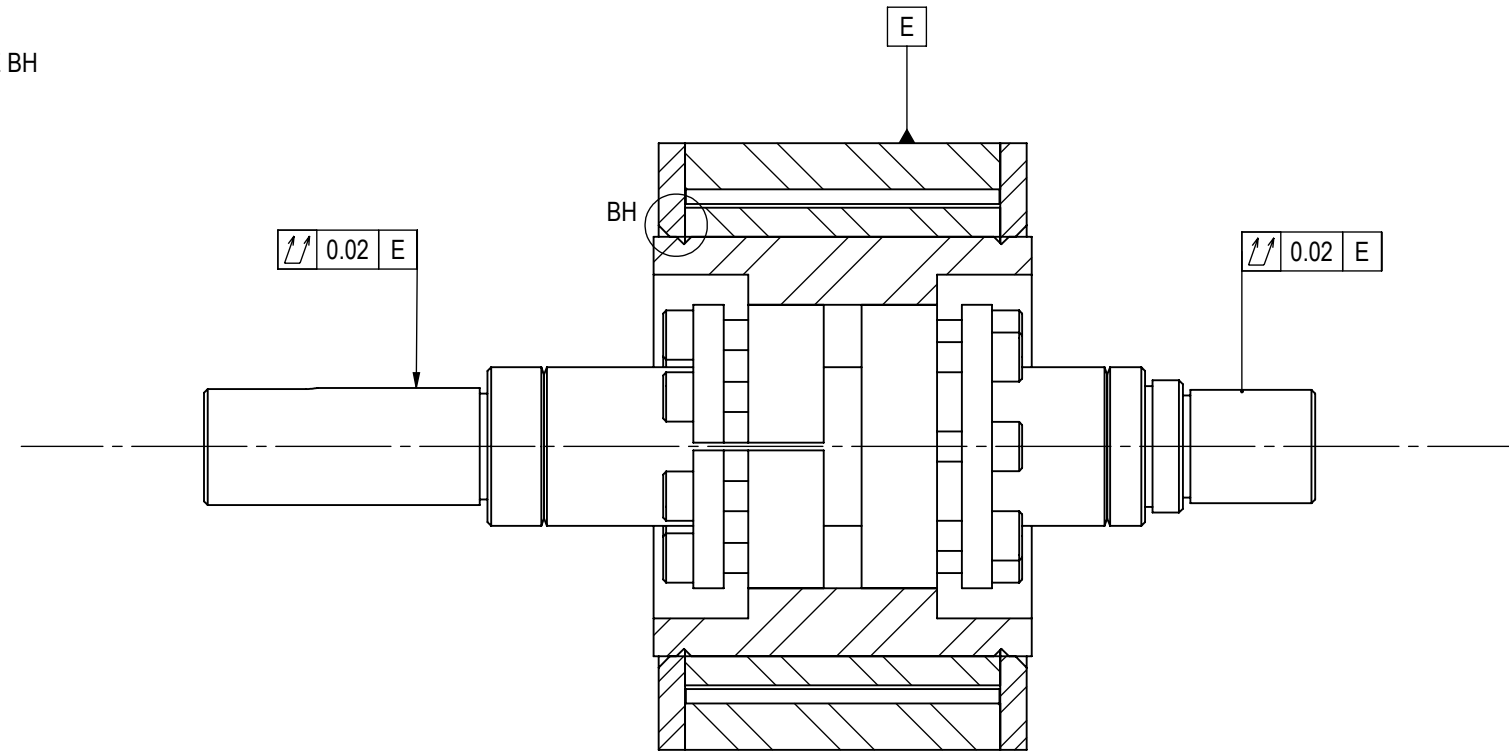


Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Ensamble:		Material		
	Ensamble del rotor		Varios		
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018		
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__		
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión	Plano
	1:2	0.2 mm	mm	Emisión	13 de 21



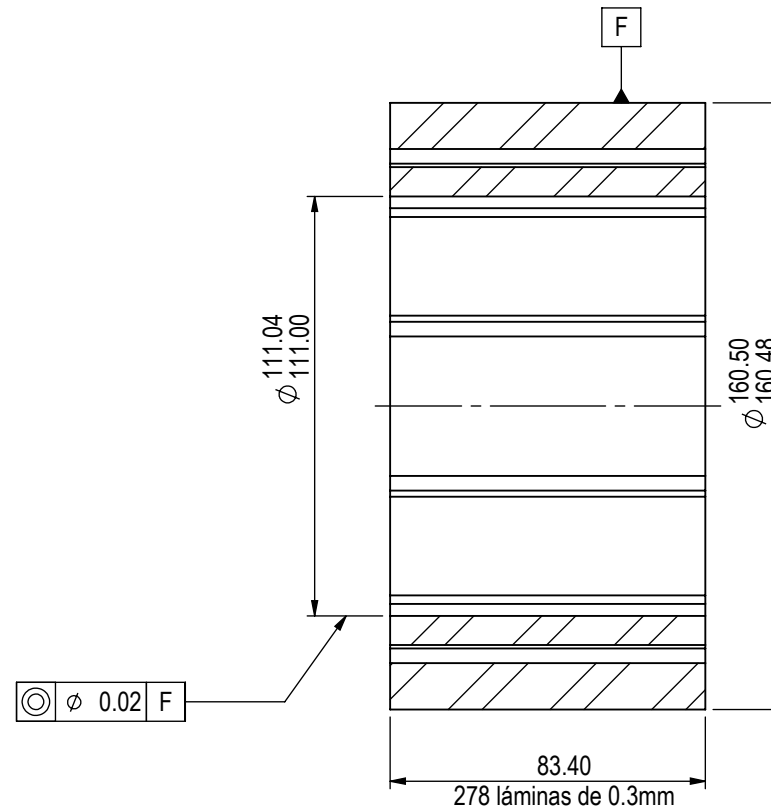
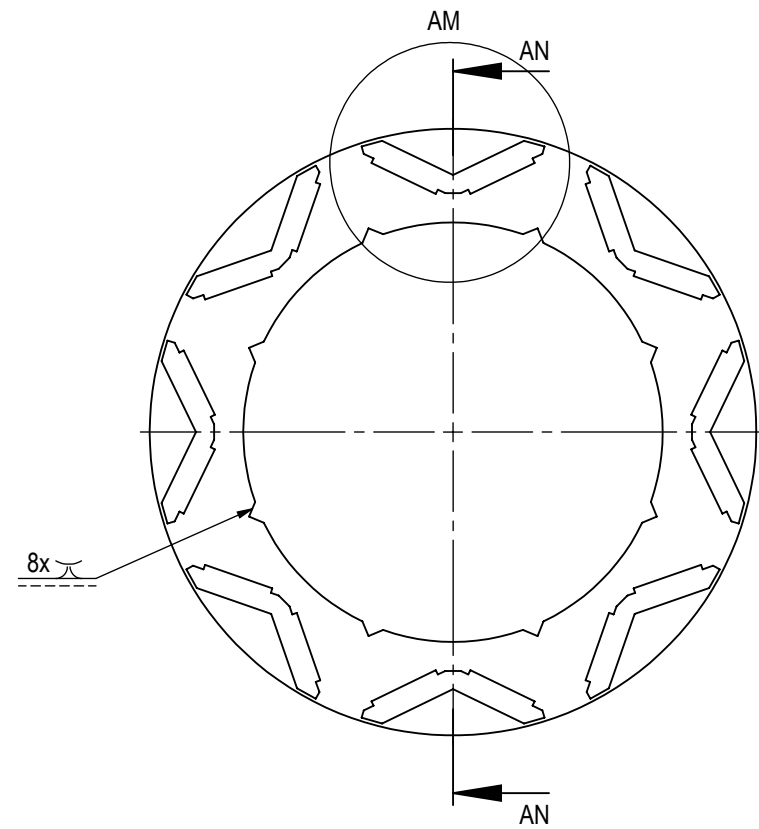
DETALLE BH



SECCIÓN AL-AL

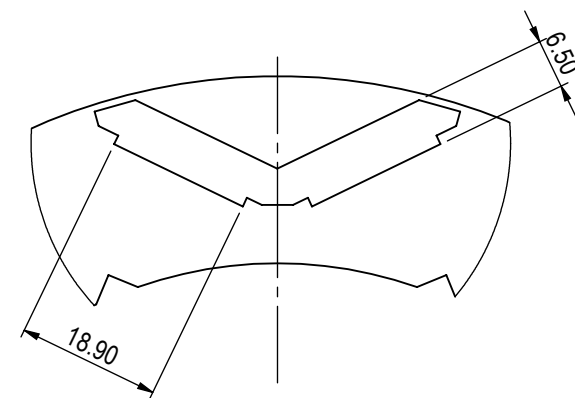
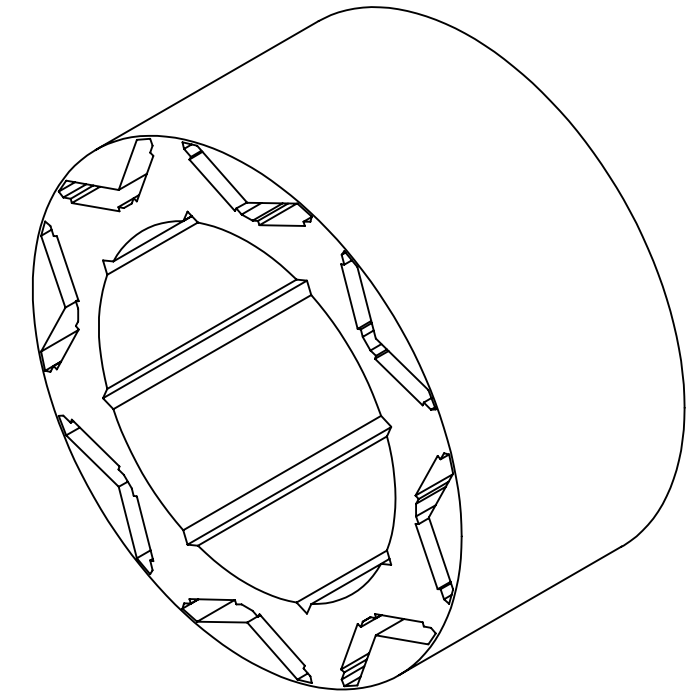
Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Ensamble:		Material	
	Ensamble del rotor		Varios	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__	
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión
	1:2	0.2 mm	mm	Emisión
				Plano
				14 de 21



⊙ ϕ 0.02 F

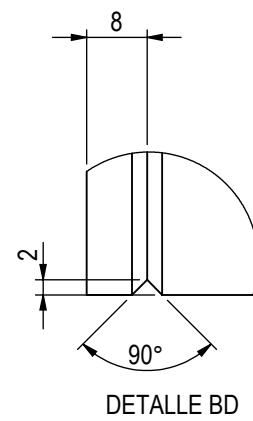
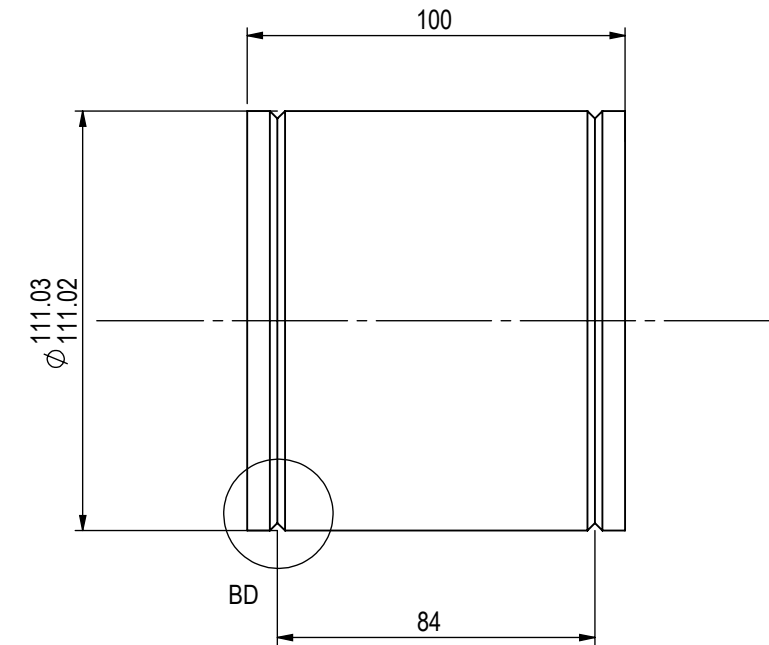
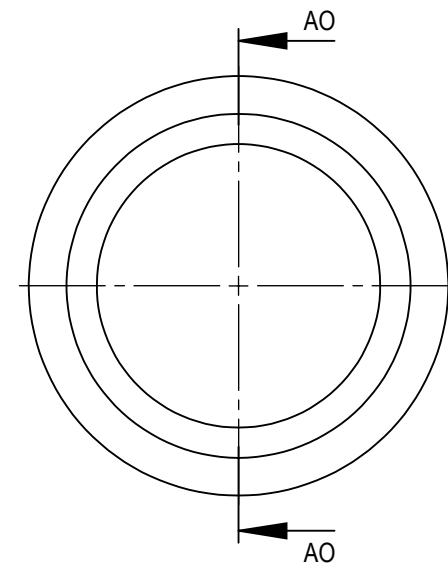
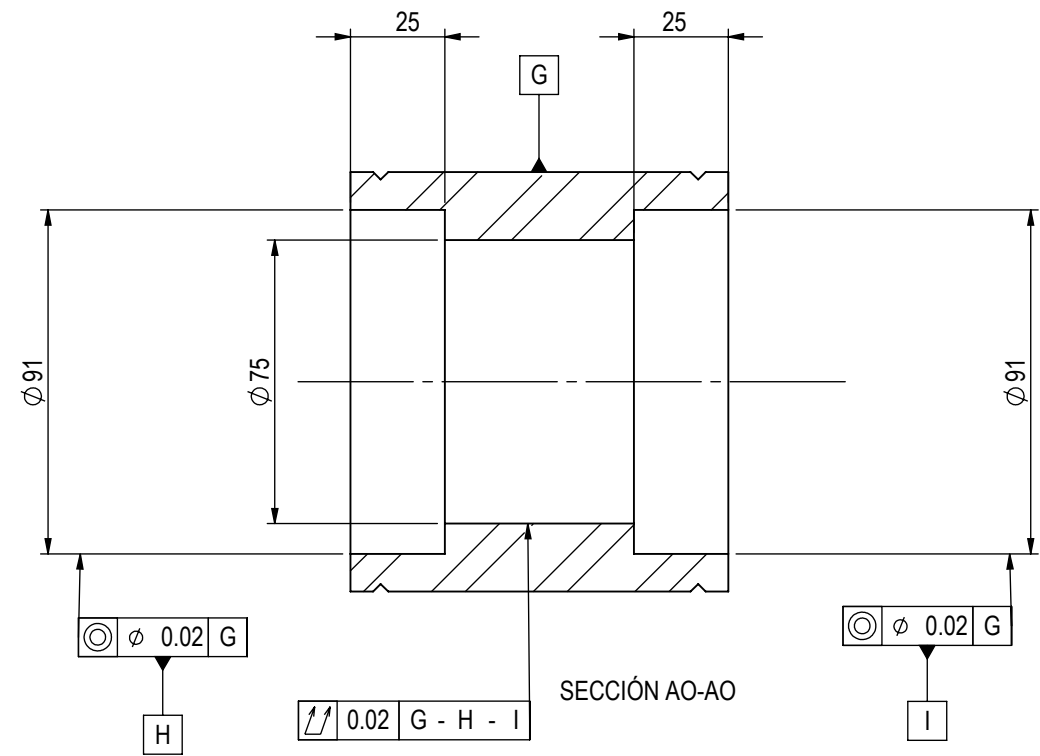
SECCIÓN AN-AN



DETALLE AM

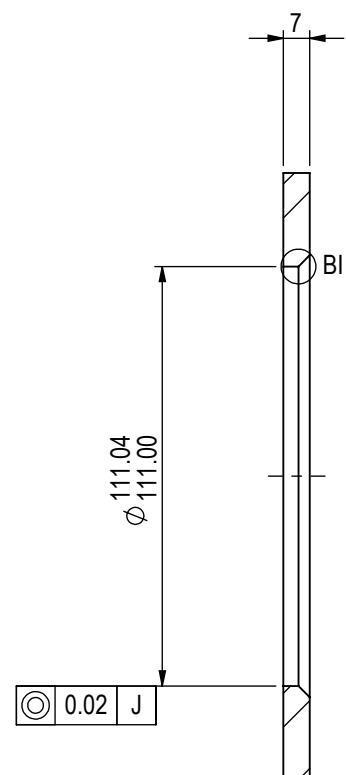
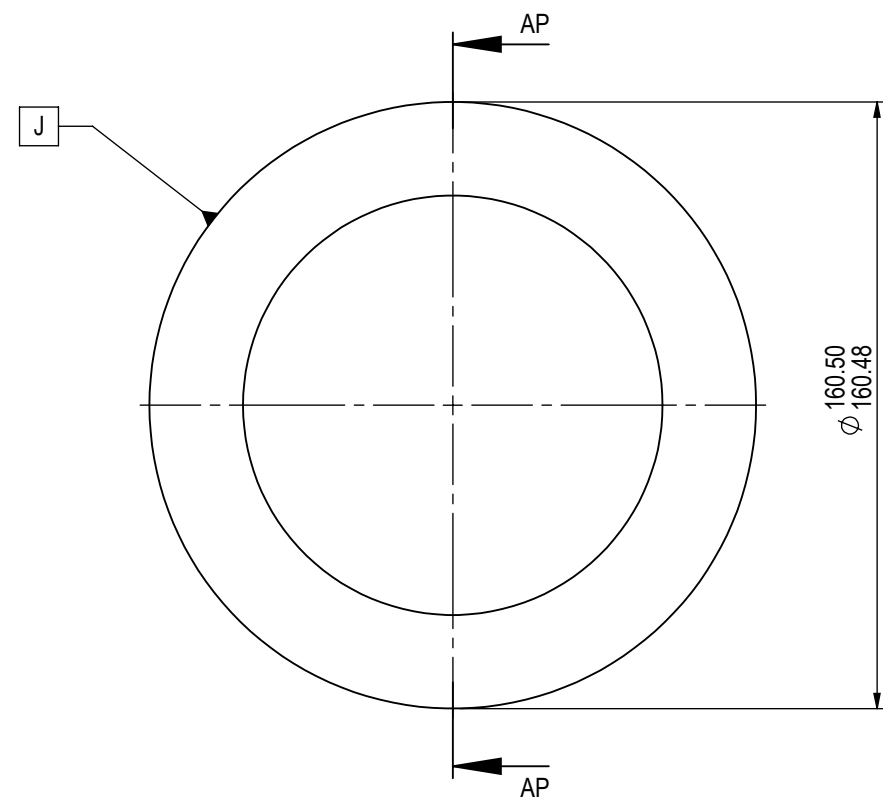
Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Pieza:		Material	
	Núcleo laminado del rotor		Acero al silicio M15	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__	
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión
	1:2	0.1 mm	mm	Plano
			Emisión	15 de 21

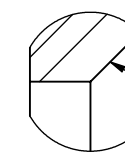


Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Pieza:		Material	
	Centro del rotor		AISI 9840	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__	
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión
	1:2	0.1 mm	mm	Plano
			Emisión	16 de 21

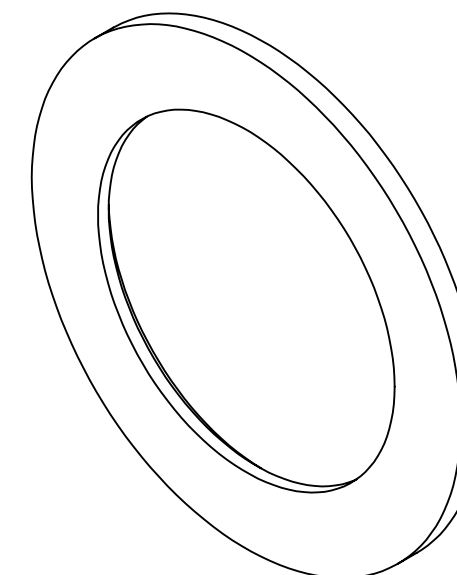


SECCIÓN AP-AP



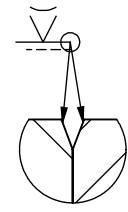
Chafilán 3x45°

DETALLE BI

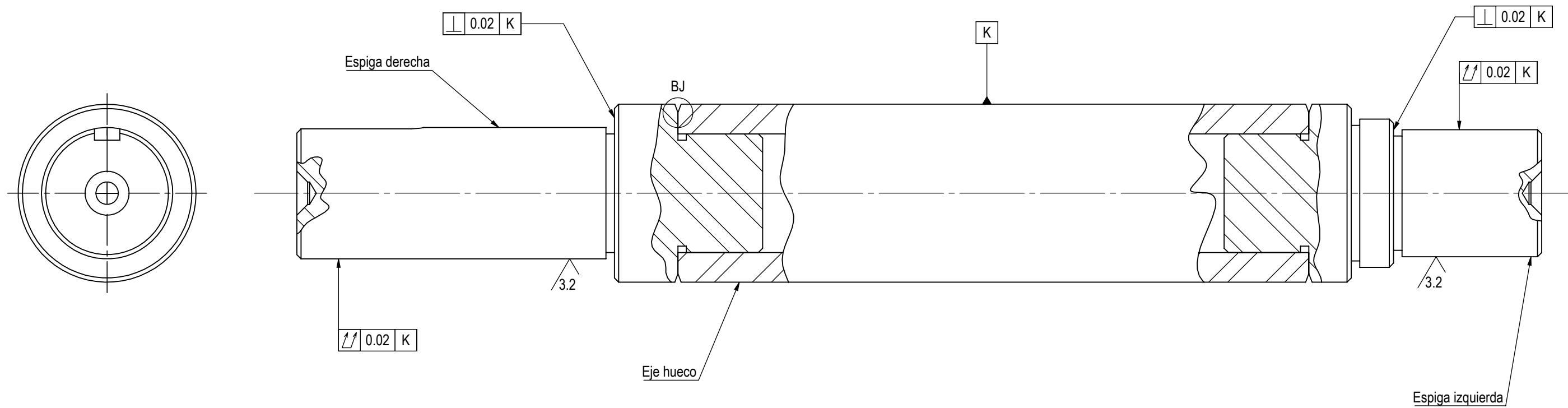


Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Pieza:		Material	
	Placa final para balanceo		Acero inoxidable 304	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__	
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión
	1:2	0.2 mm	mm	Emisión
				Plano
				17 de 21

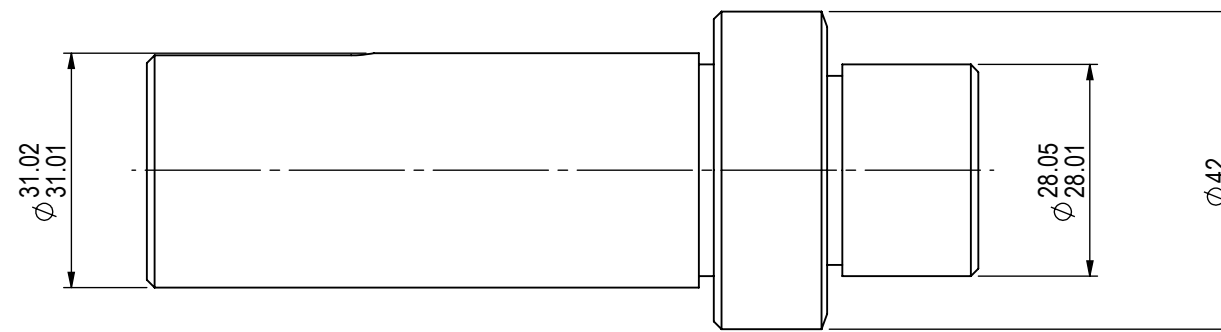
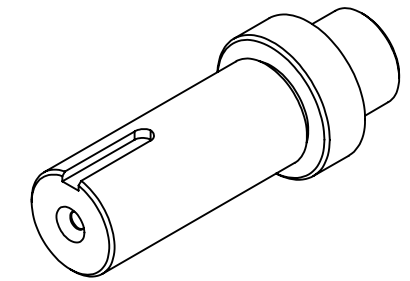
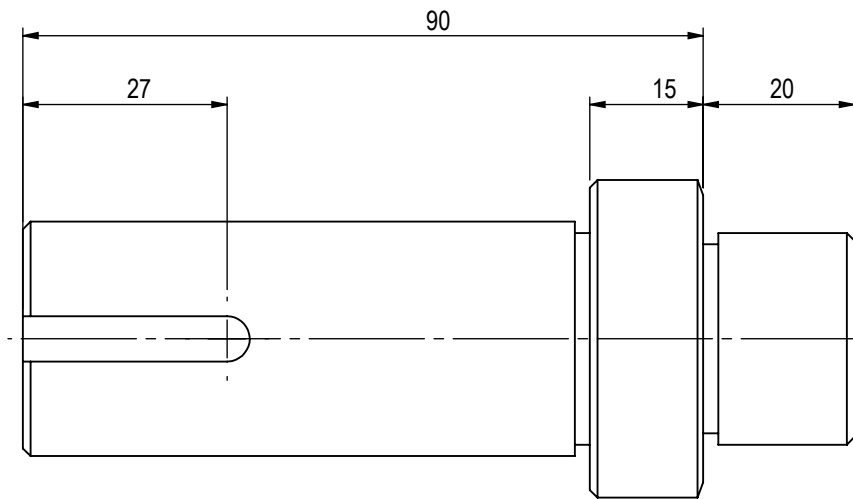
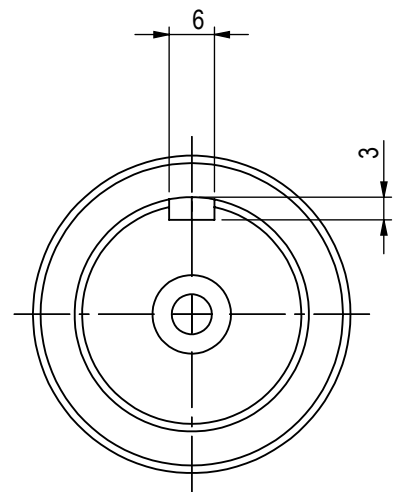


DETALLE BJ



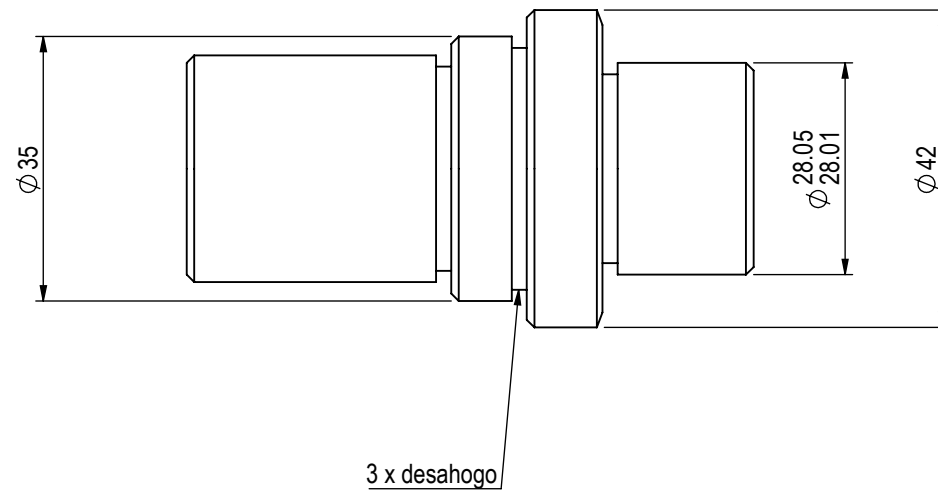
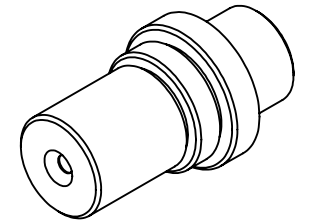
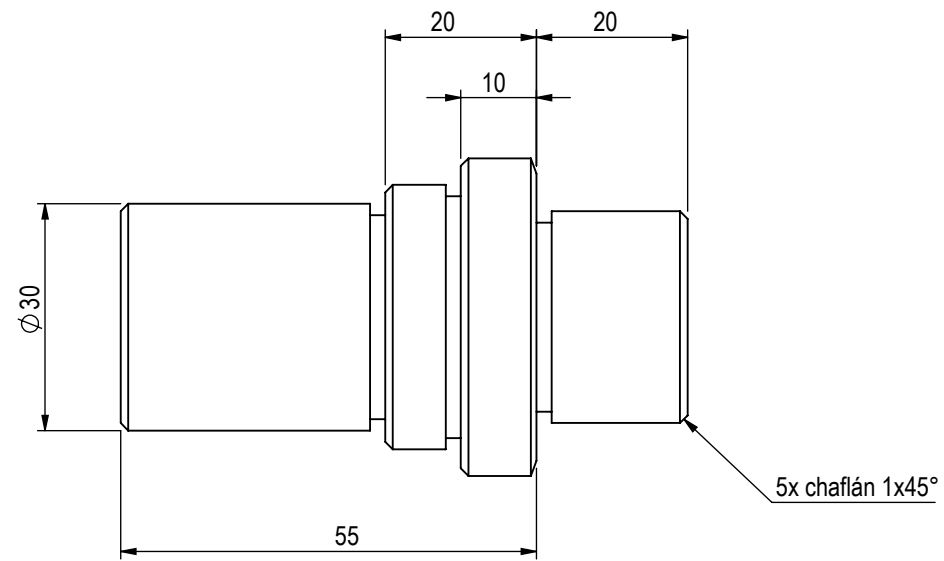
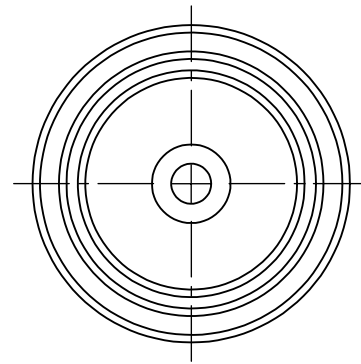
Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Ensamble:		Material	
	Ensamble de la flecha		AISI 9840	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__	
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión
	1:2	0.1 mm	mm	Emisión
				Plano
				18 de 21



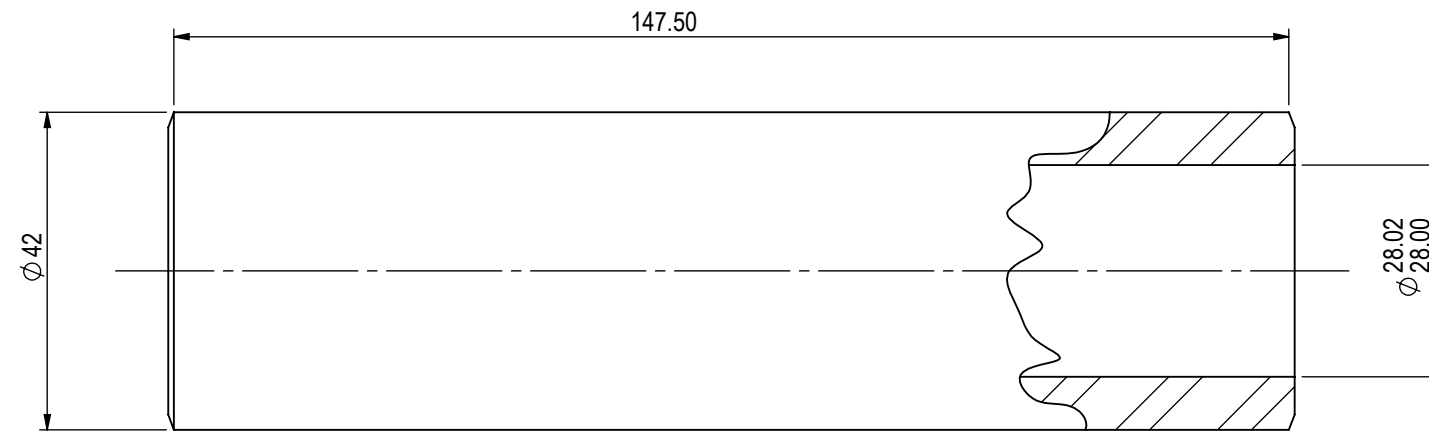
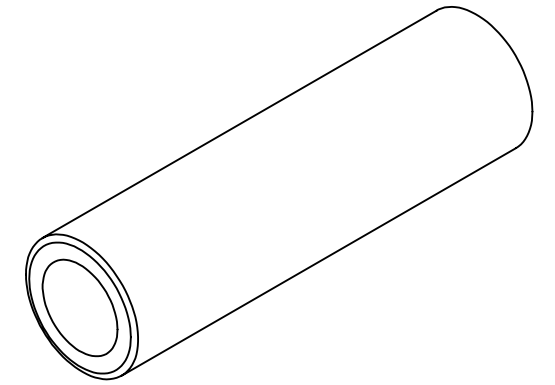
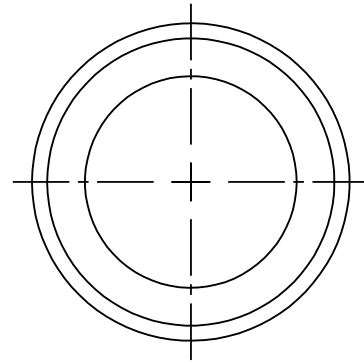
Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Pieza:		Material		
	Espiga derecha		AISI 9840		
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018		
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__		
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión	Plano
	1:1	0.1 mm	mm	Emisión	19 de 21



Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Pieza:		Material	
	Espiga izquierda		AISI 9840	
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018	
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__	
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión
	1:1	0.1 mm	mm	Plano
		Emisión	20 de 21	



Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes para aplicaciones de tracción

	Pieza:		Material		
	Eje hueco		AISI 9840		
	Dibujó:	Ing. Alfonso Arriaga Vigil	11/12/2018		
	Revisó:	Dr. Marcelo López Parra	__/__/__		
	Escala	Tolerancia	Unidades	Revisión	Plano
	1:1	0.1 mm	mm	Emisión	21 de 21

Lista de materiales y costos.

Elaboró:	Fecha :	 UAT - FI <small>Unidad de Alta Tecnología - Facultad de Ingeniería</small>	Proyecto:	
Alfonso A.V	15/01/2019		Motor eléctrico para tracción	
Autorizó:	Fecha:		LM-MET: Presupuesto general	
Marcelo L.P			Revisión:	Emisión
Firma:	Firma:	Hoja: 1 de 5		

#	Descripción	Subtotal	
	2 x Motor eléctrico síncrono de imanes permanentes, trifásico a 400V, potencia nominal de 50 kW, par nominal de 300 Nm, velocidad angular máxima de 6000 RPM, 8 polos.		
1	Materiales para maquinados y manufactura.	\$	70,956.40
	Productos comerciales de línea.	\$	64,391.16
	Servicios de manufactura	\$	207,005.00
Total			\$ 342,352.56

Elaboró:	Fecha :		Proyecto:	
Alfonso A.V	15/01/2019		Motor eléctrico para tracción	
Autorizó:	Fecha:		LM-MET: Maquinables-soldables	
Marcelo L.P			Revisión:	Emisión
Firma:	Firma:	Hoja: 2 de: 5		

#	C	U.M	Descripción	Precio Unitario	Subtotal
1	80	Kg	Lingote para fundición en aluminio 7075	\$ 294.32	\$ 23,545.60
2	15	Kg	Barra redonda de 101.6 mm en aluminio 6063	\$ 140.00	\$ 2,100.00
4	120	m	Lámina de 0.3 mm de espesor y 1.2 m de ancho en acero al silicio de grano no orientado M15	\$ 319.45	\$ 38,334.00
5	40	Kg	Barra redonda de Ø115 mm en acero aisi 9840	\$ 68.28	\$ 2,731.20
6	10	Kg	Barra redonda de Ø115 mm en acero aisi 9840	\$ 68.28	\$ 682.80
7	10	Kg	Barra hueca de Øext 46 mm Øint 24 mm en acero aisi 9840	\$ 68.28	\$ 682.80
8	10	Kg	Solera de 7.94 mm x 203.2 mm en acero inoxidable T304	\$ 288.00	\$ 2,880.00
				Subtotal	\$ 70,956.40

Elaboró:	Fecha :		Proyecto:	
Alfonso A.V	15/01/2019		Motor eléctrico para tracción	
Autorizó:	Fecha:		LM-MET: Productos de línea	
Marcelo L.P	(Pendiente)		Revisión:	Re: Emisión
Firma:	Firma:		Hoja: 3	de: 5

#	C	U.M	Marca y modelo	Descripción	Precio Unitario	Subtotal
1	6	piezas	Parker: 16 ELO-S	Conexión a 90° de 1' por lado, rosca de 1' 7/16 -12 y sello de empaque incluido.	\$ 526.79	\$ 3,160.74
2	4	metros	Parker	Tira para Oring de 3 mm de diámetro	\$ 1,358.00	\$ 5,432.00
4	3	piezas	TE Connectivity: 1-2141230-1	Conector macho de alto voltaje	\$ 2,306.47	\$ 6,919.41
5	3	piezas	TE Connectivity: 1-2141166-1	Conector macho de alto voltaje	\$ 2,306.47	\$ 6,919.41
6	3	piezas	TE Connectivity: HD34-18-14SN	Conector	\$ 513.73	\$ 1,541.19
7	3	piezas	SKF: e-Drive	Rodamiento para aplicaciones de tracción, diámetro exterior de 62 mm, diámetro interior de 30 mm y espesor de 16 mm	\$ 2,879.00	\$ 8,637.00
8	3	piezas	SKF: 30x50x8 CRW1 V	Sello mecánico radial para ejes	\$ 879.54	\$ 2,638.62
9	3	piezas	SKF: BMD-6206/064S2/UA008A	Unidad de rodamiento con encoder integrado	\$ 3,329.47	\$ 9,988.41
10	3	piezas	Wattlow: 23CJFUD10A	Termopar	\$ 1,230.00	\$ 3,690.00
11	200	piezas	Du Pont: Nomex	Aislante para ranuras del estator	\$ 27.50	\$ 5,500.00
12	200	piezas	Du Pont: Nomex	Aislante para separar bobinas del estator	\$ 13.15	\$ 2,630.00
13	3	rollo		Alambre magnético calibre 25 AWG para 200 °C	\$ 267.00	\$ 801.00
14	6	piezas	Fenner: T301042	Buje para transmisión de potencia	\$ 981.23	\$ 5,887.38
					Subtotal	\$ 63,745.16

Elaboró:	Fecha :		Proyecto:	
Alfonso A.V	11/11/2018		Motor eléctrico para tracción	
Autorizó:	Fecha:		LM-MET: Servicios	
Marcelo L.P	(Pendiente)		Revisión:	Re 0: Emisión
Firma:	Firma:	Hoja: 4 de 5		

#	C	U.M	Descripción	Precio Unitario	Subtotal
2		Lotes	Servicio de fundicion de piezas en aluminio 7075	\$ 21,789.62	\$ 43,579.24
1		Lote	Servicio de fabricación de moldes en impresión 3D	\$ 13,678.12	\$ 13,678.12
2		Lotes	Servicio de manufactura de piezas torneadas y fresadas	\$ 32,386.13	\$ 64,772.26
2		Lotes	Servicio de ensamblado de motor	\$ 15,698.37	\$ 31,396.74
1	2	Lotes	Corte, ensamble y tratamiento térmico de los núcleos laminados del estator y rotor	\$ 26,789.32	\$ 53,578.64
				Subtotal	\$ 207,005.00

Elaboró:	Fecha :		Proyecto:	
Alfonso A.V	11/11/2018		Motor eléctrico para tracción	
Autorizó:	Fecha:		LM-MET: Maquinables-soldables	
Marcelo L.P	(Pendiente)		Revisión:	Re 0: Emisión
Firma:	Firma:	Hoja: 5 de: 5		

#	C	U.M	Descripción	Precio Unitario	Subtotal
1	30	piezas	Tornillo de cabeza cilíndrica allen M16x2, 40 mm de largo en acero inoxidable, con arandela de presión y plana	\$ 4.70	\$ 141.00
2	50	piezas	Tornillo de cabeza cilíndrica allen M8x1.25, 16 mm de largo en acero inoxidable, con arandela de presión y plana	\$ 6.85	\$ 342.50
3	10		Tornillo de cabeza cilíndrica allen M10x1.5, 100 mm de largo en acero inoxidable, con arandela de presión y plana	\$ 9.40	\$ 94.00
4	10	piezas	Tornillo de cabeza cilíndrica allen M5x0.8, 20 mm de largo en acero inoxidable, con arandela de presión y plana	\$ 6.85	\$ 68.50
				Subtotal	\$ 646.00

Memoria de cálculo de los ajustes y tolerancias

Elaboró:	Fecha :	 UAT - FI <small>Unidad de Alta Tecnología - Facultad de Ingeniería</small>	Proyecto:	
Alfonso A.V	23/12/2018		Motor eléctrico para tracción	
Autorizó:	Fecha:		CAL-MET: Memoria de cálculo	
Marcelo L.P			Revisión:	Emisión
Firma:	Firma:	Hoja: 1 de 1		

Núcleo del estator y cuerpo de la estructura

Tipo de ajuste: Posicionamiento holgado para partes estacionarias

D/d	Δ	δ	máximo	mínimo
269 H7	0.052		0	269.052
h6	0.032		0	269
				268.968

Ajustes de interferencia

111 H7	0.035		0	111.035
k6	0.022		0.003	111.025
				111
				111.003

Alojamiento del rodamiento y rodamiento

Tipo de ajuste: Posicionamiento holgado para partes estacionarias

D/d	Δ	δ	máximo	mínimo
62 H7	0.03		0	62.03
31 k5	0.011		0.002	31.013
				31.011

Cubierta trasera

Tipo de ajuste: Posicionamiento holgado para partes estacionarias

D/d	Δ	δ	máximo	mínimo
110 H7	0.035		0	110.035
g6	0.022		-0.012	109.988
				109.966

Ensamble de las espigas de la flecha

Tipo de ajuste: Ajuste de interferencia

D/d	Δ	δ	máximo	mínimo
28 H7	0.021		0	28.021
s6	0.013		0.035	28.048
				28
				28.013

Código de los programas de Matlab-FEMM

Código para el análisis de la aplicación.

```

1 %% NTUA - UNAM
2 % Research Stay Autum 2018.
3 %%
4 % This script comprises the data of a electric vehicle and a drive cicle
5 % The aim of this script is to calculate the load for the electric motor
6
7 %% Environmental data in Mexico City.
8 den_aire=1.225; % Air density, (Kg/m^3).
9 vel_viento=14/3.6;% Average wind speed, ((Km/h)/3.6 ->(m/s)).
10 g=9.78; % Gravitational constant, (m/s^2).
11
12 %% Electric Vehicle specifications.
13
14 % Weights
15 m=1563.2; % Vehicle mass, (Kg).
16 W=m*g; % Vehicle weigth, (N).
17 NumPas=5; % Number of passengers.
18 WPas=80*g; % Average weigth of each passeger, (N)
19 WCargo=100*g; % Maximum cargo weigth, (N)
20 Wtot=W+NumPas*WPas+WCargo; % Maximum Total Weigth, (N)
21 Wfr=W*0.58; % Frontal weigth, (N).
22 Wtr=W*0.42; % Rear weigth, (N).
23
24 % External Dimensions.
25 av=1.48; % Vehicle height, (m).
26 ag=av/3; % Center of gravity of the vehicle, (m).
27 aviento=av/3; % Drag point Height, (m).
28 anv=1.695; %Ancho promedio del vehículo, (m).
29 lv=2.6; % wheelbase, (m).
30 af=av*anv*0.7; % Frontal average area, (m^2).
31 cd=0.28; % Drag coefficient.
32
33 % Tire and Wheel dimensions.
34 anlla=0.185; % Rim width. (m) (185/65R15)
35 asplla=65; % Aspect Ratio (%)
36 alla=anlla*(asplla/100); % Tire heigth, (m).
37 diarin=15*0.0254; % Rim diameter, (m).
38 dialla=2*alla+diarin; % Tire Diameter.
39 mlla=20; % Wheel Mass.
40
41 % Gearbox
42 it=5;
43 %% Drive Cycle
44 DriveCycleUDDS
45
46
47 %% Static Loads.
48
49 ltr=Wfr*lv/W; %Rear wheel-gravity center distance, (m).
50 lfr=Wtr*lv/W; %Front wheel-gravity center distance, (m).)
51
52
53 %% Traction Motor Carateristics (Based in Toyota Prius 2004)
54 ParNominal=400; % Peak Torque (Nm).
55 PotenciaNominal=50000; % Peak Power (W).
56 VelAngBase=PotenciaNominal/ParNominal; % Base Angular Speed (rad/s)
57 VelAngMax=6000*(pi/30); % Maximum Angular Speed (RPM*(pi/30))-> (rad/s)
58 et=0.95; % Mechanical Efficiency of the Power Train
59 VelAng=zeros;
60 Par=zeros;

```

```

61 VelLin=zeros;
62 FTracTren=zeros;
63
64 for i=1:1:round(VelAngMax)
65     VelAng(i)=i;
66     VelLin(i)=diapla/2* VelAng(i)/it;
67     %VelLin(i)=(diapla*VelAng(i))/(2*it);
68     if VelAng <= VelAngBase
69         Par(i)=ParNominal;
70
71     else
72         Par(i)=PotenciaNominal/VelAng(i);
73     end
74     FTracTren(i)=Par(i)*it*et/(diapla/2);
75
76 end
77
78 VelAngRPM=VelAng*(30/pi);
79
80 % Theoretical idealized torque-speed curve of the base design.
81
82 TP2004TorqueSpeed = figure('Name',...
83     'Theoretical Torque-Speed Curve for TP2004');
84 plot(VelAngRPM,Par,'LineWidth',2.0)
85 savefig('TorqueSpeedCurve.fig')
86
87 %% Dynamic Equations: Newton's Second Law.
88
89 LoadCurves = figure('Name',...
90     'Loads Curves for the powertrain');
91 plot(VelLin*3.6,FTracTren,'LineWidth',2.0,'Color',[0,0,0]);
92 hold on
93
94 Fviento=zeros;
95 Fzfr=zeros;
96 Fztr=zeros;
97 fr=zeros;
98 Ffrfr=zeros;
99 Ftrfr=zeros;
100 Ftraccion=zeros;
101
102 for j=0:5:30
103     % Grade Load.
104     grado=j;
105     theta=atan(grado/100);
106     Fpen=Wtot*sin(theta);
107
108
109     for i=1:1:cont
110         % Drag Force.
111         Fviento(i)=0.5*den_aire*af*cd*(Speed_UDDS_mps(i)+vel_viento)^2;
112         % Normal Front Force
113         Fzfr(i)=(-Fviento(i)*aviento-Fpen*ag-(Wtot/g)*Acceleration_UDDS_mps(i)
*ag+Wtot*cos(theta)*ltr)/lv;
114         % Normal Rear Force.
115         Fztr(i)=(Fviento(i)*aviento+Fpen*ag+(Wtot/g)*Acceleration_UDDS_mps(i)
*ag+Wtot*cos(theta)*lfr)/lv;
116         % Rolling Resistance.
117         fr(i)=0.01*(1+(Speed_UDDS_mps(i)/100));
118         Ffrfr(i)=Fzfr(i)*fr(i)*cos(theta);

```

```

119         Ftrfr(i)=Fztr(i)*fr(i)*cos(theta);
120         % Seconds Newton's Law
121         Ftraccion(i)=(Wtot/g)*Acceleration_UDDS_mps(i)+Fviento(i)+Fpen+Ftrfr(i) ✓
+Ffrfr(i);
122
123
124     end
125
126     RegresionPol=polyfit(Speed_UDDS_mps,Ftraccion',5);
127     VecVel=(0:1:120)/3.6;
128     Ftracc=polyval(RegresionPol,VecVel);
129     plot(VecVel*3.6,Ftracc,'LineWidth',1.3,'Color',[0,0,1])
130
131 end
132 savefig('PowerTrainPerformance.fig')
133
134 %% Electric Motor load
135 % Grade Load.
136     grado=8; % Selected grade for desing the motor.
137     theta=atan(grado/100);
138     Fpen=Wtot*sin(theta);
139
140
141 for i=1:1:cont
142     % Drag Force.
143     Fviento(i)=0.5*den_aire*af*cd*(Speed_UDDS_mps(i)+vel_viento)^2;
144     % Normal Front Force
145     Fzfr(i)=(-Fviento(i)*aviento-Fpen*ag-(Wtot/g)*Acceleration_UDDS_mps(i) ✓
*ag+Wtot*cos(theta)*lfr)/lv;
146     % Normal Rear Force.
147     Fztr(i)=(Fviento(i)*aviento+Fpen*ag+(Wtot/g)*Acceleration_UDDS_mps(i) ✓
*ag+Wtot*cos(theta)*lfr)/lv;
148     % Rolling Resistance.
149     fr(i)=0.01*(1+(Speed_UDDS_mps(i)/100));
150     Ffrfr(i)=Fzfr(i)*fr(i)*cos(theta);
151     Ftrfr(i)=Fztr(i)*fr(i)*cos(theta);
152     % Seconds Newton's Law
153     Ftraccion(i)=(Wtot/g)*Acceleration_UDDS_mps(i)+Fviento(i)+Fpen+Ftrfr(i)+Ffrfr ✓
(i);
154
155
156 end
157
158
159 ParCarga= Ftraccion*(dialla/2)/it;
160 MotorSpeed=Speed_UDDS_mps/(dialla/2)*it;
161 LoadPoints = figure('Name',...
162     'Operational Points of the Drive Cycle');
163 plot(VelAngRPM,Par,'LineWidth',2.0,'Color',[0,0,0]);
164 hold on
165 plot(MotorSpeed*30/pi,ParCarga,'o');
166
167 %% Getting the representative points of th Drive Cycle
168
169 MotorSpeedRPM=(MotorSpeed*30/pi)';
170 ith=3;
171 jth=3;
172 asil=VelAngMax*30/pi/ith;
173 paril=ParNominal/ith;
174 angarea=zeros;

```

```

175 pararea=zeros;
176 for jj=1:1:ith
177     angarea(jj+1)=0+jj*asil;
178 end
179 for jj=1:1:jth
180     pararea(jj+1)=0+jj*paril;
181 end
182 velang1a=zeros;
183 parla=zeros;
184 ila=1;
185 velang1b=zeros;
186 par1b=zeros;
187 ilb=1;
188 velang1c=zeros;
189 par1c=zeros;
190 ilc=1;
191 velang2a=zeros;
192 par2a=zeros;
193 i2a=1;
194 velang2b=zeros;
195 par2b=zeros;
196 i2b=1;
197 velang2c=zeros;
198 par2c=zeros;
199 i2c=1;
200 velang3a=zeros;
201 par3a=zeros;
202 i3a=1;
203 velang3b=zeros;
204 par3b=zeros;
205 i3b=1;
206 velang3c=zeros;
207 par3c=zeros;
208 i3c=1;
209
210 angvelsize=size(MotorSpeedRPM,2);
211 for ii=1:1:angvelsize
212     % First Range of speeds
213     if (MotorSpeedRPM(ii) >=angarea(1)) && (MotorSpeedRPM(ii) < angarea(2))
214         % First Range of Torques
215         if (ParCarga(ii) >=pararea(1)) && (ParCarga(ii) < pararea(2))
216             velang1a(ila)=MotorSpeedRPM(ii);
217             parla(ila)=ParCarga(ii);
218             ila=ila+1;
219         % Second Range of Torques
220         elseif (ParCarga(ii) >=pararea(2)) && (ParCarga(ii) < pararea(3))
221             velang1b(ilb)=MotorSpeedRPM(ii);
222             par1b(ilb)=ParCarga(ii);
223             ilb=ilb+1;
224         % Third Range of Torques
225         elseif (ParCarga(ii) >=pararea(3)) && (ParCarga(ii) <= pararea(4))
226             velang1c(ilc)=MotorSpeedRPM(ii);
227             par1c(ilc)=ParCarga(ii);
228             ilc=ilc+1;
229         end
230
231     % Second Range of speeds
232     elseif (MotorSpeedRPM(ii) >=angarea(2)) && (MotorSpeedRPM(ii) < angarea(3))
233
234         % First Range of Torques

```



```

235     if (ParCarga(ii) >=pararea(1)) && (ParCarga(ii)< pararea(2))
236         velang2a(i2a)=MotorSpeedRPM(ii);
237         par2a(i2a)=ParCarga(ii);
238         i2a=i2a+1;
239
240     % Second Range of Torques
241     elseif (ParCarga(ii) >=pararea(2)) && (ParCarga(ii)< pararea(3))
242         velang2b(i2b)=MotorSpeedRPM(ii);
243         par2b(i2b)=ParCarga(ii);
244         i2b=i2b+1;
245
246     % Third Range of Torques
247     elseif (ParCarga(ii) >=pararea(3)) && (ParCarga(ii)<= pararea(4))
248         velang2c(i2c)=MotorSpeedRPM(ii);
249         par2c(i2c)=ParCarga(ii);
250         i2c=i2c+1;
251     end
252 % Third Range of speeds
253 elseif (MotorSpeedRPM(ii) >=angarea(3)) && (MotorSpeedRPM(ii)<= angarea(4))
254
255     % First Range of Torques
256     if (ParCarga(ii) >=pararea(1)) && (ParCarga(ii)< pararea(2))
257         velang3a(i3a)=MotorSpeedRPM(ii);
258         par3a(i3a)=ParCarga(ii);
259         i3a=i3a+1;
260
261     % Second Range of Torques
262     elseif (ParCarga(ii) >=pararea(2)) && (ParCarga(ii)< pararea(3))
263         velang3b(i3b)=MotorSpeedRPM(ii);
264         par1b(i3b)=ParCarga(ii);
265         i3b=i3b+1;
266
267     % Third Range of Torques
268     elseif (ParCarga(ii) >=pararea(3)) && (ParCarga(ii)<= pararea(4))
269         velang3c(i3c)=MotorSpeedRPM(ii);
270         par3c(i3c)=ParCarga(ii);
271         i3c=i3c+1;
272     end
273
274     end
275 end
276 %% Equivalent Representative Points
277
278 % Torque
279 Teq1a=sum(par1a)/size(par1a,2);
280 Teq1b=sum(par1b)/size(par1b,2);
281 Teq1c=sum(par1c)/size(par1c,2);
282
283 Teq2a=sum(par2a)/size(par2a,2);
284 Teq2b=sum(par2b)/size(par2b,2);
285 Teq2c=sum(par2c)/size(par2c,2);
286
287 Teq3a=sum(par3a)/size(par3a,2);
288 Teq3b=sum(par3b)/size(par3b,2);
289 Teq3c=sum(par3c)/size(par3c,2);
290
291 % Angular Speed
292 weq1a=sum(velang1a)/size(velang1a,2);
293 weq1b=sum(velang1b)/size(velang1b,2);
294 weq1c=sum(velang1c)/size(velang1c,2);

```

```

295
296 weq2a=sum(velang2a)/size(velang2a,2);
297 weq2b=sum(velang2b)/size(velang2b,2);
298 weq2c=sum(velang2c)/size(velang2c,2);
299
300 weq3a=sum(velang3a)/size(velang3a,2);
301 weq3b=sum(velang3b)/size(velang3b,2);
302 weq3c=sum(velang3c)/size(velang3c,2);
303
304 % Weight Coefficient
305
306 wc1a=ila/angvelsize;
307 wc1b=ilb/angvelsize;
308 wc1c=ilc/angvelsize;
309
310 wc2a=ila/angvelsize;
311 wc2b=ilb/angvelsize;
312 wc2c=ilc/angvelsize;
313
314 wc3a=ila/angvelsize;
315 wc3b=ilb/angvelsize;
316 wc3c=ilc/angvelsize;
317
318
319 %Matrix forms
320 TeqM=[Teq1a, Teq2a, Teq3a; Teq1b, Teq2b, Teq3b; Teq1c, Teq2c, Teq3c];
321 weqM=[weq1a, weq2a, weq3a; weq2b, weq2b, weq3b; weq1c, weq2c, weq3c];
322 wcM=[wc1a, wc2a, wc3a; wc1b, wc2b, wc3b; wc1c, wc2c, wc3c];
323
324 TqUDDS=[Teq1a, Teq2a, Teq3a, Teq1b, Teq2b, Teq3b, Teq1c, Teq2c, Teq3c];
325 SpeedUDDS=[weq1a, weq2a, weq3a, weq2b, weq2b, weq3b, weq1c, weq2c, weq3c];
326 WeightCoeffUDD=[wc1a, wc2a, wc3a, wc1b, wc2b, wc3b, wc1c, wc2c, wc3c];
327
328
329
330
331

```

```

1 %%                                UNAM-NTUA                                %%
2 % Título: Prueba a rotor bloqueado.
3 % Descripción: Con este código se realiza una secuencia de cálculos
4 % por medio del método de elementos finitos en FEMM. La simulación
5 % corresponde a la prueba a rotor bloqueado.
6 %%
7 % Autor: Alfonso Arriaga Vigil Fecha: 15-10-2018
8 %%
9 Imax=350;                        %Amplitud máxima de la corriente trifásica aplicada.
10 dA= 50;                          %Paso incremental de la corriente.
11 Im=zeros;                         %Inicialización del vector de amplitud.
12 Tqmax=zeros;                      %Inicialización del vector de par máximo.
13 angmax=zeros;                    %Inicialización del vector ángulo máximo.
14 dAng=40;                          %Paso incremental de los ángulos eléctricos.
15 omega_deg=0:9:360;
16 omega=omega_deg*(pi/180);
17 SizeOmega=size(omega);
18 NIteration=SizeOmega(2);
19 TorqueAngle=figure('Name',...
20     'Ángulo de Par para diferentes corrientes');
21 hold on
22 for j=1:1:Imax/dA
23     Im(j)=j*dA;                    %Amplitud de la corriente(A)
24     Ia=Im(j)*sin(omega);          %Corriente de la fase A
25     Ib=Im(j)*sin(omega+2*pi/3);  %Corriente de la fase B
26     Ic=Im(j)*sin(omega-2*pi/3);  %Corriente de la fase C
27     %% FEMM
28     openfemm;
29     opendocument('TP2004-1P-SL-SB.fem');
30     mi_saveas('TP2004-1P-SL-SBtemp.fem')
31     Tq=zeros;
32     for i=1:1:NIteration
33         mi_setcurrent('A+',Ia(i));
34         mi_setcurrent('B-',-Ib(i));
35         mi_setcurrent('C+',Ic(i));
36         mi_analyze();
37         mi_loadsolution;
38         Tq(i)=mo_gapintegral('apag',0);
39     end
40     closefemm;
41     %Identificando el Par máximo
42     Tqmax(j)=max(Tq);
43     for i=1:1:size(Tq,2)
44         if Tq(i)==Tqmax
45             angmax(j)=omega(j)*180/pi;
46         end
47     end
48     plot(omega*180/pi,Tq)
49     disp('Iteration:')
50     disp(j)
51     disp('de:')
52     disp(Imax/dA)
53 end
54 delete('TP2004-1P-SL-SBtemp.fem');
55 delete('TP2004-1P-SL-SBtemp.ans');
56 %Análisis de la corriente y par máximo.
57 TorCurr=polyfit(Im,Tqmax,1);
58 CurCurr = polyval(TorCurr,Im);
59 figure
60 plot(Im,Tqmax,'o')

```

```
61 hold on
62 plot (Im, CurCurr)
63 hold off
64 IMCurve=polyfit (Tqmax, Im, 1);
65
```

```

1 %% Core Loss Calculation Script
2
3 % David Meeker
4 % dmeeke@ieee.org
5 % AGE version 18Feb2017
6
7 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
8 %% Start User-Defined Parameters
9 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
10
11 % Model Name
12 % MyModel = 'TP2004-1P-SL-SB.fem'; % Uncommet if runs alone
13
14 % base frequency in Hz
15 wbase=1500/60; %(4000 rev/minute)*(minute/(60*seconds))
16
17 % range of speeds over which to evaluate losses
18 SpeedMin = 100; % in RPM
19 SpeedMax = 6000; % in RPM
20 SpeedStep = 100; % in RPM
21
22 % Winding properties
23 MyIdCurrent = 0; % direct current in phase current amplitude scaling
24 MyIqCurrent = 50; % quadrature current phase current amplitude scaling
25 MyLowestHarmonic = 2; % lowest numbered harmonic present in the stator winding
26 AWG=22; % Magnet wire gauge used in winding
27 WindingFill=0.3882;
28 PhaseResistance = 0.223*2.333; % phase resistance including end turns at 20 degC
29 TemperatureRise = 100; % temperature increase, degrees C
30
31 % Magnet properties
32 RotorMagnets = 1;
33 NumberPoles=8;
34 omag = 0.556*10^6; % conductivity of sintered NdFeB in S/m
35
36 % Core properties
37 ce = 0.530; % Eddy current coefficient in (Watt/(meter^3 * T^2 * Hz^2))
38 ch = 143.; % Hysteresis coefficient in (Watts/(meter^3 * T^2 * Hz))
39 cs = 0.95; % Lamination stacking factor (nondimensional)
40
41 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
42 %% End User-Defined Parameters
43 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
44
45 % helpful unit definitions
46 PI=pi; Pi=pi;
47 deg=Pi/180.;
48
49 % angle through which to spin the rotor in degrees
50 n = 360/MyLowestHarmonic;
51
52 % angle increment in degrees
53 dk = 20;
54
55 % A similar loss/volume expression can be derived to compute proximity
56 % effect losses in the windings. Use the low frequency approximation
57 % from the paper, since in this case, wire size is a lot smaller than skin
58 % depth at the frequencies of interest.
59
60 % Get parameters for proximity effect loss computation for phase windings

```

```

61 dwire=0.324861*0.0254*exp(-0.115942*AWG); % wire diameter in meters as a function
of AWG
62 owire = (58.*10^6)/(1+TemperatureRise*0.004); % conductivity of the wire in S/m at
prescribed deltaT
63 cePhase = (Pi^2/8)*dwire^2*WindingFill*owire;
64
65 %% Perform a series of finite element analyses
66
67 openfemm(1);
68 opendocument([MotorModel '.fem']);
69 mi_smartmesh(0); % use relatively coarse mesh to save time
70
71 mi_saveas([MotorModel 'temp.fem']);
72
73 % Run an analysis through an entire spin of the rotor and record
74 % element centroid flux density and vector potential (using the mesh from the
first iteration)
75 % at every step. This information will then be used to estimate
76 % core losses
77 for kk = 1:round(n/dk)
78     starttime=clock;
79     k=(kk-1)*dk; % rotor angle in degrees
80
81     % Set the rotor angle to the correct angle for this iteration
82     % Since the model uses an "air gap element", the rotor position is set by
83     % modifying a parameter indicated rotor position in the air gap element
84     % boundary definition
85     mi_modifyboundprop('apag',10,k);
86
87     % make sure that the current is set to the appropriate value for this
iteration.
88     tta = (NumberPoles/2)*k*deg;
89     Id = [cos(tta), cos(tta-2*pi/3), cos(tta+2*pi/3)];
90     Iq = -[sin(tta), sin(tta-2*pi/3), sin(tta+2*pi/3)];
91     Itot = MyIdCurrent*Id + MyIqCurrent*Iq;
92     mi_setcurrent('A+', Itot(1));
93     mi_setcurrent('C+', Itot(3));
94     mi_setcurrent('B-', -Itot(2));
95
96
97
98     mi_analyze(1);
99     mi_loadsolution;
100     mo_smooth('off'); % flux smoothing algorithm is off
101     if (k == 0)
102         % Record the initial mesh elements if the first time through the loop
103         nn = mo_numelements;
104         b = zeros(floor(n/dk),nn); % matrix that will hold the flux density info
105         A = zeros(floor(n/dk),nn); % matrix that will hold the vector potential
info
106         z = zeros(nn,1); % Location of the centroid of each element
107         a = zeros(nn,1); % Area of each element
108         g = zeros(nn,1); % Block label of each element
109         tq = zeros(floor(n/dk),1);
110         for m = 1:nn
111             elm = mo_getelement(m);
112             % z is a vector of complex numbers that represents the location of
113             % the centroid of each element.
114             z(m) = elm(4) + 1j*elm(5);
115             % element area in the length units used to draw the geometry

```

```

116         a(m) = elm(6);
117         % group number associated with the element
118         g(m) = elm(7);
119     end
120 end
121
122 % Store element flux densities *)
123 u=exp(1j*k*pi/180.);
124 for m = 1:nn
125     if(g(m)>10)
126         % Element is in a rotor magnet, marked with group numbers 11 and
higher
127         % Store vector potential at the element centroid for elements that are
in PMs
128         A(kk,m) = mo_geta(real(z(m)),imag(z(m)));
129     elseif (g(m) > 0)
130         % Element is on the stator or rotor iron
131         % Store flux density at the element centroid for these elements
132         b(kk,m) = (mo_getb(real(z(m)),imag(z(m)))*[1;1j]);
133     end
134 end
135
136 % mo_getprobleminfo returns, among other things, the depth of the
137 % machine in the into-the-page direction and the length units used to
138 % draw the geometry. Both of these pieces of information will be needed
139 % to integrate the losses over the volume of the machine.
140 probinfo=mo_getprobleminfo;
141
142 % compute torque
143 tq(kk)=mo_gapintegral('apag',0);
144 mo_close;
145
146 fprintf('% i of % i :: %f seconds :: %f N*m \n',k,n,etime(clock,starttime),tq
(kk));
147 end
148
149 % clean up after finite element runs are finished
150 closefemm;
151 delete([MotorModel 'temp.fem']);
152 delete([MotorModel 'temp.ans']);
153
154 %% Add Up Core Losses
155
156 % Compute the square of the amplitude of each harmonic at the centroid of
157 % each element in the mesh. Matlab's built-in FFT function makes this easy.
158 ns=n/dk;
159 bxfft=abs(fft(real(b)))*(2/ns);
160 byfft=abs(fft(imag(b)))*(2/ns);
161 bsq=(bxfft.*bxfft) + (byfft.*byfft);
162
163 % Compute the volume of each element in units of meter^3
164 h = probinfo(3); % Length of the machine in the into-the-page direction
165 lengthunits = probinfo(4); % Length of drawing unit in meters
166 v = a*h*lengthunits^2;
167
168 % compute fft of A at the center of each element
169 Jm=fft(A)*(2/ns);
170 for k=1:RotorMagnets
171     g3=(g==(10+k));
172     % total volume of the magnet under consideration;

```

```

173     vmag=v'*g3;
174     % average current in the magnet for each harmonic
175     Jo=(Jm*(v.*g3))/vmag;
176     % subtract averages off of each each element in the magnet
177     Jm = Jm - Jo*g3';
178 end
179
180 Iphase=sqrt(MyIdCurrent^2+MyIqCurrent^2)/sqrt(2);
181 PhaseOhmic = 3*(PhaseResistance*(1+TemperatureRise*0.004))*Iphase^2;
182
183 results=[];
184
185 for thisSpeed=SpeedMin:SpeedStep:SpeedMax
186
187     thisFrequency = thisSpeed/60; % mechanical speed in Hz
188
189     % Make a vector representing the frequency associated with each harmonic
190     % The last half of the entries are zeroed out so that we don't count each
191     % harmonic twice--the upper half of the FFT a mirror of the lower half
192     w=0:(ns-1);
193     w=MyLowestHarmonic*thisFrequency*w.*(w<(ns/2));
194
195     % Now, total core loss can be computed in one fell swoop...
196     % Dividing the result by cs corrects for the lamination stacking factor
197     g1=(g==10);
198     rotor_loss =8* ((ch*w+ce*w.*w)*bsq*(v.*g1))/cs;
199
200     g2=(g==1);
201     stator_loss =8*((ch*w+ce*w.*w)*bsq*(v.*g2))/cs;
202
203     % and prox losses can be totalled up in a similar way
204     g4=(g==2);
205     prox_loss = 8*((cePhase*w.*w)*bsq*(v.*g4));
206
207     % Add up eddy current losses in the magnets
208     magnet_loss = 8*(1/2)*((omag*(2*pi*w).^2)*(abs(Jm).^2)*v);
209
210     total_loss = rotor_loss + stator_loss + prox_loss + PhaseOhmic + magnet_loss;
211
212     results = [results; thisSpeed, rotor_loss, stator_loss, magnet_loss,
PhaseOhmic, prox_loss, total_loss];
213 end
214
215 % save('c:\\temp\\myLossData.m','results','-ASCII');
216
217 %% Loss plot
218 MotorLossesSpecificLoad= figure('Name',...
219     'Motor Losses at Specific Load');
220 plot(results(:,1),results(:,2:7));
221 xlabel('Speed, RPM');
222 ylabel('Total Losses, Watts');
223 title('Loss versus Speed');
224 legend('Rotor Core','Stator Core','Magnets','Coil Ohmic','Coil Proximity','Total
Loss','Location','northwest');
225 savefig(['MotorLossesSpecificLoad' num2str(mod) '.fig'])
226
227 % %% Torque plot
228 % plot(0:dk:(n-1),tq);
229 % xlabel('Rotor Angle, Degrees');
230 % ylabel('Torque, N*m');

```



```

231 % title('Torque on Rotor vs. Angle');
232
233 % %% Plot of heating
234 %
235 % wbase=4000/60; %(4000 rev/minute)*(minute/(60*seconds))
236 % w=0:(ns-1);
237 % w=MyLowestHarmonic*wbase*w.*(w<(ns/2));
238 %
239 % % Rotor loss
240 % g1=(g==10);
241 % ptloss = (transpose ((ch*w+ce*w.*w)*bsq).*g1)/cs;
242 %
243 % % Stator loss
244 % g2=(g==1);
245 % ptloss = ptloss + (transpose ((ch*w+ce*w.*w)*bsq).*g2)/cs;
246 %
247 % % Prox loss
248 % g4=(g==2);
249 % ptloss = ptloss + (transpose ((cePhase*w.*w)*bsq).*g4);
250 %
251 % % PM contribution
252 % ptloss = ptloss + ((1/2)*(omag*(2*pi*w).^2)*(abs(Jm).^2))';
253 %
254 % %% point location in z
255 % heating = [real(z),imag(z),ptloss];
256 % save('c:\\temp\\myLossData.txt','heating','-ASCII');
257
258

```

Bibliografía

Bernard Adkins and Ronald G Harley. *The general theory of alternating current machines: Application to practical problems*. Halsted Press, Hoboken, New Jersey, primera edición, 1975.

Ansys. *Electric Machines Design Toolkit Customized Solutions*. Ansys, 1 edición, 2019.

Ferdinand P Beer, E Ruseell Johnston, and Jhon T DeWolf. *Mecánica de materiales*. McGraw-Hill Interamericana, Edificio Punta Santa Fe Prolongación Paseo de la Reforma Núm 1015, Torre A Mexico, cuarta edición, 2006.

Allan Bonnick and Dereck Newbold. *Motor Vehicle Engineering and Maintenance*. El Servier, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 30 Corporate Drive, Burlington, MA 01803, segunda edición, 2005.

Nigel Burton. *A history of electric cars*. The Crowood Press Ltd, primera edición, 2013. ISBN 978 1 84797 571 3.

Enrico Carraro, Mattia Morandin, and Nicola Bianchi. Optimization of a traction pmasr motor according to a given driving cycle. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*, 2014.

C.C. Chan and K.T. Chau. *Modern Electric Vehicle Tecnology*. Oxford University Press, Great Clarendon Street, Oxford OX2 6DP, first edición, 2001.

Stephen J Chapman. *Máquinas Eléctricas*. McGraw-Hill Interamericana, Punta Santa Fe, Prolongación Paseo de la Reforma 1015 Torre A, Colonia Desarrollo Santa Fe, C.P 01376, México D.F, cuarta edición, 2005.

University Cornell. A hands-on introduction to engineering simulations. 2018.

Linh Dang, Nicolas Bernand, Nicolas Bracikowski, and Gérard Berthiau. Design optimization with flux weakening of high-speed pmsm for electrical vehicle considering the driving cycle. *IEEE, Transactions on Industrial Electronics*, 64:9834–9843, 2017.

Emad Dlala. Comparison of models for estimating magnetic core losses in electrical machines using the finite-element method. *IEEE, Transactions in on Magnetics*, 45:716–726, 2009.

- N. Donovan. *Andrew L. Riker and the Electric Car: A Biography of the Young Riker*. McPherson College Press, 2003. ISBN 9780974643700.
- Mehrdad Ehsani, Sebastien E Gao, Yiminand Gay, and Ali Emadi. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press Taylor Francis Group LLC, Group6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, primera edition, 2005.
- Ali Emadi. *Advanced Electric Drive Vehicles*. CRC Press Taylor Francis Group LLC, Group6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, primera edition, 2014.
- EPA. Dynamometer drive schedules. 2019. URL <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>.
- Thomas D Gillespie. *Fundamentals of vehicle dynamics*. Society of Automotive Engineers, Inc, 400 Commonwealth Drive Warrendale, PA 15096-0001, segunda edition, 2000.
- GM. Gm electric vehicles. 2018. URL https://www.gmheritagecenter.com/featured/Electric_Vehicles.html.
- Vembu Gourishankar. *Conversión de energía Electromecánica*. The haddon Craftsmen, Inc, Scranton, Penna, U.S.A., first edition, 1969.
- Michael Harpster. Chevrolet bolt drive unit motor deep dive. *2018 SAE Hybrid and Electric Vehicle Technologies Symposium*, 2018.
- IEA. Global ev outlook 2018. towards cross-modal electrification. *International Energy Agency*, 1:141, 2018.
- David Meeker. Rotating losses in a surface mount permanent magnet motor. 2017. URL <http://www.femm.info/wiki/SPMLoss>.
- M Melaina and J Eichman. Evaluation of 2005 honda accord hubrid electric drive system. Technical Report NREL/TP-5400-62518, National Renewable Energy Laboratory (NREL), febrero 2015.
- John M Miller. *Propulsion Systems for Hybrid Vehicles*. The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, primera edition, 2004.
- Faizul Momen, Khwaja Rahman, Yochan Son, and Peter Savagian. Electrical propulsion system design of chevrolet bolt battery electric vehicle. *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2017:8, 2016.
- Tomoki Nakata, Masayuki Sanada, Shigeo Mirimoto, and Yukinori Inoue. Automatic design of ipmsms using a genetic algorithm combined with the coarse-mesh fem for enlarging the high-efficiency operation area. *IEEE, Transactions in Industrial Electronics*, 64:9721–9728, 2017.

- Nissan. Nissan zero emission. 2018. URL <https://www.nissan-global.com/EN/ZEROEMISSION/STORYBOARD/EV/>.
- Mitch Olszewski. Evaluation of 2004 toyota prius hybrid electric drive system. Technical Report ORNL/TM-2006/423, Oak Ridge National Laboratory, mayo 2005.
- Mitch Olszewski. Evaluation of 2005 honda accord hybrid electric drive system. Technical Report ORNL/TM-2006/535, Oak Ridge National Laboratory, septiembre 2006.
- Chee-Mun Ong. *Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey 07458, primera edición, 1998.
- Burak Ozpineci. Oak ridge national laboratory annual progress report for the electric drive technologies program. Technical Report 2ORNL/SR-2016/640, Oak Ridge National Laboratory, octubre 2016.
- Edward M Purcell and David J Morin. *Electricity and Magnetism*. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK, third edition, 2013.
- Juha Pyrhönen, Tapani Jokinen, and Valéria Hrabovcova. *Design of Rotating Electrical Machines*. John Wiley Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, primera edición, 2008.
- Kaushik Rajashekara. History of electric vehicles in general motors. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 30:897–904, 1994.
- Jordi-Roger Riba, Carlos López-Torres, Luís Romeral, and Antoni Garcia. Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: a technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57:367–379, 2016.
- Marius Rosu, Ping Zhou, Dingsheng Lin, Dan Ionel, Popescu Mircea, Frede Blaabjerg, Vandana Rallabandi, and David Staton. *Multiphysics simulation by design for electrical machines, power electronics, and drives*. John Wiley and Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, primera edición, 2018.
- SKF. *Rolling bearings*. SKF Group, 2018.
- David Staton. Electric machine design for automotive applications. *Low Carbon Vehicle Event*, 1:23, 2016.
- David Staton and James Goss. Open source electric motors models for commercial ev and hybrid traction motors. *Motor Design Ltd*, 1:89, 2017.
- Yifan Tang. Induction motor with improved torque density, June 6 2010. URL <https://patents.google.com/patent/US7741750B1>. US Patent US 7,741,750 B1.
- Hamid A Toliyat and Gerald B Kliman. *Handbook of Electric Motors*. CRC Press, 600 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, segunda edición, 2004.

Wei Tong. *Mechanical Design of Electric Motors*. CRC Press, 600 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, first edition, 2014.

Yinye Yang, Sandra M Castano, Rong Yang, Michael Kasprzak, Beker Bilgin, Anand Sathyan, Hossein Dadkhah, and Ali Emadi. Design and comparison of interior permanent magnet motor topologies for traction applications. *IEEE TRANSACTIONS ON TRANSPORTATION ELECTRIFICATION*, 3:86–97, 2017.

Murat Yilmaz. Limitations/capabilities of electric machine technologies and modeling approaches for electric motor design and analysis in plug-in electric vehicles applications. *El Servier*, 52:80–99, 2015.