



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería – Programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería
Mención Ingeniería Eléctrica.

DISEÑO Y ESCALAMIENTO DE MOTOR DE IMANES PERMANENTES
INTERIOR PARA APLICACIONES EN TRACCIÓN DE VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS

POR: HELMUT ALEXIS CONTRERAS NOVOA

Tesis para optar al grado académico de Magíster en Ciencias de la Ingeniería
Mención Ingeniería Eléctrica

Profesor Guía: Juan Antonio Tapia Ladino
Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

Concepción, Chile 2022



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y ESCALAMIENTO DE MOTOR DE IMANES PERMANENTES
INTERIOR PARA APLICACIONES EN TRACCIÓN DE VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS**

POR: HELMUT ALEXIS CONTRERAS NOVOA

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al grado académico de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención
Ingeniería Eléctrica

Noviembre 2022
Concepción, Chile

Profesor Guía: Dr. Juan Antonio Tapia Ladino

Comisión: Dr. José Espinoza
Dr. Aníbal Valenzuela
Dr. Werner Jara



© 2021, Helmut Alexis Contreras Novoa

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Resumen

En la actualidad se observa un proceso de electrificación en los medios de transporte, con gran crecimiento en vehículos particulares, de transporte público y de carga. Lograr mayor comprensión de las características y comportamiento de las máquinas eléctricas rotatorias usadas en aplicaciones de tracción, es un tema de interés. Este asunto cobra especial relevancia debido a la mayor conciencia en relación a los efectos de la contaminación generada por los combustibles fósiles y la incidencia de estos en el calentamiento global, la cual se intenta detener mediante políticas de estado tendientes a lograr mayor eficiencia y menores emisiones en el corto y mediano plazo.

El objetivo principal de esta tesis, es presentar una metodología analítica de escalamiento de motor eléctrico, a partir de un diseño de referencia, ajustado a los requerimientos de los vehículos completamente eléctricos. La validación de los resultados se realizará a través de software de elementos finitos, contrastando el modelo escalado con el de referencia.

Para lograr el objetivo planteado, se realiza una revisión bibliográfica de artículos científicos, en los que se muestra la evolución de las máquinas eléctricas de uso en tracción, destacando las ventajas y desventajas de una tecnología frente a las otras, con el fin de establecer las características, tecnología y topología más adecuada para estas aplicaciones.

Establecido el tipo de máquina más adecuado, se determinan los parámetros para efectuar un diseño. Desde el punto de vista de dimensionamiento y geometría, se utiliza una técnica que utiliza ecuaciones para coeficiente de salida D^3L . Esta técnica de diseño es usada, debido a que hacer frente de mejor forma a las exigencias de las aplicaciones de electromovilidad exhibidas anteriormente. Desde el punto del devanado de la máquina, se utiliza un procedimiento basado en la teoría de estrella de ranuras. Sobre la máquina diseñada, se determinan las expresiones que describirán su escalamiento, para finalmente aplicar estas expresiones ajustando el diseño base a nuevos requerimientos en forma rápida y sencilla, validando los resultados mediante la comparación de las densidades de flujo magnéticos del modelo de referencia y el modelo escalado, utilizando software de elementos finitos.

Agradecimientos

A Dios, que me ha sostenido en mis debilidades.

A mí querida esposa Leticia, por la comprensión en estos años de intenso trabajo y estudio, con innumerables ocasiones en las que resté tiempo a ella y mis hijas Isidora y Florencia, para hacer frente a este perfeccionamiento y a las demandantes actividades como docente y jefe de carrera.



Índice General

| | |
|---|-----------|
| Resumen..... | iv |
| Lista de tablas..... | ix |
| Lista de figuras..... | x |
| Nomenclatura..... | xiii |
| Abreviaciones..... | xv |
| Introducción..... | 1 |
| Introducción general..... | 1 |
| Hipótesis..... | 3 |
| Objetivos..... | 3 |
| Objetivo general..... | 3 |
| Objetivos específicos..... | 3 |
| Metodología..... | 5 |
| Alcances..... | 5 |
| Restricciones..... | 6 |
| Recursos..... | 7 |
| Capítulo 2. Máquinas eléctricas usadas en tracción | 8 |
| 2.1. Introducción a las máquinas eléctricas usadas en tracción..... | 8 |
| 2.2. Motores de corriente directa..... | 8 |
| 2.3. Motores asíncronos o de inducción..... | 9 |
| 2.4. Motores síncronos..... | 10 |
| 2.5. Especificaciones de los motores eléctricos para uso en tracción..... | 14 |
| Capítulo 3. Revisión bibliográfica | 16 |
| 3.1. Máquinas eléctricas usadas en tracción..... | 16 |
| 3.1.1. Importancia de abordar la temática de la tracción eléctrica..... | 16 |
| 3.2. Motores usados en unidades HEV y EV en general..... | 18 |
| 3.2.1. Motor asíncrono de inducción (IM)..... | 20 |
| 3.2.2. Motor síncrono de imanes permanentes (PMSM)..... | 22 |
| 3.2.3. Motor de reluctancia (RM)..... | 31 |
| 3.2.3.1 Motor de síncrono de reluctancia (SynRM)..... | 32 |
| 3.2.3.2 Motor de reluctancia conmutada (SRM)..... | 33 |

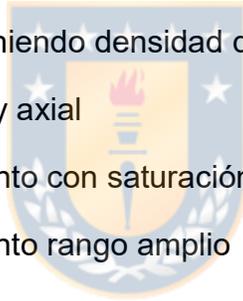
| | |
|---|-----------|
| 3.2.4. Motor PMA-SynRM..... | 36 |
| 3.3. Vehículos de pasajeros y de carga..... | 41 |
| 3.3.1. Motores usados en autobuses y camiones HEV/EV..... | 41 |
| 3.3.2. Fabricantes chinos..... | 43 |
| 3.3.3. Fabricantes coreanos..... | 48 |
| 3.3.4. Fabricantes europeos..... | 49 |
| 3.3.5. Fabricantes norte americanos..... | 49 |
| 3.3.6. Fabricantes sudamericanos..... | 50 |
| 3.4. Discusión del análisis bibliográfico..... | 51 |
| 3.5. Artículos de escalamiento de motores eléctricos..... | 53 |
| 3.6. Características y comportamiento de los IPMSM..... | 55 |
| 3.6.1. Comportamiento y modelo de régimen permanente de motor IPM..... | 59 |
| 3.6.2. Argumentos de la elección de la máquina eléctrica..... | 63 |
| Capítulo 4. Relaciones analíticas en el diseño de máquinas eléctricas | 65 |
| 4.1. Relaciones analíticas en diseño óptimo para coeficiente D^3L | 66 |
| 4.1.1. Relaciones geométricas..... | 66 |
| 4.1.2. Carga magnética..... | 67 |
| 4.2. Diseño máquina eléctrica..... | 72 |
| 4.2.1. Motores usado vehículos eléctricos comerciales..... | 73 |
| 4.2.2. Diseño del estator del motor..... | 74 |
| 4.2.3. Calcular el óptimo D_{se}/D_s que maximiza los V_{Agap} (S_{gap})..... | 76 |
| 4.3. Devanados en máquinas eléctricas..... | 79 |
| 4.3.1. Diseño de devanado para un motor de imanes permanentes..... | 83 |
| 4.4. Metodología de cálculo de devanados..... | 89 |
| 4.5. Topologías de rotor..... | 92 |
| 4.5.1. Comportamiento magneto estático..... | 95 |
| 4.6. Conclusiones del diseño de máquina de referencia..... | 97 |
| Capítulo 5. Escalamiento de máquinas eléctricas | 98 |
| 5.1. Introducción..... | 98 |
| 5.2. Leyes generales de escalamiento..... | 99 |
| 5.2.1. Escalamiento geométrico..... | 101 |

| | |
|--|------------|
| Capítulo 6. Análisis de elementos finitos | 106 |
| 6.1. Escalamiento en aumento de dimensiones..... | 106 |
| 6.1.1. Escalamiento en aumento de dimensión radial..... | 106 |
| 6.1.2. Escalamiento en reducción de dimensión radial..... | 111 |
| 6.2. Escalamiento manteniendo la densidad de corriente..... | 115 |
| 6.2.1. Escalamiento en aumento de dimensión radial..... | 115 |
| 6.2.2. Escalamiento en reducción de dimensión radial..... | 116 |
| 6.3. Escalamiento axial de la máquina..... | 117 |
| 6.4. Escalamiento radial y axial de la máquina..... | 118 |
| 6.5. Escalamiento con saturación magnética..... | 118 |
| 6.6. Análisis de desempeño..... | 121 |
| 6.6.1. Limitaciones en el uso del escalamiento geométrico..... | 121 |
| 6.6.2. Escalamiento manteniendo tensión de alimentación..... | 123 |
| Capítulo 7. Conclusiones | 125 |
| Bibliografía..... | 128 |



Lista de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 3.1. Propiedades físicas de materiales usado en PM | 23 |
| Tabla 3.2. Características buses Dongfeng | 44 |
| Tabla 3.3. Características impulsores BYD | 44 |
| Tabla 3.4. Características buses eléctricos BYD | 46 |
| Tabla 3.5. Características camiones eléctricos BYD | 47 |
| Tabla 3.6. Características de motores usados en buses BYD | 48 |
| Tabla 3.7. Especificaciones bus eléctrico coreano | 49 |
| Tabla 4.1. Información distintos fabricantes de vehículos eléctricos | 73 |
| Tabla 4.2. Resumen diseño D ³ L | 78 |
| Tabla 6.1. escalamiento manteniendo carga eléctrica | 115 |
| Tabla 6.2. escalamiento manteniendo densidad de corriente | 116 |
| Tabla 6.3. Escalamiento radial y axial | 118 |
| Tabla 6.4. Resumen escalamiento con saturación | 120 |
| Tabla 6.5. Resumen escalamiento rango amplio | 121 |



Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Características par-velocidad máquinas (IM), (SR), (SPM) y (IPM). | 14 |
| Figura 3.1. Taxonomía de motores de AC. | 18 |
| Figura 3.2. Perfil de velocidad bus de la línea 85 en Gotemburgo. | 20 |
| Figura 3.3. Características de IM con la velocidad. | 21 |
| Figura 3.4. Rueda motor - OHV diésel-eléctrico de General Electric. | 22 |
| Figura 3.5. Motor SPM con imanes y funda de retención. | 26 |
| Figura 3.6 Detalle de SPM con imanes y funda de retención. | 26 |
| Figura 3.7. Forma de onda de corriente para 10KHz. | 27 |
| Figura 3.8. Espectro rizado de corriente para 10 KHz. | 27 |
| Figura 3.9. Motores IM, IPM y SPM. | 27 |
| Figura 3.10. Ejemplo de especificaciones para un EV. | 28 |
| Figura 3.11. Curvas de potencia de diferentes motores en estudio. | 30 |
| Figura 3.12 a. Historial de precios de tierras raras de neodimio y Dysprosium. | 32 |
| Figura 3.12 b. Costo de materiales para un motor de uso en tracción de 30kW. | 32 |
| Figura 3.13 Algunas configuraciones típicas de SynRM. | 34 |
| Figura 3.14. Laminación transversal PMA-SynRM. | 36 |
| Figura 3.15. Geometría PMA-SynRM y ajes $d - q$. | 37 |
| Figura 3.16. Propuesta de estructura 8 polos PMA-SynRM. | 38 |
| Figura 3.17. Prototipos del rotor interno PMA-SynRM y modelos FEA. | 39 |
| Figura 3.18. Prototipos de rotor exterior PMA-SynRM y sus modelos FEA. | 39 |
| Figura 3.19. Comparación de resultados de simulación. | 40 |
| Figura 3.20. PMA-SynRM, FI-PMA-SynRM | 40 |
| Figura 3.21. Oferta buses eléctricos Dongfeng Motor Corporation. | 44 |
| Figura 3.22. Configuración transmisión directa y convencional. | 45 |
| Figura 3.23. Montaje motores BYD sin diferencial. | 45 |
| Figura 3.24. Montaje de Motor BYD. | 46 |
| Figura 3.25. Buses fabricado por BYD. | 47 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.26. Camiones fabricados por BYD. | 47 |
| Figura 3.27 Buse eléctricos Hyundai. | 48 |
| Figura 3.28. Topologías alternativas de máquinas PM con imanes en el rotor. | 55 |
| Figura 3.29. Disposiciones de PM en rotores de máquinas IPM. | 56 |
| Figura 3.30. Distintas configuraciones de rotor de IPM. | 57 |
| Figura 3.31. Topología de roto IPM e SPM ejes cuadratura y directo. | 58 |
| Figura 3.32. Diagrama fasorial IPM. | 60 |
| Figura 4.1. Sección de laminación de estator con ranura trapezoidal. | 67 |
| Figura 4.2. Diseño 48 ranuras, 8 polos, estrés tangencial 40KPa. | 78 |
| Figura 4.4. Clasificación de Devanados de Estator. | 80 |
| Figura 4.5. Conexiones típicas de devanados concentrados y distribuidos. | 81 |
| Figura 4.6. Estrella de ranuras para máquina trifásica con devanado doble capa. | 85 |
| Figura 4.7. Estrella de fasores con detalle de bobinas por polo por fase. | 87 |
| Figura 4.8. Bobinado para estator creado con software Dolomites. | 88 |
| Figura 4.9. Diseño de estator y devanados. | 91 |
| Figura 4.10. Densidad de flujo en el entrehierro rotor macizo. | 92 |
| Figura 4.11. Topologías de rotor de motores de imanes permanentes. | 93 |
| Figura 4.12. Tendencia de diseño de motor síncrono de imán permanente interior. | 93 |
| Figura 4.13. Comparación del volumen del imán del rotor. | 94 |
| Figura 4.14. Rotores de máquinas de imanes permanentes. | 95 |
| Figura 4.15. Diseño de máquina referencia. | 96 |
| Figura 4.16. Par respecto ángulo eléctrico máquina de referencia. | 96 |
| Figura 5.1. Escalamiento radial y axial. | 100 |
| Figura 5.2. Variación lineal de dimensiones con factor k_R en el caso de escalamiento radial. | 100 |
| Figura 6.1. Máquina de referencia. | 107 |
| Figura 6.2. Máquina de escalada con factor $k_R = 1,414$. | 108 |
| Figura 6.3. Densidad de flujo en el entrehierro máquina referencia. | 109 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.4. Densidad de flujo en el entrehierro máquina escalada $k_R = 1,414$. | 109 |
| Figura 6.5. Densidad de flujo en el yugo máquina referencia. | 110 |
| Figura 6.6 Densidad de flujo en el yugo máquina escalada $k_R = 1,414$. | 110 |
| Figura 6.7. Densidad de flujo en dientes de máquina de referencia. | 110 |
| Figura 6.8. Densidad de flujo en dientes de máquina escalada $k_R = 1,414$. | 111 |
| Figura 6.9. Máquina de escalada con factor $k_R = 0,707$. | 111 |
| Figura 6.10. Densidad de flujo entrehierro para escalamiento $k_R 0,707$. | 112 |
| Figura 6.11 Densidad de flujo en el yugo máquina escalada $k_R 0,707$. | 112 |
| Figura 6.12. Densidad de flujo en dientes de máquina escalada $k_R 0,707$. | 113 |
| Figura 6.13. Densidad de flujo entrehierro máquinas base y escaladas. | 113 |
| Figura 6.14. Máquinas base y escaladas. | 114 |
| Figura 6.15. Curvas de torque para máquina de referencia y escaladas. | 115 |
| Figura 6.16. Densidad de flujo entrehierro para escalamiento $k_A 0,5$. | 117 |
| Figura 6.17. Curvas de torque para máquina de referencia y escaladas $k_A = 0,5$. | 117 |
| Figura 6.18. Curva B-H material M-22 Steel. (94) | 119 |
| Figura 6.19. Gráfica de densidad de flujo entrehierro máquinas saturada referencia y escaladas | 120 |
| Figura 6.20. Gráfica de densidad de flujo dientes máquinas saturada referencia y escaladas. | 120 |

Nomenclatura

Vectores

- A : Vector potencial magnético [T/m].
- B : Densidad de flujo magnético [T].
- E : Intensidad de campo eléctrico [V/m].
- H : Intensidad de campo magnético [A/m].
- J : Densidad de corriente [A/m²].
- r : Radio [mm]
- T : Par [Nm]

Diseño óptimo de máquinas eléctricas.

- \hat{B}_g : Densidad máxima de flujo en el entrehierro [T]
- \hat{A}_s : Densidad máxima de corriente lineal [A/m]
- σ_{Ftan} : Estrés tangencial [KPa]
- B_{ts} : Densidad de flujo diente del estator [T]
- B_{cs} : Densidad de flujo yugo del estator [T]
- G_{ts} : Carga magnética en diente de estator
- G_{cs} : Carga magnética en yugo de estator
- Φ_p : Flujo por polo
- N_s : Número de conductores por ranura
- P : Número de pares de polos
- p : Número de polos
- Q_s : Número total de ranuras de estator
- f_s : Frecuencia [Hz]
- I_{rms} : Corriente rms de estator [A]
- \hat{I}_{ph} : Corriente máxima por fase [A]
- J_{rms} : Densidad de corriente rms de estator [A/mm²]
- D_{is} : Diámetro interior del estator [mm]
- D_{os} : Diámetro exterior del estator [mm]
- D_{or} : Diámetro exterior del rotor [mm]
- D_{ir} : Diámetro interior del rotor [mm]
- k_{is} : Factor de apilamiento de laminación
- k_p : Factor de forma de onda de potencia
- k_i : Factor de forma de onda de corriente
- k_w : Factor de bobinado
- L_s : Longitud activa del apilamiento de estator [mm]
- t_s : Ancho de diente de estator [mm]
- d_{cs} : Profundidad del yugo [mm]
- d_s : Altura del diente de estator [mm]
- d_{os} : Altura inferior del diente de estator [mm]
- A_r : Área aproximada de la ranura trapezoidal [mm²]
- b_2 : Ancho superior de la ranura de estator [mm]
- b_1 : Ancho inferior de la ranura de estator [mm]

Escalares

- F_{Total} : Fuerza magneto motriz de excitación [A-vuelta].
- I_{fase} : Corriente de fase [A_{rms}].
- I_{mag} : Corriente de magnetización [A_{rms}].
- T_d : Par electromagnético medio [Nm].
- d_{Cu} : Diámetro de un conductor de cobre [m].
- k_C : Factor de Carter.
- k_d : Factor de distribución.
- k_p : Factor de acortamiento.
- k_w : Factor de devanado.
- k_R : Factor de escala radial.
- k_A : Factor de escala axial.
- τ_u : Paso de bobina.
- τ_p : Paso polar.
- τ : Largo de paso polar [m].
- τ_s : Largo de paso de ranura [m].
- J : Densidad de corriente volumétrica [A/m^2].
- K : Densidad de corriente superficial [A/m].
- N : Número de vueltas por fase.
- P : Número de pares de polos.
- f : Frecuencia [Hz].
- m : Número de fases.
- p : Número de polos.
- q : Número de ranuras por fase y por polo.
- Φ : Flujo por polo [Wb].
- μ : Permeabilidad [H/m].
- ρ : Resistividad [Ωm].
- σ : Conductividad [S/m].
- ω : Frecuencia angular eléctrica [$\frac{rad}{s}$]



Abreviaciones

- DoE : United States Department of Energy
- ICE : Internal combustion engine
- IM : Induction Motor
- PM : Permanent magnet
- PMSM : Permanent magnet synchronous motor
- SPM : Surface permanent magnets
- SPMSM : Surface permanent magnet synchronous motor
- IPM : Internal permanent magnet
- IPMSM : Internal permanent magnet synchronous motor
- SynRM : Synchronous reluctance motor
- PMa-SynRM : Permanent magnet assisted synchronous reluctance motor
- SRM : Switched reluctance motor
- HEV : Hybrid electric vehicle
- CFD : Computational Fluid Dynamics
- FEA : Finite element analysis
- LPTN : Lumped parameter thermal network
- UCG : Uncontrolled generator
- CPSR : Constant Power Speed Range
- HEVs : Hybrid electric vehicles
- AEVs : All-electric vehicles
- EVs: : Electric vehicles
- EMI : Electromagnetic interference
- FW : Flux-weakening

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

Debido a los efectos negativos de las altas concentraciones de CO₂ en la atmósfera, es que en el mundo se han generado políticas de reducción de este tipo de emisiones. Gran parte del CO₂ generado por los seres humanos proviene de los medios de transporte de combustión interna [1], por lo que, el uso de vehículos de bajas o nulas emisiones y energéticamente eficientes, junto a la sustitución de las fuentes de generación de energía eléctrica contaminantes, son acciones que permiten lograr la reducción descrita y corresponde a uno de los elementos que motivan el desarrollo de este trabajo.

Actualmente se observa una migración de tecnología de combustión interna a eléctrica en motores empleados en la tracción o propulsión de vehículos, buscando reducción de emisiones y aumento de eficiencia energética [2].

La primera parte de este trabajo se centra en definir el tipo de máquina más adecuada, estableciendo las características que debe poseer, para el uso en aplicaciones de tracción de vehículos completamente eléctricos. Se pone especial atención a las aplicaciones de mayor potencia, como es el caso, de las usadas en transporte público de pasajeros, las que tienen prioridad en las estrategias energética a nivel mundial y nacional.

Tras la definición anterior, se realiza un diseño de máquinas eléctricas, buscando dimensiones y geometría óptima, alta eficiencia, confiabilidad y bajo costo. Los puntos descritos para el diseño, son relevantes, especialmente al considerar

producciones masivas de vehículos eléctricos, donde el uso intensivo, en el mediano y largo plazo, evidenciaran superioridades de algunos diseños respecto a otros. La propensión a fallas, es otro punto que se evidenciará con el tiempo, por lo que, el logro de un diseño consolidado, logrado en varias iteraciones, pasa hacer algo complejo.

En la actualidad, algo que caracteriza la demanda de productos es la personalización de estos, la que puede ser por preferencias personales o por requerimientos específicos de las aplicaciones, por lo que, la posibilidad de extrapolar resultados de un diseño de máquina eléctrica consolidado, para hacer frente a nuevos requerimientos, es algo altamente deseable. Bajo este contexto, contar con una herramienta que permita rediseñar a partir de un modelo consolidado, sin la necesidad de demandantes herramientas de software especializados, resulta algo altamente útil.

1.2. Hipótesis

Mediante el uso de las relaciones de dimensionamiento que determinan la dependencia de las variables eléctricas, magnéticas y mecánicas de una máquina eléctrica, es posible desarrollar una metodología que permita escalar el diseño de un motor en rango adecuado para aplicaciones en tracción de vehículos eléctricos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Proponer una metodología analítica que permita escalar el diseño de una máquina eléctrica sincrónica de imanes permanentes, para el uso en aplicaciones de tracción de vehículos eléctricos.



1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar el tipo de máquina eléctrica rotatoria más adecuado, para el uso en aplicaciones de tracción de vehículos eléctricos (EV), a través de una revisión del estado del arte en la literatura especializada, en cuanto al diseño y tecnologías de estos equipos.
- Establecer los requerimientos específicos de las máquinas eléctricas aplicadas a tracción de EV.
- Diseñar una máquina eléctrica, empleando ecuaciones con coeficiente de salida D^3L , que responda a los requerimientos de operación en vehículos de tracción eléctrica.

- Escalar una máquina eléctrica con características apropiadas para aplicaciones en electro movilidad, mediante el uso de expresiones analíticas derivadas de las leyes de escalamiento geométrico.
- Validar metodología analítica de escalamiento a través de la comparación del diseño base y escalado, usando software de elementos finitos (FEA).

1.4. Propuesta en publicaciones

- IEEE Transactions on Vehicular Technology.
- IEEE Transaction on Magnetics.



1.5. Metodología y Alcances

1.5.1. Metodología

- El trabajo se realizará mediante la revisión de artículos científicos y textos especializados, que permitan determinar los requerimientos y características de las máquinas usadas en aplicaciones de tracción eléctrica, con el fin de determinar particularidades tales como tecnología y topología.
- Establecida las características, se procede a la aplicación de las ecuaciones de dimensionamiento con coeficientes de salida D^3L . para el diseño de la máquina eléctrica que responda a los requerimientos investigados previamente, logrando un modelo de referencia, el cual se someterá a un proceso de escalamiento, aplicando las expresiones obtenidas del escalamiento geométrico.
- Los resultados se evalúan comparando el modelo de referencia, diseñado para aplicaciones de electro movilidad, y el modelo escalado a partir de este, haciendo uso de software especializado de elementos finitos FEA, tales como: FEMM 4.2, junto a Matlab en cálculos en general.

1.5.2. Alcance

- Presentar las expresiones analíticas características de la máquina síncrona de imanes permanentes, a partir de las cuales se definen las relaciones de escalamiento geométrico, para lograr una comparación de modelo de referencia y escalado mediante software especializado de elementos finitos FEA, a partir de un diseño óptimo de máquina eléctrica orientado a las aplicaciones de electro movilidad.

1.6. Restricciones

- Se mantendrá la misma velocidad nominal de la máquina de referencia en la escalada.
- Se mantendrán los niveles de saturación magnética de máquina de referencia y escalada.
- Se mantendrá la tensión nominal de máquina de referencia y escalada.
- Tendrán características geométricas similar la máquina de referencia y escalada.
- Se considera flujo térmico similares de máquina de referencia y escalada.
- Pérdidas mecánicas por fricción y resistencia al aire de ventilación no serán consideradas.



1.7. Recursos

- Computador con capacidades que permitan el uso de software de elementos finitos FEMM 2D versión 4.2 y versión actualizada de Matlab.
- Software de elementos finitos FEMM 2D versión 4.2.
- Licencia de software de elemento Matlab.
- Acceso a página web de la IEEE para descarga de artículos científicos relacionados con el tema.
- Acceso a literatura especializada en el diseño de máquinas eléctricas rotativas.



Capítulo 2. Máquinas eléctricas usadas en tracción

2.1. Introducción a las máquinas eléctricas usadas en tracción

Existe abundante material referente a los tipos de máquinas eléctricas rotatorias, o también denominados motores eléctricos, usados en tracción, pero en general existen cuatro grandes grupos, comenzando con los motores de corriente directa o continua que incorporan imanes permanentes (PM), tal es caso de los motores de corriente directa sin escobillas (Brushless DC Motors - BLDC), los que se pueden observar en aplicaciones de tracción de pequeños vehículos tales como carros de golf o motocicletas de baja potencia. En general los motores de uso más extendido, en aplicaciones de tracción de mayor envergadura, son los asíncronos y sincrónicos de corriente alterna (AC).

A continuación, se introduce al tema de los motores eléctricos usados en tracción.

2.2. Motores de corriente directa

El motor de corriente directa (Motor DC) funcionan generando campos electromagnéticos estáticos, normalmente en el estator y conmutando bobinas en el rotor alimentadas con corriente continua. Ejemplos de estos motores son:

- Motores DC de estator y rotor bobinado. El rotor es conmutado por un sistema de colector que incluye delgas y escobillas, conjunto que permite transmitir la energía eléctrica hacia las bobinas del rotor, para generar en este un campo electromagnético que interactúa con el generado en las bobinas del estator.

- Motores DC con imanes permanentes en el estator, mientras que el rotor está bobinado. En estos, también el rotor es conmutado por un sistema de colector, delgas y escobillas, pero el campo magnético en el estator es generado por imanes permanentes.
- Motores DC sin escobillas llamados también “Brushless o Brushless DC Motors – BLDC”, que cuenta con imanes permanentes en el rotor y con bobinas de estator conectadas a un accionamiento electrónico, que hace las veces de un conmutador de estado sólido, normalmente de forma de onda de tensión trapezoidal.

Preferentemente la tecnología BLDC, continúa avanzando, pero en aplicaciones de tracción de baja potencia, las que difieren de las abordadas en este estudio.

2.3. Motores asíncronos o de inducción

Los motores asíncronos o de inducción (IM), son motores que funcionan con AC y que se caracterizan por girar a velocidades levemente inferiores a la velocidad sincrónica, la que está determinada por la frecuencia de corriente eléctrica que circula por los bobinados y, el número de polos del estator y la carga a la cual se encuentra operando. El rotor constituido por materiales conductores es inducido por el campo del estator y genera un campo magnético que intenta seguir el campo giratorio del estator. Se encuentran dos clases principales de esta familia de motores:

- Motores de inducción con rotor de jaula de ardilla, cuyo rotor está formado por barras metálicas cortocircuitadas por anillos de corto circuito. Existen diferentes tipos de jaula, dependiendo del funcionamiento que se espere del motor,

haciendo un motor más resistivo o más inductivo, o formando el rotor por dos jaulas de ardilla de diferentes características, llamado rotor de doble jaula de ardilla.

- Motores de inducción de rotor devanado, en vez de barras, presentan devanados cortocircuitados. Este rotor aventaja al de jaula de ardilla en una mayor flexibilidad de funcionamiento ya que pueden ser modificadas las características del rotor mediante la adición de resistencias al bobinado cortocircuitado a través de anillos deslizantes, modificando así su curva de trabajo.

El uso de estos motores está ampliamente extendido en la industria. Son motores robustos, relativamente económicos y con buen rendimiento que permiten un muy buen funcionamiento especialmente en altas velocidades de rotación. En aplicaciones de tracción, presentan algunos inconvenientes como un tamaño mayor, menor eficiencia, menor densidad de par y bajo factor de potencia que los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM) [3][4].

2.4. Motores Síncronos

Se caracterizan por funcionar a velocidades síncronas. El estator genera un campo magnético que gira a una velocidad síncrona, tal como haría en un motor de inducción. El rotor o bien se basa en la generación de un campo magnético estático o bien en la atracción por diferencia de reluctancia o por ambos. Los motores síncronos, asimismo se podrían subdividir entre motores con imanes permanentes y motores sin imanes. Esta subdivisión de motores responde a motivos tanto de funcionamiento y diseño (uso principal de reluctancia o de campo magnético) como

económicos, resaltando el encarecimiento y escasez de los imanes tierras raras [5][6].

Algunos motores síncronos con imanes son de imanes superficiales e interiores [7]:

- Motores Síncronos de Imanes Permanentes Superficiales (SPMSM) o simplemente (SPM), que solo utilizan el campo del imán y no la reluctancia. Las diferencias entre motores de este tipo radican principalmente en la geometría de los imanes, planos o redondeado.
- Motores Síncronos de Imanes Permanentes Interiores (IPMSM) o simplemente (IPM), aprovecha el fenómeno de la reluctancia, como también, del campo magnético del imán. Se encuentra una variedad de configuraciones en la topología del rotor, de acuerdo a la posición de los imanes y el intento de aprovechar la reluctancia geométrica del rotor. También se recurre a esta clase de motores para intentar minimizar el uso de imanes permanentes en el rotor y concentrar flujo magnético en las chapas. Existen geometrías con imanes situados en V, o perpendiculares al radio, entre otras.
- Motores de Reluctancia Síncrona Asistidos por Imanes Permanentes (PMA-SynRM), son motores de reluctancia síncrona que completan las barreras magnéticas con imanes permanentes, normalmente con inyección de polvo de imán en una matriz polimérica termoplástica, llamados también "Bonded Magnets" (PM-assisted synchronous reluctance - PMAREL) [8], que gracias a su baja permeabilidad magnética permiten conservar la saliencia y añadir flujo magnético para obtener más par mecánico.

Algunos motores síncronos sin imanes son:

- Motores síncronos de anillos deslizantes, el rotor es alimentado por corriente continua a través de un sistema de anillos deslizantes que permiten generar en este un campo electromagnético estático. Este método permite controlar la intensidad de campo también en el rotor, pudiendo ejecutar técnicas de debilitamiento de campo desde el rotor. Puede ser de polos lisos o salientes, dependiendo de si su diseño intenta aprovechar la reluctancia o no.
- Motores Síncrono de Reluctancia Conmutada (SRM), en concepto son como un paso a paso (stepper) de reluctancia variable, estos motores aprovechan únicamente la reluctancia debida a la geometría del rotor. Son económicos, pero requieren un estator con bobinados concentrados y alimentado en corriente continua.
- Motor Síncrono de Reluctancia (SynRM), estos motores aprovechan solamente la reluctancia [9] y se caracterizan porque las bobinas del estator, que pueden ser alimentadas sinusoidalmente, o por ondas con modulación de anchura de pulsos (Pulse Width Modulation - PWM). Esto se consigue mediante la disposición estratégica de las barreras (zonas de material con permeabilidad magnética baja) y los portadores (zonas de material con permeabilidad magnética alta), consiguiendo niveles de saliencia aún más altos que en los SRM. Estos motores requieren estrategias y sistemas de arranque, debido a que por simple conexión a la fuente de alimentación no es posible, así que no es poco común añadirles una jaula de ardilla en el rotor para ayudar en el arranque de estos motores.

Es amplia la gama de uso de estos motores. Es posible encontrar IPM, en la mayoría de las aplicaciones de PMSM, por ejemplo, vehículos como el Toyota Prius, Honda Accord, Nissan Leaf, BMW i3. También motores SynRM como es el caso del Renault ZOE.

Los objetivos del Departamento de Energía de los Estados Unidos DoE, para el 2025 presentan grandes exigencias en cuanto a la densidad de potencias de los motores, pasando de 6kW/L a 33kW/L, para un motor de 100kW, que en la actualidad sólo son logrados por los modelos BMW i3 y Honda Accord, los cuales incorporan IPM, con tensiones del accionamiento de 650V y velocidades de rotación máximas que alcanzan 17.000 rpm [10]

En la figura 2.1. Se puede apreciar las características de par-velocidad de diferentes motores usados en vehículos eléctricos, a través de una superposición de las regiones de operación para máquinas de inducción (IM), máquinas de reluctancia (SR), máquinas de imán permanente montado en superficie (SPM) y máquinas de imán permanente interior (IPM).

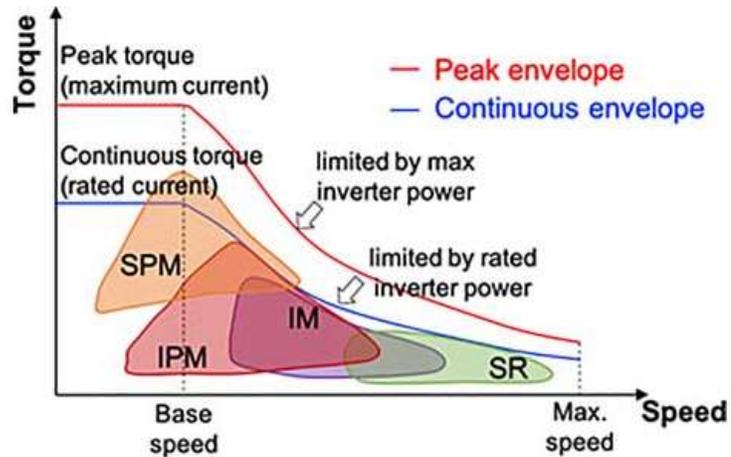


Figura 2.1. Características de par-velocidad para máquinas usadas en vehículos eléctricos. [11]



2.5. Especificaciones de los motores eléctricos para uso en tracción

Se debe tener en consideración que, en la actualidad los vehículos eléctricos presentan limitaciones en su autonomía. Por lo tanto, la academia junto a la industria automotriz, están realizando importantes esfuerzos de investigación con el propósito de aumentar progresivamente la densidad de energía de la batería, la reducción en el tiempo carga y la mejora en la eficiencia del conjunto de potencia eléctrica. Debido a que la máquina eléctrica es la principal contribuyente a la pérdida de energía del conjunto motriz en sistemas acoplados directamente a las ruedas, donde no intervienen reductores mecánicos, las mejoras en diseño juegan un papel preponderante, donde la definición de las especificaciones y requisitos deseables, ha sido abordada en términos de densidad de potencia, eficiencia a lo largo de los

ciclos de conducción y costo, de acuerdo con los objetivos establecidos por las hojas de ruta de las principales agencias gubernamentales.

- Centro de Propulsión Avanzado (APC) del Reino Unido.
- Departamento de Energía de los Estados Unidos (DoE)
- Consejo Asesor Europeo de Investigación del Transporte por Carretera (ERTRAC)
- Gobierno de China.

En general las características deseables en los motores son:

- Alta capacidad de par a baja velocidad y en subida con pendientes.
- Rango de potencia constante de 3 – 4 veces la velocidad base.
- Alta eficiencia en un amplio rango de operación.
- Capacidad de sobrecarga intermitente.
- Alta potencia específica para reducción de masa del EV.
- Alta densidad de potencia.
- Bajo costo.

Capítulo 3. Revisión bibliográfica

3.1. Máquinas eléctricas usadas en tracción

3.1.1. Importancia de abordar la temática de la tracción eléctrica

Existen dos elementos a tener en consideración al momento de abordar la temática de la movilidad, el primero es la eficiencia y el segundo es la generación de emisiones de efecto invernadero. Si se considera que un tercio del consumo energético de Chile corresponde a transporte [1], lograr aumentos en la eficiencia genera gran beneficio en la reducción de consumo de energía a nivel nacional, lo que, a su vez implica reducción de emisiones de CO₂, considerando que la matriz energética de Chile tiene una fuerte componentes de centrales térmicas a carbón, que significan aproximadamente el 38% de la generación nacional el 2022 [12]. En el contexto global esta situación se mantiene, según la Agencia Internacional de Energía AIE (2019) estimó que el 2018 el carbón, petróleo y gas natural generaron un 38%, 23% y 4% respectivamente, de energía a nivel mundial.

Reforzando los elementos a tener en cuenta, que hacen importante abordar la temática de la movilidad y que comprueban el interés mundial en aumento de eficiencia y consecuentemente la reducción de emisiones, en [10] se menciona el papel importante en el establecimiento de objetivos agresivos impuestos por el DoE, en su hoja de ruta para el 2025, en relación a los estándares de rendimiento de las unidades híbridas y eléctricas de última generación.

En la actualidad, la alternativa de mayor eficiencia y bajas o nulas emisiones es el uso de máquinas eléctricas en tracción de vehículos. En particular, las máquinas que

presenta las mejores prestaciones, en éstas aplicaciones, son las PMSM, consideradas de alto rendimiento y alta eficiencia IE4 o Súper Premium, de acuerdo a la clasificación de la Comisión Electrotécnica Internacional IEC 60034-30 o Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos NEMA respectivamente. En la categoría de Eficiencia Premium o IE3, se encuentran los SynRM y los IM. Si bien, los PMSM son los que logran mayor eficiencia, estos enfrentan un gran desafío en relación a la tecnología usada en su fabricación, debido a la escasez de minerales usados en la composición de los PM, por lo que, la sustentabilidad de estos motores, depende del mínimo uso de materiales de tierras raras, tales como el boro, hierro y neodimio (NdFeB), los cuales aumentaron su valor en un 70% los últimos años [6]. A través de nuevos diseños, es posible reducir el uso de materiales de tierras raras, con imanes más pequeños o con uso de imanes cerámicos, logrando un convenio entre el tamaño reducido del motor, alto par y alta potencia.

3.2. Motores usados en unidades HEV y EV en General

En la literatura se mencionan con mayor frecuencia los siguientes motores de uso en aplicaciones de tracción: Motor asincrónico de inducción (IM), motor síncrono de imanes permanentes (PMSM), motor síncrono de reluctancia (SynRM), motor síncrono de reluctancia asistidas por imanes permanentes (PMA-SynRM), motor síncrono de polos salientes (SYNC) [6][14]. Dentro de los motores mencionados los PMSM y PMA-SynRM de alta velocidad de rotación son tratados en varios artículos y revisados con mayor detalle más adelante.

En general podemos clasificar los motores eléctricos en la siguiente taxonomía Figura 3.1. (extraída desde la referencia [15] capítulo 6).

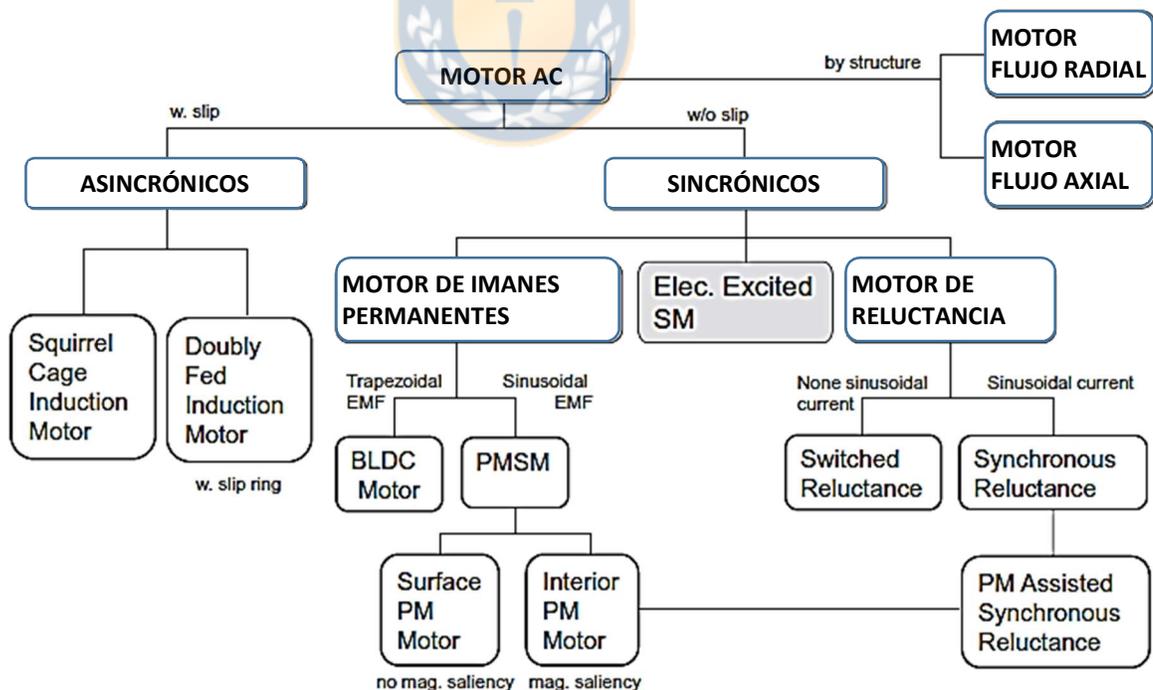


Figura. 3.1. Taxonomía de motores de AC. [15] Capítulo 6.

Los motores para uso en tracción difieren significativamente de los diseños para uso industrial. En aplicaciones de tracción, el tema crítico es el ciclo de carga en lugar del punto de operación nominal de estado estacionario. La velocidad del motor fluctúa en el rango de cero a altas velocidades, varias veces por sobre la nominal, en un corto lapso de tiempo. En el arranque y en bajas velocidades el motor se somete a gran carga inercial, por lo que la demanda de par, así también como la corriente requerida desde el convertidor y baterías, para lograr la densidad de par necesaria, son claves [6].

En aplicaciones de tracción, el diseño del motor requerido es determinado por el par de arranque y el rango de velocidad de operación. Es interesante notar que un motor de tracción normalmente debería ser capaz de lograr al menos 2 a 3 veces el par nominal en el arranque. En el ejemplo del autobús presentado en [16], el par máximo requerido es aproximadamente 3 a 4 veces el par nominal. En el mismo artículo, se muestra un ejemplo de los datos disponibles sobre el perfil de velocidad de un autobús de la línea 85 en Gotemburgo Suecia, en operación normal durante un lapso de tiempo superior a una hora, lo que es extrapolable a otros trayectos (Figura 3.2).

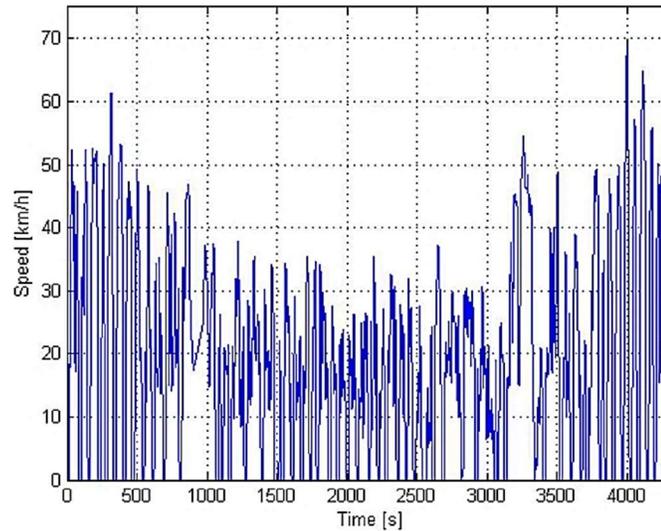


Figura 3.2. Perfil de velocidad bus de la línea línea 85 en Gotemburgo [16]



3.2.1. Motor asíncrono de inducción (IM)

En la literatura posterior al 2010 se encuentran pocos artículos en los que se mencione este tipo de motor aplicado a tracción de vehículos, tanto de pasajeros como de carga en carreteras. Se encuentran artículos de aplicaciones en tracción de trenes. En [6] se presenta este tipo de motores como una alternativa económica y robusta, la que tiene aplicaciones en vehículos livianos, de la misma forma en [14] se presenta un análisis comparativo de mejoras en el diseño de motores comerciales donde se menciona el motor del modelo S y X de Tesla [6]. En [20] se presenta un motor de inducción de 6 fases usado en autobuses, destacando los beneficios de las máquinas con más de 3 fases, en términos aumento de confiabilidad, mejora en las características mecánicas, reducción de ruidos y de vibraciones.

En los PMSM se presentan los problemas de la generación descontrolada, que pueden dañar el inversor cuando el rotor gira a alta velocidad o el inconveniente del par de frenado generado en las fallas, los que no se presentan en los IM [18, 19].

En [4] se presenta el IM como un motor con características ampliamente aceptables en aplicaciones de tracción debido a sus características y alto rendimiento dinámico. El rango de potencia constante de los IM puede ampliarse entre 4 y 5 veces la velocidad nominal, que generalmente se requiere para fines de tracción [21]. En la figura 3.3 se muestran curvas típicas del IM. Sin embargo, la operación de alta velocidad y rango de potencia constante es limitada debido a su par dinámico (pull-out torque) [22].

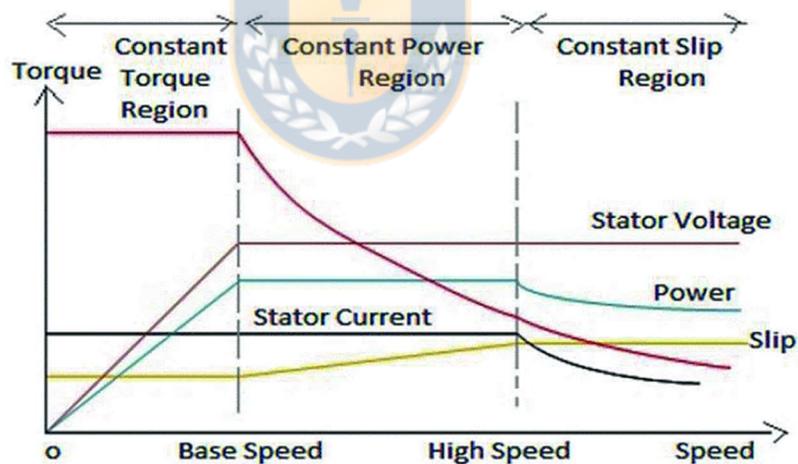


Figura 3.3. Características de IM con la velocidad [17]

Adicionalmente, en el mismo artículo [17][22], se menciona como desventaja las altas pérdidas, su pobre factor de potencia y baja eficiencia, junto a su alto peso y volumen en comparación con los PMSM de la misma potencia. De todas formas, existen fabricantes que los incorporan en buses y camiones de mediana y alta carga.

Como se mencionó anteriormente, la literatura presenta aplicaciones en trenes para los IM y los compara con las características de un SynRM [23], lo que si bien, no es el centro de esta revisión, se menciona de todos modos.

También se encuentran configuraciones en las que se usan más de un motor eléctrico para impulsar un vehículo, como es el caso del Tesla Modelo 3, el que combina un motor IM con otro PM, utilizando el primero en funcionamiento a velocidad alta y el segundo para proporcionar par de partida [11][24].

A pesar de la mejora en la eficiencia de los IM, logradas con diversos algoritmos de control de los accionamientos electrónicos, incorporando control difuso de par, que mejoran la eficiencia, así también como el uso de técnicas multi-phase, que hacen del IM un equipo más confiable [25], los IM son desafiados por los PMSM debido a su alta densidad de potencia, alta eficiencia y menos pérdidas en el rotor. No obstante, el uso de PMSM es limitado y restringido para aplicaciones de alto rendimiento debido a su mayor costo y algunas limitaciones en su desempeño.

3.2.2. Motor síncrono de imanes permanentes (PMSM)

Los imanes de neodimio y cobalto-samarium se usan ampliamente en PMSM, con sus propiedades, hacen del motor un equipo muy adecuado para aplicaciones en tracción, debido a características tales como: pequeño tamaño, peso reducido, alto

par de arranque y en baja velocidad, alta potencia, alta eficiencia, bajas pérdidas en el rotor, alta densidad de flujo remanente (residual) y alta resistencia frente a la amenaza de desmagnetización [6]. Un diseño cuidadoso y una ubicación apropiada de los PM de tierras raras de alta energía y alta coercitividad pueden proveer una cantidad significativa de par de reluctancia y un incremento de capacidad de potencia [29]. Es importante mencionar que los imanes son sensibles a la temperatura y la coercitividad del neodimio hierro boro (NdFeB) cae rápidamente a medida que aumenta la temperatura y esto afecta el rendimiento del motor [29]. En cuanto a los imanes usado en motores, la Tabla 3.1 presenta un resumen de los más comunes y sus características relevantes.

Los PMSM se ajustan muy bien a todas las aplicaciones de tracción, pero especialmente bien a las de transporte de pasajero y de carga, donde los requerimientos son precisamente de alto par, alta potencia, alta velocidad y alta eficiencia, en los cuales el uso de imanes provee una alta densidad de energía [30].

TABLA 3.1. PROPIEDADES FÍSICAS DE MATERIALES USADO EN PM [4]

| Property | Alnico | Ferrites (Ceramics) | Samarium cobalt 1~5 and 2~17 alloys | Neodymium Nd(Pr,Dy)(Fe,Co,Hf)B |
|---|-------------------------------|---------------------|--|-----------------------------------|
| Residual induction B_r/T | 0.7~1.28 | 0.23 ~ 0.41 | 0.83~ 1.16 | 1.00~1.41 |
| Coercitive force $H_c/(kA/m)$ | 37 ~ 143 | 50 ~ 290 | 48 ~ 840 | 760~1030 |
| Max. energy product $(BH)_{max}/(KJ/m^3)$ | 10.7 ~ 71.6 | 8.35 ~ 31.8 | 130 ~ 240 | 220 ~366 |
| Electric resistivity $\rho/(\Omega cm)$ | $(50 \sim 75) \times 10^{-6}$ | 10^6 | $(53 \sim 86) \times 10^{-6}$ | 160×10^{-6} |
| Max service Temperature $T_{max}/^{\circ}C$ | 450 ~ 550 | 800 | 300 ~ 350 | 150 |
| Density $d/(g/cm^3)$ | 6.8 ~ 7.3 | 4.9 | 8.4 | 7.4 |

A pesar del aumento en el valor de los imanes de tierras raras [13], las prestaciones de alto par y reducido tamaño, en este tipo de motores, los hace ideal para una gran cantidad de aplicaciones en tracción. En [31] se presenta un estudio de uso de motores de imanes permanentes en tracción y se avanza en demostrar las características superiores de los PMSM de montaje superficial (SPM) y de montaje internos (IPM) respecto del IM, para las mismas dimensiones de estator.

En los SPM, se presenta el inconveniente de la sujeción de los imanes debido a la fuerza centrífuga que se genera en la rotación, la que en estas aplicaciones alcanza velocidades máximas superiores a las 10.000 r/min, llegando incluso a las 17.000 r/min, esto último, con el fin de lograr alcanzar altas potencias con motores de tamaño reducido.

Una tendencia reciente es acoplar este tipo de motores directamente al eje mecánico de un vehículo, con el fin de prescindir de la caja de engranajes y aumentar la eficiencia y confiabilidad en general. A pesar del avance en la tecnología de reductores, por tratarse de un elemento mecánico sujeto a desgaste mayor que el motor eléctrico o el accionamiento electrónico, se busca minimizar su uso. En [6] se muestra el caso de un vehículo de carga híbridos de gran potencia, donde se elimina la caja reductora montando el motor directamente en la rueda, conocida como rueda motora y es mostrada en las figuras 3.4a y 3.4b. En vehículos de carga comerciales más pequeños no se observa esta solución, normalmente incorporan una reducción mecánica entre el motor y la rueda, debido a la alta velocidad de rotación del motor usado en esas aplicaciones. El uso de reducción mecánica, implica disminución en la confiabilidad y desgaste prematuro de la caja reductora respecto del motor, pero

su incorporación permite dimensiones y peso menores en el motor al trabajar a velocidades de rotación altas.

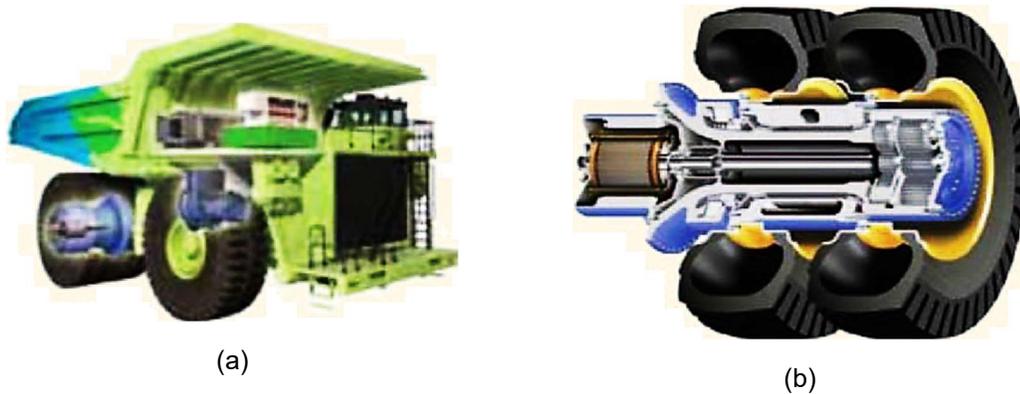


Figura 3.4. (a) Vista exterior e (b) interior de la rueda motor - OHV diésel-eléctrico de General Electric [6]

Otro elemento mecánico, que al ser eliminado contribuye a la eficiencia y confiabilidad del vehículo, es el sistema diferencial, el que es reemplazado por un control electrónico realizado con los accionamientos de cada motor asociado a las ruedas. En [4] se muestran diferentes configuraciones de vehículos híbridos, donde uno de los casos es el que utiliza ruedas motoras en aplicaciones de alto par y baja velocidad, las que son características en los vehículos de transporte de pasajero o de carga.

Hasta este punto se puede concluir que la tendencia es la eliminación de elementos mecánicos en los vehículos eléctricos y el PMSM es la alternativa que, debido a su alta densidad de par de partida, así como en bajas velocidades, lo hace más apropiado para aplicaciones de tracción en autobuses y camiones, a pesar de las

limitaciones en cuanto a tolerar altas temperatura y alto nivel de vibraciones, que pueden producir desmagnetización de los PM, condiciones que pueden darse mayormente en los vehículos de gran tamaño usados en minería.

En fabricantes de autobuses y camiones, para uso en rutas urbanas, los motores trabajan en velocidades de rotación de 10.000 a 12.000 r/min. Para mantener los imanes en su lugar se usa materiales como la fibra de carbono, debido a su alta resistencia a la tracción y baja conductividad. Sin embargo, la fibra de carbono exhibe una baja conductividad térmica, reduciendo la transferencia de calor del rotor al entrehierro figuras. 3.5 y 3.6 [33] lo que dificulta el enfriamiento del rotor, haciendo imperativa la minimización de las pérdidas.

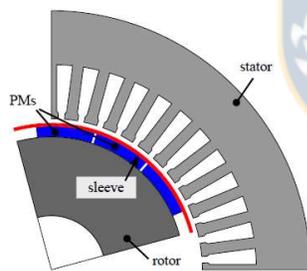


Figura 3.5 .Motor SPM con imanes y funda de retención [33]

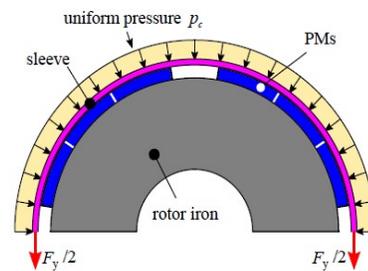


Figura 3.6 Detalle de SPM con imanes y funda de retención [33]

De hecho, el problema principal para los motores de imanes permanentes de alta velocidad, además del estrés mecánico, es el calor generado internamente causado por la pulsación del flujo debido a la ranura del estator, los armónicos en el

entrehierro figuras 3.7 y 3.8, y campos asíncronos debido a los armónicos en las formas de onda de corriente [33].

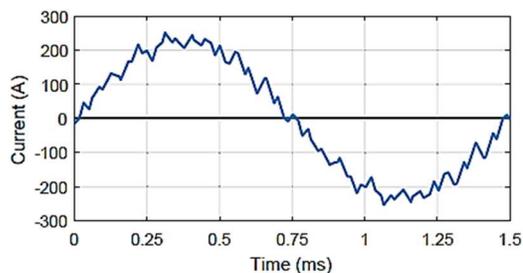


Figura 3.7. Forma de onda de corriente para 10KHz. [33]

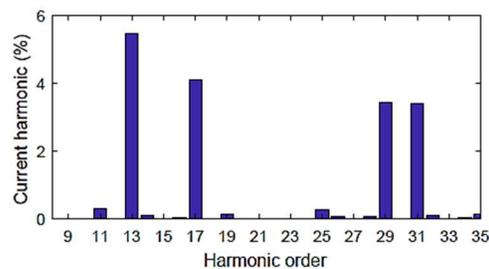


Figura 3.8. Espectro rizado de corriente para 10 KHz. [33]

En [7] se presenta una comparación muy interesante entre IM, IPM y SPM. En la figura 3.9. se muestran las topologías de estos tres motores, los cuales son comparados en términos de potencia y eficiencia. Los méritos y limitaciones de las tres soluciones fueron calculados en este artículo y se resumen en los resultados del consumo de energía, usando como referencia para la estimación del nuevo ciclo de conducción estándar europeo (NEDC, New European Driving Cycle).

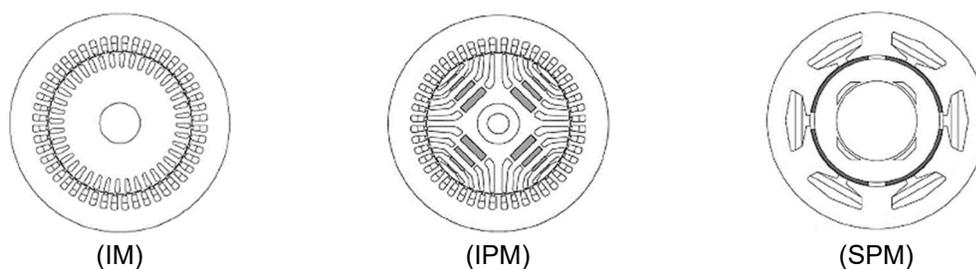


Figura 3.9. Motores IM, IPM y SPM bajo estudio en [7]

Como se resume en la figura 3.10, los EV requieren una región de operación de par constante a baja velocidad, tanto en los arranques como en partidas con pendiente positivas (en subida), y luego un rango de potencia constante a mayor velocidad. Las áreas típicas de operación de los motores para aplicaciones en tracción eléctrica urbana y extra-urbana están definidas el NEDC el cual cuenta con cuatro ciclos de conducción [35].

En la figura 3.10. se distingue el punto F, que corresponde a la máxima velocidad a potencia constante y es la que determina la máxima velocidad del vehículo en el plano. El par de partida determina la pendiente máxima que el vehículo puede subir continuamente y corresponde al U. Existe limitación por la corriente máxima del inversor i_0 de la misma forma con la tensión V_0 por lo tanto se evidencia las área urbana y extra-urbanas en la imagen

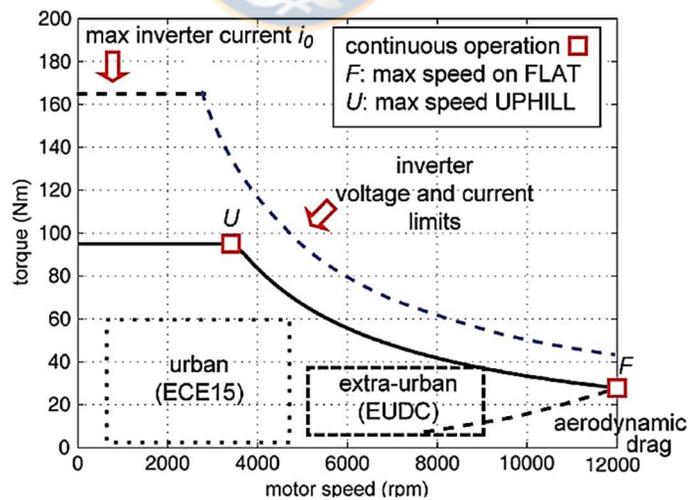
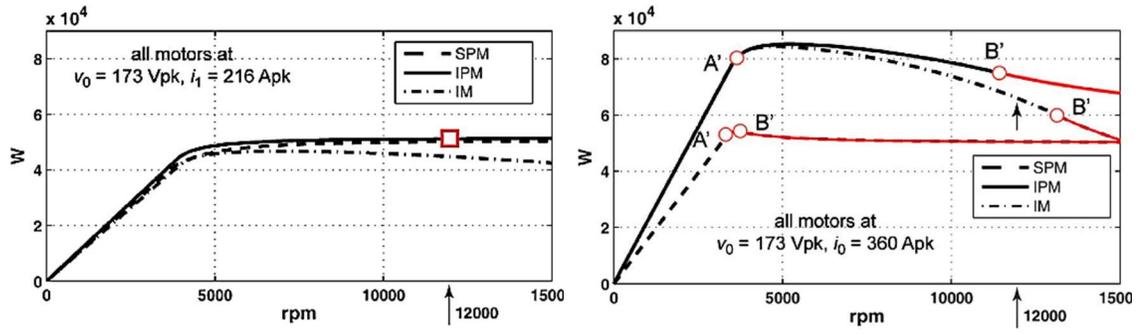


Figura 3.10. Ejemplo de especificaciones para un EV. [7]

Finalmente se concluye que el SPM tienen limitaciones con la sobrecarga, independiente de la densidad de corriente, y en alta velocidad debido a pérdidas en los PM. El motor IPM tiene el mejor rendimiento general, en términos de curva de sobrecarga de potencia y eficiencia a cualquier carga y cualquier velocidad, siempre que sea una máquina de alta saliencia, maximizada por un diseño adecuado. En comparación un IM con un IPM, se menciona que un IM tiene curvas de potencia de sobrecarga que no están muy lejos de las del IPM. En términos de pérdida y consumo de energía, esto se ve penalizado por las pérdidas en la jaula, tanto para altas como bajas velocidades, resultados obtenidos en simulación FEA en el artículo.

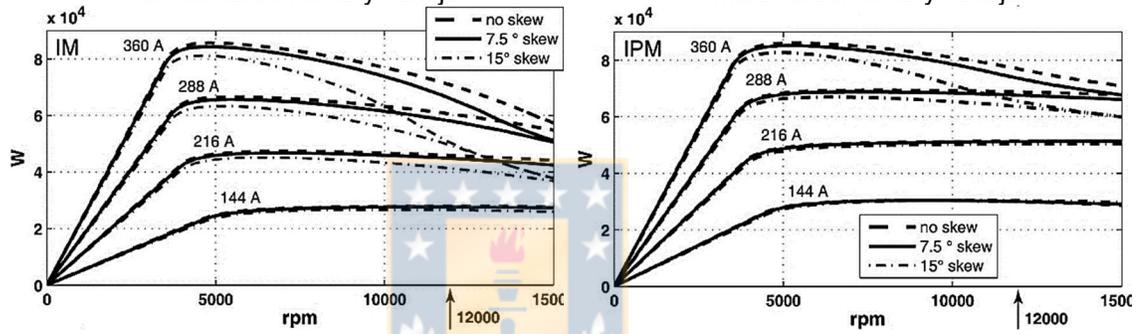
Considerando todos los motores, del ejemplo de este artículo, se demuestra que no siempre es cierto que las máquinas SPM sean más compactas y tengan más par que cualquier otra máquina, de hecho, en velocidad máxima los tres motores propuestos cumplen los requerimientos para máxima velocidad de un vehículo, con la misma potencia continua a 12.000 rpm.

En las figuras 3.11. (a) los motores SPM e IPM cumplen la especificación de potencia continua con la misma corriente y voltaje, mientras que el IM requiere una corriente más alta. En (b) Las líneas rojas, sobre el punto B de las tres curvas, indican la región operativa de máximo voltaje de par (MTPV). En (c) - (e) se muestra un resumen de las potencias con los motores analizados.



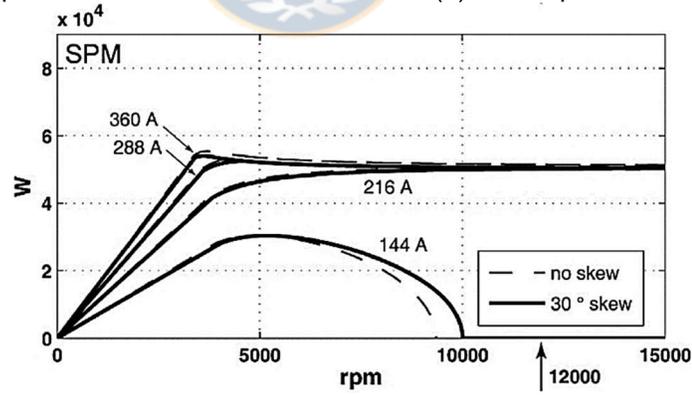
(a) Curvas de potencia de los tres motores a la misma corriente y voltaje.

(b) Curvas de potencia de los tres motores a máxima corriente y voltaje.



(c) Curva potencia constante IM

(d) Curva potencia constante IPM



(e) Curva potencia constante SPM

Figura 3.11. (a), (b), (c), (d) y (e). Curvas de potencia de diferentes motores en estudio [7]

3.2.3. Motor de reluctancia (RM)

Los motores de reluctancia RM, son máquinas eléctricas en la cual el par es producido por la tendencia del rotor a alinearse a una posición donde se maximiza la inductancia del devanado excitado. La inductancia de cada fase es máxima en su posición alineada, debido a que, la reluctancia magnética es la más baja en esa posición [9].

Debido al aumento en el valor de los materiales de tierras raras entre el 2011 y el 2015, como se muestra en la figura 3.12a, comienza la búsqueda de alternativas a los PMSM para uso en movilidad eléctrica, generándose gran avance en el estudio de los SynRM, SRM y posteriormente en los PMA-SynRM. En la actualidad los precios de estos minerales han tendido a bajar, pero existe una concentración de su extracción por parte de China, que deriva en el monopolio del mercado, como lo muestra la figura 3.12b, para el caso de las compras por parte de los Estados Unidos, por lo que, los RM continúan siendo una alternativa atractiva, asumiendo que se podrían abordar los desafíos de su baja densidad de potencia y bajo factor de potencia, en relación a los PMSM.

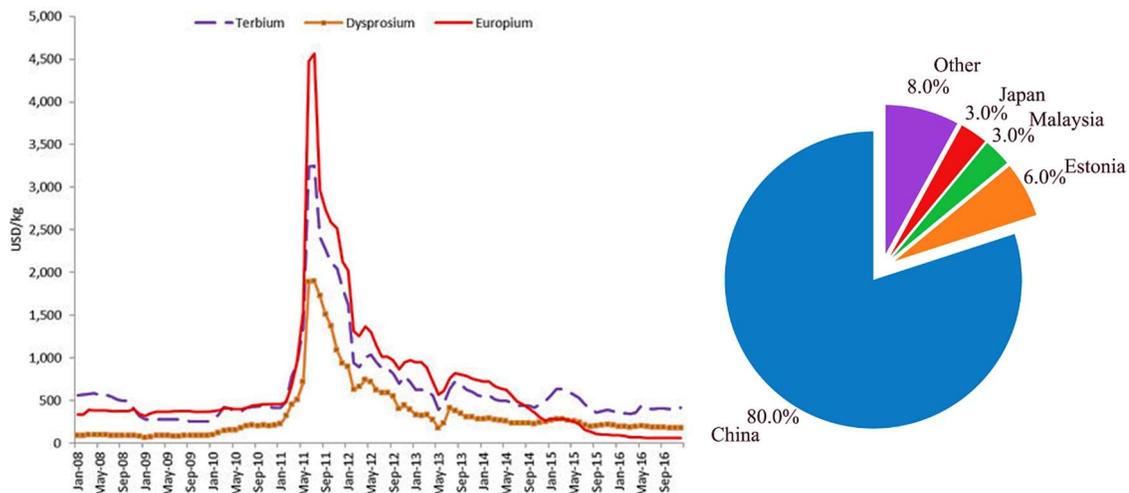


Figura 3.12 a. Historial de precios de tierras raras [13]

Figura 3.12 b. Importación de material de tierras raras a estados unidos [27]

3.2.3.1. Motor de síncrono de reluctancia (SynRM)

Los SynRM, son motores RM usados mayormente en aplicaciones industriales, los que alcanzan eficiencias Ultra Premium o IE5, con tamaños y potencia similares a los IM. Se han utilizado varios diseños innovadores logrando beneficios significativos en términos de densidad de potencia, eficiencia y amplio rango de velocidad a potencia constante (CPSR) [6].

En [26] se muestran resultados similares, para el caso de motores de 2,2 kW, donde el costo de fabricación del SynRM es un 54% del costo de fabricación de un IM con jaula de cobre.

En [28] se presenta una forma de suprimir el Torque Ripple a través de la inyección de señal de alta frecuencia al SynRM, adquiriendo información precisa de la posición

del rotor sin el uso de un sensor de rotación. Esta técnica permite suprimir este efecto en alta frecuencia, lo que implica un beneficio, debido a que el aumento de velocidad de rotación, permite mayores potencias en el motor, con tamaños reducidos, lo que implica mayor competitividad frente a los PMSM.

Además del Torque Ripple, está el desafío del gran número de parámetros del rotor, que tienen una gran influencia en el rendimiento del equipo, lo que es posible optimizar mediante diversos métodos, como se muestra en [26].

Estos motores son usados en vehículos eléctricos, como es el caso del Renault ZOE 2018 [11]

3.2.3.2. Motor de reluctancia conmutada (SRM)

Los Motores de Reluctancia Conmutada (SRM), han tenido aplicaciones de tracción eléctrica, especialmente en vehículos híbridos, como el caso del Holden Commodore [17]. Estos requieren de un accionamiento electrónico para la conmutación. La ventaja clave, además de no utilizar PM, es la estructura del rotor muy simple y robusta. En las figuras 3.13. se muestran dos topologías, donde los polos generalmente son de forma paralela y bobinado concentrado.

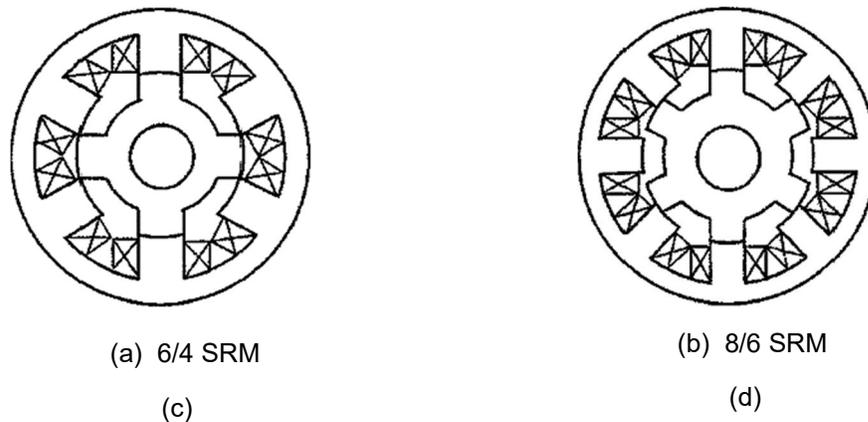


Figura 3.13 Algunas configuraciones típicas de SRM [4]

Los SRM tienen características potencialmente superiores a los IM y PMSM en aplicaciones de tracción, que incluyen alta confiabilidad, tolerancia a altas temperaturas de operación, rango de alta velocidad, adecuado para el trabajo sin uso de reductores mecánicos y facilidad de fabricación [40]. Estas características son importantes en aplicaciones en vehículos de carga de trabajo pesado en minería, por ejemplo, donde las vibraciones y lo agresivo del ambiente implica una posición de desventaja para los PMSMs.

En [49] se presenta la evaluación del rendimiento de un tipo de SRM, donde se utiliza una nueva topología de rotor segmentado de flujo axial. El objetivo de este diseño es impulsar la densidad de potencia continua lo más alto posible, donde se presenta una saturación profunda y consecuentemente pérdidas importantes, las que significan un desafío desde el punto de vista térmico. En esta topología la ondulación del par es inevitable, así también como incertidumbre en la dirección de rotación en

la partida del motor. Se logran grandes densidades de corriente con esta topología, pero esto se reduce significativamente debido a las pérdidas en alta frecuencia.

Es importante destacar que el trabajo en alta velocidad tiene ventajas desde el punto de vista de la reducción del tamaño y el peso de los equipos eléctricos, como lo muestra artículo [50]. Velocidades de rotación, en motores de este tipo, usado en turbo compresores alcanzando las 220.000 r/min.

El resumen de sus ventajas se sintetiza en una estructura robusta del rotor sin imanes o bobinado, que favorecen el trabajo en altas velocidades y lo hacen fácil de enfriar y menos sensible a la temperatura, con costo de fabricación relativamente bajo y amplia capacidad de potencia constante.

Como desventajas, se puede mencionar el difícil control debido a fuerte saturación en dientes y ranuras [4], ruido acústico, rizado del par y vibraciones. Una desventaja muy importante es la que tiene que ver con la compatibilidad electromagnética (CEM), debido a excesivo rizado en el bus de corriente continua del accionamiento, generando ruido que puede afectar otros componentes electrónicos del vehículo, por lo que la topología del convertidor usado para este motor debe ser especial.

3.2.4. Motor síncrono de reluctancia asistido por PMs (PMA-SynRM)

Cuando un SynRM cuenta con PM insertados en el rotor se denomina PMA-SynRM, como el mostrado en la figura 3.14, donde la polaridad de los imanes se elige de manera tal que contrarreste el flujo del eje q del SynRM a carga nominal [41].

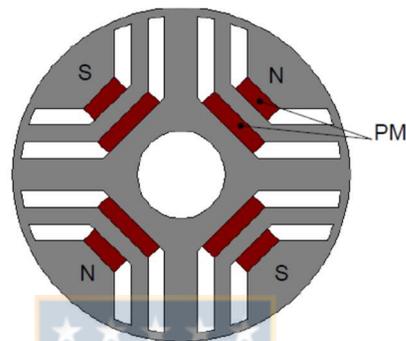


Figura 3.14. Laminación transversal para 4 polos de rotor PMA-SynRM [41]

Este tipo de motor pareciera ser un caso particular de motor de IPM, sin embargo, una diferencia sustancial es su estructura de rotor de alta anisotropía, lo que implica como resultado un bajo valor del flujo desde los PMs, esto en contraste con el IPM, en el cual la mayor parte del flujo proviene desde los PMs y el flujo producido por las corrientes del estator se considera un flujo no deseado. En la práctica, debido a estas diferencias, los PMA-SynRM tienen una idoneidad diferente, más orientada a las aplicaciones con grandes rangos de debilitamiento de campo que los IPMs [41].

Es importante destacar que los IPM fueron estudiados alrededor de los años 90s [42][43] y recientemente el mercado industrial los ha considerado como motores que compiten con los IM. En el caso de unidades de velocidad variable de alto

rendimiento, los IPMs exhiben un amplio rango de velocidad con potencia constante, que es requerida en aplicaciones de tracción [44]. En los casos anteriores, tanto en la industria como en aplicaciones de tracción, la excitación magnética debida a los PM es constante, por lo que el debilitamiento de campo (FW) debe ser realizado a través de las corrientes del estator [54-56]. En la figura 3.15 se puede apreciar un ejemplo de esta topología.

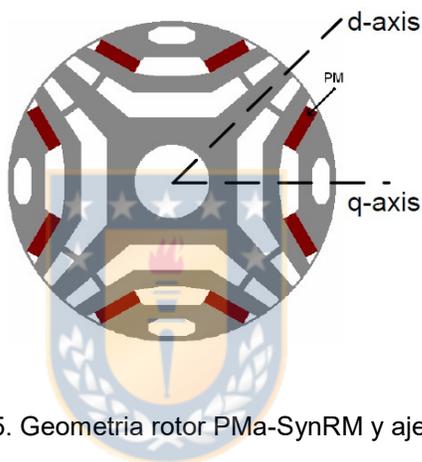


Figura 3.15. Geometría rotor PMA-SynRM y ejes $d - q$ [41]

Como se mencionó anteriormente, en busca de reducir el uso de imanes permanentes, por su escasez y alto costo, en particular los de tierras raras, tema que se discute en [45], es que se presentan propuestas en las que se usan imanes que no contienen tierras raras, tal es el caso de los imanes de cerámica o ferrita (MY30H-2) los que sustituyen a los neodimium-iron-boron (NdFe35). Por lo que en [46] se presenta el caso del uso de ferrita en motores síncronos conmutados asistidos por imanes permanentes en multicapas, como se muestra en la figura 3.16, los que son muy adecuados para el reemplazo de los imanes de tierras raras. En este artículo se

demuestra que esta propuesta, usando imanes de ferrita con fuerza coercitiva de 342 KA/m, más baja que el neodimio es posible, logrando una densidad de par de un 75%, respecto de un PMSM con imanes y una eficiencia similar que el caso de usos de tierras raras.

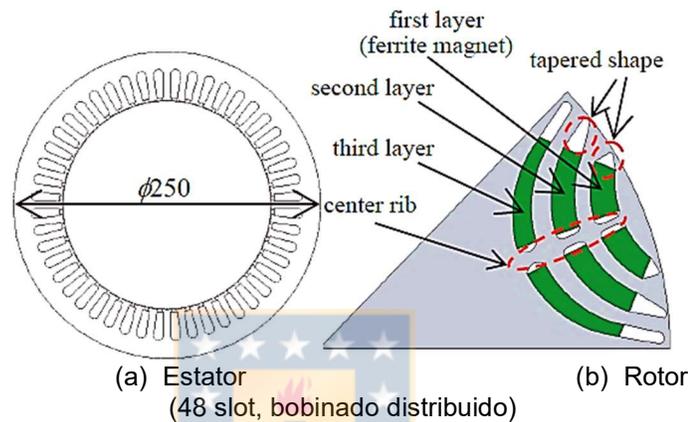


Figura 3.16. Propuesta de estructura 8 polos PMASynRM [46]

En [46] se demuestra que el par ripple es posible reducirlo con algunas modificaciones en la estructura o topología del rotor.

Otro artículo en el que se presenta el uso de imanes de cerámica es en [47], donde se muestra que el uso de éste tipo de imanes, permite mantener una alta densidad de par promedio con un mínimo de par pulsante (ripple torque) y un bajo par cogging. Este par pulsante es un inconveniente en los motores PMa-SynRM [33][48].

En [47] se presentan dos diseños de motor PMa-SynRM, el primero cuenta con los imanes en el interior del rotor, en el centro del motor y el bobinado está en el exterior, lo que es el modelo típico de motor. La segunda topología cuenta con un centro

bobinado y el elemento que realiza la rotación es la parte externa, por lo que se denomina de rotor externo. Figuras 3.17 y 3.18 muestran las diferencias entre rotores internos y externos, junto al uso de imanes de neodimio y ferrita respectivamente. Es importante resaltar que los PMA-SynRM de rotor externo logran mayor densidad de par, pero cuando una baja pulsación de par es una prioridad, se puede utilizar el diseño de PMA-SynRM del rotor interno con imanes de ferrita. Esto se deduce de la comparación de los cuatro diseños en las figuras 3.17 y 3.18 de los cuales se obtienen las gráficas de par promedio respecto de la corriente de entrada figura 3.19 (a) y par pulsante en figura 3.19 (b) [48].



Figura 3.17. Prototipos del rotor interno PMA-SynRM y modelos FEA (a) Diseño I (estator y rotor con PM de tierras raras) y (b) Diseño II (estator y rotor con PM basados en ferrita) [48]

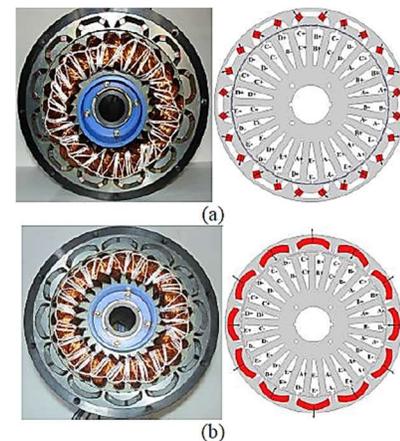


Figura 3.18. Prototipos de rotor exterior PMA-SynRM y sus modelos FEA (a) Diseño III (estator y rotor con PM de tierras raras) y (b) Diseño IV (estator y rotor con PM basados en ferrita) [48]

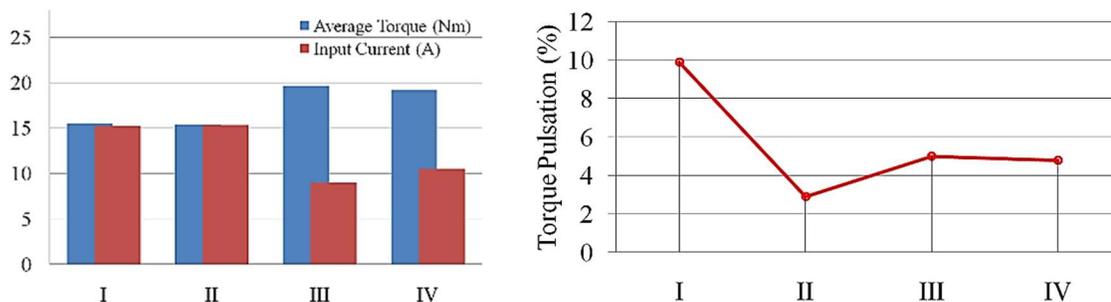
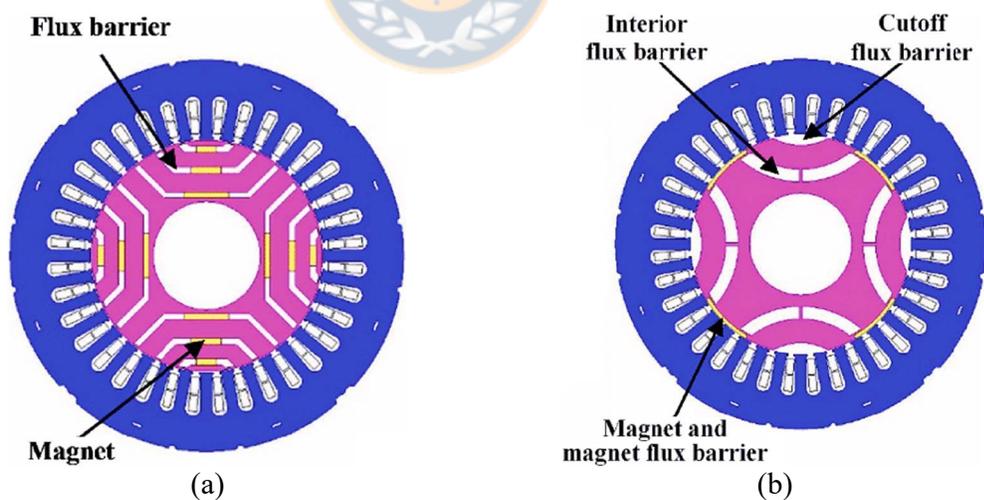


Figura 3.19. Comparación de resultados de simulación (a) por promedio con respecto a sus corrientes de entrada y (b) comparaciones de pulsaciones de par en diseños PMA-SynRM [48]

En [35] se presenta un artículo en el que se usan PMs incrustados en la superficie de un PMA-SynRM, que en este caso es denominado motor de reluctancia asistido por imanes permanentes de flujo intensificado (FI-PMA-SynRM). En la figura 3.20b, se presenta esta topología, la que tienen como beneficio el lograr un gran par, con mínimo uso de PMs.



Figuras 3.20(a) PMA-SynRM, (b) FI-PMA-SynRM

3.3. Vehículos de pasajeros y de carga

Es importante centrar la atención en los vehículos de trabajo pesado (HD) debido a que, según estudios, como el presentado en [51], el año 2017 el transporte por carretera contribuyó con un 21% de las emisiones totales de dióxido de carbono (CO₂) en la Unión Europea (UE), donde 15% de las emisiones corresponde a vehículos ligeros y el 25% a vehículos pesados (HD), estos últimos corresponden al 5% de las emisiones totales de CO₂ de la UE.

El 20 de junio de 2019, el parlamento europeo adoptó el reglamento (UE) 2019/1242, en el que se establecen normas de emisiones de CO₂ para los vehículos pesados, con el objetivo de reducir las emisiones medias, de los camiones nuevos, para 2025 y 2030.

En Chile, el 13 de febrero del 2021, se publicó en el Diario Oficial la Ley N° 21.305 Sobre Eficiencia Energética, en la cual, se indica la eficiencia en el transporte, dentro de otros. Adicionalmente, existe un compromiso realizado por Chile en la Cumbre de Cambio Climático (COP25), el que reafirma el acuerdo de París, en el que se estableció la meta de 100% del transporte público eléctrico para el 2040. En este contexto, se hace evidente la necesidad de revisar el estado actual de la oferta de vehículos transporte público y de carga.

3.3.1. Motores usados en autobuses y camiones

Los motores usados en tracción eléctrica deben cumplir con requerimientos que incluyen alto par a baja velocidad y alta potencia constante a altas velocidades.

Concretamente en relación a los estudios orientados a tracción eléctrica en autobuses eléctricos e híbridos, en [52][6] se presenta un estudio de los principios de diseño de una máquina sincrónica de imanes permanentes (PMSMs) para aplicaciones híbridas, en la que se logra demostrar con una solución numérica basada FEA, un diseño que posteriormente fue construido y probado en modo motor y generador, el que cumplió con las características necesarias para la conversión de un autobús eléctrico, mejorando la performance del motor de combustión interna, el cual se sobredimensiona para lograr los requerimientos de aceleración necesarios en una aplicación real.

De los motores presentados anteriormente, los síncronos de imanes permanentes son los que cumplen de mejor forma los requerimientos de aplicaciones en tracción, debido a su alta densidad de par y alta eficiencia [7], pero existen algunos fabricantes de vehículos para transporte de pasajeros que incluyen motores asíncronos de AC, en algunos modelos.

Con el objetivo de determinar el tipo de motor y de transmisión usado en los vehículos de trabajo pesado presentes en el mercado, se revisa información disponible en los sitios web de cada fabricante, en los que es posible observar información referente a tipo de motor usado, que en general tienden a ser del tipo sincrónico de imanes permanentes de alta velocidad de rotación.

Este estudio comienza con la revisión de la oferta disponible en China, la que básicamente presenta las alternativas de las marcas Dongfeng Motor Corporation y

BYD, información con la que se busca determinar la potencia, par y tipo de motores usados en buses y vehículos de carga.

Se revisa la oferta en Corea, donde el fabricante Hyundai Heavy Industries Co. Ltd., ha desarrollado el modelo "e-Primus", logrando mejoras en el motor de tracción y la unidad de control del motor (MCU). También se mejoró la unidad de control del motor auxiliar (ACU), el convertidor CC / CC y el sistema de gestión de batería principal (MBMS). También, lograron reducción de peso a través del uso de nuevos materiales en la fabricación del chasis [53].

En Europa, se revisa la información disponible de la empresa Solaris, la que está considerada como líder en ventas de buses eléctricos en la Unión Europea.

En Norteamérica, se revisa la información de la empresa Proterra, con ubicación en Burlingame, California, la que tiene ventas por sobre los 1.000 buses eléctricos en Estados Unidos y Canadá.

Por último, se presenta la información de la empresa Mercedes Benz, que es el único fabricante de buses eléctricos en Sudamérica.

3.3.2. Fabricantes chinos

A partir de la información disponible de los fabricantes chinos, se realiza una comparación para estimar las dimensiones de los motores usados en tracción de buses eléctricos. En esta se usa el peso del vehículo y la potencia, para lograr una referencia del tamaño de la o las máquinas eléctricas necesarias para impulsar estos vehículos.

Los principales fabricantes chinos son Dongfeng, BYD, Yutong y King Long. En el caso del fabricante asiático Dongfeng Motor Corporation, este presenta diferentes alternativas de buses completamente eléctricos, los que se detallan en las figuras 3.21. Estos modelos usan motores síncronos de imanes permanentes [54].

TABLA 3.2. CARACTERÍSTICAS BUSES DONGFENG

| Modelo | Peso (Kg) | Velocidad máx. (km/h) | Potencia (Kw) | Pasajeros |
|--------------|-----------|-----------------------|---------------|-----------|
| EQ6111CBEV1 | 16400 | 70 | 100 | 24/49 |
| EQ6100LACBEV | 16400 | 100 | 150 | 24/45 |
| WG6120BEVHM | 18000 | 70 | 110 | 28/44 |



(a) EQ6111CBEV1



(b) EQ6100LACBEV



(c) WG6120BEVHM

Figura 3.21 Oferta buses eléctricos Dongfeng Motor Corporation.

El fabricante BYD también incorpora motores sincrónicos de imanes permanentes, con tres configuraciones de ejes de tracción, con las siguientes características:

TABLA 3.3. CARACTERÍSTICAS IMPULSORES BYD

| Motor TYC-90A | Motor TYC-150A | Motor TYC-180A |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Potencia máx. 2 x 90kW | Potencia máx. 2 x 150kW | Potencia máx. 2 x 180kW |
| Par máx. 2 x 350 Nm | Par máx. 2 x 550 Nm | Par máx. 2 x 1500 Nm |

En la configuración BYD [55] no usa diferencial como el motor convencional, ya que usa dos motores y el diferencial funciona de forma electrónica en el accionamiento de los motores, por esto, es que en todos sus buses y camiones la potencia se indica como 2 X potencia motor.

En las figuras 3.22 (a) y 23 (a y b) se muestra la configuración de los motores con transmisión directa a las ruedas de los autobuses o camiones desarrollados por el fabricante chino BYD y en 3.22 (b) se muestra un sistema de tracción convencional.

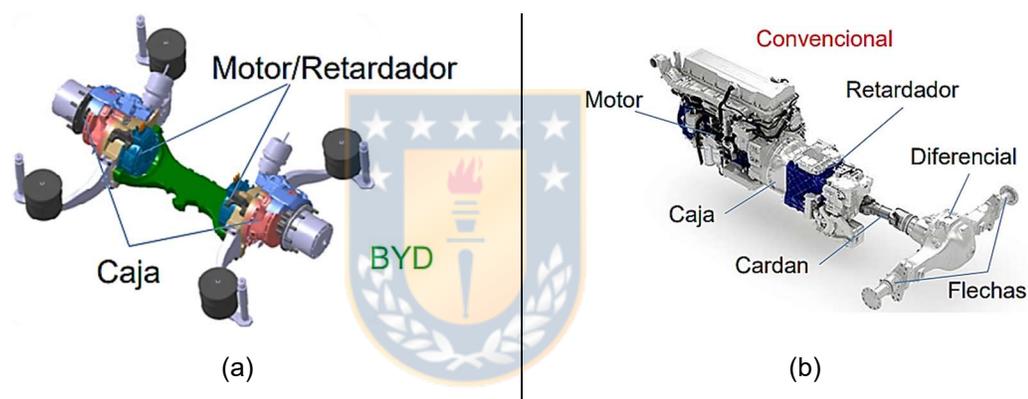


Figura 3.22. Configuración transmisión (a) directa y (b) convencional.

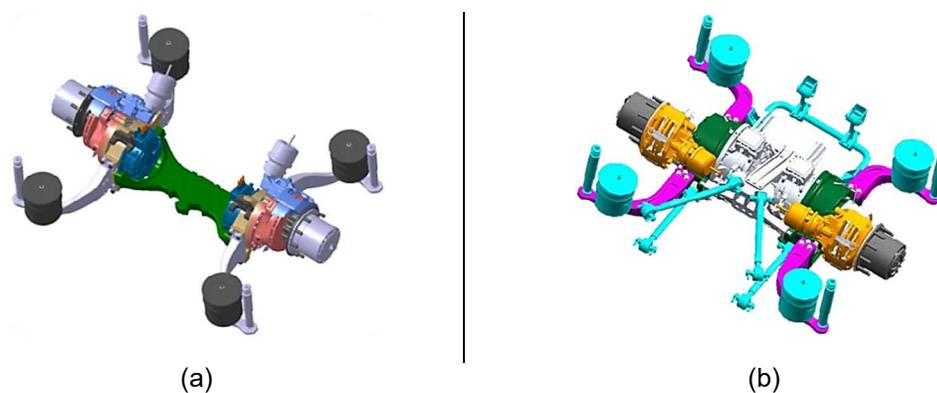


Figura 3.23. Montaje motores BYD sin diferencial

En las figuras 3.24 se muestra la configuración de los motores usados por BYD y un detalle con el corte para observar los engranajes asociados a la transmisión desde cada motor al tambor donde se sostiene la rueda del autobús o camión. En el caso del autobús, la rueda para el modelo K9 usa un neumático 295/80 R22,5. Esto implica que la reducción será de 10.000 r/min a 1118,5 r/min que es aproximadamente 8,9 veces para una velocidad máxima de 70 Km/h.



(a) Montaje motores BYD sin diferencial con corte.



(b) Montaje motores BYD corte.

Figura 3.24. Montaje de Motor BYD.

A continuación, se presenta un resumen de características de buses fabricados por BYD. En la tabla 3.4. se compara el peso, velocidad máxima, potencia de los motores y cantidad de pasajeros.

TABLA 3.4. CARACTERÍSTICAS BUSES ELÉCTRICOS BYD

| Modelo | Peso (Kg) | Velocidad máx. (km/h) | Potencia (Kw) | Torque (Nm) | Pasajeros |
|---------------------|-----------|-----------------------|---------------|-------------|-----------|
| BYD K7 electric bus | 18000 | 71 - 90 | 2 X 90 | 2 X 350 | 19/49 |
| BYD K9 electric bus | 18000 | 71 - 90 | 2 x 90 | 2 x 350 | 29 |
| BYD C9 electric bus | 18000 | > 100 | 2 x 180 | 2 x 550 | 49 |



Figura 3.25. Buses fabricados por BYD.

BYD presenta los siguientes modelos de camiones [56]

TABLA 3.5. CARACTERÍSTICAS CAMIONES ELÉCTRICOS BYD

| Modelo | Peso (Kg) | Velocidad máx. (km/h) | Potencia (Kw) | Torque (Nm) |
|----------------------|-----------|-----------------------|---------------|-------------|
| T8F - Heavy Duty | 18000 | 85 | 2 x 150 | 2 x 550 |
| T9SJ - Heavy Duty | 28000 | 90 | 2 x 150 | 2 x 550 |
| Class 8 - Heavy Duty | 47000 | 100 | 2 x 180 | 2 x 1500 |



(a)



(b)

Figura 3.26. Camiones fabricados por BYD.

BYD usa motores sincrónicos de imanes permanentes, con potencias desde los 90 a 180 kw. Algunas especificaciones adicionales se presentan en la tabla 3.6.

TABLA 3.6. CARACTERÍSTICAS DE MOTORES USADOS EN BUSES BYD

| | |
|----------------------------|------------|
| Max. Potencia | 150 kW × 2 |
| Max. Par | 550 Nm × 2 |
| Max. Gradiente inclinación | 18% |
| Max. Velocidad de rotación | 10.000 rpm |
| Razón de velocidad | 22 |
| Eficiencia teórica | 0,9127 |

3.3.3. Fabricantes coreanos

En el caso del bus completamente eléctrico Primus de la empresa Hyundai, consta de un motor de propulsión, con una potencia máxima de 240kW, un torque máximo de 1855Nm y un reductor de engranaje del tipo planetario.

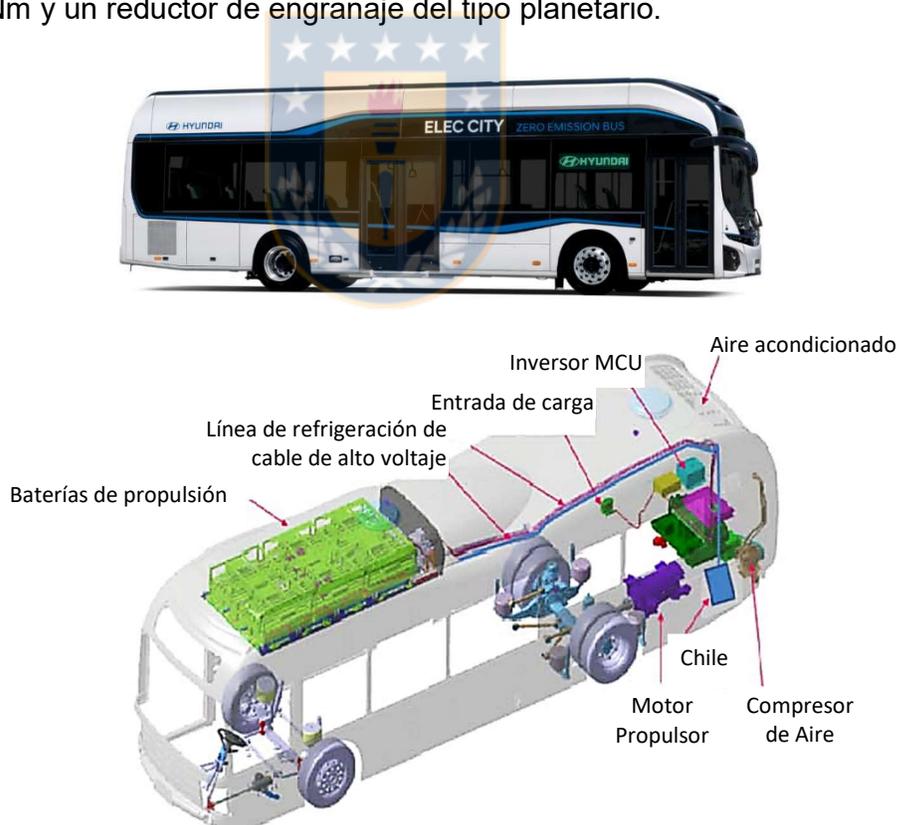


Figura 3.27 Buse eléctricos Hyundai

TABLA 3.7. ESPECIFICACIONES BUS ELÉCTRICO COREANO

| Item | | Specifications |
|--------------------------------------|------------------|---------------------|
| Seating Capacity | (Persons) | 23*24*1 |
| Vehicle Weight | (kg) | 10720 |
| Full - Length | (mm) | 11050 |
| Overall-Width | (mm) | 2480 |
| Full Height | (mm) | 3410 |
| Distance between Axis | (mm) | 5400 |
| Overhang(mm) | Front | 2400 |
| | Rear | 3250 |
| Track(mm) | Front | 2115 |
| | Rear | 1855 |
| The maximum turning radius | | 89 |
| Tire | | 270/0R/225-16PR |
| Propulsion Motor | Max. Power (kW) | 240 (326hp) |
| | Max. Torque (Nm) | 1150 |
| Battery | Type | Lithium ion polymer |
| | Capacity (kWh) | 87 |
| Maximum speed (km/h) | | 100 |
| Gradeability (%) | | 25% |
| Driving distance per one charge (km) | | 100 @ 40 km/h |

3.3.4. Fabricantes europeos

La empresa Solaris es el mayor fabricante de buses eléctricos urbanos de Europa. En la información técnica disponible en su sitio web, se puede apreciar unidades con motores eléctricos asíncronos, con potencia máxima desde los 1x160, 1x220, 1x240, 2x125 y 1x300 kW [57], dependiendo de la capacidad de pasajeros de cada unidad.

3.3.5. Fabricantes norte americanos

En el mercado de América del Norte está presente la empresa Proterra, fabricante de buses eléctricos, con unidades vendidas en Estados Unidos y Canadá. Estos buses cuentan con gran capacidad de almacenamiento de energía, en dos versiones de 225 y 450 kWh, lo que implica diferencias en la autonomía. En su propulsión, existen cuatro

modelos, dos que usan motores duales Duopower de 205kW independientes, con potencias máximas de 338kW y dos modelos que usa un motor eléctrico sincrónico de imanes permanentes de 170 y 240kW en trabajo continuo y potencia máxima de 335kW para las unidades Prodriver [58].

3.3.6. Fabricantes sudamericanos

En Sudamérica el primer fabricante de buses eléctricos es la empresa Mercedes-Benz, la que lanzo su primera unidad completamente eléctrica en agosto de 2021. No existe información técnica disponible del propulsor usado, pero se incluye en esta revisión, por ser la primera empresa sudamericana que desarrolla un bus eléctrico completamente en Brasil.



3.4. Discusión del análisis bibliográfico

El IM presenta ventajas tales como el ser económico, robusto [6], eficiente para carga parcial, bajo par en frenado debido a fallas, no sufre generación descontrolada [18], alto rendimiento dinámico [4] y potencia constante ampliada entre 4 y 5 veces la velocidad nominal del motor [21]. Como desventaja, frente a los PMSM, se presenta una baja densidad de potencia, baja eficiencia, bajo factor de potencia, alto peso y gran volumen [3][17][22].

Las tendencias tecnológicas y requerimiento de entidades gubernamentales [10], apuntan a la disminución de los tamaños, aumento de la densidad de par / potencia y aumento en la eficiencia. Esta disminución de tamaño es debida al gran volumen y peso ocupado por las baterías, que debido al aumento de la densidad de par requerido por las aplicaciones de tracción en baja velocidad y de potencias, en altas velocidades de rotación de los motores, hace necesario una gran capacidad de energía.

El aumento en los precios de los minerales de tierras raras [13][36] debido a restricciones impuestas en la comercialización por el gobierno de China, que es el máximo productor mundial [27][45], hace poco atractiva la producción de PMSM por países occidentales, por lo cual, la tendencia apunta hacia la búsqueda de topologías donde se logre reducir o eliminar el uso de PMs que incorporen estos minerales, logrando un convenio entre tamaño, densidad de par/potencia, confiabilidad y precio competitivo.

Los RM cobran gran importancia en aplicaciones de trabajo pesado [3], debido a lo robustos, simples y confiables [40]. Tanto los SynRM como los SRM, presentan cualidades que los hacen potencialmente atractivos en aplicaciones de tracción eléctrica. En el caso de los SRM, el ruido acústico, rizado del par, vibraciones y problema de CEM, debido al excesivo rizado en el bus de corriente continua del accionamiento, asoman como principales debilidades [4] [39].

Una tecnología interesante en aplicaciones de tracción es las PMA-SynRM, que tienen como principal ventaja, la reducción o eliminación del uso de PM de tierras raras.

La tendencia en vehículos de mayor tamaño, tales como buses y camiones, es el uso de motores acoplados directamente a las ruedas [6], los que para lograr velocidades apropiadas para transporte urbano y de carga, deben incorporar reductores mecánicos de alta eficiencia. Las velocidades máximas de los motores, que actualmente son de preferencias PMSM, están en el orden de 10.000 a 17.000 r/min.

Altas velocidades de rotación implican reducción en el tamaño del motor manteniendo la potencia, con el inconveniente del aumento en las pérdidas debido al trabajo en alta frecuencia.

Tecnologías como la de SynRM, SRM y PMA-SynRM, aparecen como alternativas en desarrollo con gran potencial, las que por el momento tienen pocas aplicaciones, pero que muestran cualidades interesantes en soluciones en la tracción de vehículos

de mayor tamaño, como es el caso de autobuses y vehículos de carga usados en las faenas de extracción minera.

3.5. Análisis bibliográfico artículos de escalamiento.

En el capítulo 5 presenta el escalamiento de máquinas eléctricas, por lo que, en este punto del análisis bibliográfico, se detalla el estado de arte de esta temática.

El tema del escalamiento de máquinas eléctricas se aborda en varios artículos, disponibles desde los años 80s. En [73] se exploró el campo magnético en la cabeza de bobina de una máquina síncrona superconductora deducido desde las leyes de escala. Existen intentos de determinar las leyes de escala para PMSM por Binns y Shimmin [74], y leyes de escala para máquinas de SynRM [75].

Artículos donde se escala únicamente la dimensión axial (alargamiento del laminado) para IM, abordado en [76] y que puede ser aplicado a PMSM [77], con ciertas limitaciones tecnológicas.

En su forma más completa, en [78] se usan tres procedimientos de escala, el axial, radial y rebobinado. [79] Incluyendo el efecto de la influencia de las cabezas de bobina y las pérdidas en los imanes, pero que no profundiza en los aspectos térmicos asociados al escalamiento. Este desarrollo de las expresiones de escalamiento, se deriva de las ecuaciones de Poisson.

En [80] se introduce una escala correspondiente al dominio del tiempo, demostrando que los campos magnéticos en la máquina escalada son consistentes con la de referencia. Además, se incluye el aspecto térmico, donde bajo el supuesto de conducción térmica lineal dentro de los materiales de la máquina, se demuestra que

el perfil de temperatura también es consistente, siempre que se mantenga la temperatura de la máquina original a través de sistemas de enfriamiento escalado. Debido a que se presenta esta metodología para un escalado espacial estricto de una máquina específica, en este caso de inducción, no se comprueba que sea apropiado para aplicar en IPM, como los de uso en movilidad eléctrica. En este caso, también se deriva desde las ecuaciones de Poisson las expresiones usadas en el escalamiento.

En [81] se aborda el aspecto térmico para escalamiento de un motor SynRM, validando los resultados con software FEMM de elementos finitos. La validación solo se realiza para escalamiento radial de la máquina, considerando condición sin saturación y con saturación magnética.

En la literatura no se abordan el escalamiento de máquinas diseñadas con coeficiente de dimensionamiento óptimo D3L. Si bien, se encuentra en la literatura análisis del aspecto térmico en el escalamiento de PMSM, falta analizar con mayor profundidad lo que ocurre en las cabezas de bobinas, lo que pueda implicar modificaciones en el sistema de ventilación de la máquina, incluyendo elementos que contribuyan a una mayor capacidad de disipación.

3.6. Características y comportamiento IPMSM

Este apartado tiene como propósitos entregar una visión general de los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM), mostrando la diferencia entre los del tipo imanes permanentes interiores IPMSM y superficiales SPMSM, para lo cual, se revisarán las ecuaciones que modelan estáticamente estas máquinas y que demuestran sus diferencias y ventajas en aplicaciones de movilidad eléctrica. Diferencias constructivas tales como el hecho que los equipos de SPM, al contar con los imanes en la superficie del rotor, si bien son más sencillos de fabricar, tienen el inconveniente del riesgo de desprenderse a velocidades altas de rotación, las que en aplicaciones de tracción están alcanzando las 17.000 revoluciones por minuto, razón por la cual, en la mayoría de los casos se prefieren los IPM, a pesar de su complejidad constructiva. También se pueden demostrar ventajas desde el punto de vista magnético del IPM por sobre el SPM.

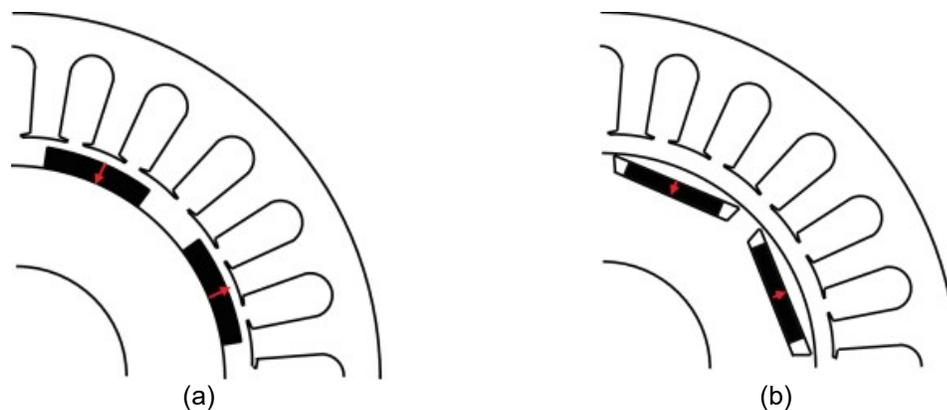


Figura 3.28. Topologías alternativas de máquinas PM con imanes en el rotor: (a) SPM, (b) IPM

Es posible encontrar varias topologías de IPM, los cuales presentan ventajas en aplicaciones específicas. Las figuras 3.29 muestra ejemplos de estas topologías del rotor.

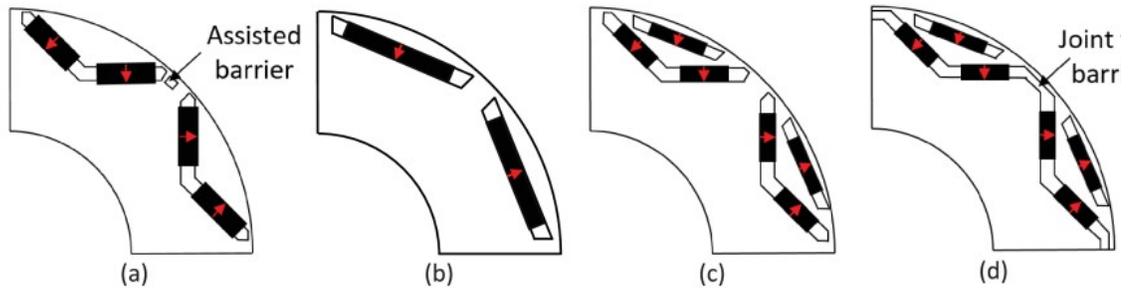


Figura 3.29. Disposiciones de PM en rotores de máquinas IPM: (a) en forma de V, (b) de tipo tangencial, (c) en forma de delta, (d) en forma de delta con barrera de flujo común [11].

Desde el punto de vista magnético, la dirección angular en la que fluye la parte principal del flujo a través del entrehierro desde el rotor hacia el estator se denomina eje directo (d), equivalente a un polo norte magnético. El eje cuadratura (q) está en el punto central entre dos ejes directos. Cuando el valor de reluctancia de eje d y q son diferentes se obtienen par por esta vía. Una topología con imanes permanentes que genera par de reluctancia, podría actuar como motor de reluctancia al no contar con los imanes, donde un valor bajo de inductancia en el eje d y uno alto en el eje q optimiza el rendimiento del motor. Por lo cual, es común encontrar espacios de aire en los IPM, que cumplen la función de incrementar el par de reluctancia y que son llamadas barreras de flujo figuras 3.30 (a), a raíz de la permeabilidad relativa cercana a la unidad de los imanes, esto implica menor reactancia en el eje d respecto del eje q debido a que en este último existe una trayectoria con mayor contenido de hierro

respecto al otro eje, con trayectoria por los imanes, lo que resulta en lo que se conoce como saliencia del rotor.

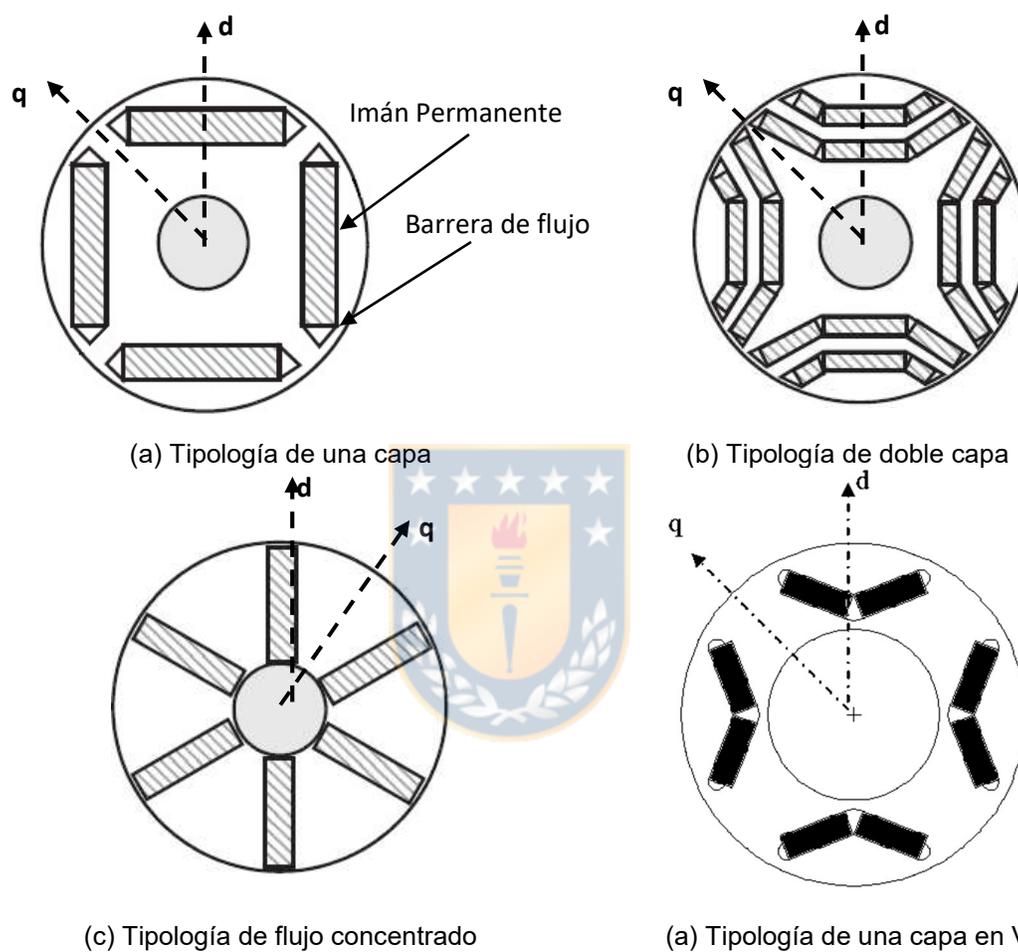


Figura 3.30. Distintas configuraciones de rotor de IPM [61]

En general, los IPM presentan características interesantes cuando se comparan con los SPM, las que se detallan a continuación [13-15]:

- Inductancia elevada cuando opera en la zona de debilitamiento de campo (flux weakening).
- Menor riesgo de desmagnetización de los imanes.
- Mejores prestaciones a elevadas temperaturas.
- Mayor resistencia a la corrosión y a los impactos.

Se debe destacar el hecho de que el motor IPM genera par combinando, el par correspondiente a reluctancia, producto de la saliencia del rotor, y el par magnético, debido a los imanes permanentes, lo que implica una mayor densidad de par en comparación con el SPM, que solo genera el par producido por los imanes permanentes [59].

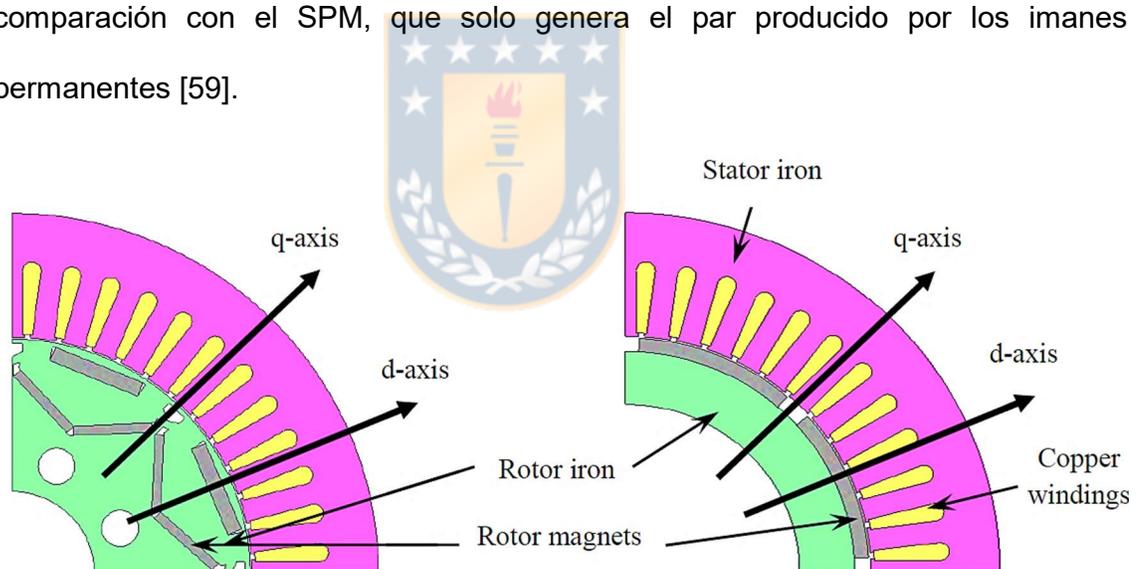


Figura 3.31 Topología de roto IPM e SPM ejes cuadratura y directo [59]

3.6.1. Comportamiento y modelo de régimen permanente de motor IPM

Con el fin de explicar las diferencias en cuanto al par desarrollado en la máquina IPM respecto de la SPM, se presenta el análisis matemático en régimen permanente en ejes directo (d) y en cuadratura (q), a través del cual se demuestra la generación de par para ambos casos, y de paso, comprender la operación de la máquina de reluctancia y reluctancia asistida por imanes permanentes.

Para modelar un motor las tres ecuaciones fundamentales son:

- Ecuación de tensión.
- Ecuación de flujo.
- Ecuación de par electromagnético.

En el caso de un IPM trifásico, utilizando transformada de Park. En régimen permanente el diagrama fasorial es como el mostrado en la figura 3.32, donde la fuerza electromotriz (FEM) de cada fase en circuito abierto está determinada por la ecuación.

$$E = jE_q = j\omega\psi_{PM} \quad (3.1)$$

Donde, ω es la velocidad síncrona (ángulo eléctrico) y ψ_{PM} es el flujo en el devanado estático debido a la componente fundamental en el eje directo (d) producido por los imanes permanentes. Se desprecia cualquier componen en el eje d de FEM asociada con la fuga de flujo magnético, especialmente cuando el devanado estático está sinusoidalmente distribuido.

Del diagrama fasorial mostrado en la figura 3.32 se puede ver que:

$$V_d = RI_d - X_q I_q \quad (3.2)$$

$$V_q = RI_q + E_q + X_d I_d \quad (3.3)$$

Los ángulos δ y γ se definen tal como se muestra en la figura 3.32, así el voltaje y la intensidad de fase en el motor se pueden expresar como:

$$V_d = -V \sin \delta, V_q = V \cos \delta \quad (3.4)$$

$$I_d = \pm I \sin \gamma, I_q = I \cos \gamma \quad (3.5)$$

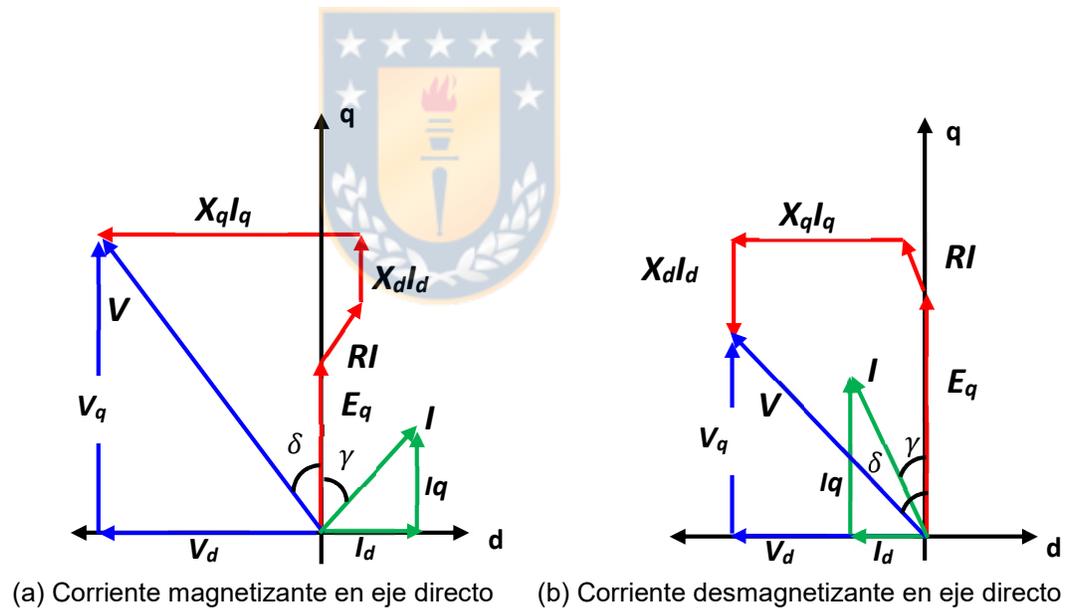


Figura 3.32. Diagrama fasorial IPM.

En motores grandes, la resistencia de los conductores del estator R es despreciable, por lo que se tiene a partir de (3,2) y (3,3):

$$I_d = \frac{V_q - E_q}{X_d} \quad (3.6)$$

$$I_q = -\frac{V_d}{X_q} \quad (3.7)$$

La potencia compleja por fase y par de polos en el motor se expresa como:

$$\vec{S} = \vec{V} \cdot \vec{I} = (V_d + jV_q)(I_d + jI_q) = V_d I_d + V_q I_q + j(V_q I_d + V_d I_q) = P + jQ \quad (3.8)$$

Sustituyendo (1.4), (1.6) y (1.7) en (1,8), la potencia activa aparece expresada por

$$P = V_d I_d + V_q I_q = V_d \frac{(V_q - E_q)}{X_d} - V_q \frac{V_d}{X_q} = \frac{V_d(-E_q)}{X_d} + \frac{(X_q - X_d)V_d V_q}{X_d X_q} \quad (3.9)$$

$$P = \frac{V_t E_q}{X_d} \sin \delta + \frac{(X_d - X_q)V_t^2}{2X_d X_q} \sin(2\delta) \quad (3.10)$$

$$\text{Donde: } V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (3.11)$$

Asumiendo que no existieran pérdidas, el par electromagnético total desarrollado por una máquina trifásica IPM con p pares de polos viene determinado por (3.12).

$$T = \frac{3p}{\omega} P = \frac{3p}{\omega} \left[\frac{V_t E_q}{X_d} \sin \delta + \frac{(X_d - X_q)V_t^2}{2X_d X_q} \sin(2\delta) \right] \quad (3.12)$$

En un motor de reluctancia pura $E_q = 0$

$$T = \frac{3p}{\omega} \frac{(X_d - X_q)V_t^2}{2X_d X_q} \sin(2\delta) \quad (3.13)$$

El primer término de (3.12) es el par debido al flujo magnético generado por el imán permanente, y el segundo término es el par de reluctancia el cuál es proporcional a

la diferencia de inductancias en el eje d y de q , $L_d - L_q$. En un motor SPM, L_d es prácticamente igual a L_q , por lo que el par reluctante es cero.

En un motor IPM, L_d es menor que L_q , debido a que en el eje directo de éste tipo de rotores, el flujo magnético tiene que atravesar los espacios donde están alojados los imanes permanentes, además del entrehierro, mientras que el flujo magnético en la dirección del eje de cuadratura sólo tiene que atravesar la distancia de entrehierro.

Se puede deducir que un motor IPM puede alcanzar un mayor par que el generado en un SPM, el cual no tiene la capacidad de generar componente de par reluctante por diferencia de inductancias. Sin embargo, la existencia de par de reluctancia no implica necesariamente que un IPM alcance mayor relación potencia-tamaño que el SPM, debido a que en un IPM el enlace de flujo de los imanes en el devanado del estator no es el mismo que en el motor de imanes superficiales, tomando la misma cantidad de material o volumen de imanes en ambos casos.

La ecuación (3.14) es otra forma de expresar la ecuación (3.12), en la cual se puede visualizar con mayor claridad el par total generado por un IPM, el que se incrementa debido a la saliencia del rotor, y podría ser superior al de un SPM cuando se da el caso de tener el mismo flujo magnético de los imanes enlazados por el devanado estatórico.

$$T = \frac{3p}{2} [\psi_{PM} I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (3.14)$$

En resumen, el par electromagnético de IPM consta de dos componentes. Uno es el par de imán permanente generado por la interacción del campo magnético del

entrehierro y el campo magnético del estator. El otro es el par de reluctancia generado por la asimetría del circuito magnético del eje d y el eje q . [83].

3.6.2. Argumentos de la elección de la máquina eléctrica

Las Máquinas Síncronas de Imanes Permanentes Interior (IPMSM) o simplemente IPM se observan como topología preferida en aplicaciones de tracción, por encima de las de Imanes Permanente Superficiales (SPMSM) o simplemente SPM [11][23], debido a beneficios tales como la contribución del par de saliencia, producto de la diferencia entre la inductancia del eje de cuadratura y de eje directo, mínima masa de los imanes, alta resistencia a la desmagnetización, con requerimiento de imanes de menor coercitividad, amplia capacidad de debilitamiento de campo, alta eficiencia en la operación y velocidades más altas de rotación, sin riesgos de desprendimiento de los PM. En este punto, es importante destacar el alto precio y concentración en la comercialización de los PMs de tierras raras, especialmente los que tienen alto contenido de disprosio (Dysprosium, Dy) y el terbio (Terbium, Tb), componentes necesarios para aumentar la resistencia a la desmagnetización por alta temperatura de operación y que aumentan rápidamente su valor, junto al alto costo del neodimio (Neodymium, Nd). El reducir el uso de imanes permanentes de tierra raras, junto a la disminución de contenido Dy y Tb , en los PMSMs es importante y en los IPM se logra respecto a las SPM.

En estudios se demuestra que la masa de material activo del rotor, para el SPM, es alrededor de un 45% menor respecto del IPM, pero el rotor SPM necesita un recubrimiento sobre los imanes para lograr resistencia mecánica suficiente a la

fuerza centrífuga en altas velocidad de rotación. El efecto de regeneración del SPM es más del 50% más alto que el IPM, lo que implica que este último, es mejor en caso de fallas de regeneración descontrolada a velocidades de operación altas, del orden de 10.000 rpm [59].

Considerando todos los argumentos expuestos anteriormente, la Máquina Radial Síncrona de Imanes Permanentes Interior (IPMSRM) es la designada como la más apropiada en aplicaciones de tracción eléctrica, por lo que será la usada desde este punto en adelante.



Capítulo 4. Relaciones analíticas en el diseño óptimo máquinas eléctricas

En el capítulo anterior se determinó la máquina eléctrica idónea para el uso en aplicaciones de tracción de vehículos eléctricos, poniendo atención a las usadas en aplicaciones de transporte público de pasajeros, debido a que tienen prioridad en las estrategias energéticas a nivel mundial y estatal, en la búsqueda de la reducción gases de efecto invernadero y el aumento de la eficiencia energética.

Establecido el tipo de máquina eléctrica de propulsor más adecuada para movilidad eléctrica, se realiza un análisis más profundo, con el objetivo de establecer los parámetros y particularidades que permitan realizar un diseño a través de una metodología óptima.

En cuanto al diseño de máquinas eléctricas, se encuentran las ecuaciones de dimensionamiento con factor D^2L y D^3L . En el caso de D^2L , la metodología relaciona la potencia y la velocidad sincrónica con el volumen de la máquina, sin considerar factores claves como la geometría completa del estator, las densidades de flujo en piezas de hierro y densidades de corriente en los conductores. Para el caso de D^3L [61], esta busca maximizar la potencia aparente en el entrehierro bajo restricción de estrés tangencial, limitando la temperatura generada por las pérdidas [62], de forma de evitar daños a los imanes permanentes metálicos usados en el interior de estos equipos, punto relevante al considerar que en estas aplicaciones se busca reducir el tamaño del motor y esto sumado a un alto requerimiento de par en bajas

velocidades y en pendientes, implica generación de calor que puede afectar los imanes insertados en el rotor.

A partir del diseño logrado en este capítulo, que se denomina máquina de referencia o base, se desarrolla una metodología que permita realizar ajustes para enfrentar nuevos requerimientos sin la necesidad de repetir el complejo y largo proceso de diseño óptimo, el que implica el uso de herramientas de software especializados con alto requerimiento computacional, simplificando y acelerando el rediseño a través de la extrapolación de resultados.

4.1. Relaciones analíticas en el diseño óptimo máquinas eléctricas para coeficiente D^3L

Las expresiones usadas en el diseño de máquinas de imanes permanentes son las que se presentan a continuación para coeficiente de salida D^3L [61][62][63]

4.1.1. Relaciones geométricas

En máquinas pequeñas y medianas, normalmente los dientes del estator son rectangulares y las ranuras trapezoidales. En las máquinas sincrónicas grandes, se usan devanados preformados, los cuales por simplicidad son alojados en ranuras con geometría rectangular y dientes trapezoidales.

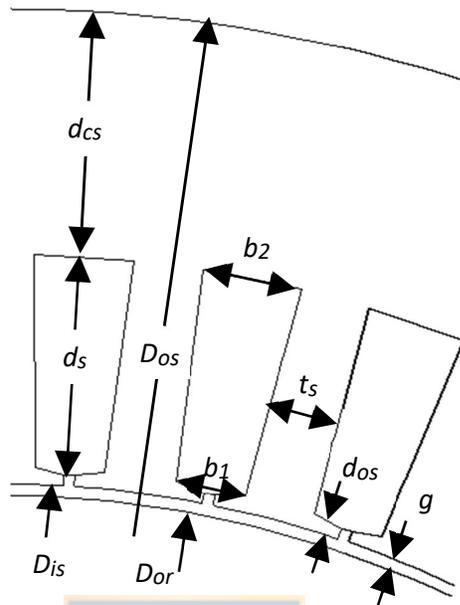


Figura 4.1. Sección de laminación de estator con ranura trapecoidal.

4.1.2. Carga magnética

En la geometría de la figura 4.1, se muestran los siguientes parámetros para el estator: diámetro externo del D_{os} , diámetro interno D_{is} , profundidad del yugo d_{cs} , profundidad de la ranura d_s , altura inferior de la ranura d_{os} , ancho superior de ranura b_2 , ancho inferior de ranura b_1 , abertura de la ranura b_0 , ancho del diente t_s , y para el rotor: diámetro externo del rotor D_{or} . El entrehierro corresponde a g .

La densidad de flujo en dientes y yugo del estator puede ser expresada como:

$$B_{ts} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \frac{p\phi_p}{Q_s t_s k_{is} l_i} \quad (4.1)$$

$$B_{cs} = \frac{\phi_p}{2} \left(\frac{1}{d_{cs} k_{is} l_i}\right) \quad (4.2)$$

Donde k_{is} es el factor de apilamiento, el que representa la relación entre el largo del hierro del estator, incluyendo los espacios debidos a la laminación y el largo físico del hierro l_i , ϕ_p corresponde a flujo por polo.

Para el valor máximo de la densidad de flujo, se tiene:

$$\hat{B}_{g1} = \frac{p\phi_p}{2D_{is}l_e} \quad (4.3)$$

donde l_e es el largo efectivo de la laminación de hierro, incluyendo los espacios de aire internos.

Basado en la ley de continuidad de flujo y la geometría mostrada en la figura 4.1. Es posible expresar:

$$t_s = \frac{\pi}{Q_s k_{is}} \left(\frac{B_{g1}}{B_{ts}} \right) \left(\frac{l_e}{l_i} \right) \quad (4.4)$$

$$d_{cs} = \frac{D_{is}}{P k_{is}} \left(\frac{B_{g1}}{B_{cs}} \right) \left(\frac{l_e}{l_i} \right) \quad (4.5)$$

Considerando la carga magnética en el diente G_{ts} y carga magnética en el yugo G_{cs} :

$$G_{ts} = \frac{1}{k_{is}} \left(\frac{B_{g1}}{B_{ts}} \right) \left(\frac{l_e}{l_i} \right) \quad (4.6)$$

$$G_{cs} = \frac{1}{k_{is}} \left(\frac{B_{g1}}{B_{cs}} \right) \left(\frac{l_e}{l_i} \right) \quad (4.7)$$

Se tienen las siguientes expresiones simplificadas:

$$t_s = \frac{\pi \cdot D_{is}}{Q_s} \cdot G_{ts} \quad (4.8)$$

$$d_{cs} = \frac{D_{is}}{P} \cdot G_{cs} \quad (4.9)$$

El diámetro externo del estator y profundidad de la ranura puede ser calculada con la expresión:

$$D_{os} = D_{is} + 2(d_{os} + d_s + d_{cs}) \quad (4.10)$$

El ancho de la ranura y la profundidad del yugo queda expresado por:

$$\pi(D_{is} + 2d_{os}) = (t_s + b_1)Q_s \quad (4.11)$$

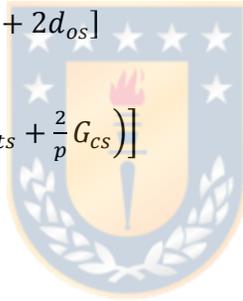
$$\pi(D_{os} - 2d_{cs}) = (t_s + b_2)Q_s \quad (4.12)$$

Resolviendo las ecuaciones para b_1 , b_2 y d_s se obtiene.

$$b_1 = \frac{\pi}{Q_s} [D_{is}(1 - G_{ts}) + 2d_{os}] \quad (4.13)$$

$$b_2 = \frac{\pi}{Q_s} \left[D_{os} - D_{is} \left(G_{ts} + \frac{2}{p} G_{cs} \right) \right] \quad (4.14)$$

$$d_s = \frac{Q_s}{2\pi} (b_2 - b_1) \quad (4.15)$$



El área de la ranura es, aproximadamente:

$$A_r = \frac{d_s}{2} (b_1 + b_2) \quad (4.16)$$

Insertando las ecuaciones (4.13) – (4.15) en la ecuación (4.16), se obtiene una ecuación cuadrática en términos de la relación de diámetro interior y exterior.

$$a \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right)^2 - 2b \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right) + 1 = \frac{Q_s \cdot A_r}{\frac{\pi \cdot D_{os}^2}{4}} + \frac{\delta_1}{D_{os}^2} \quad (4.17)$$

Donde

$$a = \left(G_{ts} + \frac{2}{p} G_{cs} \right)^2 - (1 - G_{ts})^2 \quad (4.18)$$

$$b = G_{ts} + \frac{2}{p} G_{cs} \quad (4.19)$$

$$\delta_1 = 4[d_{os}^2 + D_{is} \cdot d_{os}(1 - G_{ts})] \quad (4.20)$$

La ecuación para la potencia activa de entrada a la máquina medida en el entrehierro, de acuerdo con la regla *Essen* de la referencia [62], es:

$$P_s = \frac{3}{2} \omega_e k_{is} k_p N_s \phi_p I_s \cos \phi_g \quad (4.21)$$

Desde la ecuación (4.21), la potencia aparente nominal en la máquina puede ser expresada como:

$$S_{gap} = 3\pi f_s k_w k_{is} k_p N_s \phi_p I_s \quad (4.22)$$

$$\phi_p = \frac{2D_{is}L_s}{p} B_{g1} \quad (4.23)$$

$$J_{rms} = \frac{3\sqrt{2}N_s I_s}{Q_s A_w} \quad (4.24)$$

$$A_w = k_w A_r \quad (4.25)$$

En términos de la densidad de flujo en el entrehierro, densidad de corriente J_{rms} , y área de la ranura A_r , la ecuación (4.22) puede ser reescrita como:

$$S_{gap} = \sqrt{2}\pi f_e k_{is} k_p \frac{D_{is}L_s}{p} (Q_s k_w A_r) \hat{B}_{g1} J_{rms} \quad (4.26)$$

Finalmente, a partir de la ecuación (4.17), insertándola en la ecuación (4.26), se obtiene:

$$S_{gap} = \frac{\sqrt{2}\pi^2}{4} k_w k_i k_p \frac{f_e}{p} \left[a \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right)^3 - 2b \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right)^2 + \frac{D_{is}}{D_{os}} \right] J_{rms} \hat{B}_{g1} D_{os}^3 L_s \quad (4.27)$$

La potencia de salida en watts es:

$$P_{out} = S_{gap} \cdot \eta_{gap} \cos \phi_{gap} \quad (4.28)$$

En términos de velocidad de rotación mecánica R_{mech} , se obtiene:

$$\frac{P_{out}}{R_{mech}} = \frac{S_{gap}}{R_{mech}} \cdot \eta_{gap} \cos \phi_{gap} \quad (4.29)$$

Escribiendo en términos de potencia de salida, la cantidad σ_o es llamada coeficiente de salida D_{os}^3 .

$$\frac{P_{out}}{R_{mech}} = \sigma_o D_{os}^3 L_s \quad (4.30)$$

La optimización de diseño de la máquina se logra a partir de la expresión incluida entre paréntesis de cuadrados en la ecuación (4.27).

$$f_o(D_{is}/D_{os}) = \left[a \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right)^3 - 2b \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right)^2 + \frac{D_{is}}{D_{os}} \right] \quad (4.31)$$

El valor óptimo de D_{is} se puede determinar diferenciando la ecuación (4.31) con respecto a D_{is} mientras se mantiene constante D_{os} y se establece el resultado en cero. Por lo tanto,

$$\frac{\partial f_o(D_{is}/D_{os})}{\partial D_{is}} = 0 = 3a \frac{D_{is}^2}{D_{os}^3} - 4b \frac{D_{is}}{D_{os}^2} + \frac{1}{D_{os}} \quad (4.32)$$

$$\left. \frac{D_{is}}{D_{os}} \right|_{Optimal} = \frac{2b \pm \sqrt{4b^2 - 3a}}{3a} \quad (4.33)$$

4.2. Diseño de máquina eléctrica

A partir información disponible en el capítulo 2, donde se muestra las ofertas de algunos fabricantes asiáticos, europeos, norteamericanos y sudamericanos, se extrae información referente a las potencias de los motores usados como impulsores de estos vehículos, centrando la atención en el caso de los buses de cero emisiones, los que tienen prioridad en la política de disminución de gases de efecto invernadero y eficiencia energética de varias naciones. Se observa que las potencias de los motores están en el rango de los 90kW a los 450kW, dependiendo de la forma en la que funciona la transmisión, la que puede usar un motor principal o dos unidades acopladas a través de reductor directamente en cada rueda. En el caso de los vehículos livianos, las potencias de estos están en el rango de 12kW a 110kW, de acuerdo a información disponible en los informes Oakridge [64].

En el diseño óptimo de máquina eléctrica, que será usada como base para posteriormente realizar escalamiento, se revisa información de distintos fabricantes disponibles en [64][65], la que, en este caso, se usará para definir la cantidad de ranuras y de polos de la máquina a diseñar.

TABLA 4.1 INFORMACIÓN DISTINTOS FABRICANTES DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS [64]

| Parameter | Accord G | Accord M | LEAF | 2010 Prius | LS 600h | Camry | 2004 Prius |
|---|----------------------|---------------------|---|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Lamination Dimensions | | | | | | | |
| Stator OD, cm | 29,202 | 29,134 | 20,0 | 26,4 | 20,0 | 26,4 | 26,9 |
| Stator ID, cm | 19,660 | 19,660 | 13,10 | 16,19 | 13,086 | 16,19 | 16,19 |
| Stator stack length, cm | 3,762 | 6,17 | 15,1 | 5,08 | 13,54 | 6,07 | 8,4 |
| Rotor OD, cm | 19,504 | 19,500 | 13,0 | 16,04 | 12,91 | 16,05 | 16,05 |
| Rotor lamination ID, cm | 11,80 | | | 5,1 | 5,3 | 10,5 | 11,1 |
| Rotor stack length, cm | | | | 5,0165 | 13,59 | 6,2 | 8,36 |
| Air gap, mm | 0,78 | 0,8 | | 0,73 | 0,89 | 0,73025 | 0,73025 |
| Lamination thickness mm | 0,34 | | | 0,305 | 0,28 | 0,31 | 0,33 |
| Stator Wiring | | | | | | | |
| Number of stator slots | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 |
| Parallel circuits per phase | 2 legs | | 4 legs | | 2 legs | 2 legs | |
| Coil in series per phase | 4 per leg | | 2 per leg | 8 | 4 per leg | 4 per leg | |
| Number of wires in parallel | 11 per leg | 10 | 15 per leg | 12 | 9 per leg | 9 per leg | 13 |
| Wire size, AWG | ~18 | ~18 | ~20 | 20 | 20 | 20 | 19 |
| Phase resistance (21°C), Ω | | | ~0,00567 | 0,077 | 0,0225 | 0,023 | 0,069 |
| Slot depth, mm | ~28,59 | ~28,19 | | 30,9 | 19,25 | 30,9 | 33,5 |
| Slot opening, mm | ~2,037 | ~2,037 | | 1,88 | 1,88 | 1,88 | 1,93 |
| Magnets (neodymium iron boron [NdFeB]) | | | | | | | |
| Magnet dimensión, mm | 26,5x6,28x ~37,62 | 26,5x6,28x ~61,7 | 21,3x8,43x2,29 and 28,9x8,36x3,79 | 49,3x17,88x 7,16 | 66,4x18,7x 3,05 | 60,6x19,1x 6,6 | 83,1x18,9x 6,5 |
| Magnet volumen, cm ³ | 6,26 | 10,27 | | 6,31 | 3,78 | 7,63 | 10,2 |

4.2.1. Motores usado vehículos eléctricos comerciales

Desde la información disponible en la tabla 4.1, se determina que el uso de 48 ranuras es el estándar en general en el diseño de impulsores para vehículos eléctricos. En relación a las dimensiones, en el diámetro exterior estas varían entre 290 y 200 mm. Otro punto interesante es que la mayoría usa configuración de rotor con imanes en V. En cuanto al tamaño del entrehierro, este oscila entre los 0,75 a 0,89 mm.

Se procede a diseñar la máquina a partir de la información lograda hasta este punto, desde la revisión del estado del arte en los artículos científicos y la información disponible de los fabricantes de unidades para tracción.

Para el diseño de la máquina de referencia, se consideran 48 ranuras de estator, un diámetro externo de 283 mm, 8 polos y un entrehierro de 1 mm.

4.2.2. Diseño del estator del motor

La información necesaria para realizar el diseño óptimo con coeficiente D³L basado en dimensiones, cantidad de ranuras y dimensiones de imanes, es la resumida a continuación.

- Diámetro externo estator $D_{os} = 283 [mm]$
- Pares de polos de la máquina $p = 8 [un]$
- Ranuras del estator $Q_s = 48 [un]$
- Densidad de flujo en el yugo $B_{cs} = 0,96 [T]$
- Densidad de flujo en dientes $B_{ts} = 1,65 [T]$
- Densidad de flujo de la fundamental en el entrehierro $\hat{B}_{g1} = 0,8 [T]$
- Densidad de corriente $J_{rms} = 6.7 [A/mm^2]$
- Factor de apilamiento: $k_{is} = 0,95 [un]$
- Factor de llenado de cobre $k_{cu} = 0,4 [un]$
- Restricción de estrés tangencial $\sigma_{tan} = 40 [KPa]$

Se tiene que, aplicando las relaciones de flujo magnético por polo, el valor de la fundamental de la densidad de flujo magnético es:

$$G_{cs} = \frac{\hat{B}_{g1}}{k_{is} \cdot B_{cs}} = 0,877 \quad (4.35)$$

$$G_{ts} = \frac{\hat{B}_{g1}}{k_{is} \cdot B_{ts}} = 0,510 \quad (4.36)$$

$$a \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right)^2 - 2b \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right) + 1 = \frac{Q_s \cdot \hat{A}_s}{\pi \cdot D_{os}^2} + \frac{\delta_1}{D_{os}^2} \quad (4.37)$$

$$a = \left(G_{ts} + \frac{2}{p}G_{cs}\right)^2 - (1 - G_{ts})^2 \quad (4.38)$$

$$a = 4 \frac{G_{cs}^2}{2p^2} + 4 \frac{G_{ts}G_{cs}}{2p} + 2G_{ts} - 1 = 0,2927[mm] \quad (4.39)$$

$$b = G_{ts} + \frac{2}{p}G_{cs} = 0,7297[mm] \quad (4.40)$$

La potencia aparente en el entrehierro S_{gap} es maximizada cuando la función $f_0\left(\frac{D_{se}}{D_s}\right)$ es maximizada, definida en (4.41):

$$f_0\left(\frac{D_{is}}{D_{os}}\right) = \frac{D_{is}}{D_{os}} f\left(\frac{D_{is}}{D_{os}}\right) = \frac{D_{is}}{D_{os}} \left(a \frac{D_{is}^2}{D_{os}^2} - 2b \frac{D_{is}}{D_{os}} + 1\right) \quad (4.41)$$

$$f_0\left(\frac{D_{is}}{D_{os}}\right) = \left(a \frac{D_{se}^3}{D_s^3} - 2b \frac{D_{se}^2}{D_s^2} + \frac{D_{se}}{D_s}\right) \quad (4.42)$$

$$\frac{df_0\left(\frac{D_{is}}{D_{os}}\right)}{d\left(\frac{D_{is}}{D_{os}}\right)} = \left(3a \frac{D_{is}^2}{D_{os}^2} - 4b \frac{D_{is}}{D_{os}} + 1\right) \quad (4.43)$$

$$\left(\frac{D_{is}}{D_{os}}\right)_1 = 0,3879; \quad \left(\frac{D_{is}}{D_{os}}\right)_2 = 2,9361 \quad (4.44)$$

$$D_{is1} = \left(\frac{D_{is}}{D_{os}}\right)_1 * D_{os} = 109,77[mm] \quad (4.45)$$

$$t_s = \frac{\pi \cdot D_{is}}{Q_s} \cdot G_{ts} = 3,667[mm] \quad (4.46)$$

$$d_{cs} = \frac{D_{is}}{2P} \cdot G_{cs} = 12,036[mm] \quad (4.47)$$

$$b_1 = \frac{\pi}{Q_s} [D_{is}(1 - G_{ts}) + 2d_{os}] = 3,033[mm] \quad (4.48)$$

$$b_2 = \frac{\pi}{Q_s} \left[D_{os} - D_{is} \left(G_{ts} + \frac{2}{p}G_{cs} \right) \right] = 13,280[mm] \quad (4.49)$$

$$d_s = \frac{D_{os} - D_{is}}{2} - (d_{os} + d_{cs}) = 73,578[mm] \quad (4.50)$$

4.2.3. Calcular el óptimo Dse/Ds que maximiza los VAgap (Sgap)

Expresión para la tensión inducida

$$e_{(t)} = E_{max} \sin(2\pi f_s t) \quad (4.51)$$

$$E_{max} = 4\pi \frac{f_s}{p} k_w N \hat{B}_{g1} L_s D_{is} \quad (4.52)$$

$$I_{max} = \frac{\pi}{2} k_i \frac{D_{is}}{mN} A \quad (4.53)$$

$$A = \frac{2mN}{\pi D_{is}} I_{rms} \quad (4.54)$$

$$i_{(t)} = I_{max} \sin(2\pi f_s t - \varphi) \quad (4.55)$$

$$S_{gap} = \frac{m}{T} \int_0^T e_{(t)} i_{(t)} dt \quad (4.56)$$

$$S_{gap} = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi^2}{4} k_w k_i k_p \frac{f_s}{p} \left[a \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right)^3 - 2b \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right)^2 + \frac{D_{is}}{D_{os}} \right] J_{rms} \hat{B}_{g1} D_{os}^3 L_s \quad (4.57)$$

Con una densidad de corriente RMS de 6,7 [A/mm²]; $k_{cu} = 0,4$; $k_i = 0,95$; $L_s = 200$ [mm], estrés tangencial de 40[kPa].

La expresión para el par (*torque*) en función del stress tangencial es:

$$T = 2 \left(\frac{\pi \cdot D_{is}^2}{4} L_s \right) * \sigma_{Ftan} \quad (4.72)$$

$$A \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right)^2 - B \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right) + C \quad (4.73)$$

$$A = -\frac{\sqrt{2} \cdot k_w}{4} \cdot a \cdot J_{rms} \cdot \hat{B}_{g1} \cdot \cos \gamma = -0,2218 \quad (4.74)$$

$$B = \left(\frac{\sigma_{max}}{D_{os}} + \frac{\sqrt{2} \cdot k_w}{2} \cdot b \cdot J_{rms} \cdot \hat{B}_{g1} \cdot \cos \gamma \right) = 1,2475 \quad (4.76)$$

$$C = -\frac{\sqrt{2} \cdot k_w}{4} \cdot J_{rms} \cdot \hat{B}_{g1} \cdot \cos \gamma = -0,7580 \quad (4.78)$$

$$A \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right)^2 - 2B \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right) + C \quad (4.80)$$

$$\left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right)_1 = -0,693 \quad (4.82)$$

$$D_{is} = \left(\frac{D_{is}}{D_{os}} \right)_1 \cdot D_{os} = 196,124[mm] \quad (4.83)$$

$$t_s = \frac{\pi \cdot D_{is}}{Q_s} \cdot G_{ts} = 6,551[mm] \quad (4.84)$$

$$d_{cs} = \frac{D_{is}}{2P} \cdot G_{cs} = 21,505[mm] \quad (4.86)$$

$$b_1 = \frac{\pi}{Q_s} [D_{is}(1 - G_{ts}) + 2d_{os}] = 6,416[mm] \quad (4.88)$$

$$b_2 = \frac{\pi}{Q_s} \left[D_{os} - D_{is} \left(G_{ts} + \frac{2}{p} G_{cs} \right) \right] = 9,156[mm] \quad (4.90)$$

$$b_2 = \frac{\pi}{48} \left[200 - 130,327 \left(0,495 + \frac{2}{8} 0,443 \right) \right] = 7,920[mm] \quad (4.91)$$

$$d_s = \frac{D_{os} - D_{is}}{2} - (d_{os} + d_{cs}) \quad (4.92)$$

$$d_s = \frac{200 - 130,327}{2} - (1 + 7,220) = 20,933[mm] \quad (4.93)$$

En la Tabla 4.2. se resumen las dimensiones del diseño del motor de referencia. En la primera columna se presentan las dimensiones sin la optimización. En la segunda columna, se resumen las dimensiones con optimización, bajo estrés tangencial de 40KPa, valor que está dentro del rango usados típicamente en PMSM comerciales indicados en la literatura [75] pagina 262.

TABLA 4.2. RESUMEN DISEÑO D³L

| | | D ³ L | |
|-------------------|------------|-------------------|------------------|
| | | Sin optimización | Con optimización |
| G _c : | 0,877 | σ_{Ftan} : | 40 kPa |
| G _t : | 0,510 | A: | -0,222 |
| a: | 0,293 | B: | 1,248 |
| b: | 0,730 | C: | -0,758 |
| D _{is} : | 109,771 mm | D _{is} : | 196,124 mm |
| D _{or} : | 107,771 mm | D _{or} : | 194,124 mm |
| t _s : | 3,667 mm | t _s : | 6,551 mm |
| d _{cs} : | 12,0363 mm | d _{cs} : | 21,5048 mm |
| b ₁ : | 3,649 mm | b ₁ : | 6,41596 mm |
| b ₂ : | 13,280 mm | b ₂ : | 9,156 mm |
| d _s : | 73,5782 mm | d _s : | 20,9335 mm |

Finalmente se logra el diseño de estator mostrado en la figura 4.2.

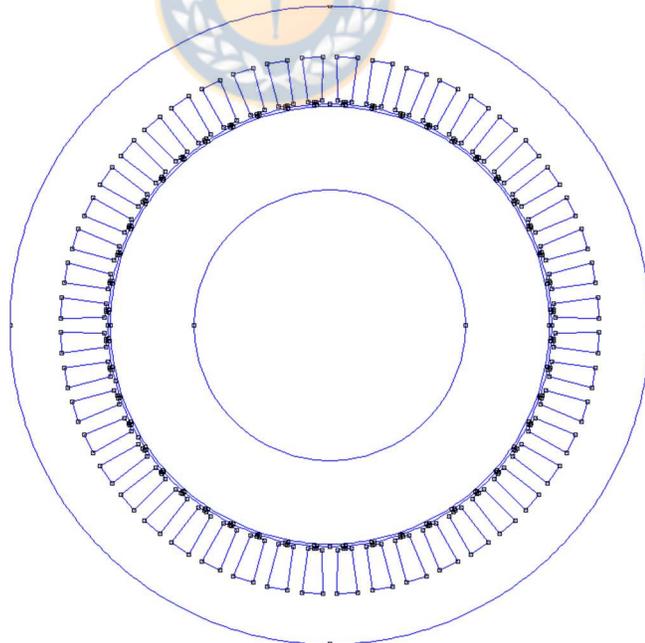


Figura 4.2. Diseño 48 ranuras, 8 polos, estrés tangencial 40KPa.

4.3. Devanados en máquinas eléctricas

El principio de funcionamiento básico de las máquinas eléctricas está establecido en la interacción entre los campos magnéticos y las corrientes que fluyen en los devanados de esta, por lo que, el objetivo del devanado es producir un campo magnético que se utiliza para crear par. Las construcciones y conexiones de las bobinas del devanado, junto con las corrientes y tensiones alimentadas a ellas, determinan los modos de funcionamiento y el tipo de máquina eléctrica. Al momento de diseñar una máquina eléctrica, se busca controlar el campo magnético gestionando el devanado, es decir, la posición, la forma, el movimiento, etc. En la literatura se encuentra una amplia variedad de artículos sobre motores de imanes permanentes con distintos tipos de devanados, los cuales presentan diferencias en cuanto al contenido armónico y eficiencia, listando los más comunes a continuación:

- Bobinado distribuido.
- Bobinado concentrado.
- Bobinado paso completo.
- Bobinado paso fraccionario.

Según diferentes construcciones, el devanado se puede clasificar en distribuido y concentrado. Cada tipo de bobinado puede tener diferentes capas, es decir, una capa, doble capa e incluso varias capas, cuantas más capas tenga, más difícil será su fabricación.

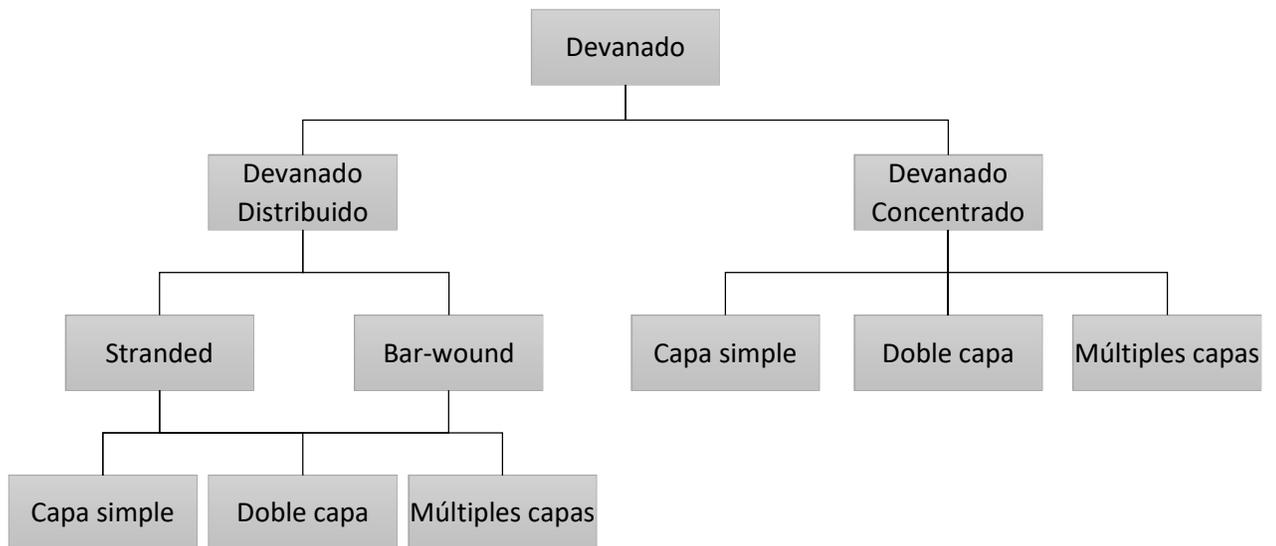
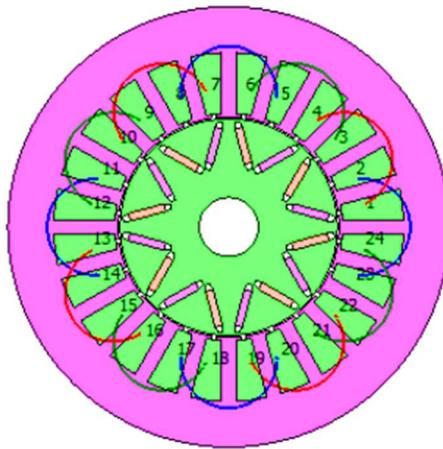


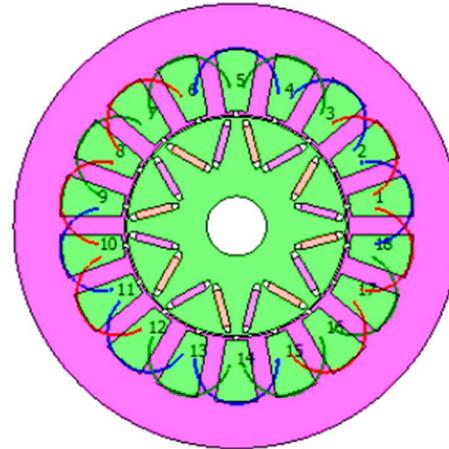
Figura 4.4. Clasificación de Devanados de Estator.

Desde el punto de vista de las topologías, típicamente encontramos máquinas de flujo axial, radial y algunas nuevas como el caso del denominado motor híbrido radial-axial [59]. Desde este punto en adelante, se trabajará sólo con las de flujo radial, que corresponden a las más común en aplicaciones de electro movilidad.

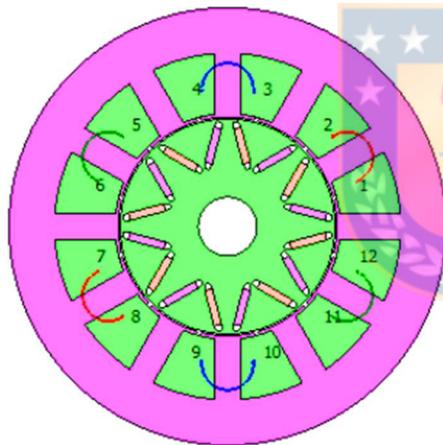
Las configuraciones de devanados distribuidos y concentrados son mostradas en las figuras 4.5 (a), (b), (c) y (d) [60], donde se aprecia que en los concentrados no existe cruce de cabezas de bobinas, lo que implica menor uso de cobre y menores pérdidas por I^2R . Adicionalmente se puede apreciar los del tipo paso completo y paso fraccionario.



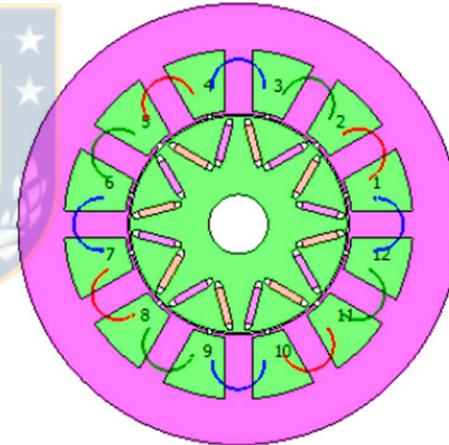
(a) Devanado distribuido de ranura completa de una sola capa de 24 ranuras



(b) Devanado distribuido de ranura fraccionaria de doble capa de 18 ranuras



(c) Devanado concentrado no superpuesto de una sola capa de 12 ranuras



(d) Devanado concentrado no superpuesto de doble capa de 12 ranuras

Figura 4.5. Conexiones típicas de devanados concentrados y distribuidos para máquina de 8 polos y 3 fases.

Los devanados distribuidos se utilizan principalmente en el estator de máquinas de CA, incluidas las máquinas de inducción y síncronas. El devanado puede crear una distribución de Fuerza Magneto Motriz (FMM) giratoria sinusoidal y un campo magnético en el entrehierro, en el caso de los distribuidos, estos son comunes en

todas las máquinas, mientras que los concentrados se pueden encontrar en máquina de baja potencia o bajo costo. Además, se aplican devanados multifásicos para mejorar el contenido armónico de la FMM en el entrehierro, es decir, hacerlo más sinusoidal. La FMM define el funcionamiento de la máquina y está involucrada en la determinación de parámetros tales como inductancia, par y características necesarias para el accionamiento que la comandará.

En la literatura se encuentran artículos, en los que se presentan algunas ventajas de los devanados concentrados, los que pueden ser de paso completo o de paso de paso fraccionario, entendiendo estos últimos, como bobinados que ocupa un ángulo inferior al de un polo magnético. El uso de paso fraccionario se debe a que reducen el contenido armónico de bajo orden, que es generado en devanados de paso completo, esta configuración, adicionalmente, reduce el material conductor, debido a que se logran cabezas de bobina más cortas, junto con conseguir mayor eficiencia.

Los devanados distribuidos de capa simple y de doble capa, estos últimos, las bobinas de distintas fases comparten una ranura [66].

En general las ventajas de los devanados de paso fraccionario respecto de los de paso completo se encuentran en los siguientes artículos [67], [68], [69], desde los cuales se desprende, para el caso de los de devanados distribuidos de paso fraccionario, las siguientes ventajas:

- Cabezas de bobinas más cortas, lo que implica menor pérdida y masa de cobre.
- Factores de relleno más altos, especialmente para el estator segmentado, que provee mayor par, mayor densidad de potencia y un menor costo de fabricación.

- Bajo acoplamiento mutuo que contribuye a una mejor tolerancia a fallas, especialmente para devanados concentrados de una sola capa.
- Operación en velocidad variable dado la facilidad del control del debilitamiento de campo a alta velocidad.
- Reducción significativa de las pérdidas Joule (I^2R) debido a cabezas de bobinas más cortas, lo que mejora la eficiencia.

4.3.1. Diseño de devanado para un motor de imanes permanentes

En esta sección se presentan la metodología empleadas en el diseño del devanado. A través de la ecuación (4.94), es posible determinar si el devanado usado es de tipo distribuido o concentrado, definiendo que distribuidos son donde q es mayor o igual a 1 y concentrados si es menor que 1.

$$q = \frac{Q_s}{m \cdot 2 \cdot p} = \frac{48}{3 \cdot 2 \cdot 4} = 2 \quad (4.94)$$

A partir de esta definición, se determina que el devanado usado, corresponde a uno de tipo distribuido de paso de ranura completa (FSDW), debido principalmente a la simplicidad.

Las expresiones que se resumen a continuación, corresponden al diseño de la disposición del devanado en las ranuras de la máquina, basándose en la referencia [70]. La metodología corresponde a la teoría de la estrella de ranuras, con la que se diseña una estructura simétrica y equilibrada. Esta metodología define la periodicidad t , que se obtienen determinando el máximo común divisor (MCD) entre el número de ranuras Q_s y los pares de polos p .

$$t = MCD\{Q_s, p\} \quad (4.95)$$

El número de fasores en la estrella se determina con:

$$n_{ph} = Q_s/t \quad (4.96)$$

El ángulo en grados entre ranuras consecutivas se determina con la expresión:

$$\alpha_r = 360 \cdot p/Q_s \quad (4.97)$$

El ángulo en grados entre fasores consecutivos se determina con la expresión:

$$\alpha_{ph} = 360 \cdot t/Q_s \quad (4.98)$$

La estrella de ranuras se divide en una cantidad de sectores dado por:

$$n_s = 2 \cdot m \quad (4.99)$$

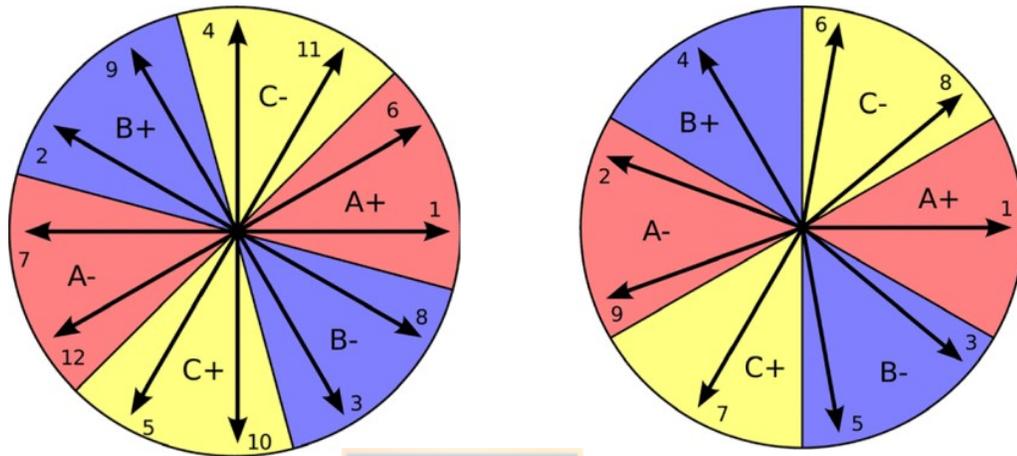
Cada sector abarcando un ángulo en grados de:

$$\alpha_s = 360/(2 \cdot m) \quad (4.100)$$

Con un ángulo mecánico entre ranuras de:

$$\alpha_m = 360/Q_s \quad (4.101)$$

Los sectores designados como A+ y A- están desplazados 180° en la estrella, como se muestra en la figura 4.6.



(a) Estrella de ranuras para Q/t par, con 12 ranuras, 10 polos.

(b) Estrella de ranuras para Q/t impar, con 9 ranuras, 8 polos.

Figura 4.6. Estrella de ranuras para máquina trifásica con devanado doble capa [70]

El número de fasores en cada sector, está dado por la expresión:

$$q = \frac{Q_s}{2 \cdot m \cdot t} \quad (4.102)$$

En relación a la cantidad de fasores por fase, se pueden dar dos situaciones, que Q_s/t sea un valor par o que sea un valor impar. En el primer caso, existe la misma cantidad de fasores en el sector positivo y negativo, como se muestra en la figura 4.6 (a). En el segundo caso, existe diferente cantidad de fasores en cada sector, como se muestra en la figura 4.6 (b).

El número de ranuras por cada fase de la máquina está dado por:

$$n_{rp} = \frac{Q_s}{m} \quad (4.103)$$

Donde Q_s es el número de ranuras, m es el número de fases

Considerando el diseño de la geometría del estator, basado en información de diferentes fabricantes de motores para electro movilidad, se tiene una configuración de 48 ranuras y 8 polos de alimentación trifásica, los cálculos para determinar la estrella de fasores son los siguientes:

$$t = MCD\{48,4\} = 4 \quad (4.104)$$

El número de fasores en la estrella se determina con:

$$n_{ph} = 48/4 = 12 \quad (4.105)$$

El ángulo en grados entre ranuras consecutivas se determina con la expresión:

$$\alpha_r = 360 \cdot 4/48 = 30^\circ \quad (4.106)$$

El ángulo en grados entre fasores consecutivos se determina con la expresión:

$$\alpha_{ph} = 360 \cdot 4/48 = 30^\circ \quad (4.108)$$

La estrella de ranuras se divide en una cantidad de sectores dado por:

$$n_s = 2 \cdot 3 = 6 \quad (4.109)$$

Cada sector abarcando un ángulo en grados de:

$$\alpha_s = 360/(2 \cdot 3) = 60^\circ \quad (4.110)$$

Con un ángulo mecánico entre ranuras de:

$$\alpha_m = 360/48 = 7,5^\circ \quad (4.111)$$

Usando el siguiente código de Matlab, se obtienen la estrella de fasores de la figura

4.7.

```
close all

for i=1:48
    theta=deg2rad(30*(i-1));
    Z=cos(theta)+j*sin(theta);
    compass(Z)
    hold on
    keyboard
end
```

En la figura 4.8. se muestra el bobinado de estator logrado con el uso del software

Dolomites.

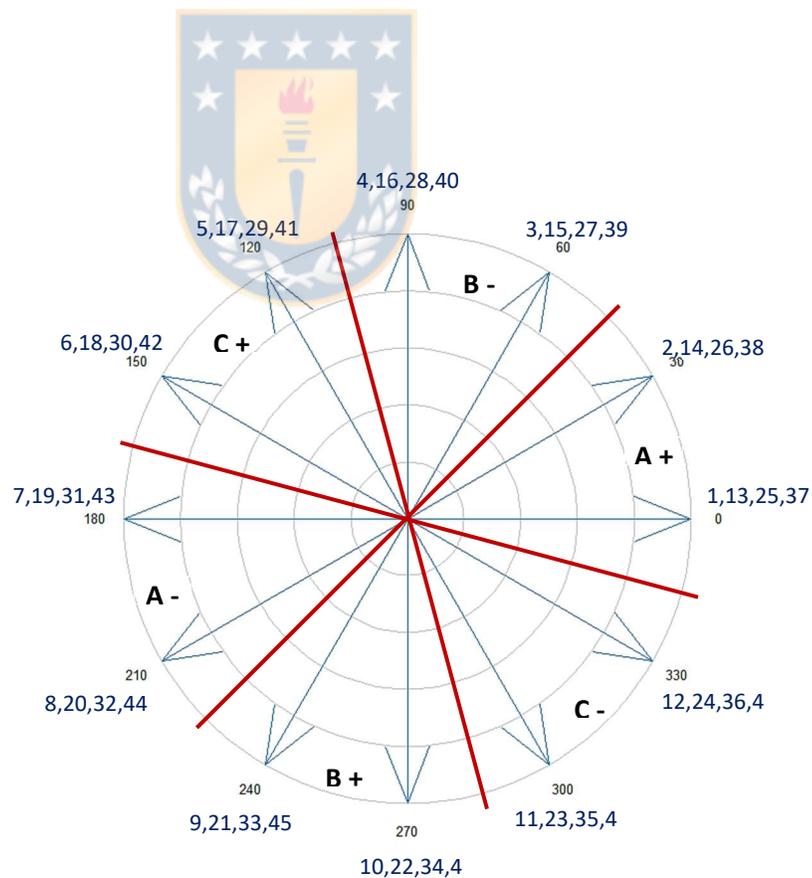


Figura 4.7. Estrella de fasores con detalle de bobinas por polo por fase, creado con código Matlab.

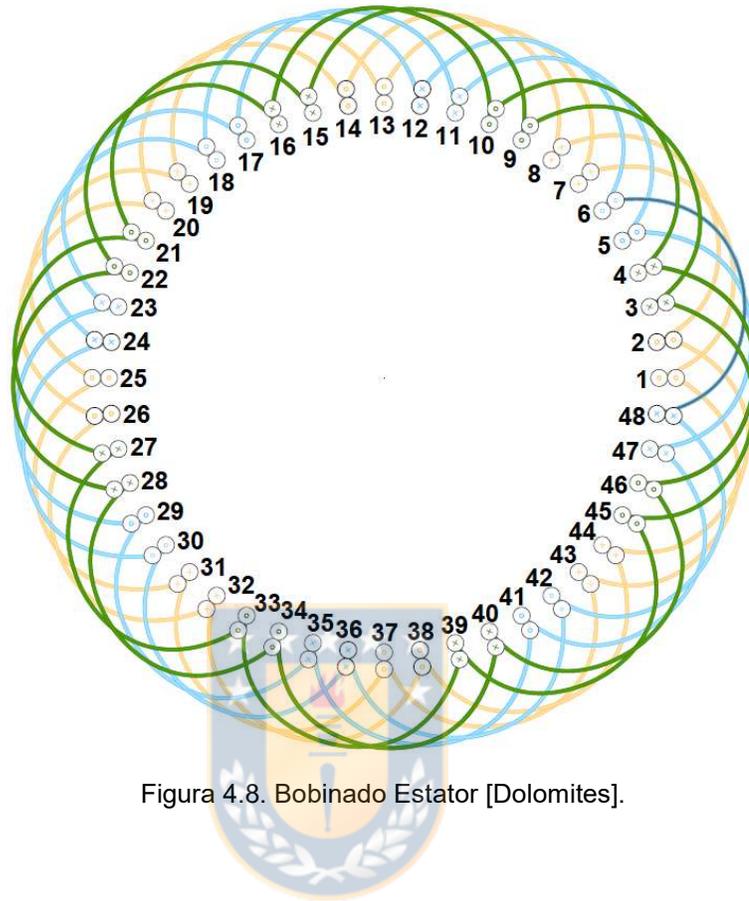


Figura 4.8. Bobinado Estator [Dolomites].

4.4. Metodología de cálculo de devanados

Las siguientes expresiones son usadas para determinar las características del devanado, para lograr la carga eléctrica y la carga magnética, manteniendo una determinada densidad de corriente en la ranura y un par promedio en la máquina. En primer lugar, está la ecuación de la carga eléctrica o densidad de corriente lineal \hat{A}_s en la expresión (4.112), donde k_w es el factor de bobinado, Q_s es el número de ranuras del estator, N_s es la cantidad de conductores por ranura, \hat{I}_{ph} la corriente máxima por fase, D_{is} es el diámetro interno del estator.

$$\hat{A}_s = \frac{k_w \cdot Q_s \cdot N_s \cdot \hat{I}_{ph}}{\pi \cdot D_{is}} \quad (4.112)$$

En la expresión (4.113), permite calcular el par en la máquina, el que tiene relación proporcional con la carga eléctrica \hat{A}_s , carga magnética en el entrehierro \hat{B}_{g1} , diámetro interno del estator D_{is} y el largo axial activo del apilamiento L_s .

$$T = \frac{\pi \cdot D_{is}^2 \cdot L_s \cdot \hat{A}_s \cdot \hat{B}_{g1}}{4} \quad (4.113)$$

Donde el cálculo del par, se relaciona con el estrés tangencial σ_{tan} , el diámetro y largo axial.

$$\sigma_{tan} = \frac{\hat{A}_s \hat{B}_{g1}}{2} \cos \varphi \quad (4.114)$$

Por último, se tiene la expresión de par, incluyendo el estrés tangencial:

$$T = 2\sigma_{tan} \frac{\pi \cdot D_{is}^2 \cdot L_s}{4} \quad (4.115)$$

El factor de relleno de la ranura está dado por la expresión (4.116) y corresponde al área ocupada por el cobre A_{cu} en el área de la ranura A_r .

$$k_{cu} = \frac{A_{cu}}{A_r} \quad (4.116)$$

La densidad de corriente en la ranura, tiene relación directa con la corriente y número de vueltas en la ranura e inversamente proporcional al cobre en la ranura.

$$J_{rms} = \frac{N_s \cdot I_{phrms}}{k_{cu} \cdot A_r} \quad (4.117)$$

A partir de la potencia nominal y la velocidad de rotación, en radianes por segundo, es posible encontrar el torque requerido, lo que se presenta en la siguiente expresión.

$$T = \frac{P}{\omega_r} \quad (4.118)$$

Considerando una máquina de 100kW y velocidad de rotación de nominal 4500 rpm, se determina la carga eléctrica en función de la máxima densidad de corriente aceptable para este diseño, correspondiente a 6,7 [A/mm²], con un factor de relleno de cobre de 0,4 y un área de ranura de 153,2 [mm²].

$$N_s \cdot I_{phrms} = 410,5 [A \cdot vueltas] \quad (4.119)$$

Considerando una corriente sinusoidal, se aplica un factor de forma de corriente K_i de igual a $\sqrt{2}$. El factor de bobinado, se determina a partir de los factores de paso k_p , en este caso unitario, y el factor de distribución k_d . El diámetro interno del estator de la máquina fue obtenido en el proceso de diseño geométrico, con un diámetro de 196[mm].

$$\hat{A}_s = 43713 \left[\frac{A}{m} \right] \quad (4.120)$$

El torque promedio para una carga magnética B_{g1} de 0,8 [T], con un largo activo de la máquina de 200[mm].

$$\hat{T} = 211 [N \cdot m] \quad (4.121)$$

En la figura 4.9, se muestra el diseño geométrico con el devanado y valores de corriente calculados.

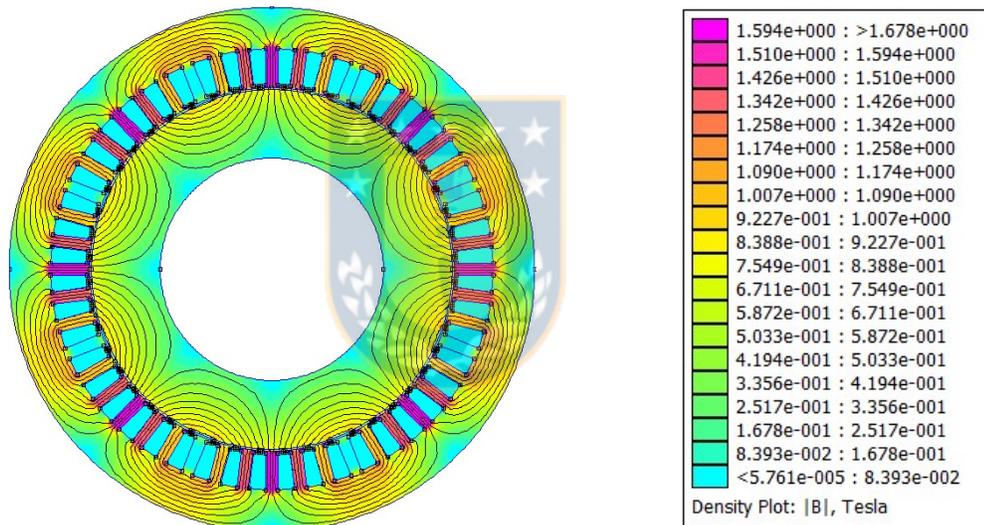


Figura 4.9. Diseño de estator y devanados.

En la figura 4.10, se muestra la densidad de flujo en el entrehierro, para el devanado calculado. En este caso se presenta un rotor macizo de acero al silicio M-22 Steel.

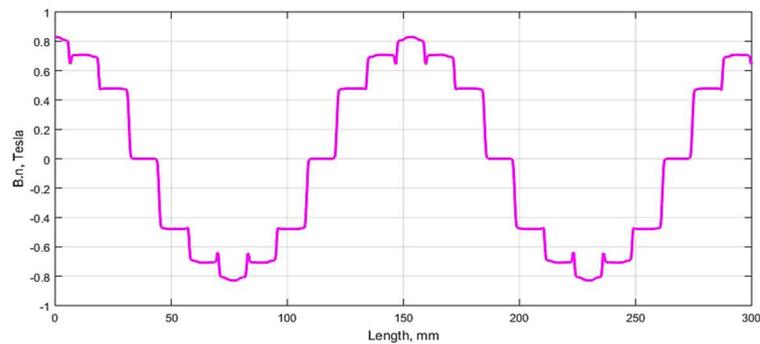


Figura 4.10. Densidad de flujo en el entrehierro rotor macizo.

4.5. Topologías de rotor

En las máquinas eléctricas de imanes permanentes se pueden encontrar diversidades de topologías de rotor, pero los dos grandes grupos son, los antes mencionados, de imanes interiores y superficiales. En las figuras 4.11 a, b, c, d y f, se muestran diferentes estructuras de rotor, las que buscan una densidad de flujo con una distribución más sinusoidal en el entrehierro. Adicionalmente, se busca maximizar la relación par del motor versus masa de imanes permanentes, debido al alto costo de estos. En el caso de las figuras 4.11 a, b y e, se requieren imanes con forma, los que implican una mayor complejidad en el proceso fabricación. En el caso de los rotores en los que se utilizan imanes rectangulares, como es el caso de las figuras 4.11 c, d y f, estos son más simples de construir.

La selección de una topología dependerá de la aplicación. Normalmente los SPM son usados en servomotores, en los que la calidad y linealidad del par son de gran

importancia. En el caso de lo IPM, estos son de uso intensivo en aplicaciones industriales y de tracción de vehículos eléctricos, donde el debilitamiento de campo en altas velocidades de rotación es importante.

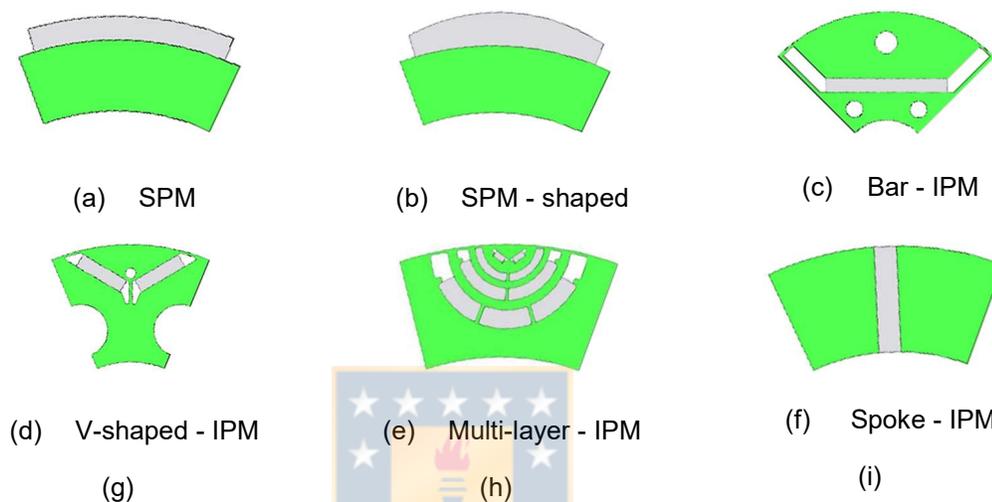


Figura 4.11. Topologías de rotor de motores de imanes permanentes.

Desde el estudio presentado en [71], se extrae información importante del uso de imanes permanentes de distintos fabricantes de motores para vehículos eléctricos. Las configuraciones analizadas corresponden a las mostradas en las figuras 4.12.

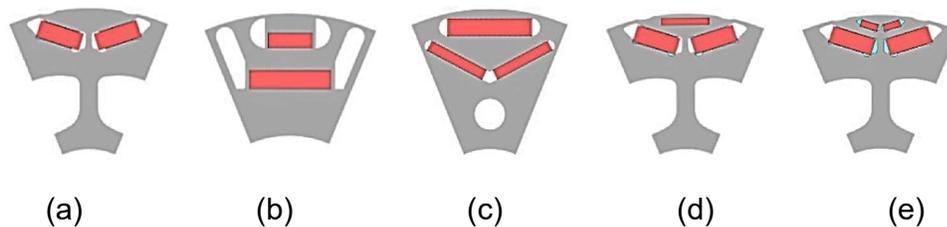


Figura 4.12. Tendencia de diseño de motor síncrono de imán permanente interior [71]

En la gráfica de la figura 4.13. se presenta el volumen usado para cada configuración de imanes del rotor para IPMs comerciales. Debido a lo escaso de los PM de tierras raras, el lograr un volumen reducido es un punto importante en el diseño motores, por lo que, desde la gráfica se puede inferir que es la configuración del tipo V la que implica menor uso de imanes.

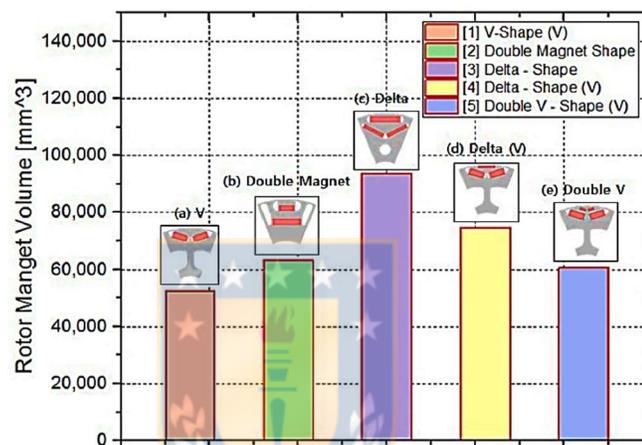


Figura 4.13. Comparación del volumen del imán del rotor [71].

Las diferentes configuraciones de rotor son mostradas en la figura 4.14, desde donde se puede observar la disposición de los polos magnéticos de los imanes y los ejes directos y de cuadratura en cada caso [72].

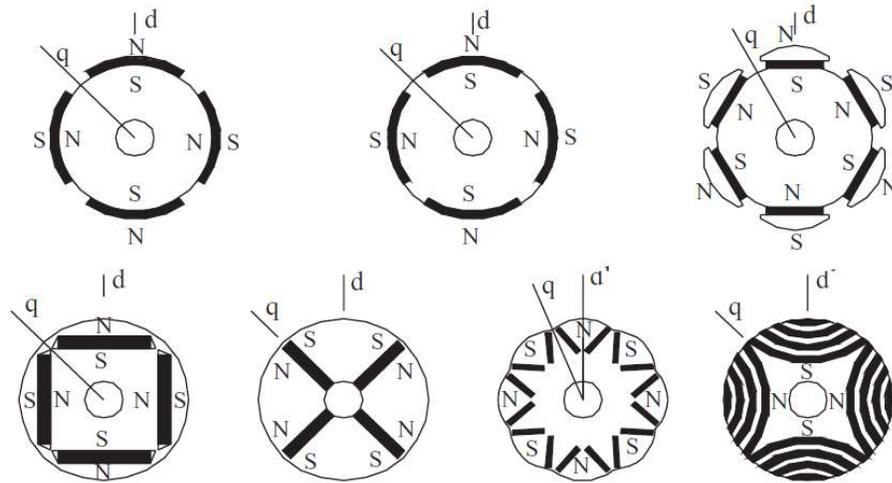


Figura 4.14. Rotores de máquinas de imanes permanentes [71].

En el diseño de la estructura de un motor de imanes permanentes, el rotor corresponde al principal componente de potencia, por lo que, el diseño de su estructura afecta significativamente el rendimiento. Se debe lograr un compromiso entre beneficio electromagnético y mecánico, lo que implica, el no perder de vista la resistencia mecánica del rotor, lo que en algunos casos significa el detrimento de comportamiento electromagnético.

4.5.1. Comportamiento magneto estático.

A partir de la topología tipo V, se desarrolla un modelo que permitan comprobar el comportamiento sin corriente en los devanados, obteniendo el nivel de inducción y forma de las líneas de flujo. En el rotor se usaron imanes permanentes de neodimio grado magnético N40, específicamente NdFeB 40 MGOe.

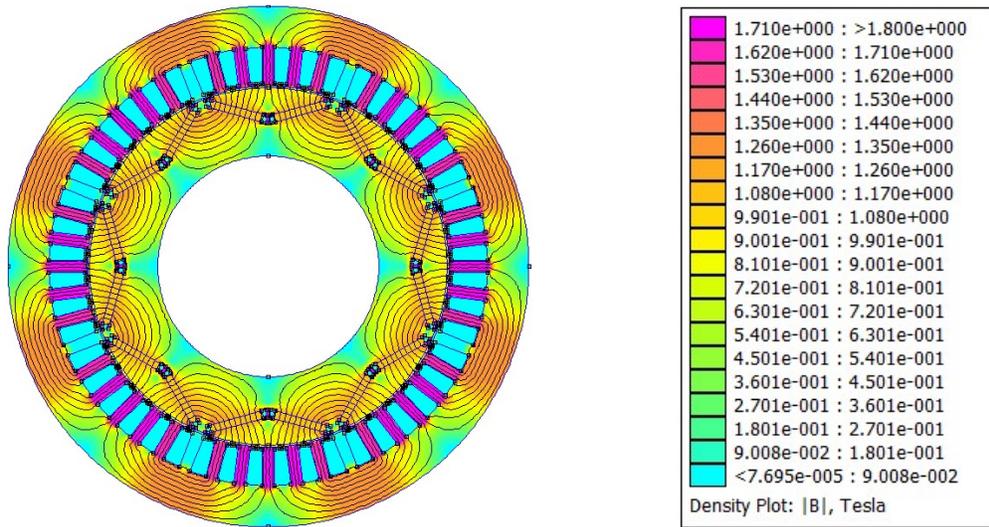


Figura 4.15. Diseño de máquina referencia.

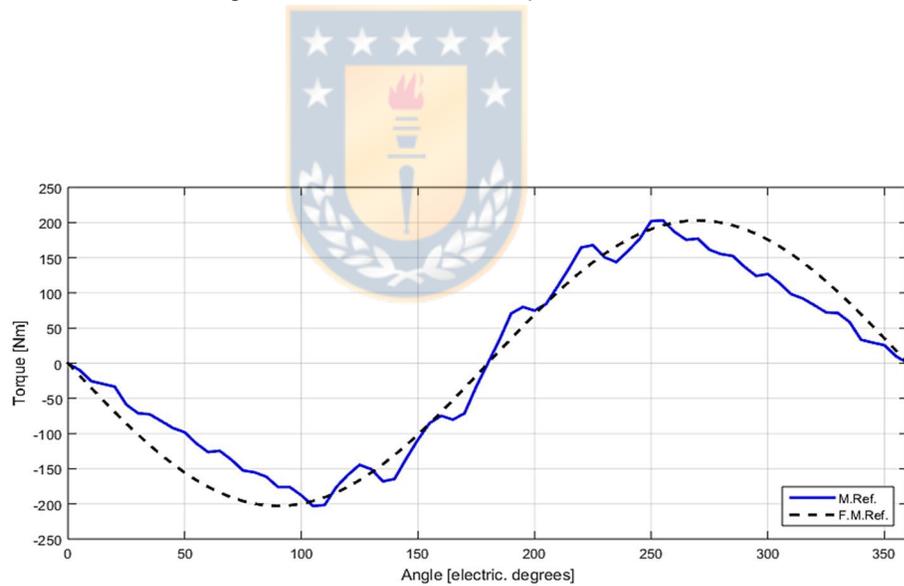


Figura 4.16. Par respecto ángulo en grados eléctricos de la máquina de referencia

4.6. Conclusiones del diseño de máquina de referencia

El diseño de la máquina de referencia, tiene dimensiones que se encuentran dentro de los valores encontrados en topologías comerciales, para máquinas de 100kW, valor de potencia determinado para aplicaciones de tracción, con velocidad base de rotación de 4500 rpm.

Producto de la optimización geométrica, para un estrés tangencial de 40KPa, valor que se encuentra dentro del rango indicado en la literatura para este tipo de máquinas. Se obtienen una estructura de estator robusta, respecto del diseño sin optimización, donde el yugo y dientes tienen bajos niveles de saturación magnética, al comparar las densidades de flujo con la curva B-H para el material usado M-22 Steel, por lo que es un diseño que trabaja lejos de la saturación, lo que será importante en la etapa de escalamiento de la máquina.

El roto es diseñado con topología en forma de V de los PM. Esta topología implica buena relación entre volumen de imanes permanentes y par desarrollado, junto a una estructura robusta para soportar velocidades de rotación que pueden alcanzar 17.000 rpm.

Se usa un devanado distribuido de paso de ranura completa, obtenido a través de una metodología basada en la teoría de estrella de ranuras, con la que se logra una estructura simétrica y equilibrada.

En la curva de torque versus ángulo eléctrico, se puede apreciar asimétrica, respecto de la fundamental, lo que implica diferencias de inductancia del eje directo y de cuadratura, por lo que se verifica que existe par reluctante.

Capítulo 5. Escalamiento de máquinas eléctricas

5.1. Introducción

En máquinas eléctricas, como en otros dispositivos, el tamaño tiene importantes efectos fundamentalmente sobre las características operativas de los equipos. La influencia del tamaño de la máquina en su rendimiento, es posible determinarla a través de relaciones que derivan de las denominadas *leyes de escalamiento*, las que son usadas en física e ingeniería y que tienen como finalidad predecir el comportamiento de un diseño existente, creado para una aplicación en particular, que se quiere ajustar a un nuevo requerimiento, manteniendo la geometría original. En este caso particular, se abordará el escalamiento de máquinas IPM para aplicaciones en tracción de vehículos eléctricos, con restricciones tales como geometría similar, velocidad nominal similar, tensión de alimentación similar, nivel de saturación magnética similares, flujo térmico similar, pérdidas mecánicas y resistencia al aire similar.

En el escalamiento de máquinas eléctricas es posible realizar procedimientos en forma separada, los que incluyen el de escala axial y de escala radial, junto al de rebobinado, que permite ajustar a un nuevo requerimiento de nivel de voltaje. Para cada procedimiento de escala, existen un factor independiente, a través del cual es posible determinar parámetros tales como par, potencia, eficiencia, pérdidas.

Para lograr un recálculo rápido y preciso, el requisito principal que debe ser satisfecho es el de conservar los niveles de saturación magnética de la máquina original en la máquina escalada, debido a que, la derivación de las leyes de escala

se basa en que los campos magnéticos se mantienen exactamente iguales, lo que implica que la densidad de flujo magnético no debe diferir de las presentes en las zonas activas del modelo de referencia. Adicionalmente se debe considerar, el mantener los mismos materiales, geometría y tecnología, operando a la misma temperatura, ignorando las pérdidas mecánicas, que normalmente corresponden a las generadas producto de la fricción y el viento, junto a las pérdidas en el bobinado en corriente alterna, las que, de igual modo, en este caso son ignoradas.

A continuación, se presenta la determinación de los factores de escala, a partir de la geometría de la máquina. En el anexo A, se resumen las expresiones del escalamiento a partir del modelo dinámico de la máquina y la ecuación de Poisson, que permiten comprobar los resultados obtenidos a través del escalamiento geométrico.



5.2. Leyes generales de escalamiento

En esta sección se presentan las expresiones analíticas, derivadas de las *leyes de escalamiento*, aplicadas a diseños óptimo de IPMs, con las cuales es posible calcular de forma rápida y simple, parámetros de rendimiento de la máquina, tales como par, potencia, pérdidas y eficiencia.

En el escalamiento de máquinas eléctricas para tracción, normalmente se mantiene constantes parámetros tales como la tensión de alimentación y velocidad nominal, así también la geométrica del diseño de referencia. Las modificaciones son en las dimensiones radiales y axiales, a través de factores de escala, con k_R para las

dimensiones radiales y k_A para las dimensiones axiales, lo que es mostrado en las figuras 5.1 y solo para el caso radial en la 5.2.

En casos donde es necesario adaptar el devanado original a una tensión diferente, es posible aplicar un tercer factor de escala, denominado escalamiento del devanado, pero que no se aborda en este capítulo.

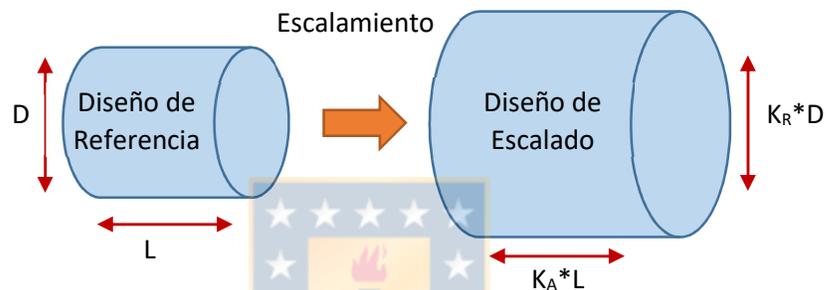


Figura 5.1. Escalamiento radial y axial.

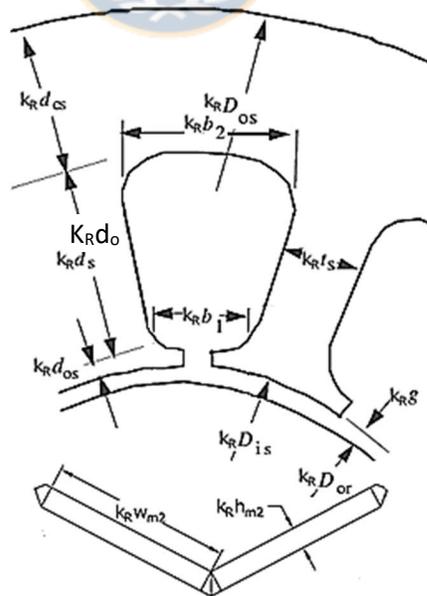


Figura 5.2. Variación lineal de dimensiones con factor k_R en el caso de escalamiento radial.

5.2.1. Escalamiento geométrico

El escalamiento de un sistema cilíndrico se subdivide en escalamiento radial y axial, como se mencionó anteriormente. En el caso de las dimensiones radiales, estas serán afectadas por k_R , de la siguiente forma;

$$D = k_R * D_0 \quad (5.1)$$

Donde D_0 corresponde a una dimensión genérica en el sentido de la seccional transversal de la máquinas de referencia y D es la dimensión escalada. Este proceso no es influenciado por k_A .

En el caso de cambios en la longitud axial de la máquina o apilamiento, es el factor de escala k_A el único que participa, no siendo afectado por k_R .

$$L = k_A * L_0 \quad (5.2)$$

Donde L_0 corresponde a cualquier dimensión en la sección longitudinal de la máquinas, que es escalada a una longitud L .

El área de la sección transversal es escalada, en forma general, desde la máquina de referencia A_0 , por un factor de escalamiento radial al cuadrado.

$$A = k_R^2 * A_0 \quad (5.3)$$

El volumen se escala desde la máquina de referencia, con la participación del cuadrado del factor de escala radial k_R^2 y el factor de escala axial k_A .

$$v = k_R^2 * k_A * v_0 \quad (5.4)$$

Donde v_0 es el volumen en forma genérica de la máquina de referencia, el que es escalado a v .

A partir de estas expresiones de escalamiento geométrico, junto a las expresiones del capítulo 4, incluyendo un factor k_N para ajustar el número de vueltas del devanado, es posible deducir:

Para la carga eléctrica de la máquina se tiene:

$$\hat{A}_0 = \frac{k_w \cdot Q_s \cdot N_s \cdot I_{ph}}{\pi \cdot D_{is}} \quad (5.5)$$

Como el diámetro se ve afectado solamente con el factor de escalamiento radial k_R , se tiene:

$$\hat{A} = \frac{k_w \cdot Q_s \cdot k_N \cdot N_s \cdot I_{ph}}{\pi \cdot k_R \cdot D_{is}} \quad (5.6)$$

Esto implica:

$$\hat{A} = \frac{k_N}{k_R} \cdot \hat{A}_0 \quad (5.7)$$

Para la densidad de corriente en la ranura, se tiene:

$$J_0 = \frac{N_s \cdot I_{ph}}{k_{cu} \cdot A_r} \quad (5.8)$$

En este caso la densidad de corriente se ve afectada por el área o sección transversal de la ranura, por lo que el factor de escalamiento radial debe estar al cuadrado.

$$J = \frac{k_N \cdot N_s \cdot I_{ph}}{k_{cu} \cdot k_R^2 \cdot A_r} \quad (5.9)$$

La densidad de corriente en la máquina escalada es:

$$J = \frac{k_N}{k_R^2} \cdot J_0 \quad (5.10)$$

El para electromecánico.

$$T_{em0} = \frac{\pi \cdot D_{is}^2 \cdot L_s \cdot \hat{A}_s \cdot \hat{B}_{g1}}{4} \quad (5.11)$$

Donde el cálculo del par, se relaciona con el estrés tangencial σ_{tan} , el diámetro y largo axial.

$$\sigma_{tan} = \frac{\hat{A}_s \hat{B}_{g1}}{2} \cos \varphi \quad (5.12)$$

Se tiene la expresión de par, incluyendo el estrés tangencial.

$$T_{em0} = 2 \sigma_{tan} \frac{\pi \cdot D_{is}^2 \cdot L_s}{4} \quad (5.13)$$

El volumen del roto está dado por la siguiente expresión.

$$v_0 = \frac{\pi \cdot D_{is}^2 \cdot L_s}{4} \quad (5.14)$$

Por lo que el volumen para la máquina escalada es:

$$v_0 = \frac{\pi \cdot k_R \cdot D_{is}^2 \cdot k_A \cdot L_s}{4} \quad (5.15)$$

Sustituyendo la expresión (5.6) en (5.12) se tiene para el estrés tangencial:

$$\sigma_{tan} = \frac{k_w \cdot Q_s \cdot k_N \cdot N_s \cdot \hat{I}_{ph} \cdot \hat{B}_{g1}}{\pi \cdot k_R \cdot D_{is}} \cos \varphi \quad (5.16)$$

La expresión para el par, en función del volumen del rotor y el estrés tangencial es:

$$T_{em} = 2 \cdot k_N \cdot \sigma_{tan} \cdot k_R \cdot k_A \cdot v_0 \quad (5.17)$$

Por lo tanto, se tiene que el par es afectado por los factores escalamiento radial k_R , axial k_A y de ajuste de devanado k_N , por lo que la expresión para escalar el par es:

$$T_{em} = k_R \cdot k_A \cdot k_N \cdot T_{em0} \quad (5.18)$$

En el caso de la potencia de salida, al igual que el par, esta se ve afectada por los factores radial y axial, debido al aumento en el cuadrado del diámetro y del largo activo de la máquina.

$$P_{em} = \omega \cdot T_{em} \quad (5.19)$$

$$P_{em} = k_R \cdot k_A \cdot k_N \cdot P_{em} \quad (5.20)$$

En cuanto a las pérdidas en el cobre, se tienen dos zonas, la correspondiente al núcleo del devanado y la correspondiente a las cabezas de bobinas, las que se ven afectadas por factores diferentes. El núcleo es afectado por modificaciones en el radio y largo de la máquina, por lo que operan ambos factores de escala, lo que equivale al volumen de cobre. En las cabezas de bobina, es el escalamiento radial el involucrado, debido a que, el aumento del radio implica un aumento en el perímetro de la máquina. La influencia de las cabezas de bobinas es poco significativa en los resultados finales del escalamiento, por lo que no será considerada.

$$P_{cu} = k_R \cdot k_A \cdot k_N \cdot P_{cu} \quad (5.21)$$

Las pérdidas en el hierro, tienen relación con las pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas. La densidad de flujo en dientes y yugo, junto a la frecuencia de operación, se relacionan también con estas pérdidas. Dependiendo del escalamiento que se realice, los resultados de las pérdidas en el hierro serán afectadas tanto por los cambios en el radio como en el largo de la máquina, por lo que se puede calcular de la siguiente forma:

$$P_{fe} = k_R \cdot k_A \cdot k_N \cdot P_{fe} \quad (5.20)$$

La disipación de calor en la máquina tiene relación con la superficie expuesta al flujo de aire por auto ventilación. La superficie exterior, donde el diámetro externo D_{os} y el largo L_s son las dimensiones que determinan la superficie de disipación de calor:

$$S_{dis0} = \pi \cdot D_{os} \cdot L_s \quad (5.21)$$

Por lo que el escalamiento incorpora los factores de escala radial k_R y axial k_A .

$$S_{dis} = \pi \cdot k_R \cdot D_{os} \cdot k_A \cdot L_s \quad (5.22)$$

$$S_{dis} = k_R \cdot k_A \cdot S_{dis0} \quad (5.23)$$

Las pérdidas del cobre son más significativas que las pérdidas en el hierro, por lo que, el aumento de temperatura, en forma simplificada, tiene relación con las pérdidas del cobre y la superficie de disipación.

$$\delta_0 = \frac{\rho \cdot v_{cu} \cdot I_{rms}^2}{\pi \cdot D_{os} \cdot L_s} \quad (5.24)$$

El escalamiento para la variación de temperatura en la máquina, queda de la siguiente forma:

$$\delta = k_R \cdot \delta_0 \quad (5.25)$$

Capítulo 6. Análisis de elementos finitos

Para comprobar los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las expresiones de escalamiento, se utiliza el modelo de referencia, diseñado en el capítulo 4.

Se presentan dos escenarios, el primero es con el factor de ajuste del devanado k_N igual a k_R , en cuyo caso, se mantiene constante la carga eléctrica de la máquina de referencia en la escalada, permitiendo estimar fácilmente el par disponible al realizar el escalamiento. El segundo escenario, es con el factor de ajuste del devanado k_N igual a k_R^2 , logrando mantener la densidad de corriente en la ranura de la máquina, punto de gran interés cuando se escala en reducción de tamaño.

A partir del diseño de máquina de referencia, se escala para comprobar los dos escenarios antes descritos. Se comienza con el aumento del par en el eje de la máquina, determinando las dimensiones radiales en forma analítica, manteniendo constante el largo axial. Se repetirá el procedimiento anterior, disminuyendo el par requerido, manteniendo el largo axial.

Finalmente se escalará la máquina con nivel de saturación por sobre la curva B-H del material usado en el diseño. En todos los casos se comprobarán los resultados aplicando el software de elementos finitos FEMM 4.2.

6.1. Escalamiento manteniendo la carga eléctrica

6.1.1. Escalamiento en aumento de dimensión radial

Se escala en aumento de dimensiones para comprobar el primer escenario, con el k_N igual a k_R . La forma de evidenciar el correcto funcionamiento del escalamiento

analítico, es a través de la comparación de la densidad de flujo en el entrehierro, lo que es posible graficar con la información obtenida desde la simulación con el software de elementos finitos. Adicionalmente es posible evaluar las densidades de flujo en los dientes y yugo de la máquina de referencia y escaladas, de la misma forma que en el entrehierro, tomando un punto central en el yugo y dientes, graficando la densidad de flujo a través de un ángulo de 180° mecánicos. En la figura 6.1 se muestra la máquina de referencia, con un diámetro de estator externo de 283 mm, interior del estator de 196 mm y un entrehierro de 1 mm.

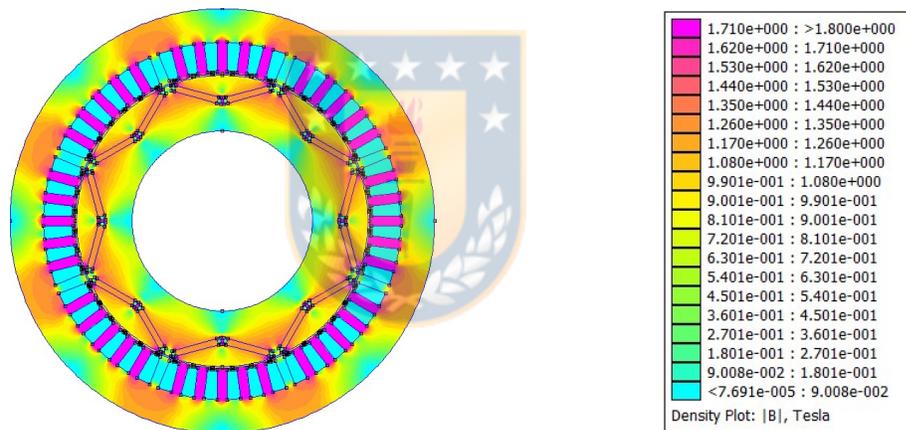


Figura 6.1. Máquina de referencia.

La máquina de referencia tiene un par máximo, medido en la simulación de elementos finitos, de 203 N·m. Se aplica el escalamiento para logra un par de 405 N·m, sólo modificando la dimensión radial, manteniendo constante el largo axial.

Aplicando la expresión 6.1 se obtiene el factor de escala radial:

$$k_R = \sqrt[2]{\frac{T_{Shaf}}{k_A T_{Shafo}}} = \sqrt[2]{2} = 1,414 \quad (6.1)$$

Al escalar la máquina, está implícito el escalamiento de la tensión de alimentación. La tensión aplicada, debe aumentar con el área, para mantener constante la carga eléctrica. Es probable que, en aplicaciones de tracción, el aumento de la tensión de alimentación no sea posible, debido a que está asociado al nivel de tensión entregado por las baterías y el diseño del accionamiento, por lo que se hace k_N igual a k_R , verificando el primer escenario.

Las pérdidas totales en el estator, obtenidas en la simulación del diseño de referencia, son iguales a 1065 W. Se calcula pérdidas totales por el factor $k_R = \sqrt{2}$, se calcula pérdidas totales igual a 2130 W, lo que concuerda con el valor obtenido en la simulación para el modelo escalado. Las pérdidas del cobre solo considerando la parte del núcleo del devanado, dejando fuera la zona de las cabezas de bobina, las que el software de simulación no considera debido a su característica 2D.

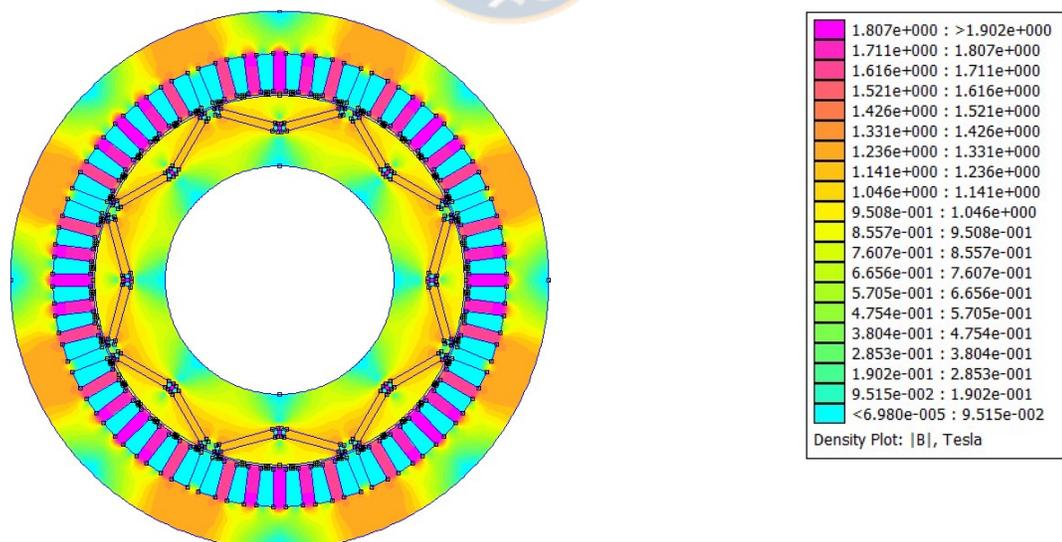


Figura 6.2. Máquina escalada con factor $k_R = 1,414$.

Se verifica la densidad de flujo magnético a lo largo del entrehierro, para el caso de la máquina de referencia y escalada, usando la función de gráfica de densidad de flujo de FEMM, lo que es mostrado en la figura 6.3, a lo largo de 180° mecánicos. Como se puede apreciar, ambas gráficas son imagen exacta, lo mismo para el punto central del yugo y dientes figuras 6.5 a 6.6.

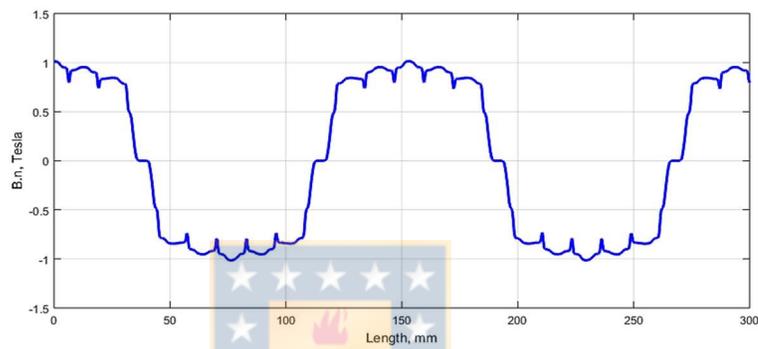


Figura 6.3. Densidad de flujo en el entrehierro máquina referencia.

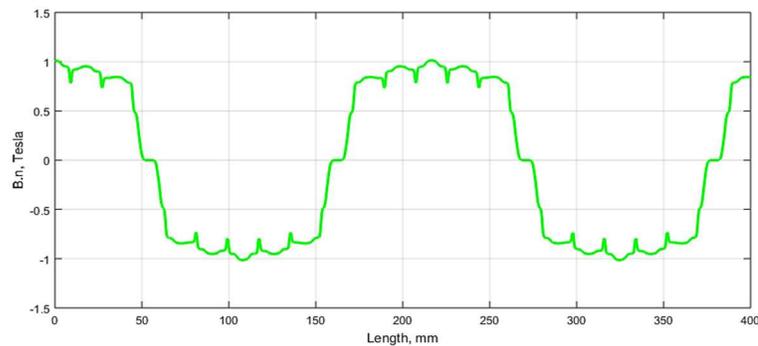


Figura 6.4. Densidad de flujo en el entrehierro máquina escalada $k_R = 1,414$.

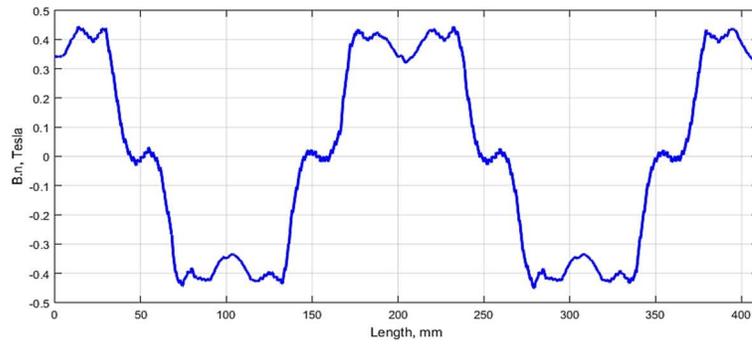


Figura 6.5. Densidad de flujo en el yugo máquina referencia.

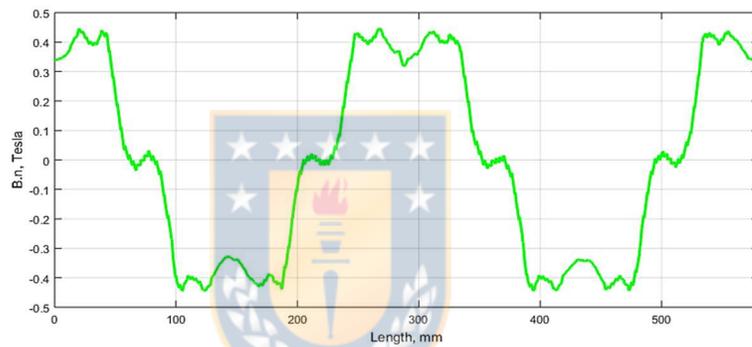


Figura 6.6 Densidad de flujo en el yugo máquina escalada $k_R = 1,414$.

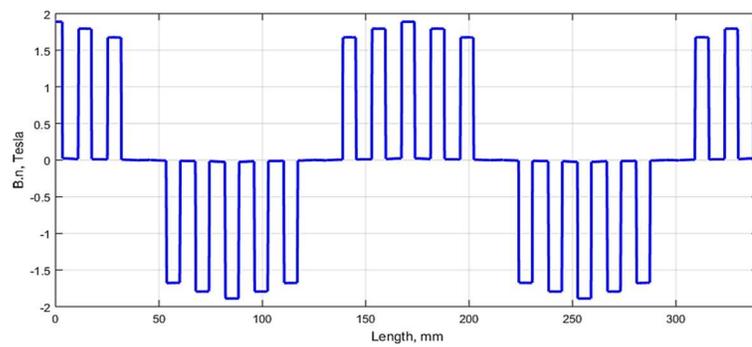


Figura 6.7. Densidad de flujo en dientes de máquina de referencia.

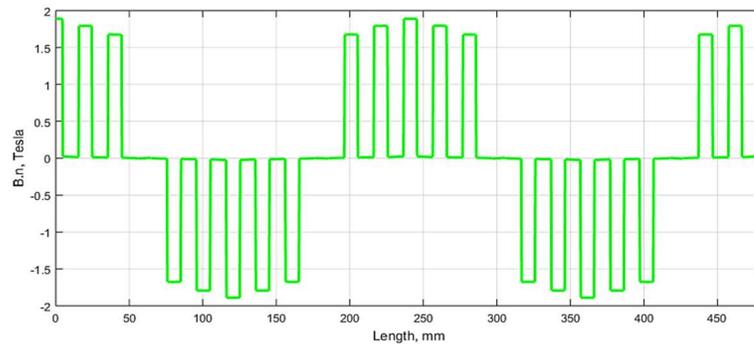


Figura 6.8. Densidad de flujo en dientes de máquina escalada $k_R = 1,414$.

6.1.2. Escalamiento en reducción de dimensión radial

Comprobado el primer escenario, se procede a escalar en reducción de dimensiones radiales, lo que permitirá verificar el comportamiento del modelo. Se aplica un factor radial k_R de 0,707, lo que significa una reducción del par a la mitad.

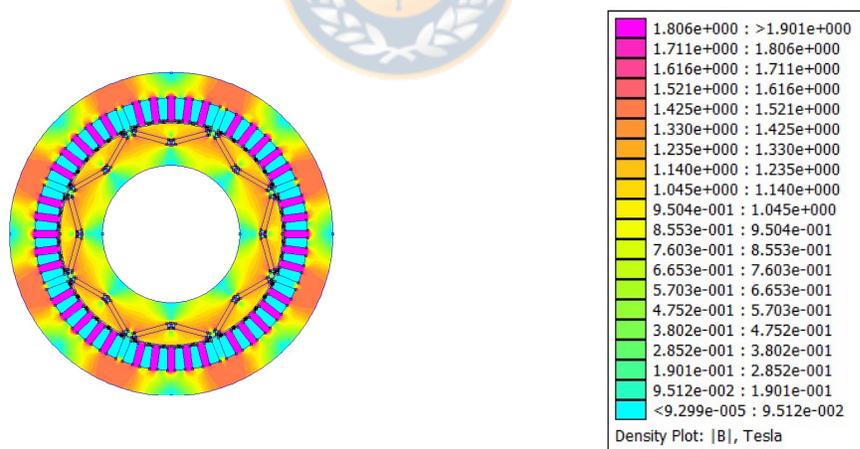


Figura 6.9. Máquina de escalada con factor $k_R = 0,707$.

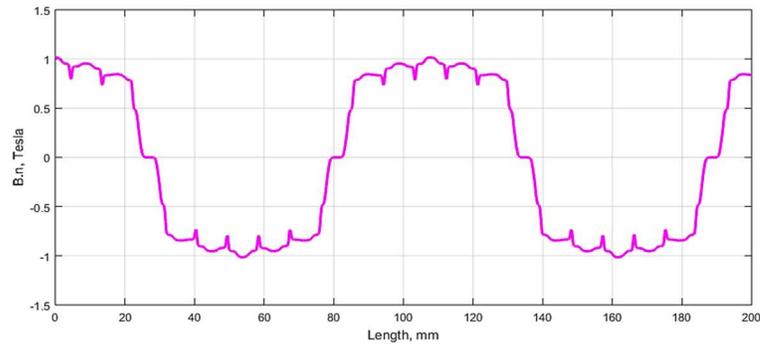


Figura 6.10. Gráfica de densidad de flujo entrehierro para escalamiento k_R 0,707

Al igual que el caso anterior, la disminución de la escala radial, implica una disminución en el nivel de la tensión de alimentación por el factor k_R . Es probable que se mantenga la tensión de alimentación en aplicaciones de tracción, debido a motivos mencionados para el caso anterior.

Mantener la tensión de alimentación en la máquina escalada, implica modificaciones en las vueltas del devanado, con k_N igual a k_R .

Las gráficas 6.11 y 6.12, muestran las densidades de flujo en un punto central del yugo y punto central en los dientes del estator, para la máquina escalada en reducción de dimensiones.

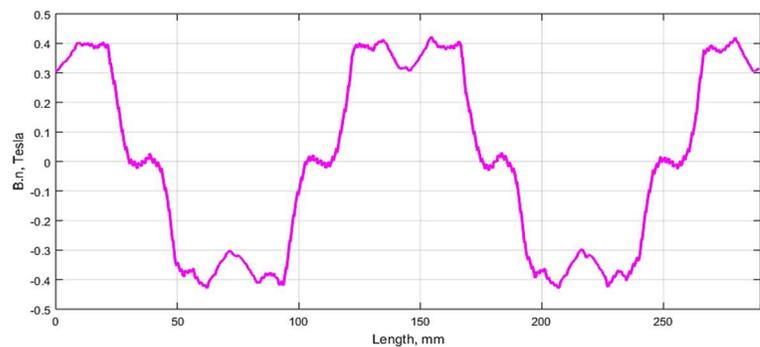


Figura 6.11 Densidad de flujo en el yugo máquina escalada k_R 0,707.

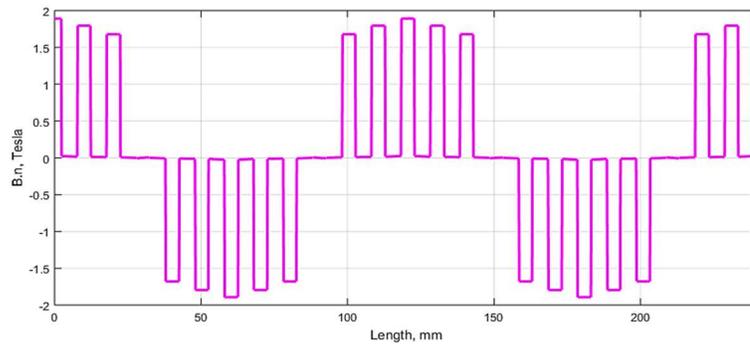


Figura 6.12. Densidad de flujo en dientes de máquina escalada k_R 0,707.

Se comprueba el escalamiento de las pérdidas, de acuerdo a cálculo analítico, de la misma forma que se realizó para el escalamiento en aumento de dimensión radial.

En la figura 6.13 se presentan las gráficas de las densidades de flujo en el entrehierro para las 3 máquinas, comprobándose que el aumento o disminución de las dimensiones, en este caso por el factor k_R , manteniendo la carga eléctrica específica, implica la mantención de la densidad de flujo esperada en el entrehierro.

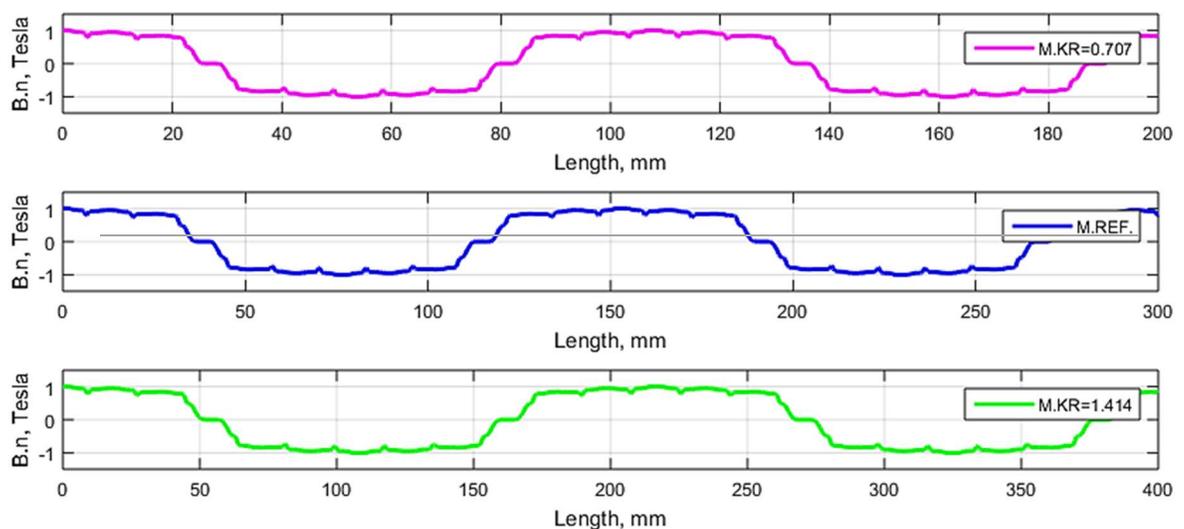


Figura 6.13. Gráfica de densidad de flujo entrehierro máquinas base y escaladas.

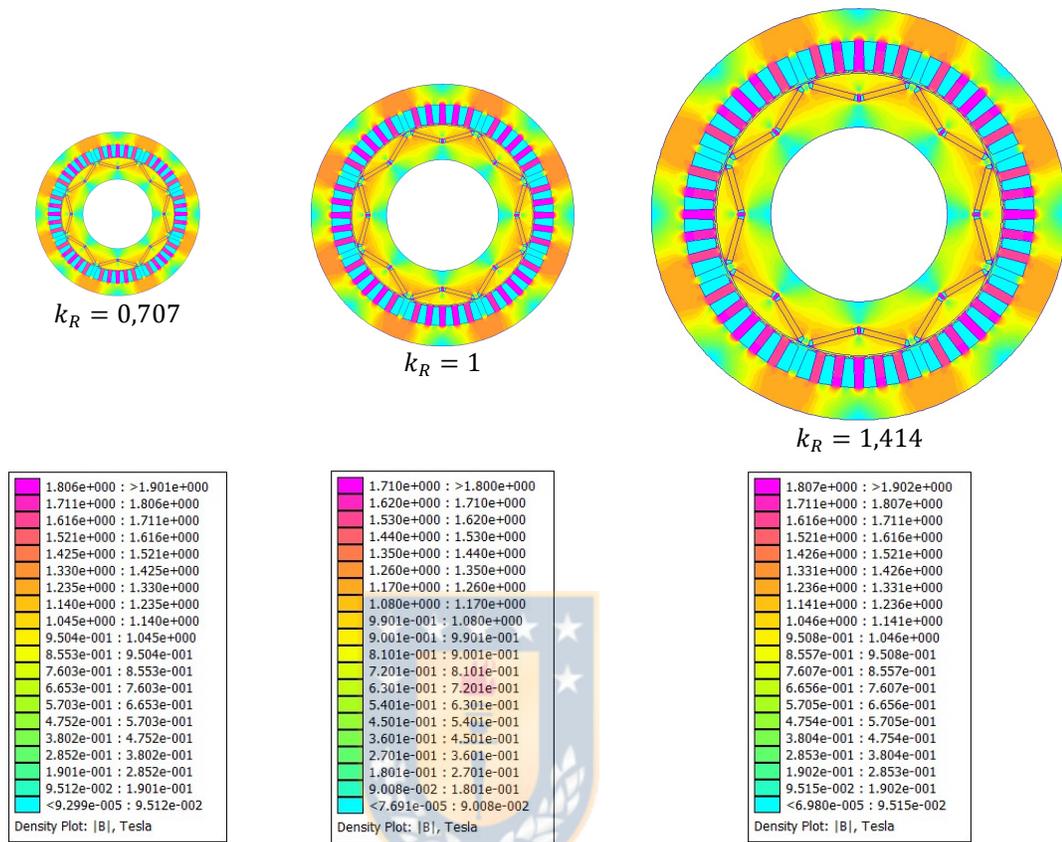


Figura 6.14. Máquinas de referencia y escaladas.

Las curvas de par en la máquina de referencia y escaladas son las mostradas en la figura 6.15. Donde se comprueba que la aplicación del factor de escala radial opera perfectamente, logrando el aumento al doble del par y luego la reducción a la mitad.

En la tabla 6.1 se resumen los resultados para este escenario.

Se comprobó punto a punto, con mediciones cada $1,25^\circ$ mecánicos, completando con 72 mediciones 90° mecánicos equivalentes a 360° eléctricos.

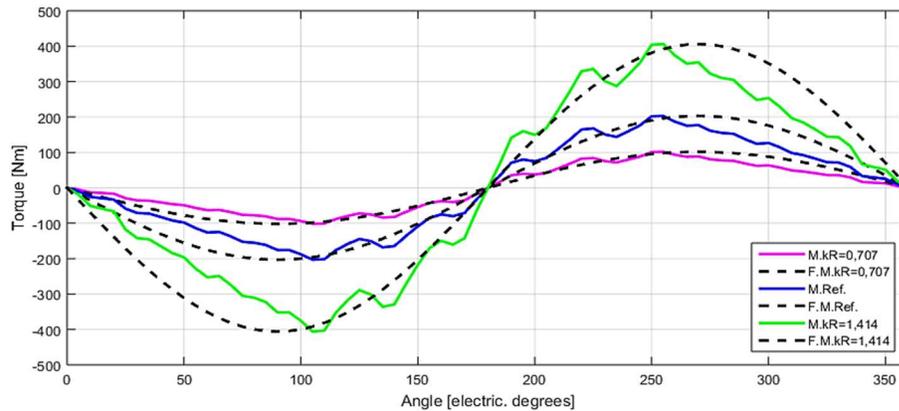


Figura 6.15. Gráficas de curvas de torque para máquina de referencia y escaladas.

TABLA 6.1. ESCALAMIENTO MANTENIENDO CARGA ELÉCTRICA

| k_R | Torque [$N \cdot m$] | | | J A/mm ² |
|--------------|------------------------|-----------|------------|------------------------|
| | Simulado | Calculado | Diferencia | |
| $1/\sqrt{2}$ | 101.2 | 101.5 | -0.2 | 9.6 |
| Referencia | 202.9 | 202.9 | 0 | 6.7 |
| $\sqrt{2}$ | 405.6 | 405.9 | -0.3 | 4.7 |

6.2. Escalamiento manteniendo la densidad de corriente

6.2.1. Escalamiento en aumento de dimensión radial

El segundo escenario es con factor de ajuste del devanado k_N es iguala k_R^2 , lo que busca mantener la densidad de corriente de ranura a través del ajuste de las vueltas del devanado, de forma diferente a lo realizado en el primer escenario.

La expresión para el par bajo este segundo escenario es:

$$T_{em} = k_R^3 \cdot k_A \cdot T_{em0} \quad (6.2)$$

Solo modificando la dimensión radial, implica un factor de escala que se determina con la siguiente expresión:

$$k_R = \sqrt[3]{\frac{T_{emo}}{T_{em}}} \quad (6.2)$$

El factor de escala radial para lograr el doble del par de la máquina de referencia igual a $\sqrt[3]{2}$.

El factor de devanado para mantener constante la densidad de corriente en la ranura se calcula con la siguiente expresión:

$$k_N = \sqrt[3]{k_R^{-2}} \quad (6.2)$$

Se aumenta el tamaño radial de la máquina de referencia en $\sqrt[3]{2}$ y se ajusta las vueltas del devanado en $\sqrt[3]{2}^2$, simulando y comparando el par máximo obtenido y la densidad de corriente en la ranura obtenida, con lo calculado analíticamente. Los resultados se muestran en la tabla 6.1.

6.2.2. Escalamiento en reducción de dimensión radial

Se repite el procedimiento anterior para reducción del para a la mitad, con factor de escalamiento radial igual a $1/\sqrt[3]{2}$ y factor de ajuste de devanado igual a $1/\sqrt[3]{2}^2$. Los resultados obtenidos se detallan en la tabla 6.1.

TABLA 6.2. ESCALAMIENTO MANTENIENDO DENSIDAD DE CORRIENTE

| k_R | Torque [$N \cdot m$] | | | J A/mm ² |
|-----------------|------------------------|-----------|------------|------------------------|
| | Simulado | Calculado | Diferencia | |
| $1/\sqrt[3]{2}$ | 100.8 | 101.5 | -0.7 | 6.7 |
| Referencia | 202.9 | 202.9 | 0 | 6.7 |
| $\sqrt[3]{2}$ | 405.3 | 405.9 | -0.6 | 6.7 |

6.3. Escalamiento axial de la máquina

Empleando sólo escalamiento axial en la reducción del largo activo de la máquina, se busca lograr la mitad del par de referencia, por lo que se aplica un k_A de 0,5 reduciendo de 200 mm a 100 mm. En este caso, k_R son iguales k_N y se mantienen constantes.

Se verifica la mantención de la densidad de flujo en el entrehierro, lo que se muestra en la figura 6.16, logrando el par calculado, el que es exactamente la mitad. En este caso se redujo el largo axial, pero en máquinas usadas en aplicaciones de posicionamiento, es común buscar mayor par y baja inercia, como es el caso de los servomotores, donde se debe tener cuidado en que el largo de la máquina no genere una flexión del rotor que implique distancias riesgosas del entrehierro.

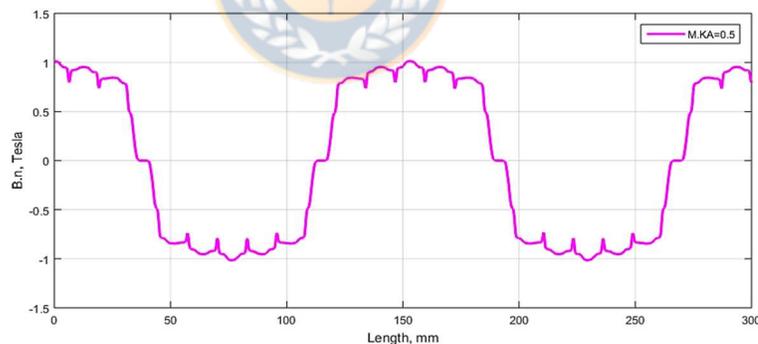


Figura 6.16. Gráfica de densidad de flujo entrehierro para escalamiento $k_A = 0,5$

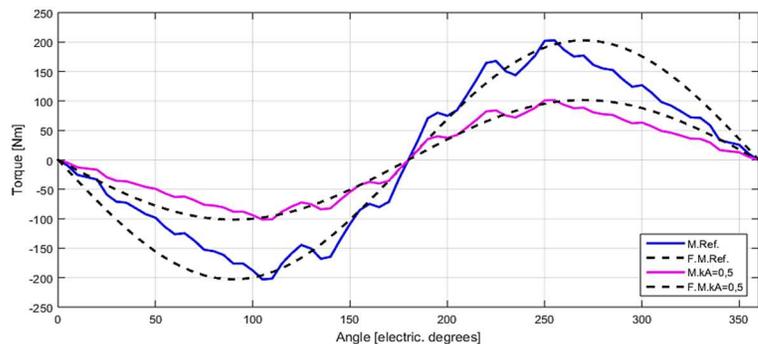


Figura 6.17. Gráficas de curvas de torque para máquina de referencia y escaladas $k_A = 0,5$.

6.4. Escalamiento radial y axial de la máquina

Se aplica escalamiento radial y axial en aumento de dimensiones a la máquina de referencia, con k_R y k_N iguales a $\sqrt{2}$ y k_A igual a 1,5. Se verificó en simulación con software de elementos finitos mostrando los resultados en la tabla 6.3.

Se repitió el procedimiento anterior en reducción de dimensiones con k_R y k_N iguales a $1/\sqrt{2}$ y k_A igual a 0,5. Se obtienen los resultados resumidos en la tabla 6.3.

En simulación se verificó adicionalmente las densidades de flujo en el entrehierro, yugo y dientes, las que son exactamente igual en todos los casos, verificándose que el escalamiento axial no genera diferencias en los resultados analíticos y simulados.

TABLA 6.3. ESCALAMIENTO RADIAL Y AXIAL

| k_R, k_A | Torque [$N \cdot m$] | | | J A/mm ² |
|-------------------|------------------------|-----------|------------|------------------------|
| | Simulado | Calculado | Diferencia | |
| $1/\sqrt{2}, 1/2$ | 50.7 | 50.5 | 0.2 | 9.6 |
| Referencia | 202.9 | 202.9 | 0 | 6.7 |
| $\sqrt{2}, 3/2$ | 608.8 | 608.7 | 0.1 | 4.7 |

6.5. Escalamiento con saturación magnética

Para comprobar el comportamiento de la máquina escalada con saturación, se aumentan las vueltas del devanado, trabajando en la zona de los dientes, por sobre el codo de la curva B-H, con una densidad de flujo superior a 2 [T]. El material usado en la simulación para el estator y rotor es acero al silicio M-22 Steel, el que presenta la curva B-H de la figura 6.18.

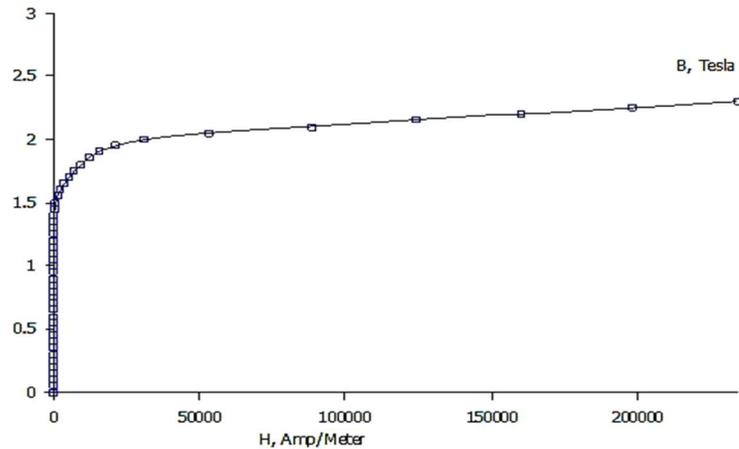


Figura 6.18. Curva B-H material M-22 Steel.

Al trabajar con saturación, la densidad de flujo en el entrehierro y dientes se mantiene exactamente igual en la máquina de referencia y escaladas, lo que es mostrando en las figuras 6.19 a 6.20. Se calcula el par máximo con la expresión (5.18), considerando k_N igual a k_R , para los casos de aumento y disminución de dimensiones. Se obtienen resultados satisfactorios en la comparación de simulados versus valores calculados, lo que se detalla en la tabla 6.4. Por lo que se concluye que las expresiones obtenidas para el escalamiento geométrico operan correctamente en escalamiento con saturación.

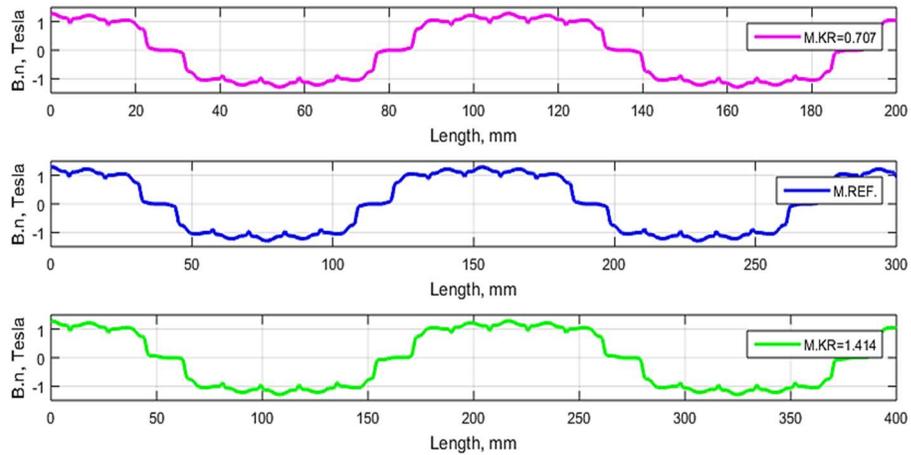


Figura 6.19. Gráfica de densidad de flujo entrehierro máquinas saturada referencia y escaladas.

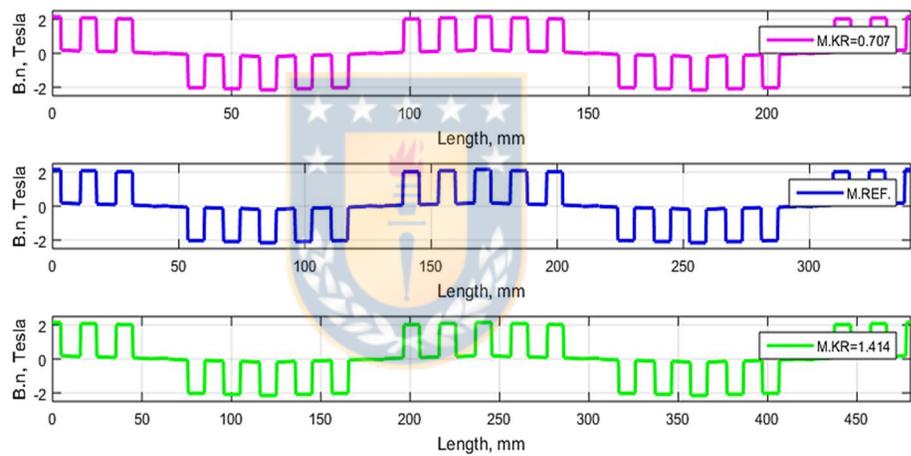


Figura 6.20. Gráfica de densidad de flujo dientes máquinas saturada referencia y escaladas.

TABLA 6.4. RESUMEN ESCALAMIENTO CON SATURACIÓN

| k_R | Torque [$N \cdot m$] | | | J A/mm ² |
|-------------------|------------------------|-----------|------------|------------------------|
| | Simulado | Calculado | Diferencia | |
| Sat. $1/\sqrt{2}$ | 378.9 | 378.8 | 0.1 | 592.3 |
| Ref. Sat. | 757.6 | 757.6 | 0 | 33.5 |
| Sat. $\sqrt{2}$ | 1515.3 | 1515.1 | 0.2 | 23.7 |

6.6. Análisis de desempeño

A partir de las expresiones obtenidas del escalamiento geométrico, se explica la forma en la que esta herramienta es útil en aplicaciones de tracción de vehículos eléctricos.

El principal punto de interés a la hora de evaluar la utilidad del escalamiento presentado como herramienta, es obtener de forma rápida y simple, parámetros de la máquina escalada que permitan determinar la eficiencia de esta en aplicaciones de tracción.

6.6.1. Limitaciones en el uso del escalamiento geométrico

La herramienta desarrollada (escalamiento geométrico), es útil en la obtención de parámetros de la máquina escalada en forma rápida y simple, pero se debe tener claridad de las limitaciones.

Para resaltar las limitaciones, se realizó un escalamiento en un rango mayor al mostrado anteriormente en 6.1 y 6.2, con un aumento de dimensiones para logra un incremento de 25 veces el par de la máquina de referencia. Se compararon los resultados analíticos y simulados, comprobando una correcta operación de las expresiones en este rango, resumidas en la tabla 6.5.

TABLA 6.5. RESUMEN ESCALAMIENTO RANGO AMPLIO

| k_R | Torque [$N \cdot m$] | | | J A/mm ² |
|---------------|------------------------|-----------|------------|------------------------|
| | Simulado | Calculado | Diferencia | |
| $1/\sqrt{25}$ | 8.1 | 8.1 | 0 | 167.5 |
| Reference | 202.9 | 202.9 | 0 | 6.7 |
| $\sqrt{25}$ | 5064.1 | 5074.1 | -9.9 | 6.7 |

Si bien, los resultados de la simulación fueron satisfactorios, se debe tener en consideración aspectos que no son evaluados por la herramienta, como es el caso del incremento en la temperatura de la máquina al ser aumentadas sus dimensiones. Las pérdidas en el cobre aumentan con k_R^2 , con largo axial constante, mientras que la superficie de transferencia de calor aumenta con k_R , lo que implica un aumento de temperatura mayor que el aumento en la superficie de disipación de calor. Considerando que existe transferencia de calor por el entrehierro desde el estator hacia el rotor y que en el rotor las principales pérdidas son en el hierro, las que aumentan con k_R^2 , existen limitaciones prácticas, las que escapan a los resultados entregados por esta herramienta, que pueden conducir a daño en los imanes permanentes. Esto es lo que define el límite superior del escalamiento.

Otro aspecto a tener en consideración, es que al escalar todas las dimensiones de la máquina, se estaría modificando también el espesor de la laminación, pero es probable que esto se mantenga constante. El aumento de tamaño, implicaría una laminación más gruesa y por lo tanto mayores pérdidas por corrientes parásitas (*Foucault*).

Se redujo el tamaño para logra un par 25 veces más pequeño que el de la máquina de referencia. Los resultados calculados con la herramienta coinciden con los valore obtenido en la simulación con FEMM 4.2. pero al igual que caso explicado anteriormente, existen limitaciones prácticas. La principal limitación es en la densidad de corriente en las ranuras, tema que se discuta más adelante. Adicionalmente, existe la limitación de largo del entrehierro, el que para este caso es

de 0,2 mm, por debajo de lo recomendado en la literatura, de 0,5 mm [62] para motores de imanes permanentes página 292.

6.6.2. Escalamiento manteniendo tensión de alimentación

Se debe considerar que el escalamiento de las dimensiones, implica un escalamiento de la tensión suministrada por el accionamiento electrónico, pero es probable que en aplicaciones de tracción este valor se desee mantener constantes, en cuyo caso, se presentan el siguiente análisis.

En el caso de aumentar las dimensiones radiales, para mantener las densidades de flujo en la máquina escalada, se debe mantener la carga eléctrica del modelo de referencia. Si se busca conservar la tensión de alimentación desde la referencia, se debe tener en cuenta que la carga eléctrica es inversamente proporcional al diámetro del entrehierro (5.6). Al aumentar la dimensión radial, es necesario también aumentar las vueltas por ranura, por lo que, para mantener este parámetro es necesario igualar el factor k_N al factor k_R . Debido a que el área de ranura aumentó en k_R^2 , esto implica que la densidad de corriente en la ranura, aplicando la expresión (5.10), disminuye de en k_R , lo que significa un beneficio, debido a la reducción de pérdidas por efecto Joule en el cobre, pero que no implican un aumento de pérdidas totales por aumento de longitud del cobre en los devanados.

En el caso de disminución en dimensiones radiales, el reducir el área de la ranura, manteniendo la carga eléctrica de la máquina de referencia, genera un aumento en la densidad de corriente. Aplicando la expresión (5.10), se deduce que el incremento es de k_R veces la densidad de referencia, esto debido a la disminución en k_R^2 del

área de la ranura y la disminución en k_R de factor k_N . Este aumento en la densidad de corriente en las ranuras, significa un aumento en las pérdidas del cobre por efecto Joule. El incremento en las pérdidas se traduce en un aumento en la temperatura, lo que, sumado a la reducción del tamaño del ventilador, en el caso de los motores autoventilados, genera dificultades en la operación del equipo, debido a la clase de aislación del devanado y temperatura riesgosamente alta para los imanes permanentes. Para hacer frente a lo anterior, es necesario considerar la incorporación de un sistema refrigeración más eficiente. La literatura indica que, para máquinas síncronas autoventiladas, la densidad de corriente está en el rango de 3 a 5 A/mm² y para las con sistema de refrigeración con agua, las densidades están en el rango de 7 a 10 A/mm² [83].

Lo expuesto anteriormente, sería una gran debilidad de la herramienta desarrollada al escalar en reducción de dimensiones, por lo que se determina una segunda metodología de escalamiento, donde el factor de ajuste del devanado k_N se iguala a k_R^2 , logrando mantener la densidad de corriente en las ranuras, con los resultado mostrados en la tabla 6.2.

Bajo el escenario explicado anteriormente, la limitación en la reducción de dimensiones sería solamente de tipo mecánica, debido al mínimo tamaño de entrehierro factible para máquinas de imanes permanentes, indicado en la literatura con un valor de 0,5 mm [61].

Capítulo 7. Conclusiones

El primer objetivo de este trabajo, es establecer el tipo de máquina eléctrica más apropiado para aplicaciones en tracción eléctrica. Se concluye que la Máquina Radial Síncrona de Imanes Permanentes Interior (IPMSRM), con PM en rotor en forma de V, es la más apropiada.

Los argumentos principales que respaldan el uso de IPMSRM, tienen relación con las tendencias tecnológicas en máquinas eléctricas para uso en tracción, las que apuntan a la disminución de los tamaños y aumento de la densidad de par y potencia. La disminución de tamaño tiene relación con el gran volumen y peso ocupado por las baterías de los vehículos eléctricos, que debido al aumento de la densidad de par requerido en baja velocidad y de potencias en altas velocidades de rotación, hace necesaria una gran capacidad de almacenamiento de energía.

Otra tendencia es la reducción de uso de minerales de tierras raras, los que, debido a la concentración en la producción, por parte de China, y alto valor de estos, hacen necesario buscar topologías de máquinas donde se logre un convenio entre tamaño, densidad de par/potencia, confiabilidad y precio competitivo, con el mínimo uso de PM que contengan estos minerales. Topologías que aprovechan el par reluctante, en particular, la configuración de rotor con imanes en forma de V, son la que logra el mejor convenio entre volumen de imanes y par obtenido.

Por último, está la tendencia relacionada con la alta velocidad de rotación, donde en la actualidad, se alcanzan velocidades máximas del orden de 17.000 rpm en motores usados en tracción, con el objetivo de reducir el tamaño del motor, por lo que es

importante usar topologías de rotor que no tengan riesgos de desprendimiento de los PM por fuerza centrífuga, observándose como mejor alternativa los con PM interiores.

Los requerimientos de las máquinas eléctricas para uso en tracción, están definidos por diferentes organismos gubernamentales, tales como el DOE y VTO, para los Estados Unidos. Actualmente existen objetivos técnicos para el 2025.

En cuanto al diseño de máquinas eléctricas de referencia, se logra un diseño que responde a las características levantadas desde la revisión bibliográfica. La estructura de estator se determina con ecuaciones de dimensionamiento con factor D^3L , optimizada con estrés tangencial de 40KPa, dentro del rango usado para estas máquinas según literatura. Se obtienen un modelo de referencia, con devanado diseñado a partir de metodología de estrella de ranuras, logrando un diseño robusto, con niveles de densidad de flujo por debajo de la saturación para material M-22 Steel, usado en esta máquina. La curva de par, da cuenta de un diseño con saliencia, donde la asimetría indica la diferencia entre inductancia del eje de cuadratura y directo, que corresponde a lo esperado para este diseño de IPMSM, con rotor de PMs en forma de V.

Se determinan las expresiones para lograr un escalamiento geométrico, el que usa los factores de escala radial k_R , axial k_A y de ajuste de devanado k_N . Presentando, en un primer escenario, la metodología de escalamiento que permite mantener la carga eléctrica de la máquina de referencia en la máquina escalada. En un segundo

escenario, se presenta la metodología de escalamiento que permite mantener la densidad de corriente de la máquina de referencia en la máquina escalada.

A partir de la expresión del par, determinada en el escalamiento geométrico, se calculó analíticamente y contrastó con los valores obtenidos en la simulación, para cada ángulo eléctrico del rotor, tanto en aumento como disminución de tamaño, comprobándose la exactitud del procedimiento.

Se realiza un escalamiento con niveles de saturación por sobre el codo de la curva B-H del material usado en el estator, manteniéndose los valores de densidades de flujo en entrehierro, dientes y yugo, validándose los resultados del par determinados en forma analíticamente y simulada para cada caso.

En la reducción de dimensiones, el procedimiento presentado en el segundo escenario, donde el devanado se ajusta a k_R^2 , se logra mantener la densidad de corriente de la máquina de referencia en la máquina escalada, por lo que es posible el escalamiento de diseños con niveles altos de densidad de corriente, que son comunes en motores usados en tracción de vehículos.

Bibliografía

- [1] Gobierno de Chile; “Estrategia Nacional de Electromovilidad”, 2021.
- [2] Barroso, Daniel G., et al. "Electrified Automotive Propulsion Systems: State-of-the-Art Review." *IEEE Transactions on Transportation Electrification* (2021).
- [3] A. M. EL-Refaie, "Motors/Generators for Traction/Propulsion Applications: A Review", *IEEE International Electric Machine & Drives (IEMDC)*, pp. 490-497, 2011.
- [4] S. Jamshed, Y. Ren¹, Y. Hu¹, J. Wang², L. Jiang¹ “Configurations and Control of Traction Motors for Electric Vehicles: A Review”, *Chinese Journal of Electrical Engineering*, Vol.3, No.3, December 2017
- [5] Rare Earth Elements Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Cerium, Dysprosium, Erbium), By Application (Magnets, Catalyst), By Region, And Segment Forecasts, 2019 – 2025 <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/rare-earth-elements-market-2019>
- [6] Marquette University, Milwaukee, Wisconsin United States; “Toward a Sustainable More Electrified Future: The Role of Electrical Machines and Drives”, pp 49 – 59, March 2019.
- [7] G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo, P. Guglielmi, "Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 6, pp. 2322-2332, 2012.
- [8] Rösel, Uta, and Dietmar Drummer. "Injection Moulding of Multipolar Polymer-Bonded Magnets into Soft Magnetic Inserts for Rotors in Reluctance Motors." *Magnetism 1.1* (2021): 3-21.
- [9] A. Chiba, Y. Takano, M. Takeno, T. Imakawa, N. Hoshi, M. Takemoto, and S. Ogasawara, "Torque density and efficiency improvements of a switched reluctance motor without rare-earth material for hybrid vehicles, " *Industry Applications*, *IEEE Transactions on*, vol. 47, pp. 1240-1246, may-june 2011
- [10] Chowdhury, Shajjad, et al. "Enabling technologies for compact integrated electric drives for automotive traction applications." 2019 *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. IEEE, 2019.
- [11] L. Shao, A. E. H. Karci, D. Tavernini, A. Sorniotti and M. Cheng, "Design approaches and control strategies for energy-efficient electric machines for electric vehicles—A review", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116900-116913, 2020.
- [12] Gobierno de Chile, “Transición Energética de Chile”, 2022

- [13] V. Fernandez, "Rare-earth elements market: A historical and financial perspective", *Resources Policy*, vol. 53, pp. 26-45, Sep. 2017.
- [14] M. Popescu, J. Goss, D. Staton, D. Hawkins, Y. C. Chong, A. Boglietti, "Electrical vehicles—Practical solutions for power traction motor systems", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 3, pp. 2751-2762, May/Jun. 2018.
- [15] Neapolitan, Richard E., and Kwang Hee Nam. "AC motor control and electrical vehicle applications." (2018).
- [16] P. Lindh, J. Montonen, P. Immonen, J. Tapia, J. Pyrhönen, "Design of a Traction Motor with Tooth-Coil Windings and Embedded Magnets", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61 n. 8, August, 2014. pp. 4306-4314.
- [17] Yadav, Dharmendra Singh, and Manisha Manisha. "Electric Propulsion Motors: A Comparative Review for Electric and Hybrid Electric Vehicles." 2022 IEEE International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE). IEEE, 2022.
- [18] B. A. Welchko, T. M. Jahns and S. Hiti, "IPM synchronous machine drive response to a single-phase open circuit fault," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, no. 5, pp. 764-771, September, 2002.
- [19] S.H. Han, T.M. Jahns, M. Aydin, M.K. Guven, and W.L. Soong, "Impact of Maximum Back-EMF Limits on the Performance Characteristics of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines," in *Rec. of 2006 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Vol. 4, Oct. 2006, pp. 1962-1969.
- [20] Nuca, Ilie, et al. "Development of Traction System with Six Phase Induction Motor for Urban Passenger Vehicle." 2020 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE). IEEE, 2020.
- [21] Z. Q. Zhu, D. Howe, "Electrical machines and drives for electric hybrid and fuel cell vehicles", *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 746-765, Apr. 2007.
- [22] L. Kumar S. Jain , "Electric propulsion system for electric vehicular technology_A review", Volume 29, January 2014, Pages 924-940
- [23] S. M. De Pancorbo, G. Ugalde, J. Poza, A. Egea, "Comparative study between induction motor and synchronous reluctance motor for electrical railway traction applications", *Proc. IEEE EDPC*, pp. 1-5, 2015.
- [24] A. Krings and C. Monissen, "Review and Trends in Electric Traction Motors for Battery Electric and Hybrid Vehicles," 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2020, pp. 1807-1813, doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270946.

- [25] Fnaiech, Mohamed Amine, et al. "Fuzzy logic and sliding-mode controls applied to six-phase induction machine with open phases." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57.1 (2009): 354-364.
- [26] Jia, Shaofeng, et al. "Design and Comparison of Three Different Types of IE4 Efficiency Machines." 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2019.
- [27] Poudel, Bikrant, et al. "Toward less rare-earth permanent magnet in electric machines: A review." *IEEE Transactions on Magnetics* (2021).
- [28] Li, Chengrui, et al. "High frequency torque ripple suppression for high frequency signal injection based sensorless control of SynRMs." 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2019.
- [29] B. Bilgin, A. Emadi, "Electric motors in electrified transportation: a step toward achieving a sustainable and highly efficient transportation system", *IEEE Power Electron. Mag.*, vol. 1, no. 2, pp. 10-17, 2014
- [30] J.-H. Cho, H.-S. Oh, S.-U. Cho, D. G. Kim, I.-S. Park, "Development of IPM synchronous motor for diesel hybrid electric vehicle", *Proc. INTELEC*, pp. 1-5, 2009.
- [31] Bin Zhang, Ronghai Qu, Wei Xu, Jian Li, "A permanent magnet traction machine with wide high efficiency range for EV application", *Industrial Electronics Society IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE*, pp. 000457-000463, 2015.
- [32] Ngo, Duc-Kien, Min-Fu Hsieh, and Thanh Anh Huynh. "Torque enhancement for a novel flux intensifying PMa-SynRM using surface-inset permanent magnet." *IEEE Transactions on Magnetics* 55.7 (2019): 1-8.
- [33] C. Babetto, G. Bacco, G. Berardi, N. Bianchi, "High Speed Motors: a Comparison between Synchronous PM and Reluctance Machines" in *IEEE ECCE Conf, Cincinnati (USA)*, pp. 3927-3934, October 2017.
- [34] Chen, Bicheng, et al. "A Study on Scaling Laws for Thermal Parameters of Permanent Magnet Synchronous Machines." 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2021.
- [35] Puškár, Michal, et al. "Environmental study focused on the suitability of vehicle certifications using the new European driving cycle (NEDC) with regard to the affair "dieselgate" and the risks of NOx emissions in urban destinations." *Air Quality, Atmosphere & Health* 12.2 (2019): 251-257.
- [36] J.D. Widmer, R. Martin and M. Kimiabeigi, "Electric vehicle traction motors without rare earth magnets", *Sustainable Materials and Technologies*, Vol.3, pp. 7-13, 2015

- [37] B. C. Mecrow, A. G. Jack, J. M. Masterman, "Determination of rotor eddy current losses in permanent magnet machines", *Conf. Rec. 6th Int. Elect. Mach. Drives*, pp. 299-304, 1993.
- [38] Puškár, Michal, et al. "Environmental study focused on the suitability of vehicle certifications using the new European driving cycle (NEDC) with regard to the affair "dieselgate" and the risks of NOx emissions in urban destinations." *Air Quality, Atmosphere & Health* 12.2 (2019): 251-257.
- [39] M. Zeraoulia, M. Benbouzid, D. Diallo, "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 6, pp. 1756-1764, Nov. 2006
- [40] K. Kiyota, H. Sugimoto, A. Chiba, "Comparing electric motors: an analysis using four standard driving schedules", *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 20, no. 4, pp. 12-20, 2014.
- [41] Niazi, Peyman. "Permanent magnet assisted synchronous reluctance motor design and performance improvement". Texas A&M University, 2005.
- [42] T.M. Jahns, G.B. Kliman, T.M. Neumann, "Interior permanent magnet synchronous motors for adjustable speed drives", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-22, no. 4, pp. 738-746, 1986.
- [43] R. Schiferl, T. Lipo, "Power capability of salient pole permanent magnet synchronous motors in variable speed drive applications", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 26, no. 1, pp. 115-123, 1990.
- [44] K.T. Chau, C.C. Chan, C. Liu, "Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2246-2257, 2008.
- [45] P. Xue and J. Lin, "Discussion on the rare earth resources and its development potential of Inner Mongolia of China", in *Proc. ICMREE*, May 20–22, 2011, vol. 1, pp. 9–12.
- [46] S. Ooi, S. Morimoto, M. Sanada et al., "Performance evaluation of a high power density PMASynRM with ferrite magnets", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 3, pp. 1308-1315, 2013.
- [47] S. Reddy, S. Md. Z. Islam, Choi "Performance Review of Permanent Magnet assisted Synchronous Reluctance Traction Motor Designs", 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp 23-27 Sept. 2018
- [48] S. S. R. Bonthu, A. Arafat, S. Choi, "Comparisons of rare-earth and rare-earth-free external rotor permanent magnet assisted synchronous reluctance motors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 12, pp. 9729-9738, Dec 2017.

- [49] R. Madhavan, B. G. Fernandes, "Performance improvement in the axial flux-segmented rotor-switched reluctance motor", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, vol. 29, no. 3, pp. 641-651, Sep. 2014.
- [50] D. Gerada, "High-speed electrical machines: technologies trends and developments", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 6, pp. 2946-2959, 2014.
- [51] [Online]. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles_en
- [52] K. Kamiev, J. Montonen, M. P. Ragavendra, J. Pyrhönen, J. A. Tapia, M. Niemelä, "Design principles of permanent magnet synchronous machines for parallel hybrid or traction applications", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 11, pp. 4881-4890, Nov. 2013.
- [53] [Online]. <https://trucknbus.hyundai.com/global/es/products/bus/elec-city>
- [54] [Online]. <http://dongfeng.su/en/product/electric-bus.html>
- [55] [Online]. <https://en.byd.com/bus/>
- [56] [Online]. <https://en.byd.com/truck/>
- [57] [Online]. <https://www.solarisbus.com/en/vehicles/zero-emissions/urbino-electric>
- [58] [Online]. <https://www.proterra.com/>
- [59] Won, Hoyun, et al. "Novel efficiency-shifting radial-axial hybrid interior permanent magnet synchronous motor for electric vehicle." 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2020.
- [60] R. Yang, B. Sc, M. Sc, "Electrified vehicle traction machine design with manufacturing considerations", Hamilton, Ontario, 2016.
- [61] V. B. Honsinger, "Sizing equations for electrical machinery," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. EC-2, no. 1, March 1987, pp. 116–121.
- [62] LIPO, Thomas A., et al. *Introduction to AC machine design*. 2019.
- [63] J. Tapia, J. Pyrhonen, J. Puranen et al., "Optimal design of large permanent magnet synchronous generators", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 1, pp. 642-650, 2012.
- [64] T. Burrell, Oak Ridge National Laboratory, 2013.
- [65] T. Burrell, Oak Ridge National Laboratory, 2014.

- [66] Wang, Can-Fei, et al. "Design issues of an IPM motor for EPS." *COMPEL- The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering* (2012).
- [67] Kimiabeigi, M., and J. D. Widmer. "On winding design of a high performance ferrite motor for traction application." 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE, 2016.
- [68] El-Refaie, Ayman M. "Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: Opportunities and challenges." *IEEE Transactions on industrial Electronics* 57.1 (2009): 107-121.
- [69] Zuopeng, Ding, Zhang Bing, and Yin Dejun. "A design of fractional-slot concentrated winding IPM synchronous motor for electric vehicles." *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2017.
- [70] Alberti, Luigi, and Nicola Bianchi. "Theory and design of fractional-slot multilayer windings." *IEEE Transactions on Industry Applications* 49.2 (2013): 841-849.
- [71] Hwang, Myeong-Hwan, et al. "Design and analysis of rotor shapes for IPM motors in EV power traction platforms." *Energies* 11.10 (2018): 2601.
- [72] Jokinen, Tapani, Valeria Hrabovcova, and Juha Pyrhonen. *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons, 2013.
- [73] H. Kofler, C. Sommerhuber, and F. Zerobin, "The Magnetic Reaction Field In The End Region Of A Synchronous Machine With Superconducting Field Winding," *IEEE Transactions On Magnetics*, vol. 17, no. 5, pp. 1970–1973, Sep 1981.
- [74] K. J. Binns and D. W. Shimmin, "The Relationship Between Performance Characteristics and Size Of Permanent Magnet Motors," in *Seventh International Conference On Electrical Machines And Drives*, 1995. (Conf. Publ. No. 412), Sep 1995, pp. 423–427.
- [75] Q. S. Gu and M. Stiebler, "Scaling And Dimensioning Of Switched Reluctance Machines," *European Transactions On Electrical Power*, vol. 7, no. 5, pp. 301–310, 1997.
- [76] L. Alberti, N. Bianchi, and S. Bolognani, "Lamination Design Of A Set Of Induction Motors," *Journal Of Electrical Engineering: Theory And Application*, vol. 1, pp. 18–23, 2010.
- [77] L. Alberti, N. Bianchi, A. Boglietti, and A. Cavagnino, "Core Axial Lengthening As Effective Solution To Improve The Induction Motor Efficiency Classes," *IEEE Transactions On Industry Applications*, vol. 50, no. 1, pp. 218–225, Jan 2014.

- [78] S. Stipetic, D. Zarko and M. Popescu, "Scaling laws for synchronous permanent magnet machines", Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) 2015 Tenth International Conference on, pp. 1-7, March 31 2015-April 2 2015.
- [79] S. Stipetic, D. Zarko, and M. Popescu, "Ultra-fast axial and radial scaling of synchronous permanent magnet machines," IET Electr. Power Appl., vol. 10, no. 7, pp. 658–666, 2016.
- [80] Nell, Martin & Lenz, Jonas & Hameyer, Kay. (2019). "Scaling laws for the FE solutions of induction machines. Archives of Electrical Engineering". 68. 677-695. 10.24425/aee.2019.129350.
- [81] Wang, Yawei, et al. "Scalability of synchronous reluctance machines considering thermal performance." 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2019.
- [82] Jokinen, Tapani, Valeria Hrabovcova, and Juha Pyrhonen. "Design of rotating electrical machines". John Wiley & Sons, 2013.
- [83] Song, Liwei, et al. "Reluctance torque analysis and reactance calculation of IPM for HEVs based on FEM." 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE, 2010.
- [84] Xu, Yongming, et al. "Research On Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Performance Matching of Electric Bus." IEEE Transactions on Applied Superconductivity 31.8 (2021): 1-4.