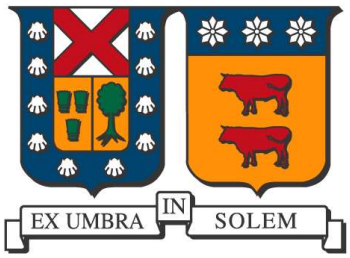
**Universidad Técnica Federico Santa María**

*Departamento de Ingeniería Eléctrica*

*Valparaíso - Chile*

---




# OPTIMIZACIÓN DE UN MOTOR DE RELUCTANCIA CONMUTADA MEDIANTE USO DE SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS

---

**ÁLVARO FELIPE LÓPEZ ALVARADO**

---

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

PROFESOR GUÍA

**DR. ALEJANDRO ANGULO**

PROFESOR CORREFERENTE

**Dr. JORGE JULIET**

11 de agosto de 2025

## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):** ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

**Título del trabajo:** OPTIMIZACIÓN DE UN MOTOR DE RELUCTANCIA CONMUTADA MEDIANTE USO DE SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS

**Nombre del candidato(a):** Álvaro Felipe López Alvarado

**Carrera / Grado:** Ingeniería Eléctrica

**Campus:** Casa Central Valparaiso **;** **Departamento**: Ingeniería Eléctrica

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Alejandro Angulo, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha: 11-08-2025** ; **Firma:** _____

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 11-08-2025 ; **Firma:** _____

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

*Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución.*

# Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis familiares por la comprensión y paciencia que me han tenido. A mis compañeros y amigos que he encontrado en la universidad con los que he compartido momentos importantes en mi vida.

Agradezco el esfuerzo y paciencia de los profesores que me han enseñado sus invaluables conocimientos tanto en los ramos como en mi crecimiento personal a pesar de ser una persona no siempre dedicada al estudio.

Finalmente, agradezco a todas las personas que han contribuido indirectamente en la realización de esta memoria brindándome ánimo, apoyo y compañía. A todos ustedes, muchas gracias.

# Índice general


**1. Introducción** **5**

1.1. Definición del problema . . . . . 5

1.2. Solución propuesta . . . . . 5

1.3. Objetivo principal . . . . . 5

1.4. Objetivos específicos . . . . . 6

1.5. Alcance . . . . . 6

1.5.1. Metodología y plan de trabajo . . . . . 7

**2. Marco teórico** **8**

2.1. Máquina de reluctancia conmutada . . . . . 8

2.1.1. Ventajas e inconvenientes . . . . . 10

2.1.2. Pérdidas . . . . . 10

2.1.3. Cantidad de polos estator/rotor . . . . . 11

2.1.4. Formulación general . . . . . 13

2.1.5. Circuito equivalente . . . . . 13

2.2. Formulación de características iniciales . . . . . 14

2.2.1. Largo de la máquina . . . . . 14

2.2.2. Factor del laminado del núcleo . . . . . 14

2.2.3. Entrehierro del estator y rotor . . . . . 14

2.2.4. Factor de llenado de ranuras . . . . . 15

2.2.5. Número de vueltas por polo . . . . . 15

2.2.6. Diámetro del eje . . . . . 15

2.3. Aplicación de motores a la industria automotriz . . . . . 16

2.3.1. Aplicación de la MRC a la industria automotriz . . . . . 16

2.3.2. Máquinas clásicas para tracción automotriz . . . . . 16

2.3.3. Motores sincrónicos . . . . . 16

2.3.4. Motores de inducción o asincrónicos . . . . . 17

2.4. Comparación . . . . . 17

2.5. Programa de simulación: Ansys Electronics Desktop . . . . . 21
2.5.1. Módulo ‘RMxprt . . . . . 22
2.5.2. Módulo “Design Of Experiment” . . . . . 22
2.5.3. “Optimization” . . . . . 24
2.5.4. Motor-CAD . . . . . 25
2.5.5. Maxwell 2D y 3D . . . . . 26

**3. Datos y pasos previos a la optimización** **27**
3.1. Setup experimental . . . . . 27
3.2. Datos de referencia . . . . . 27
3.2.1. Parámetros objetivos de referencia . . . . . 27
3.2.2. Automóvil eléctrico de referencia . . . . . 29
3.2.3. Objetivos de diseño del motor de reluctancia conmutada . . . . . 29
3.2.4. Procedimiento del programa Ansys Motor-CAD . . . . . 30
3.3. Memoria de cálculo . . . . . 34
3.3.1. Diámetro de eje . . . . . 34
3.3.2. Materiales para estator y rotor . . . . . 34
3.3.3. Ramas paralelas . . . . . 35
3.3.4. Factor de llenado . . . . . 35
3.3.5. Grosor del conductor . . . . . 35
3.3.6. Grosor y tipo de aislación del conductor . . . . . 37
3.3.7. Ángulo de encendido y ángulo de apagado . . . . . 38
3.4. Variables para la optimización . . . . . 39
3.5. “Paper” de referencia inicial . . . . . 41
3.6. Previo a optimizar . . . . . 41
3.6.1. Creación del modelo inicial . . . . . 41
3.6.2. Procedimiento inicial en el programa Ansys Electronics Desktop . . . . . 41
3.6.3. Parametrización de sus variables . . . . . 50
3.6.4. Procedimiento de parametrización . . . . . 51
3.6.5. Función “Cost” . . . . . 54

**4. Simulación y resultados** **58**

4.1. Optimización . . . . . 58

4.1.1. Módulo: “Design of Experiments (DOE)” . . . . . 59

4.1.2. Procedimiento del módulo: “Design of Experiments” . . . . . 59

4.1.3. Módulo: “Optimization” . . . . . 63

4.1.4. Procedimiento del módulo: “Optimization” . . . . . 64

4.1.5. Primera fase de optimización . . . . . 66

4.1.6. Segunda fase de optimización . . . . . 67

4.1.7. Optimización transitoria . . . . . 69

4.2. Comparación de la máquina de referencia con la MRC en Maxwell 2D . . . . . 69

4.2.1. Controlador transitorio de la MRC . . . . . 69

4.2.2. Comparación de torque . . . . . 70

4.2.3. Comparación de tensiones . . . . . 71

4.2.4. Comparación de corrientes . . . . . 72

4.3. Problemas y dificultades de los programas utilizados . . . . . 73

4.3.1. Programa para la optimización, Ansys Electronics Desktop . . . . . 73

4.3.2. Programa Ansys Motor-CAD . . . . . 75

**5. Conclusiones** **76**

**6. Anexos** **79**

6.1. Información extra del motor de referencia . . . . . 79

6.2. Datos de la optimización . . . . . 83

# Índice de figuras


2.1. Comparativa física de la MRC con máquinas sincrónica de imanes permanentes y de inducción: (a) máquina sincrónica “IPM”, (b) máquina de inducción, (c) máquina de reluctancia conmutada 12/8 polos [1]. . . . . 8

2.2. Flujo enlazado según la posición del rotor de la MRC [1]. . . . . 9

2.3. Comportamiento de torque y potencia según la velocidad de la MRC. [1] . . . . . 10

2.4. Configuraciones trifásicas de polos en máquinas de reluctancia conmutada: (a) 6/4, (b) 12/8, (c) 18/12, (d) 24/16, (e) 30/20 y (f) 36/24 [1]. . . . . 12

2.5. Circuito equivalente simplificado de la MRC [1]. . . . . 13

2.6. Potencia nominal según número de polos en MRC de 24/16 [1]. . . . . 15

3.1. Imagen de la máquina de referencia sincrónica “IPM”, obtenida desde Motor-CAD. . 28

3.2. Automóvil Nissan Leaf 2012 [2]. . . . . 29

3.3. Modelados del programa Motor-CAD. . . . . 30

3.4. Ejemplos de máquinas rotativas en el programa Ansys Motor-CAD. . . . . 31

3.5. Ventana de inicio de Ansys Motor-CAD con el modelo de la máquina de referencia cargado. . . . . 31

3.6. Controlador por defecto configurado para la máquina de referencia. . . . . 32

3.7. Configuración del modelo de pérdidas para la máquina de referencia. . . . . 32

3.8. Pérdidas por viento calculadas automáticamente para la máquina de referencia. . . . 33

3.9. Pérdidas por rodamientos calculadas automáticamente para la máquina de referencia. 33

3.10. Angulos ON/OFF de referencia para una MRC de 18/12 polos. . . . . 39

3.11. Ventana inicial del programa Ansys Electronics Desktop. . . . . 42

3.12. Tipo de máquinas disponibles en el módulo RMxprt. . . . . 43

3.13. Pestañas de configuración para la MRC. . . . . 43

3.14. Propiedades de la pestaña “Machine”. . . . . 44

3.15. Ventana del tipo de circuito. . . . . 45

3.16. Propiedades de la pestaña “Circuit”. . . . . 45

3.17. Propiedades de la pestaña “Stator”. . . . . 46

3.18. Propiedades de la pestaña “Rotor”. . . . . 47

3.19. Propiedades de la pestaña “Winding”. . . . . 48
3.20. Configuración del “Setup” 4000 rpm en la pestaña “Analysis”. . . . . 48
3.21. Configuración del “Setup” 5500 rpm en la pestaña “Analysis”. . . . . 49
3.22. Propiedades de la pestaña “Shaft”. . . . . 49
3.23. Parametrización de la máxima potencia de salida con el parámetro fijado en 160° y velocidad nominal. . . . . 50
3.24. Parametrización de la eficiencia de salida con el parámetro fijado en 40° y velocidad nominal. . . . . 50
3.25. Parametrizaciones realizadas para la MRC. . . . . 51
3.26. Añadir parametrización. . . . . 52
3.27. Configuración de la parametrización en la pestaña "Sweep Definitions". . . . . 52
3.28. Configuración de la parametrización en la pestaña General. . . . . 53
3.29. Características definidas para analizar. . . . . 54
3.30. Descripción de áreas de la MRC. . . . . 56

4.1. Esquema general del proceso de optimización. . . . . 58
4.2. Añadir el “Design of experiments”. . . . . 59
4.3. Configuración inicial del “Design of Experiments”. . . . . 60
4.4. Configuración de cálculos en el “Design of Experiments”. . . . . 61
4.5. Configuración de la función “Cost” en el “Design of Experiments”. . . . . 62
4.6. Configuración de los rangos de las variables en el “Design of Experiments”. . . . . 63
4.7. Añadir módulo de “Optimization”. . . . . 64
4.8. Configuración general del módulo “Optimization”. . . . . 65
4.9. Ejemplo de estabilización de la curva de optimización. . . . . 65
4.10. Configuración de rangos de variables para la optimización. . . . . 66
4.11. Diagrama de cajas: Comparación general de “Cost” vs Configuración de polos. . . . 67
4.12. Gráfico de Pareto: eficiencia vs densidad de potencia gravimétrica. . . . . 68
4.13. Gráfico de Pareto: eficiencia vs densidad de potencia volumétrica. . . . . 68
4.14. Circuito de control de la MRC . . . . . 70
4.15. Torque transitorio de la máquina sincrónica de referencia. . . . . 70
4.16. Torque transitorio de la MRC variación “12S8R” 110 D4. . . . . 71

4.17. Tensión transitoria de la máquina sincrónica de referencia. . . . . 71
4.18. Tensión transitoria de la MRC variación “12S8R” 110 D4. . . . . 72
4.19. Corriente transitoria de la máquina sincrónica de referencia. . . . . 72
4.20. Corriente transitoria de la MRC variación 12S8R 110 D4. . . . . 73

6.1. Temperaturas del motor de referencia formato radial. . . . . 79
6.2. Temperaturas del motor de referencia formato axial. . . . . 80
6.3. Gráfica de torque del motor de referencia. . . . . 80
6.4. Gráfica de potencia del motor de referencia. . . . . 81
6.5. Gráfica de eficiencia del motor de referencia. . . . . 81
6.6. Gráfica de torque nominal del motor de referencia. . . . . 82
6.7. Datos de la primera fase de optimización. . . . . 83
6.8. Datos de la segunda fase de optimización configuración “6S4R”. . . . . 84
6.9. Datos de la segunda fase de optimización configuración “12S8R” Op. 1. . . . . 85
6.10. Datos de la segunda fase de optimización configuración “12S8R” Op. 2. . . . . 86
6.11. Datos de la segunda fase de optimización configuración “12S8R” Op. 3. . . . . 87

# Índice de Tablas

2.1. Comparación del rendimiento de las máquinas eléctricas aplicadas al torque automotriz 18

2.2. Comparación de los costos de las máquinas eléctricas aplicadas al torque automotriz 19

2.3. Comparación de la producción y mantenimiento de las máquinas eléctricas aplicadas al torque automotriz. . . . . 20

2.4. Comparación del control y operación de las máquinas eléctricas aplicadas al torque automotriz. . . . . 21

2.5. Configuraciones del método DRE y sus características [3]. . . . . 24

3.1. Características del motor de referencia obtenidas desde el programa Motor-CAD. . . 28

3.2. Datos de puntos de operación de la máquina de referencia. . . . . 30

3.3. Ramas paralelas y grosor de aislante según configuración de polos. . . . . 38

3.4. Variación de ángulos y velocidades . . . . . 39

3.5. Parámetros y variables del modelo con sus valores y rangos. . . . . 40

# Nomenclatura

$DiaWire$: Diámetro de los conductores de la bobina.

$Eje$: Diámetro interior del rotor.

$EspYuRot$: Espesor del yugo del rotor.

$EspYuStator$: Espesor del yugo del estator.

$Gap$: Distancia entre el estator y el rotor.

$GosorPRot$: Grosor de los polos del rotor, es un factor, de 0 a 1.

$GosorPStator$: Grosor de los polos del estator, es un factor, de 0 a 1.

$GrosRot$: Grosor del rotor del motor.

$GrosStator$: Grosor del estator del motor.

$largorRot$: Largo del rotor.

$largoStator$: Largo del estator.

$NStrands$: Número de filamentos en el cable conductor.

$SalCa$: Salida de la cabeza de la bobina.

$VpP$: Vueltas por polo.

$Ang\_lead$: Ángulo ON, define el inicio del pulso eléctrico.

$Ang\_trig$: Ángulo OFF, define el término del pulso eléctrico.

$Cost$: Función creada para la optimización de características de la máquina.

$D$: Diámetro del eje.

$E$: Eficiencia de la máquina.

$P$: Peso activo de la máquina.

$V$: Volumen activo de la máquina.

$T$: Torque de la máquina.

$FF$: Factor de llenado de espacios o "fill factor".

$K_e$: Coeficiente para la eficiencia en la función "Cost".

$K_p$: Coeficiente para el peso activo en la función “Cost”.

$K_v$: Coeficiente para el volumen activo en la función “Cost”.

$K_t$: Coeficiente para el torque en la función “Cost”.

$K_f$: Coeficiente para el factor de llenado de espacios en la función “Cost”.

$D_{es}$: Diámetro exterior del estator.

$D_{is}$: Diámetro interior del estator.

$L_t$: Longitud total del estator incluyendo bobinado.

$A_{ts}$: Área total del estator.

$A_{de}$: Área con el diámetro externo del estator restándole el grosor del estator.

$A_{di}$: Área con el diámetro interior del estator.

$A_{tp}$: Aproximación del área total de los polos.

$P_{di}$: Perímetro del estator con el diámetro interior.

$A_{ep}$: Área total entre los polos.

$A_{tc}$: Área total transversal de los conductores.

$T_{max}$: Torque máximo.

$t$: Resistencia a la tracción máxima.

$A_o$: Área de la sección transversal del conductor.

$I_{rmsprama}$: Corriente eficaz por rama.

$J_{ref}$: Densidad de corriente de referencia.

# Resumen

Este estudio aborda la optimización de una máquina de reluctancia conmutada (MRC) para evaluar su desempeño en comparación con un motor sincrónico de imanes permanentes, enfocado en aplicaciones de torque automotriz. La optimización se realizó empleando los programas de análisis por elementos finitos de Ansys, recientemente adquiridos por la Universidad Técnica Federico Santa María. El objetivo de esta comparación fue determinar si las MRC pueden competir con las máquinas líderes en el sector automotriz, como los motores sincrónicos y asincrónicos. Para esto, los resultados obtenidos se complementaron con datos de la literatura, permitiendo un análisis de factores como rendimiento, costo, producción, mantenimiento, control y operación.

Los resultados indican que las MRC presentan una competitividad limitada en aplicaciones de torque automotriz. A pesar de sus ventajas, como resistencia a condiciones adversas, capacidad para operar a altas temperaturas, alto torque inicial, bajo costo de materiales y adecuado control de torque y velocidad, su desempeño se ve comprometido en aspectos clave como la eficiencia, variabilidad del torque, peso y volumen, que resultan fundamentales en este ámbito.

En cuanto a los programas utilizados, Ansys Electronics Desktop y Ansys Motor-CAD ofrecen amplias capacidades de simulación para productos y máquinas eléctricas y electrónicas; sin embargo, se encuentran en una fase inicial en cuanto a la optimización de MRC. Aunque estos programas permiten modelar dichas máquinas, sus funcionalidades de optimización son limitadas y se enfocan principalmente en modelos previamente optimizados.

# Abstract

This study focuses on the optimization of a switched reluctance machine (SRM) to evaluate its performance compared to a permanent magnet synchronous motor, specifically for automotive torque applications. The optimization was carried out using finite element analysis programs from Ansys, recently acquired by the Federico Santa María Technical University. The purpose of this comparison was to assess whether SRMs can compete with leading machines in the automotive sector, such as synchronous and asynchronous motors. For this purpose, the results obtained were complemented with data from the literature, allowing an analysis of factors such as performance, cost, production, maintenance, control, and operation.

The results indicate that SRMs show limited competitiveness in automotive torque applications. Despite advantages such as resistance to adverse conditions, the ability to operate at high temperatures, high initial torque, low material cost, and adequate torque and speed control, SRM performance is compromised in key aspects such as efficiency, torque variability, weight, and volume, which are fundamental in this field.

Regarding the programs used, Ansys Electronics Desktop and Ansys Motor-CAD provide extensive simulation capabilities for electrical and electronic products and machines; however, they are still in an initial phase for SRM optimization. Although these programs allow for modeling such machines, their optimization functionalities are limited and mainly focus on previously optimized models.

# Capítulo 1

# Introducción

## 1.1. Definición del problema

La industria automotriz ha adoptado principalmente motores sincrónicos y de inducción, debido a su rendimiento superior en aplicaciones de torque, mientras que la máquina de reluctancia conmutada (MRC), aunque presenta un diseño estructuralmente simple y un bajo costo de fabricación, no ha alcanzado una aceptación amplia en este sector. La MRC enfrenta limitaciones críticas en eficiencia, control de torque y manejo de vibraciones, lo cual reduce su competitividad frente a otras tecnologías de motores. Estas desventajas, junto con la necesidad de optimizar sus características térmicas y de ruido, afectan su desempeño en vehículos eléctricos, donde los motores deben cumplir con requisitos estrictos de eficiencia y durabilidad. Este estudio tiene como objetivo investigar y optimizar una MRC en comparación con un motor sincrónico, evaluando su capacidad para competir eficazmente en aplicaciones de torque automotriz.

## 1.2. Solución propuesta

Esta memoria propone una optimización de un motor de reluctancia conmutada a partir de la comparación con un motor sincrónico de imanes permanentes, ya diseñado y adaptado para aplicaciones de torque automotriz. El objetivo es evaluar las diferencias en rendimiento y funcionalidad entre ambos motores, y determinar si los motores de reluctancia pueden ser competitivos en la industria automotriz.

## 1.3. Objetivo principal

Diseñar un motor de reluctancia conmutada para uso en tracción de vehículos eléctricos, utilizando simulación computacional basada en elementos finitos y considerando indicadores de desempeño tanto estáticos como dinámicos. Posteriormente, comparar sus características y resultados con máquinas pioneras en este tipo de aplicaciones.

## 1.4. Objetivos específicos

- Definir los parámetros topológicos relevantes de una máquina de reluctancia conmutada (MRC) con el fin de optimizarlos en base a la evaluación de su impacto en los principales indicadores operacionales de la máquina, como su peso, torque y eficiencia.
- Definir e implementar un modelo base de la MRC, que permita inicializar el proceso de optimización, basándose en resultados documentados en la literatura y en limitaciones propias de los materiales.
- Optimizar la topología de una MRC, utilizando el programa Ansys Electronics Desktop, considerando indicadores estáticos y dinámicos de desempeño como funciones de mérito.
- Comparar la MRC optimizada con otros tipos de motores utilizados en tracción de vehículos eléctricos, analizando críticamente los resultados obtenidos en el contexto de esta aplicación.

## 1.5. Alcance

Desde los años 2000, la industria de vehículos eléctricos ha experimentado un crecimiento exponencial, desarrollando vehículos cada vez más avanzados. Se proyecta que esta industria continuará expandiéndose hasta llegar a reemplazar los autos con motores de combustión interna en un futuro cercano. No obstante, los motores predominantes en aplicaciones de torque automotriz, como los motores sincrónicos y de inducción, han mantenido su liderazgo en este sector.

Esta memoria tiene como objetivo optimizar una máquina de reluctancia conmutada (MRC) mediante la comparación con un motor clásico de referencia en aplicaciones de torque automotriz. La finalidad es explorar las capacidades de la MRC en este tipo de aplicaciones y evaluar si puede competir de manera efectiva con las máquinas que actualmente lo dominan. La optimización se centrará en aspectos como las pérdidas reales simuladas, el esfuerzo estructural en términos de cálculos específicos como el eje mínimo, así como el análisis de características de la MRC como densidad de potencia, torque, eficiencia, volumen, peso y la diferencia entre configuraciones de polos en sistemas trifásicos, utilizando un punto de funcionamiento nominal de la máquina de referencia.

El enfoque de la optimización se centrará exclusivamente en las características topológicas de la máquina, sin considerar su control, aunque se incluirá una evaluación y optimización estática básica en Maxwell 2D, así como otras características relevantes, tales como las diferentes configuraciones de polos, peso, eficiencia, densidad de torque y corriente máxima. Además, se considerará únicamente la potencia del motor de referencia y las velocidades de funcionamiento.

### 1.5.1. Metodología y plan de trabajo

**1.- Selección del motor de referencia:** Seleccionar un motor tradicional empleado para el control de torque de un automóvil eléctrico que se encuentre en circulación. Utilizar sus parámetros y puntos de funcionamiento para realizar la optimización comparativa con el modelo de máquina de reluctancia conmutada.

**2.- Construcción del modelo inicial:** Construir un modelo inicial que se aproxime a los parámetros y puntos de funcionamiento del motor eléctrico seleccionado, considerando diferentes combinaciones de polos estator/rotor de la MRC, así como las dimensiones y topologías del motor de referencia, además de resultados bibliográficos para sus dimensiones faltantes.

**3.- Desarrollo de la función de optimización:** Crear una función de optimización "Cost", que incluya restricciones de torque, eficiencia y límites estructurales de la máquina, determinados por el motor de referencia seleccionado.

**4.- Utilización de herramientas de optimización:** Emplear herramientas de optimización del programa Ansys Electronics Desktop, comenzando con variaciones estocásticas de las variables y eligiendo métodos acordes a las exigencias del proyecto. Posteriormente, seleccionar las mejores soluciones y optimizarlas con algoritmos gradientes multiobjetivo.

**5.- Optimización dedicada:** Seleccionar la combinación de polos de estator/rotor ideal para el motor de reluctancia en el contexto de torque automotriz. Considerando los parámetros del motor de referencia elegido y realizando una optimización dedicada a la combinación elegida, que incluya simulaciones transitorias en 2D para observar su comportamiento dinámico.

**6.- Evaluación cuantitativa y cualitativa:** Seleccionar las mejores optimizaciones obtenidas para realizar una evaluación tanto cuantitativa como cualitativa, esta última basada en la literatura. Con esto, concluir sobre las ventajas y desventajas de los motores de reluctancia conmutada para aplicaciones de torque automotriz.

# Capítulo 2

# Marco teórico

## 2.1. Máquina de reluctancia conmutada

La MRC es un tipo de motor eléctrico que funciona mediante la variación de la reluctancia magnética en la estructura del rotor. En una MRC, el rotor está completamente formado por un material ferromagnético y posee una estructura dentada para generar la variación de reluctancia (resistencia al flujo magnético). Cada diente conforma un polo del rotor. El estator también tiene una estructura dentada, y sus dientes están rodeados por bobinas de excitación que crean los campos magnéticos que interactúan con los polos del rotor, generando el torque. Existen diferentes combinaciones de polos estator/rotor que influyen en la cantidad de fases de la máquina y en sus características de torque y velocidad. En la figura 2.1 se presentan sus componentes en una configuración 12/8 y su comparativa física con los motores sincrónicos y de inducción:

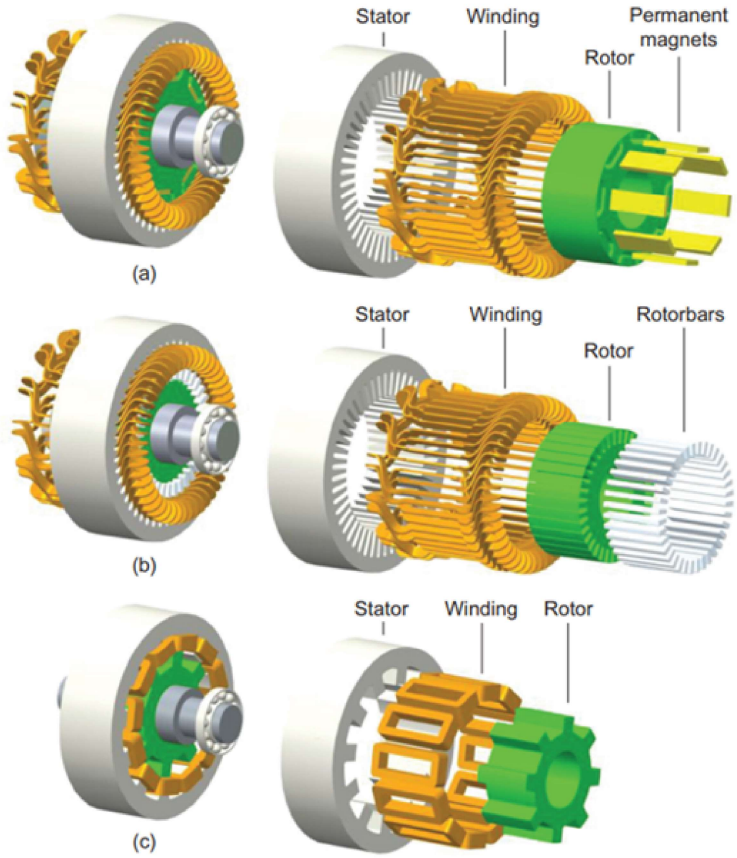



Figura 2.1: Comparativa física de la MRC con máquinas sincrónica de imanes permanentes y de inducción: (a) máquina sincrónica “IPM”, (b) máquina de inducción, (c) máquina de reluctancia conmutada 12/8 polos [1].

El funcionamiento de la MRC se basa en la atracción magnética de los dientes del rotor por los campos magnéticos producidos por las bobinas del estator. Al energizar un polo del estator, se crea un campo magnético en su dirección, lo que provoca que un diente del rotor busque alinearse con este polo. Luego, el polo del estator se desenergiza antes de alinearse con el rotor, y sucesivamente se energizan los siguientes polos para mantener el movimiento rotatorio. El giro y la alineación de los polos de estator y rotor producen una variación continua de reluctancia en la máquina. La reluctancia aumenta cuando los polos están desalineados y disminuye al alinearse, alcanzando el mínimo en esta posición. La figura 2.2 ilustra este fenómeno de manera gráfica.

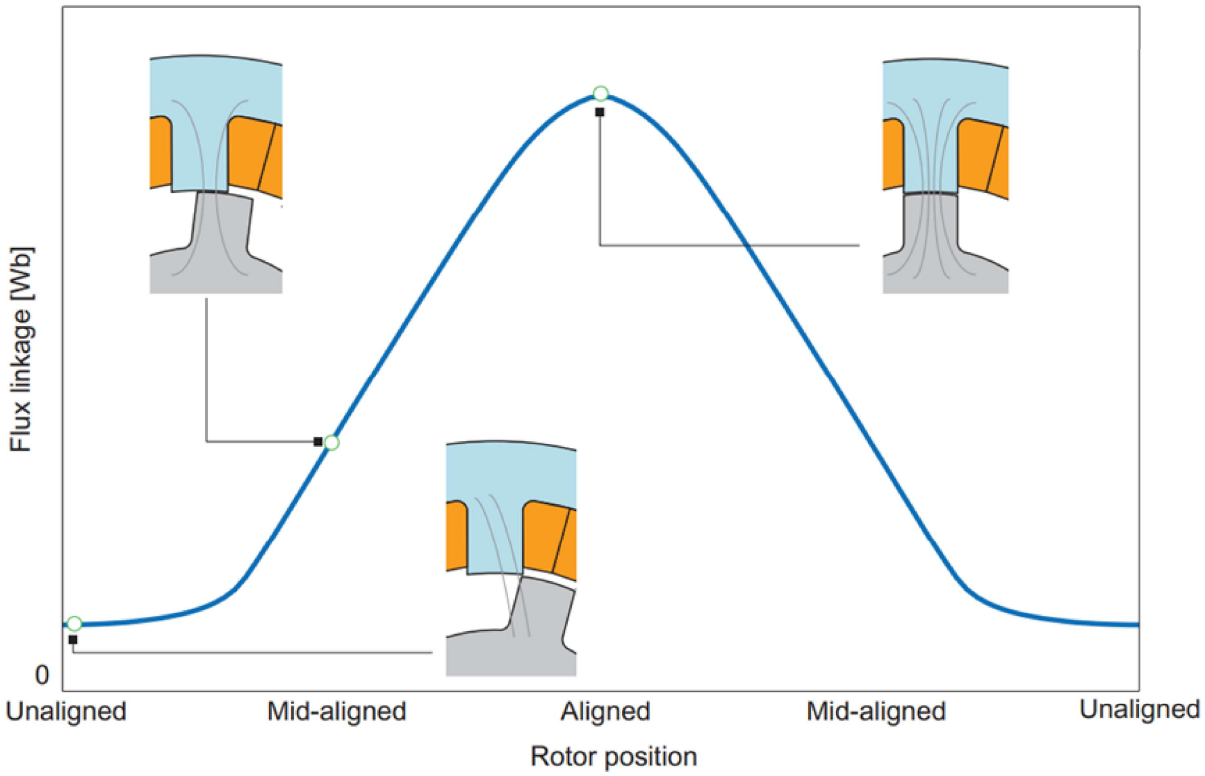



Figura 2.2: Flujo enlazado según la posición del rotor de la MRC [1].

El comportamiento de torque y velocidad de la MRC se divide en tres zonas de operación. La máquina comienza con su torque máximo, el cual se mantiene hasta alcanzar la velocidad base del motor. Esta zona se denomina de torque constante. A partir de este punto, al aumentar la velocidad, el torque disminuye, pero la potencia se mantiene constante, por lo que se le denomina zona de potencia constante. Finalmente, en la última zona, conocida como caída de potencia, la máquina alcanza sus límites de velocidad, y el torque disminuye considerablemente. La figura 2.3 resume este comportamiento.

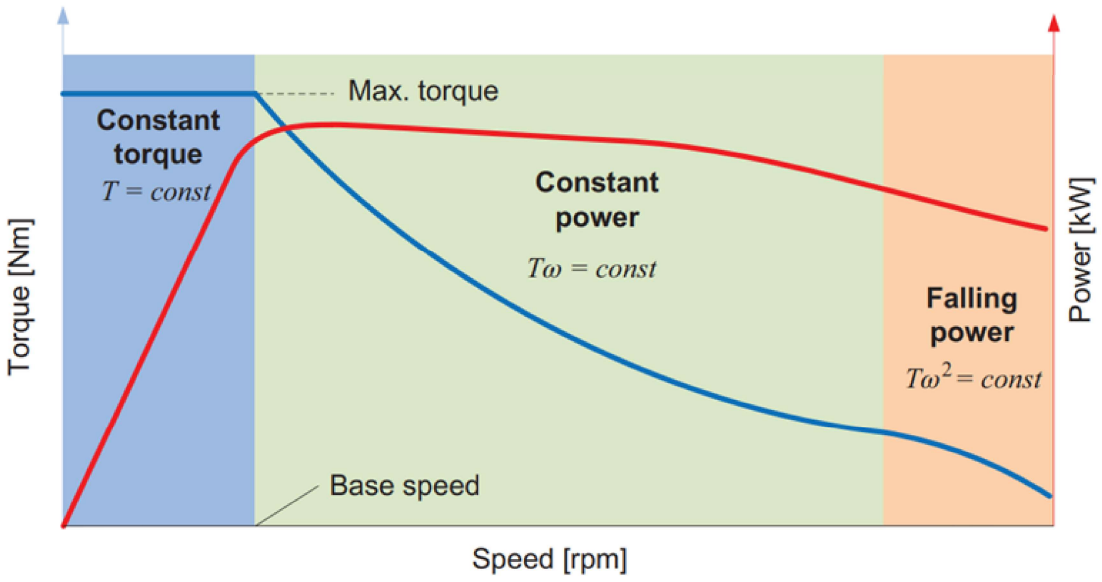



Figura 2.3: Comportamiento de torque y potencia según la velocidad de la MRC. [1]

### 2.1.1. Ventajas e inconvenientes

Los MRC son adecuados para aplicaciones de alta velocidad y eficiencia, y pueden operar a temperaturas elevadas. Su diseño sin imanes permanentes ni bobinas en el rotor simplifica la fabricación y el mantenimiento. Sin embargo, estas máquinas presentan desafíos como el ruido, la vibración y el torque variable, debido a su operación conmutada. Esto hace necesario un control electrónico avanzado para su óptimo funcionamiento, aunque, a pesar de estos desafíos, la MRC sigue siendo una opción atractiva para aplicaciones automotrices.

### 2.1.2. Pérdidas

En general, las pérdidas de la MRC se dividen en cuatro tipos: pérdidas mecánicas, magnéticas, térmicas y pérdidas por los componentes de conmutación en el circuito de alimentación.

Actualmente, las pérdidas por conmutación son menores, pero siguen siendo importantes, ya que anteriormente constituían el principal inconveniente de estos motores. Estas pérdidas dependen de la configuración de polos y de la calidad de los componentes de conmutación. Con la incorporación de IGBT, que permiten una conmutación rápida y eficiente, se ha incrementado el uso de las MRC. Debido a esta evolución, estas pérdidas no se considerarán en esta memoria.

Las pérdidas mecánicas se deben principalmente a las pérdidas por el roce con el aire, derivadas de la forma del rotor, y en menor medida al roce en los apoyos. Para reducir las pérdidas por aire, suele agregarse un material no magnético, como resina epóxica, entre los polos del rotor para crear una superficie lisa. Esto disminuye significativamente las pérdidas por aire y reduce el ruido generado

por la máquina. En la optimización de la MRC se agregará como perdida por roce de aire un 1 % de la potencia del motor a velocidad base, para ser calculada en el programa Motor-CAD.

Finalmente, las pérdidas magnéticas y térmicas en la máquina están relacionadas con los conductores y el núcleo magnético. Las pérdidas en los conductores se generan por el efecto Joule, que produce calor al circular corriente a través de un conductor con resistencia. En el núcleo magnético, las pérdidas se dividen en dos componentes principales: las pérdidas por corrientes de Foucault ("eddy currents"), generadas al aplicar un campo magnético en materiales ferromagnéticos, donde dichas corrientes recorren el núcleo y producen calor; y las pérdidas por histéresis, causadas por el esfuerzo necesario para cambiar constantemente la dirección y la alineación de los dipolos magnéticos en el núcleo. Estas pérdidas dependen del material utilizado en el núcleo, tanto en el estator como en el rotor.

### 2.1.3. Cantidad de polos estator/rotor

La cantidad de polos en una MRC puede variar considerablemente y afecta directamente las características de torque, velocidad, número de fases, corriente y tamaño de la máquina. En general, una mayor cantidad de polos incrementa el torque generado, mientras que una menor cantidad de polos aumenta la velocidad. Sin embargo, este comportamiento no está completamente predeterminado debido a las características no lineales de la máquina. En esta sección se describen las configuraciones de polos que se utilizarán en la optimización de esta memoria. Inicialmente, se seleccionarán configuraciones basadas en estudios bibliográficos para luego, mediante simulaciones, determinar la configuración óptima. Los convertidores DC/AC son generalmente optimizados para configuraciones trifásicas, por lo que en esta memoria se optó por configuraciones de polos con este tipo de alimentación. Elegir una configuración de polos con más fases incrementa el costo del sistema de conmutación, mientras que optar por menos fases aumenta la corriente que deben soportar los conductores. Las configuraciones trifásicas para los MRC se presentan en la figura 2.4.

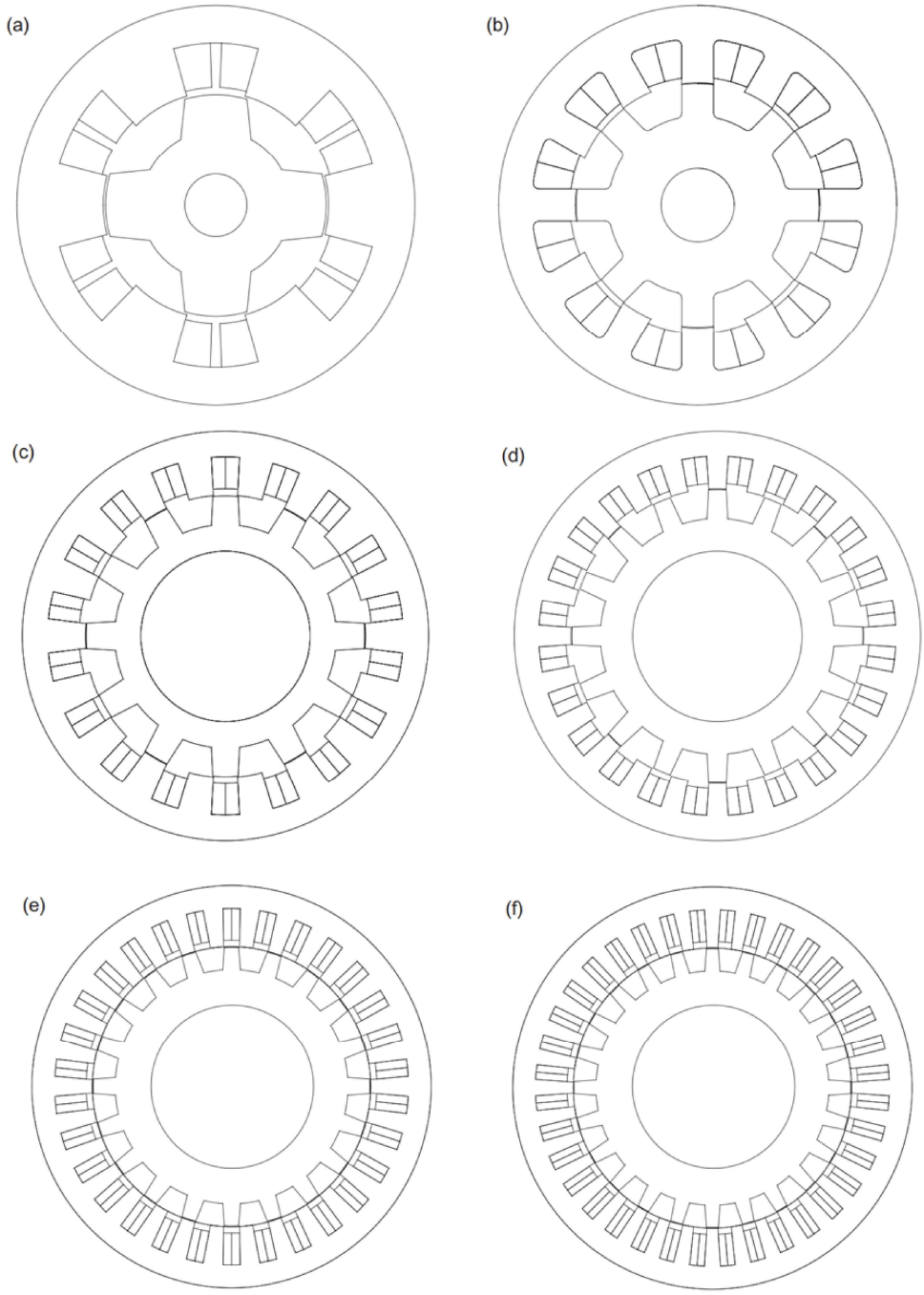



Figura 2.4: Configuraciones trifásicas de polos en máquinas de reluctancia conmutada: (a) 6/4, (b) 12/8, (c) 18/12, (d) 24/16, (e) 30/20 y (f) 36/24 [1].

Generalmente, las configuraciones con una gran cantidad de polos se recomiendan para aplicaciones de alta potencia que requieren máquinas de mayores dimensiones, ya que con más polos el espacio para los conductores es menor. Por lo tanto, en esta memoria se enfocará en las configuraciones 6/4, 12/8, 18/12 y 24/16, las cuales ofrecen un buen equilibrio entre torque y velocidad.

### 2.1.4. Formulación general

En esta sección se presenta la formulación general de la MRC y su circuito equivalente, junto con las características generales obtenidas del libro guía.

Un parámetro importante en la industria automotriz es la densidad de potencia volumétrica, que refleja el espacio que ocupa el motor en relación con la potencia que genera. Este parámetro se calcula utilizando la potencia nominal y el volumen activo de la máquina, determinado mediante la fórmula del volumen de un cilindro. Para esto, se considera el largo y diámetro activo de la máquina, sin incluir los elementos externos de disipación. El largo se define hasta las cabezas de bobinas del estator, y el diámetro activo corresponde al diámetro exterior del estator.

$$V_{\text{active}} = \frac{\pi D_s^2}{4} L_{\text{total}}, \tag{2.1}$$

donde:

$V_{\text{active}}$: Volumen activo de la máquina.

$D_s$: Diámetro activo, correspondiente al diámetro exterior del estator.

$L_{\text{total}}$: Largo total, definido hasta las cabezas de bobinas del estator.

### 2.1.5. Circuito equivalente

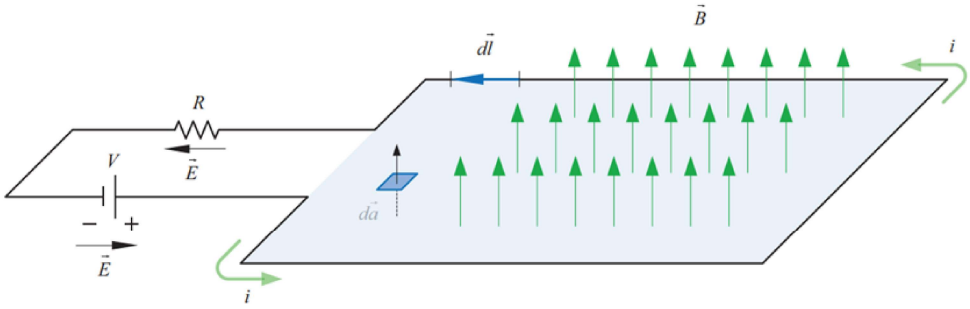



Figura 2.5: Circuito equivalente simplificado de la MRC [1].

En general, el circuito equivalente se establece despreciando la inductancia mutua entre las fases de la MRC. Así, el valor de la tensión por fase corresponde a la suma de la caída de tensión generada por la resistencia de los conductores y la variación del flujo en el tiempo. La variación del flujo se obtiene mediante la integral cerrada del campo magnético en los polos del estator. Considerando un alambre con una sola vuelta, como en la figura 2.5, la fórmula es la siguiente:

$$v = Ri + \frac{d\phi}{dt} \tag{2.2}$$

Ahora, si se considera que son múltiples vueltas de bobina y el flujo pasa a través de $N$ capas, además de varias bobinas en serie, la resistencia total aumenta y se genera un encadenamiento del flujo por fase ($\lambda$). Este parámetro depende de la posición de los polos y de la corriente, de modo que la fórmula del circuito equivalente por fase de la MRC queda como sigue:

$$v = Ri + N\frac{d\phi}{dt} = Ri + \frac{d(N\phi)}{dt} = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \tag{2.3}$$

## 2.2. Formulación de características iniciales

En esta sección se analizan las fórmulas, constantes y datos obtenidos de los recursos bibliográficos, con el fin de definir los parámetros del modelo inicial de la MRC. Estos datos complementan los obtenidos de la máquina de referencia y proporcionan un punto de partida para la optimización.

### 2.2.1. Largo de la máquina

En cuanto al largo del rotor y estator de la máquina, puede existir una diferencia entre ambos. Normalmente, el estator es igual o más largo que el rotor, especialmente si se consideran las cabezas de bobinas (“end turn”). Sin embargo, en aplicaciones avanzadas de torque, el rotor puede ser más largo que el estator. En la optimización de la MRC, el largo tanto del estator como del rotor será configurado en un rango amplio que incluya el largo del motor de referencia.

### 2.2.2. Factor del laminado del núcleo

El factor de laminado define las caracteristicas del laminado del núcleo ferromagnético de la MRC y de todas las máquinas electromagnéticas en general. Este laminado permite disminuir la corriente de Foucault (“eddy current”) y reducir la temperatura del núcleo. Su valor es siempre menor que 1, ya que un valor de 1 implicaría un núcleo sólido. Para motores, el factor de laminado oscila entre 0.8 y 0.95, determinado por el grosor de las láminas que componen el núcleo.

### 2.2.3. Entrehierro del estator y rotor

Otro parámetro importante es el entrehierro de la máquina, que representa la distancia entre el rotor y el estator. Un entrehierro menor incrementa el torque de la máquina, pero también aumenta las fuerzas radiales, afectando el torque variable y generando más ruido. Generalmente, para máquinas pequeñas, este valor es de aproximadamente 1 mm. En máquinas de mayor tamaño, el diseño debe considerar la expansión térmica de los materiales; sin embargo, esto no es aplicable en esta memoria.

### 2.2.4. Factor de llenado de ranuras

El factor de llenado de ranuras indica el espacio ocupado por los conductores en las ranuras del estator. Aunque los conductores cuadrados optimizan este espacio, en este caso se utilizarán conductores circulares debido a las limitaciones del programa de optimización. En un embobinado manual, el factor de llenado oscila entre 35 % y 40 % , pero con herramientas automatizadas puede alcanzar entre 35 % y 60 % . Este factor se diseña teniendo en cuenta variables como la temperatura, el torque y el espacio axial del motor.

### 2.2.5. Número de vueltas por polo

El número de vueltas por polo puede variar ampliamente, debido a las características no lineales de la máquina. En la figura 2.6, se muestra una referencia del número de vueltas en una configuración de 24/16, extraída del libro guía.

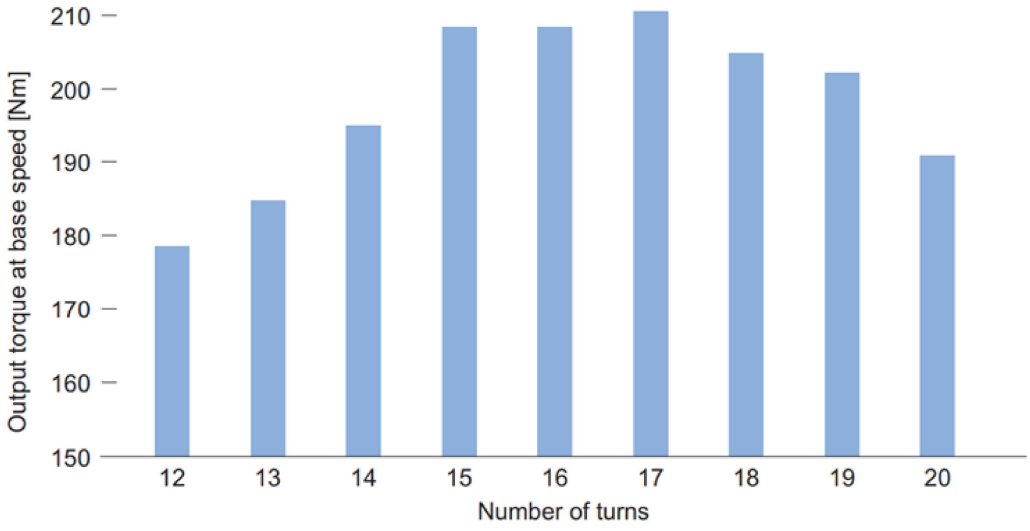



Figura 2.6: Potencia nominal según número de polos en MRC de 24/16 [1].

### 2.2.6. Diámetro del eje

El diámetro del eje de la MRC depende del material y del torque máximo que debe soportar. Este torque máximo se establece en función de la máquina de referencia. En general, las MRC presentan un torque inicial mayor que otros tipos de motores, por lo que en la selección final se considerarán motores que soporten su propio torque máximo. La fórmula utilizada para determinar el diámetro del eje $D$ en metros según el torque máximo $T_{\text{max}}$ es la siguiente:

$$D = \left( \frac{5,1 \cdot T_{\max}}{t} \right)^{1/3}, \tag{2.4}$$

donde $t = \frac{t_{\max} \cdot k_t}{f_s}$, $f_s = 4$, $k_t = 0.8$ y $t_{\max}$ (MPa) es la resistencia máxima a la tracción del eje [4].

## 2.3. Aplicación de motores a la industria automotriz

### 2.3.1. Aplicación de la MRC a la industria automotriz

En la producción industrial automotriz, es esencial contar con motores eficientes, de bajo costo y de fácil fabricación para su producción en masa. En general, las MRC son atractivas para su uso en la industria automotriz, especialmente por su simplicidad de fabricación y bajo costo. Además, son capaces de entregar un par significativo de torsión a bajas velocidades, lo que las hace idóneas para la conducción urbana.

Adicionalmente, este tipo de motores no se limita a la tracción automotriz; también son adecuados para sistemas de dirección asistida, gracias a su par a bajas velocidades. Otra aplicación en automóviles se encuentra en los sistemas de ventilación y aire acondicionado, donde operan con gran eficiencia.

### 2.3.2. Máquinas clásicas para tracción automotriz

Existen varios motores eléctricos utilizados para la tracción automotriz, los cuales han sido optimizados y desarrollados durante más tiempo que las MRC para este tipo de aplicaciones. Los motores más utilizados en este ámbito son los motores sincrónicos y los de inducción, que se compararán con la MRC. Cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas, las cuales se resumen a continuación.

### 2.3.3. Motores sincrónicos

Los motores sincrónicos son ampliamente utilizados para la tracción automotriz, debido a su alta eficiencia y su par constante. Están compuestos por un estator con devanado trifásico, que genera un campo magnético rotatorio. Su rotor puede ser un electroimán excitado por corriente continua a través de anillos deslizantes o un rotor con imanes permanentes. Su operación se realiza a una velocidad constante, que depende de la frecuencia de la red a la que se alimenta. Además, su principal ventaja radica en su capacidad para mantener esta velocidad independientemente de la carga. Sin embargo, presentan problemas, como un bajo par de arranque y costos elevados de fabricación debido a sus componentes, accesorios y mayor complejidad en la construcción del rotor.

### 2.3.4. Motores de inducción o asincrónicos

Los motores de inducción se utilizan en la tracción automotriz principalmente porque son más simples y económicos de fabricar que los motores sincrónicos. El estator del motor de inducción es similar al de los motores sincrónicos, y su rotor en cortocircuito generalmente se compone de una jaula de ardilla. Su funcionamiento consiste en inducir una corriente en el rotor mediante la diferencia de velocidad entre los campos magnéticos del estator y del rotor. Esta diferencia, donde el rotor gira a una velocidad ligeramente inferior al campo magnético del estator, se conoce como deslizamiento. Los problemas comunes de esta máquina incluyen el deslizamiento excesivo (solo en caso de sobrecargas o fallas), sobrecalentamiento, fallas en las barras de la jaula de ardilla y pérdida de eficiencia si no se mantienen adecuadamente.

## 2.4. Comparación

En esta sección se compararán las características obtenidas de datos bibliográficos de las máquinas presentadas en la sección anterior con las de la máquina de reluctancia conmutada (MRC). Se crearán tablas comparativas que contrasten las características de los tres tipos de motores utilizados en aplicaciones de torque automotriz: la sincrónica, la asíncrónica y la de reluctancia conmutada. La comparación se dividirá en cuatro aspectos: rendimiento, costo, producción, mantenimiento y control y operación, que estarán en las tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4. Los recursos bibliográficos utilizados para esta comparación incluyen “Switched Reluctance Motor Drives, Fundamentals to Applications”, “Electric Motor Maintenance and Troubleshooting, Second Edition” y “Electric Motors and Drives” [1] [5] [6].

| Característica | Máquina sincrónica de imanes permanentes | Máquina de inducción | Máquina de Reluctancia Conmutada |
|---|---|---|---|
| **Densidad de potencia gravimétrica** | Alta | Moderada | Moderada |
| **Densidad de potencia volumétrica** | Alta | Moderada | Baja |
| **Eficiencia** | Alta | Moderada a alta, depende del mantenimiento, diseño y velocidad | Baja, un control adecuado puede aumentar su eficiencia |
| **Torque inicial** | Alto, gracias al campo inmediato en el rotor | Moderado, ya que requiere un tiempo para establecer un flujo en el rotor limitando un torque alto al arranque | Alto, su funcionamiento permite mejorar la eficiencia en el arranque con los ángulos de control correctos |
| **Rizado de torque (“Ripple”)** | Moderado, el control electrónico moderno reduce las ondulaciones en el torque | Bajo, su rizado de torque depende del deslizamiento y con un control adecuado el deslizamiento es bajo y estable | Alto, inherente al diseño de la máquina |
| **Rendimiento a bajas velocidades** | Moderado, si se mantiene la sincronización | Moderado, depende del control adecuado | Moderado, presenta bajo factor de potencia a carga ligera, pero posee alta controlabilidad |
| **Rendimiento a altas velocidades** | Alto, mantiene su sincronización | Alto, pero requiere gestión térmica debido a las pérdidas en el rotor | Moderado, depende del control electrónico |
| **Gestión térmica** | Alta, necesaria y crítica | Moderada, importante a altas velocidades especialmente en su rotor | Moderada, necesaria solo en el estator |

Tabla 2.1: Comparación del rendimiento de las máquinas eléctricas aplicadas al torque automotriz

El rendimiento de la MRC sobresale en el torque inicial y muestra un desempeño moderado en todos los rangos de velocidad y resistencia a temperaturas. Aunque estas características son relevantes para aplicaciones de torque automotriz, la MRC presenta desventajas significativas en otros aspectos clave, como peso, volumen, eficiencia y torque variable. Por ello, en términos de rendimiento general, se considera inferior a las máquinas comúnmente empleadas en aplicaciones de torque automotriz. Sin embargo, sus características podrían aprovecharse mejor en la tracción de vehículos más robustos, como jeeps, camionetas o camiones.

| **Característica** | **Máquina sincrónica de imanes permanentes** | **Máquina de inducción** | **Máquina de Reluctancia Conmutada** |
|---|---|---|---|
| **Costo de producción** | Alto, debido a la precisión de los componentes, especialmente en el rotor | Moderado, más simple que el motor IPM en su diseño | Moderado, debido al entrehierro, requiere un montaje preciso |
| **Costo de materiales** | Alto, por componentes de gran valor, como los imanes permanentes de tierras raras | Bajo o moderado, no requiere componentes específicos | Bajo, utiliza materiales simples, aunque generalmente requiere más material |
| **Costo de mantenimiento** | Alto, por la complejidad de la máquina, que depende del tipo | Bajo, debido a su constitución simple, sin escobillas o conmutadores | Moderado, bajo costo de mantenimiento en el motor, pero alto en el control |
| **Costo de control** | Alto, necesita un controlador avanzado para mantener la sincronización | Bajo o moderado, no requiere un control complejo | Alto, requiere un control complejo |
| **Costo de gestión térmica** | Alto, se necesita un enfriamiento adecuado | Alto, por las pérdidas en el rotor | Bajo a moderado, solo se debe refrigerar el estator |

Tabla 2.2: Comparación de los costos de las máquinas eléctricas aplicadas al torque automotriz

En términos de costos, la MRC compite favorablemente frente a otras máquinas. Destaca por sus bajos costos en disipación térmica y materiales. En comparación con la máquina sincrónica, es conveniente, pero frente a la máquina de inducción, sus costos son similares, siendo esta última más económica debido a sus menores costos en sistemas de control.

| Característica | Máquina sincrónica de imanes permanentes | Máquina de inducción | Máquina de Reluctancia Conmutada |
|---|---|---|---|
| **Facilidad de producción en masa** | Baja, debido a su complejidad por el rotor | Alta, sus piezas y montaje son simples | Moderada, por la simplicidad de construcción, aunque requiere un buen control de calidad por el entrehierro |
| **Facilidad de mantenimiento** | Baja, debido a su complejidad | Moderada, diseño simple sin componentes complejos | Moderada, por su simplicidad, aunque se complica por el cambio de rodamientos y mantenimiento del controlador |
| **Problemas de producción** | Altos, se requiere precisión en la construcción | Bajos, los estándares de fabricación están bien establecidos | Moderados, se necesita precisión para mantener un entrehierro uniforme alrededor del rotor |
| **Vida útil** | Alta, con mantenimiento adecuado | Alta, tolerancia a condiciones adversas y alta fiabilidad | Alta, robustez y alta tolerancia a condiciones adversas similar a los motores de inducción |
| **Frecuencia de mantenimiento** | Moderada, depende de las condiciones operativas y del tipo de motor | Baja, motores robustos sin elementos que se desgasten significativamente | Moderada, desgaste en los rodamientos debido al torque variable; el controlador requiere mantenimientos periódicos |
| **Durabilidad y resistencia** | Moderada, con sellados adecuados, pero limitada resistencia a temperaturas y condiciones adversas | Alta, diseño simple y robusto, resistente a condiciones adversas | Alta, conocida por su resistencia a ambientes adversos y altas temperaturas |

Tabla 2.3: Comparación de la producción y mantenimiento de las máquinas eléctricas aplicadas al torque automotriz.

Aunque generalmente se considera que la MRC presenta ventajas en producción y mantenimiento debido a su simplicidad constructiva, esta percepción no siempre se cumple. Los problemas asociados suelen relacionarse con el entrehierro, que es la separación entre el estator y el rotor. Este valor es alrededor de menos de 1 mm, ya que se ha comprobado que incrementa el torque de la máquina. El entrehierro complica la construcción, ya que debe mantenerse estable alrededor de todo el rotor; de lo contrario, aumenta el torque variable.

El desgaste de los rodamientos incrementa con el torque variable, y este desgaste a su vez aumenta dicho torque variable. Por lo tanto, es esencial realizar un mantenimiento adecuado o emplear rodamientos especiales diseñados para mitigar estos efectos. Es posible reducir el torque variable mediante un diseño, control y selección de rodamientos apropiados; sin embargo, debido a la naturaleza de funcionamiento de estas máquinas, el torque variable seguirá siendo elevado.

| **Característica** | **Máquina sincrónica de imanes permanentes** | **Máquina de inducción** | **Máquina de Reluctancia Conmutada** |
|---|---|---|---|
| **Dificultad de control** | Moderada, requiere sistemas de control precisos para mantener el sincronismo | Moderada, el control depende de los parámetros de la máquina que pueden variar con la temperatura | Alta, se necesita un control avanzado para mitigar el torque variable y el ruido |
| **Flexibilidad operativa** | Alta, buen control del factor de potencia y precisión en la velocidad | Alta, con controladores modernos puede adaptarse a cambios rápidos de velocidad y torque | Alta, ofrece un gran control sobre sus parámetros mediante la variación de los ángulos |

Tabla 2.4: Comparación del control y operación de las máquinas eléctricas aplicadas al torque automotriz.

La flexibilidad operativa en todas las máquinas comparadas es alta, si se utiliza un control adecuado. Por otro lado la máquina de reluctancia conmutada presenta una mayor dificultad de control, ya que para la conducción urbana es necesario mitigar el rizado de torque propio de la máquina.

## 2.5. Programa de simulación: Ansys Electronics Desktop

Este programa de elementos finitos es ampliamente utilizado en la industria para el desarrollo de productos y componentes de diversa índole. Cuenta con plataformas multifísicas que pueden simular una gran variedad de fenómenos magnéticos, mecánicos, térmicos y eléctricos. Se utilizará la versión Ansys Electronics Desktop 2024 R1 para llevar a cabo los procedimientos de optimización

de esta memoria. Esta versión ofrece diferentes opciones para optimizar parámetros y dispone de una herramienta especializada en motores, donde se simularán la estructura y características de la MRC. El programa está compuesto por diferentes módulos que operan en conjunto, algunos más limitados que otros.

### 2.5.1. Módulo ‘RMxprt

El módulo RMxprt es una herramienta especializada del entorno Ansys Electronics Desktop, utilizada para diseñar y analizar máquinas rotativas eléctricas. Ofrece una amplia gama de tipos de máquinas rotativas y permite simularlas a partir de plantillas específicas, incluyendo los motores de reluctancia conmutada. Esta herramienta tiene capacidades especializadas para modelar sistemas electromagnéticos rotativos en 2D, lo que facilita la optimización del diseño de motores eléctricos.

En este módulo, es posible modelar la geometría 2D del motor eléctrico de manera detallada, considerando sus dimensiones, características y componentes. Esto permite crear simulaciones muy precisas. Se dispone de una gran cantidad de materiales para utilizar, especialmente aleaciones de silicio, que se emplearán en esta memoria.

Se pueden realizar análisis electromagnéticos evaluando diferentes puntos de operación definidos por el usuario, determinando diversas características de la máquina, tales como pérdidas, corrientes, par, velocidad, peso y otros parámetros estáticos en los puntos evaluados. Además, se generan gráficos que representan el comportamiento general del sistema.

Este módulo permite explorar distintas configuraciones de diseño y convertir la mayoría de los parámetros en variables, que pueden utilizarse en el modelo con algoritmos estocásticos. También se puede exportar el modelo generado en esta herramienta para crear simulaciones en 2D y 3D, que permiten observar las características dinámicas de la máquina.

### 2.5.2. Módulo “Design Of Experiment”

El “Design Of Experiment” (“DOE”) es una herramienta de “Optimetrics” disponible en Ansys Electronics Desktop, utilizada para determinar puntos de muestreo y sistemas de superficie en respuesta. Este módulo está orientado hacia objetivos y análisis, lo que, mediante un enfoque matemático, permite disminuir el número de simulaciones requeridas. Esto facilita la exploración efectiva del espacio de diseño antes de ejecutar una optimización de cualquier tipo. Cabe destacar que, al realizar simulaciones con diferentes configuraciones de parámetros, esta herramienta no se bloquea si encuentra un problema de tipo no congruente. Por ejemplo, si los polos son demasiado pequeños para funcionar, simplemente evita este error y muestra únicamente los resultados calculados correctamente, evitando la necesidad de configurar los límites de variables cada vez que se presenta una incongruencia en la simulación.

El “DOE” describe la relación entre las variables de diseño (eficiencia, peso, etc.) y el rendimiento

del producto simulado, generando superficies de respuesta que proporcionan información necesaria para el desarrollo y optimización del producto. Esta información facilita la comprensión e identificación de los cambios provocados por las variables para cumplir con los requisitos del producto. Sin embargo, en el caso de la MRC, debido a la presencia de múltiples errores y variaciones no lineales, estas superficies de respuesta no se pueden aplicar efectivamente a la máquina.

En la configuración de esta herramienta, se pueden especificar los tipos de "DOE", las superficies de respuesta, las metas objetivo y las variables de la máquina. Existen diferentes métodos y algoritmos de "DOE" disponibles, todos con un propósito común: localizar los puntos de muestreo de manera eficiente. Esto permite explorar el espacio de los parámetros de entrada de forma óptima, obteniendo información con un número mínimo de puntos de muestreo y reduciendo el proceso computacional. Para elegir correctamente el algoritmo de "DOE", se deben considerar los requisitos y recomendaciones de cada algoritmo, que dependen de la cantidad de variables de entrada [3]. Los diferentes algoritmos son los siguientes:

- Diseño de Relleno de Espacios Óptimos (DRE): Distribuye las muestras uniformemente en todo el espacio de diseño, siguiendo un esquema de hipercubo latino (sin puntos que compartan filas o columnas). Luego, con un postprocesamiento, logra obtener un máximo conocimiento del espacio con la menor cantidad de puntos posibles. Su inconveniente es que no cubre adecuadamente los extremos del espacio de diseño.

- Diseño Compuesto Central (DCC): Este algoritmo se centra en el cribado de datos y determina las tendencias generales del meta-modelo, ofreciendo resultados confiables y robustos, pero depende de la linealidad de las variables.

- Diseño Box-Behnken (DBB): Diseño cuadrático de tres niveles, donde las combinaciones de muestra se encuentran en el punto medio de las aristas formadas por dos factores. Generalmente requiere un menor número de combinaciones, pero tiene un límite en la cantidad de variables que se pueden utilizar.

- Muestreo de Hipercubo Latino (MHL): Forma avanzada del método de muestreo de Monte Carlo que evita la agrupación de muestras, similar al DRE, pero sin postprocesamiento.

De los métodos mencionados, se eligió el DRE para esta memoria. Esto se debe a la no linealidad de la MRC, que requiere una distribución uniforme que abarque ampliamente el espacio de diseño.

El método DRE tiene propiedades de diseño configurables que pueden ayudar a mejorar el ajuste de la superficie de respuesta. En la tabla 2.5 se mostrarán todas las posibles configuraciones y qué método puede optar a ellas; estas configuraciones tienen diferentes estrategias de muestreo.

| Configuración | Características |
|---|---|
| Máxima Distancia Mínima | Maximiza la distancia entre cualquier par de puntos; algoritmo rápido. |
| L2 Centrado | Busca minimizar la discrepancia entre la distribución empírica de los puntos de muestreo y la distribución uniforme, resultando en un muestreo más uniforme. |
| Máxima Entropía | Minimiza la incertidumbre, maximizando el determinante de la matriz de covarianza de los puntos de muestreo; consume mayores recursos computacionales. |
| Máximo Número de Ciclos | Permite elegir la cantidad de ciclos combinatorios de parámetros para determinar las iteraciones de optimización; dependiendo de cuántos ciclos se configure, puede consumir más recursos. |

Tabla 2.5: Configuraciones del método DRE y sus características [3].

En resumen, se optará por utilizar el "DOE" con un algoritmo de diseño de relleno de espacios óptimos y con una configuración de máxima distancia mínima. Esto se debe a la no linealidad de la MRC y a la reducción de recursos computacionales que implica la configuración elegida. Para la cantidad de ejemplos se seleccionará un valor cercano a 2000, aunque podrá variar según se requiera en el proyecto. Además, se deben considerar los límites del programa y la capacidad de cómputo del hardware.

### 2.5.3. "Optimization"

La función "Optimization" interactúa con los proyectos electromagnéticos de Ansys Electronics Desktop, permitiendo la optimización de una amplia variedad de parámetros de diseño [3]. Este módulo cuenta con diferentes configuraciones, y en esta memoria se optó por un proceso que busca encontrar el valor mínimo de la función designada como "Cost". El módulo ajusta los valores de las variables hasta alcanzar el mínimo con la precisión asignada.

El primer paso para la optimización consiste en seleccionar un tipo de algoritmo optimizador. El programa ofrece cinco opciones principales, que se describen a continuación:

"Sequential Nonlinear Programming (SNLP)": este algoritmo es el recomendado por el manual para la mayoría de los casos. Se utiliza en problemas de optimización no lineales continuos, buscando el mínimo o máximo de la función de costo mediante un ajuste iterativo de las variables de diseño.

'Sequential Mixed Integer NonLinear Programming (SMINLP)": diseñado para resolver problemas mixtos que contienen variables continuas y enteras o binarias. El "SMINLP" es útil en situaciones que requieren decisiones discretas o selección entre un conjunto finito de opciones.

"Quasi Newton": este método se utiliza para resolver problemas de optimización no lineales continuos. Aproxima la matriz hessiana de la función objetivo y utiliza esta información para buscar la

dirección de búsqueda óptima.

“Pattern Search”: este método emplea un enfoque heurístico para encontrar soluciones óptimas. Busca soluciones prometedoras iterativamente en el rango de diseño y las mejora con patrones predefinidos, siendo eficaz para problemas que no pueden resolverse con algoritmos convencionales.

“Genetic Algorithm”: inspirado en la evolución biológica, este algoritmo se basa en la selección natural y reproducción para encontrar soluciones óptimas. Genera una población de posibles soluciones, las combina y modifica, repitiendo el procedimiento hasta alcanzar la solución.

Existen optimizadores adicionales basados en los algoritmos anteriores, con una función extra de post-procesamiento llamada “Decision Support Process”, que puede mejorar y refinar las soluciones obtenidas. Los algoritmos adicionales se describen a continuación:

“Nonlinear Programming by Quadratic Lagrangian, Gradient (NPQL)”: basado en el gradiente de la función objetivo, es especialmente funcional para soluciones con un solo objetivo y se basa en métodos “quasi-Newton”.

“Mixed-Integer Sequential Quadratic Programming, Gradient and Discrete (MISQP)”: este optimizador, también basado en el gradiente de la función objetiva, resuelve problemas de programación no lineal con enteros mixtos mediante un método de programación cuadrática secuencial.

“Screening (Search based)”: método directo no iterativo que genera números cuasi-aleatorios basados en el algoritmo de “Hammersley” para localizar múltiples óptimos tentativos, que luego se refinan con los métodos “NPQL” o “MISQP”.

“Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA)”: algoritmo de búsqueda aleatoria iterativa que permite optimizar problemas con variables continuas y es efectivo para la búsqueda de óptimos globales. Este método también refina sus resultados utilizando los métodos “NPQL” o “MISQP”.

“Adaptive Multiple Objective (Gradient)”: este optimizador es iterativo y adaptativo, considerando múltiples objetivos y empleando una superficie de respuesta “kriging” junto con “MOGA”.

Este último es la opción más recomendable para la optimización, ya que permite abordar múltiples objetivos y es iterativo y adaptativo, lo cual resulta ventajoso en un problema no lineal.

### 2.5.4. Motor-CAD

Motor-CAD es un programa especializado en máquinas rotativas que simula prácticamente todas sus características, incluidas las variables eléctricas, magnéticas, térmicas, el espaciado de conductores, pérdidas y esfuerzos mecánicos en los puntos más críticos de la máquina. Debido a su optimización para máquinas rotativas eléctricas, sus simulaciones son rápidas y completas. Sin embargo, presenta limitaciones en la optimización de máquinas de reluctancia conmutada desde su interfaz, así como en el uso del modelo “Lab” y la importación de modelos desde Ansys Electronics Desktop.

Este programa ofrece cuatro tipos de modelados para máquinas rotativas: “E-magnetic”, “Thermal”,

"Mechanical" y "Lab", que pueden estar interconectados. En "E-magnetic" se configuran las opciones generales de las máquinas, sus parámetros, configuraciones y accionamientos, además de mostrar gráficos transitorios de sus características. En "Thermal" se analizan en detalle cada parte de la máquina con su respectivo valor de temperatura, enlazándose con "E-Magnetic" o "Lab" por separado. El modelo "Lab" permite analizar las características a lo largo de todo el rango de velocidad y su ciclo de trabajo, especialmente para análisis automotrices. Por último, el modelo "Mechanical" examina el esfuerzo y características mecánicas en los puntos críticos de la máquina.

Principalmente, el programa se utilizará para determinar las características de la máquina de referencia, dado que sus capacidades para simular una máquina de reluctancia conmutada son limitadas.

### 2.5.5. Maxwell 2D y 3D

Tras la simulación en "Rmxprt", los datos y el modelo de una configuración de velocidad y potencia específica se pueden exportar al entorno Maxwell 2D o 3D. Este entorno permite observar diferentes características magnéticas y eléctricas de la MRC, como las líneas de flujo magnético en el núcleo, la densidad de corriente en los conductores y el torque variable, lo que facilita el análisis del comportamiento de la máquina. Es útil para calcular características en puntos específicos de funcionamiento y analizar las características transitorias de la máquina. Sin embargo, el tiempo de simulación puede ser un inconveniente, ya que, al agregar cálculos complejos de vectores y campos en diferentes fracciones de tiempo, especialmente en el entorno 3D, este proceso puede ser prolongado, dependiendo de las configuraciones.

El módulo Maxwell 2D se utilizará para analizar el comportamiento transitorio de la máquina, pero no para optimizar sus características transitorias, dado que no está enlazado con "RMxprt". Solo se puede exportar un modo de operación específico desde este último, y el tiempo requerido para realizar una sola simulación es aproximadamente 250 veces mayor en comparación con el módulo "RMxprt", aunque esto depende del paso configurado.

# Capítulo 3

# Datos y pasos previos a la optimización

## 3.1. Setup experimental

En los experimentos computacionales, se utilizó un procesador 12th Gen Intel(R) Core(TM) i9-12900k CPU @ 3.19GHz (16 CPUs), con una memoria RAM de 32 GB y un sistema operativo Windows 10 Pro. El software de simulación empleado fue Ansys Electronics Desktop y Ansys Motor-CAD 2024 R1.

## 3.2. Datos de referencia

### 3.2.1. Parámetros objetivos de referencia

Para la obtención de los datos de referencia, se consultaron diversas fuentes de información sobre motores eléctricos destinados al torque automotriz. La información disponible, especialmente sobre los motores más recientes en el mercado, resulta insuficiente para una comparación adecuada. Por lo tanto, se seleccionó una plantilla de ejemplo de una máquina sincrónica de imanes permanentes de torque automotriz proporcionada por Ansys Motor-CAD. Esta plantilla contiene información completa de los parámetros y características de la máquina analizada, un motor sincrónico de imanes permanentes de 80 kW del Nissan Leaf 2012. Este motor será la máquina de referencia en esta memoria, y los datos obtenidos, como el punto nominal de operación, tamaño, peso y características generales, se resumen en la siguiente tabla 3.1.

| Características del motor de referencia | |
|---|---|
| Potencia nominal (kW) | 79.8 |
| Torque nominal (Nm) | 138.6 |
| Torque máximo de partida con 500 A “peak” (Nm) | 275.8 |
| Masa activa (kg) | 34.2 |
| Masa total (kg) | 49.9 |
| Diámetro exterior del estator (mm) | 198 |
| Largo estator (mm) | 160 |
| Largo estator incluyendo bobinas (mm) | 220 |
| Diámetro del Eje (mm) | 20 |
| Volumen activo de la máquina (l) | 3.9 |
| Densidad potencia volumétrica (kW/l) | 20.5 |
| Densidad potencia gravimétrica (kW/kg) | 2.3 |
| Tensión DC (V) | 375 |
| Corriente “peak” de operación (A) | 267 |
| Torque variable “peak to peak” (%) | 11 |
| Torque variable “peak to peak” (Nm) | 13 |
| Material del estator y rotor | M350-50A |

Tabla 3.1: Características del motor de referencia obtenidas desde el programa Motor-CAD.

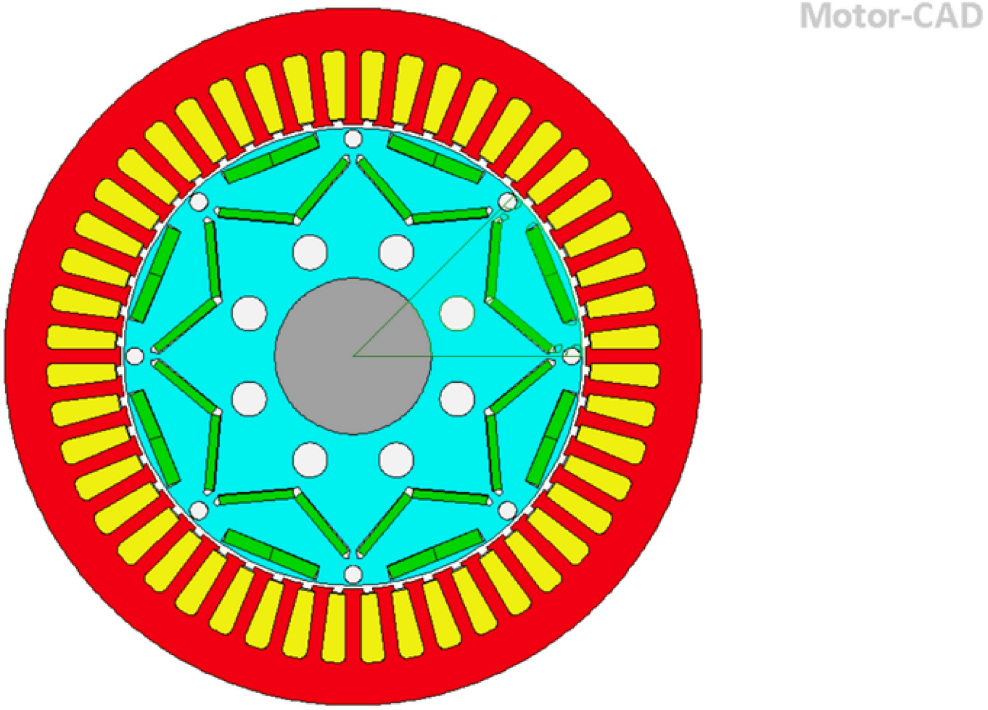



Figura 3.1: Imagen de la máquina de referencia sincrónica “IPM”, obtenida desde Motor-CAD.

### 3.2.2. Automóvil eléctrico de referencia

El automóvil eléctrico que utiliza el motor de referencia es el Nissan Leaf 2012 SV, un vehículo de tamaño mediano con capacidad para cinco personas. Este vehículo emplea baterías de litio para alimentar su motor, tiene una autonomía de 160 km y su peso aproximado es de 1521 kg [7].



Figura 3.2: Automóvil Nissan Leaf 2012 [2].

### 3.2.3. Objetivos de diseño del motor de reluctancia conmutada

Se considerarán dos puntos de operación del motor de referencia para la optimización de la máquina de reluctancia conmutada. El primero es el punto de máxima potencia, fundamental ya que representa el desempeño a carga máxima. Por otro lado, se considerará un punto con menor velocidad y potencia moderada (velocidad base), representativo del trabajo promedio del motor, ya que prácticamente entrega el torque máximo en operación normal. En la tabla 3.2 se presenta un resumen con las características de los puntos de operación mencionados.

| Característica | Punto de velocidad base | Punto nominal |
|---|---|---|
| Potencia (kW) | 63.5 | 79.8 |
| Eficiencia ( % ) | 96.3 | 96.62 |
| Velocidad (rpm) | 4000 | 5500 |
| Corriente “DC” (A) | 175.9 | 220.3 |
| Tensión de fase “peak” (V) | 189.1 | 216.5 |
| Corriente de fase “peak” (A) | 267 | 267 |
| Torque (Nm) | 151.7 | 138.6 |
| Fase de avance (grados eléctricos) | 39.17 | 54.04 |
| Potencia electromagnética (kW) | 64.4 | 81.1 |
| Temperatura promedio (°C) | 123.3 | 129.6 |
| Factor de Potencia (–) | 0.871 | 0.953 |
| Torque variable “peak to peak” ( % ) | 12 | 17.73 |
| Torque variable “peak to peak” (Nm) | 18.46 | 25 |

Tabla 3.2: Datos de puntos de operación de la máquina de referencia.

*Considerar que estos valores incluyen la temperatura simulada, así como las pérdidas resistivas, por fricción de aire, por fricción de rodamientos y pérdidas en el hierro.

### 3.2.4. Procedimiento del programa Ansys Motor-CAD

A continuación, se detalla el procedimiento realizado para obtener los datos del motor de referencia en el programa Ansys Motor-CAD.

**Ventana inicial del programa**

El programa presenta una interfaz de usuario simplificada, que se organiza en cuatro tipos de modelado, mostrados en la figura 3.3.

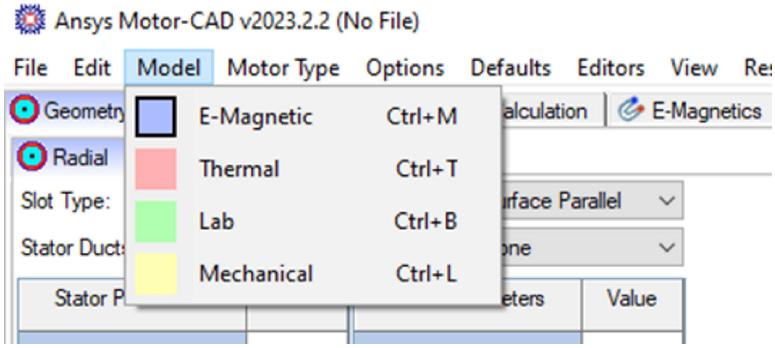
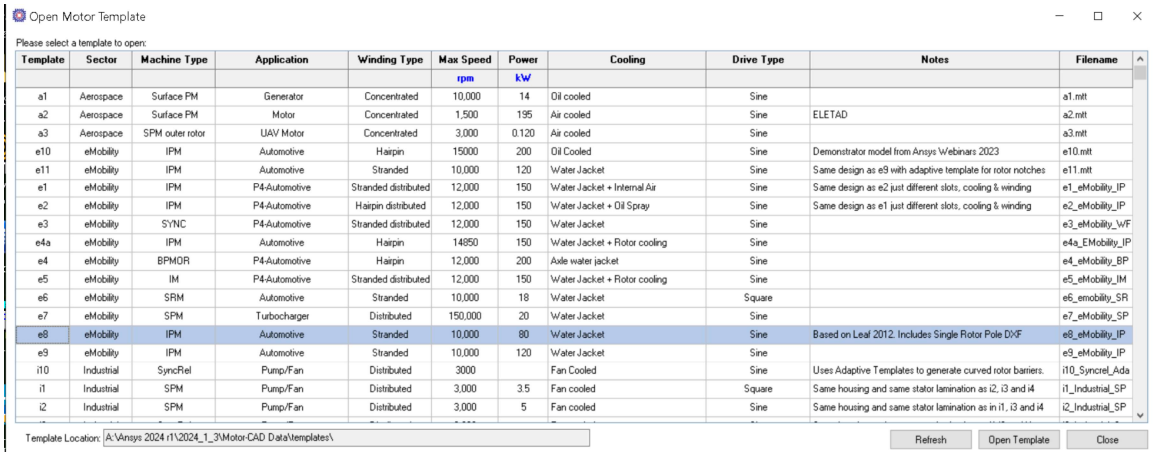



Figura 3.3: Modelados del programa Motor-CAD.

Los modelados se clasifican según los resultados que ofrecen: electromagnéticos, térmicos, mecánicos y de laboratorio. Este último proporciona un análisis completo y determina las características de la máquina en todo el rango de operación, mientras que los otros modelos brindan información específica para un punto de operación. En este estudio, se utilizarán los modelos de forma combinada para simular el motor en condiciones realistas de pérdidas y funcionamiento.

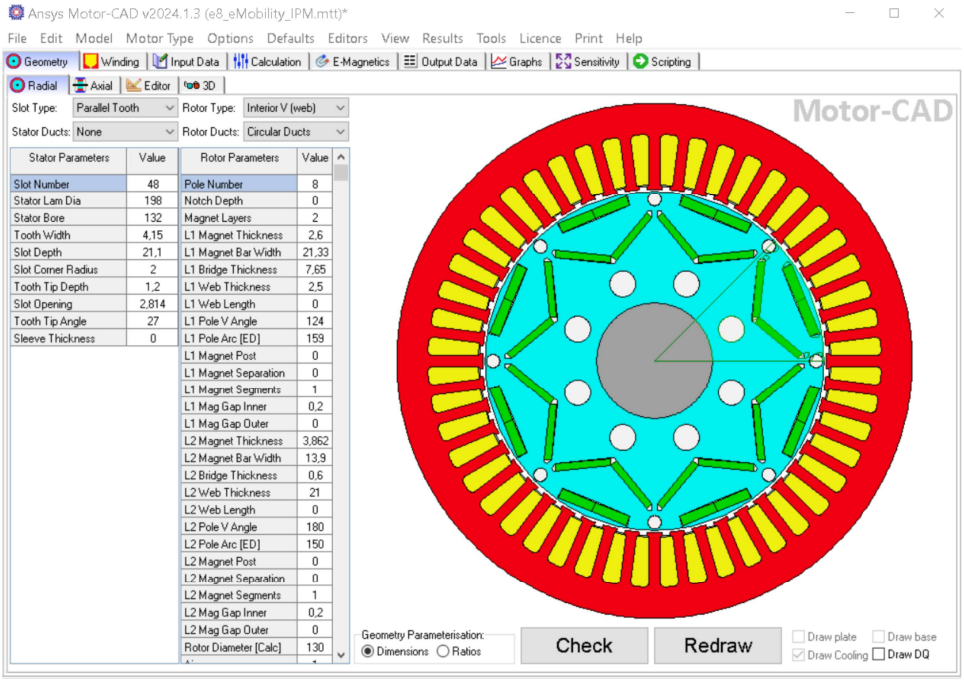
### Cargar el archivo

El motor de referencia se cargará desde las "Templates", bajo el nombre "e8_emovility_IPM.mtt", como se muestra en la figura 3.4 y en la figura 3.5 se muestra la forma de la maquina cargada.




| Template | Sector | Machine Type | Application | Winding Type | Max Speed | Power | Cooling | Drive Type | Notes | Filename |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | rpm | kW | | | | |
| a1 | Aerospace | Surface PM | Generator | Concentrated | 10,000 | 14 | Oil cooled | Sine | | a1.mtt |
| a2 | Aerospace | Surface PM | Motor | Concentrated | 1,500 | 195 | Air cooled | Sine | ELETAD | a2.mtt |
| a3 | Aerospace | SPM outer rotor | UAV Motor | Concentrated | 3,000 | 0.120 | Air cooled | Sine | | a3.mtt |
| e10 | eMobility | IPM | Automotive | Hairpin | 15000 | 200 | Oil Cooled | Sine | Demonstrator model from Ansys Webinars 2023 | e10.mtt |
| e11 | eMobility | IPM | Automotive | Stranded | 10,000 | 120 | Water Jacket | Sine | Same design as e9 with adaptive template for rotor notches | e11.mtt |
| e1 | eMobility | IPM | P4-Automotive | Stranded distributed | 12,000 | 150 | Water Jacket + Internal Air | Sine | Same design as e2 just different slots, cooling & winding | e1_eMobility_IP |
| e2 | eMobility | IPM | P4-Automotive | Hairpin distributed | 12,000 | 150 | Water Jacket + Oil Spray | Sine | Same design as e1 just different slots, cooling & winding | e2_eMobility_IP |
| e3 | eMobility | SYNC | P4-Automotive | Stranded distributed | 12,000 | 150 | Water Jacket | Sine | | e3_eMobility_WF |
| e4a | eMobility | IPM | Automotive | Hairpin | 14850 | 150 | Water Jacket + Rotor cooling | Sine | | e4a_EMobility_IP |
| e4 | eMobility | BPMOR | P4-Automotive | Hairpin | 12,000 | 200 | Axle water jacket | Sine | | e4_eMobility_BP |
| e5 | eMobility | IM | P4-Automotive | Stranded distributed | 12,000 | 150 | Water Jacket + Rotor cooling | Sine | | e5_eMobility_IM |
| e6 | eMobility | SRM | Automotive | Stranded | 10,000 | 18 | Water Jacket | Square | | e6_emobility_SR |
| e7 | eMobility | SPM | Turbocharger | Distributed | 150,000 | 20 | Water Jacket | Sine | | e7_eMobility_SP |
| e8 | eMobility | IPM | Automotive | Stranded | 10,000 | 80 | Water Jacket | Sine | Based on Leaf 2012. Includes Single Rotor Pole DXF | e8_eMobility_IP |
| e9 | eMobility | IPM | Automotive | Stranded | 10,000 | 120 | Water Jacket | Sine | | e9_eMobility_IP |
| i10 | Industrial | SyncRel | Pump/Fan | Distributed | 3000 | | Fan Cooled | Sine | Uses Adaptive Templates to generate curved rotor barriers. | i10_Syncrel_Ada |
| i1 | Industrial | SPM | Pump/Fan | Distributed | 3,000 | 3.5 | Fan cooled | Square | Same housing and same stator lamination as i2, i3 and i4 | i1_Industrial_SP |
| i2 | Industrial | SPM | Pump/Fan | Distributed | 3,000 | 5 | Fan cooled | Sine | Same housing and same stator lamination as in i1, i3 and i4 | i2_Industrial_SP |

Figura 3.4: Ejemplos de máquinas rotativas en el programa Ansys Motor-CAD.




| Stator Parameters | Value |
|---|---|
| Slot Number | 48 |
| Stator Lam Dia | 198 |
| Stator Bore | 132 |
| Tooth Width | 4,15 |
| Slot Depth | 21,1 |
| Slot Corner Radius | 2 |
| Tooth Tip Depth | 1,2 |
| Slot Opening | 2,814 |
| Tooth Tip Angle | 27 |
| Sleeve Thickness | 0 |

| Rotor Parameters | Value |
|---|---|
| Pole Number | 8 |
| Notch Depth | 0 |
| Magnet Layers | 2 |
| L1 Magnet Thickness | 2,6 |
| L1 Magnet Bar Width | 21,33 |
| L1 Bridge Thickness | 7,65 |
| L1 Web Thickness | 2,5 |
| L1 Web Length | 0 |
| L1 Pole V Angle | 124 |
| L1 Pole Arc [ED] | 159 |
| L1 Magnet Post | 0 |
| L1 Magnet Separation | 0 |
| L1 Magnet Segments | 1 |
| L1 Mag Gap Inner | 0,2 |
| L1 Mag Gap Outer | 0 |
| L2 Magnet Thickness | 3,862 |
| L2 Magnet Bar Width | 13,9 |
| L2 Bridge Thickness | 0,6 |
| L2 Web Thickness | 21 |
| L2 Web Length | 0 |
| L2 Pole V Angle | 180 |
| L2 Pole Arc [ED] | 150 |
| L2 Magnet Post | 0 |
| L2 Magnet Separation | 0 |
| L2 Magnet Segments | 1 |
| L2 Mag Gap Inner | 0,2 |
| L2 Mag Gap Outer | 0 |
| Rotor Diameter [Calc] | 130 |

Figura 3.5: Ventana de inicio de Ansys Motor-CAD con el modelo de la máquina de referencia cargado.

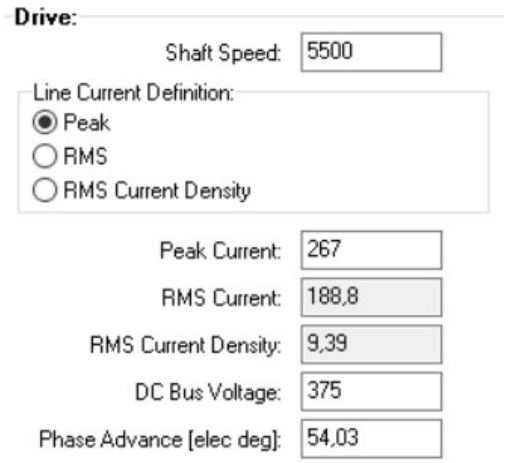



Figura 3.6: Controlador por defecto configurado para la máquina de referencia.

Tras cargar el ejemplo y considerando los datos del controlador mostrado en la figura 3.6, la máquina se configura en el modelo "Lab" con una corriente "peak" de 267 A, tomando en cuenta los modelos de saturación y de pérdida, como se muestra en la figura 3.7. Además, se activa un modo automático para calcular las pérdidas por viento y rodamientos (figuras 3.8 y 3.9), obteniendo aproximadamente 9 W de pérdida a 5500 rpm (3 W por pérdida de rodamientos y 6 W por pérdida de viento). Ansys Electronics Desktop cuenta con un modelado intrínseco para estas pérdidas, que se calculan en relación con una velocidad base, y se asignan los mismos valores de pérdida con la velocidad nominal.

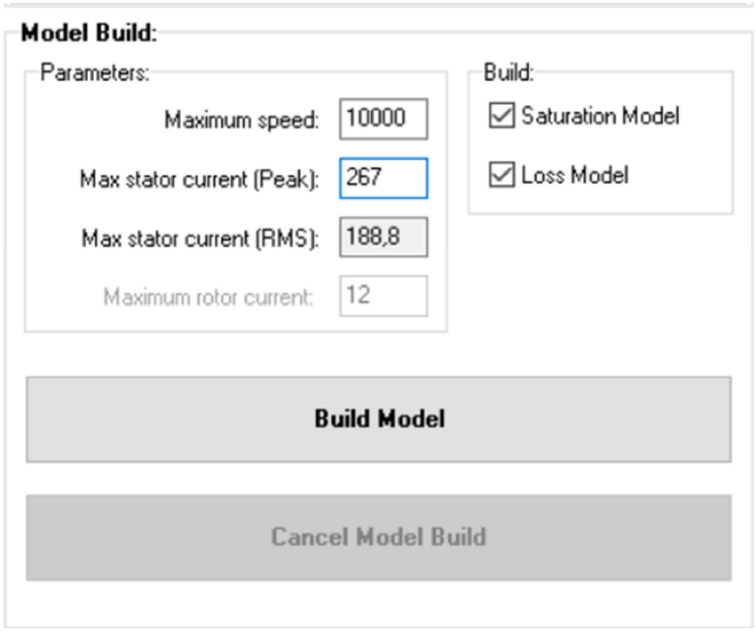



Figura 3.7: Configuración del modelo de pérdidas para la máquina de referencia.

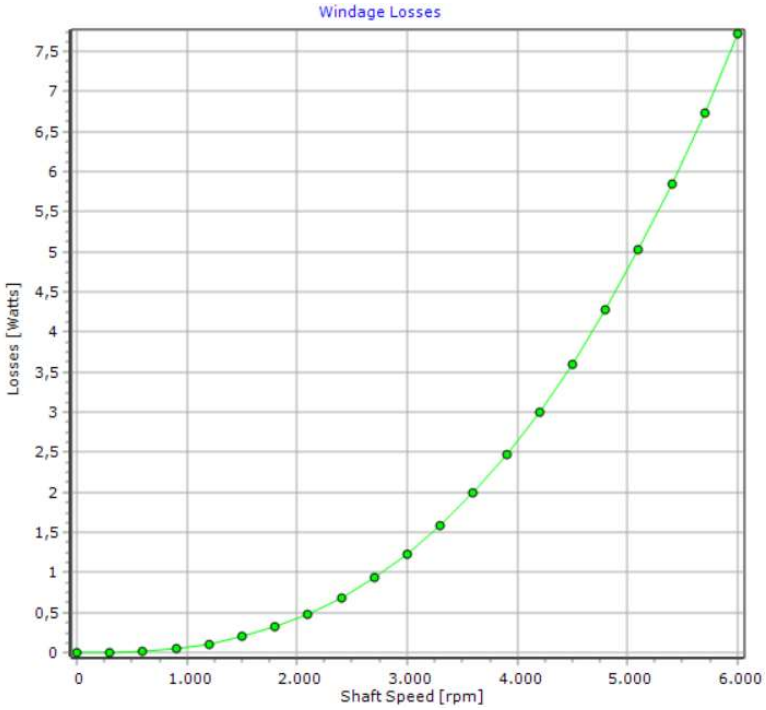



Figura 3.8: Pérdidas por viento calculadas automáticamente para la máquina de referencia.

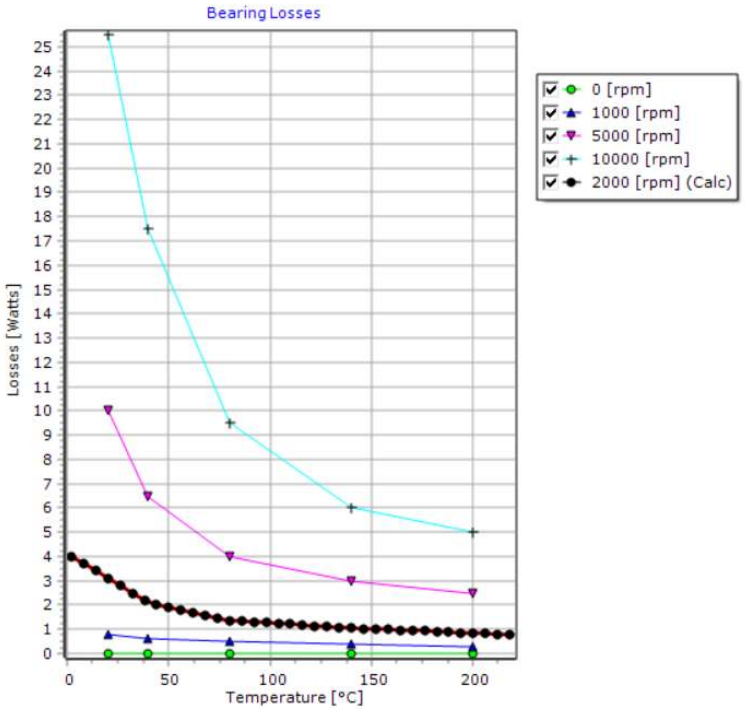



Figura 3.9: Pérdidas por rodamientos calculadas automáticamente para la máquina de referencia.

También se considera el acoplamiento entre los modelos térmico y magnético, los cuales se integrarán en la simulación para obtener datos realistas. Este acoplamiento se configurará de forma iterativa,

de modo que el programa pueda encontrar una solución de temperatura cercana a la real, con un margen de error inferior al 1 % .

## 3.3. Memoria de cálculo

En esta sección se calcularán y mostrarán las decisiones, para elegir los rangos de variables y diferentes componentes de la MRC. Considerar que existen parámetros que no pueden asignarse como variables, como lo son las ramas paralelas, número de polos, aislación de los conductores, etc. Es debido a esto, que este tipo de variables se dejarán constantes y se explicará a continuación sus funciones y razón de su valor.

### 3.3.1. Diámetro de eje

Para el diámetro del eje se tiene como primera referencia el valor del eje del motor sincrónico, el cual es de 20 mm de diámetro. Considerar que este valor corresponde al eje externo de la máquina de referencia, es decir, el que finalmente transmite el torque. Por lo que el eje interno de la MRC por lo menos debe ser mayor a este número. Pero, debido a que la MRC optimizada puede poseer valores más altos de torque de partida, se considera calcular la resistencia a la tracción máxima del eje utilizada en el motor de referencia, para decidir en base a este valor si los ejes de las MRC optimizadas soportan su propio torque de arranque.

Reemplazando los valores de referencia en la formula 2.4 y calculando se obtiene lo siguiente:

$$0.020\,\mathrm{m} = \left(\frac{5.1 \cdot 280\,\mathrm{Nm}}{t}\right)^{\frac{1}{3}}, \tag{3.1}$$

$$t = 178\,\mathrm{MPa} \tag{3.2}$$

Con esto, se considera el mismo valor de resistencia máxima a la tracción ($t$) del eje del motor de referencia en el caso de decidir una máquina apropiada.

### 3.3.2. Materiales para estator y rotor

En general, los materiales tienen una proporción directa entre su densidad de peso y conducción de flujo magnético. Los materiales utilizados serán de aleación de silicio, la cual es comúnmente ocupada en este tipo de aplicaciones. El material elegido será el M270-35A, el cual posee un buen equilibrio entre la conducción de flujo magnético y densidad de peso.

### 3.3.3. Ramas paralelas

Una configuración importante de estos motores son las ramas paralelas, que se refieren a la conexión en paralelo de las bobinas para cada fase. Su configuración depende de la cantidad de polos que tenga la máquina. Por ejemplo, una máquina de doce polos en el estator y ocho en el rotor, la cual es trifásica debido a que existe un factor común de cuatro polos entre el estator y el rotor. Lo que implica dividir los polos del estator en cuatro dando la cantidad de tres fases, luego la configuración del conexionado entre los polos define las ramas paralelas. El bobinado de los polos se puede conectar tanto en serie como en paralelo y normalmente se configuran en paralelo para repartir la corriente. Para el ejemplo presentado existen tres configuraciones de ramas paralelas, una, dos y cuatro. Una rama paralela significa que todos los polos están conectados en serie, dos ramas paralelas significan que dos pares de polos en serie están conectados en paralelo y cuatro ramas paralelas significa que los cuatro polos se encuentran conectados en paralelo. Se ha seleccionado la mayor cantidad de ramas paralelas para todas las MRC optimizadas en esta memoria, debido a las mejoras que implica esta configuración. Estas mejoras son significativas, ya que pueden aumentan el par que proporciona la máquina, reducir las corrientes por los conductores y una mayor flexibilidad a la máquina a costa de un control más sofisticado.

En resumen, se ajustarán todas las máquinas con el mayor número de ramas paralelas permitidas, que serán las siguientes: configuración 6/4, dos ramas paralelas; configuración 12/8, cuatro ramas paralelas; configuración 18/12, seis ramas paralelas; y configuración 24/16, ocho ramas paralelas.

### 3.3.4. Factor de llenado

El “fill factor” o factor de llenado de espacio de las ranuras es un parámetro muy importante. En general, para las MRC el llenado eficiente de espacio indica unas mejores características, por lo que el rango a configurar este parámetro será de 50-60 % , lo que está dentro del rango de llenado por maquinaria. Este valor se ajusta de esta manera para que haya espacio para las aislaciones y para el “Wire Wrap”. Este último parámetro es un conexionado en los terminales de las bobinas del estator, puede reducir el espacio para los conductores. El “Wire Wrap” se ajustó en configuración automática.

### 3.3.5. Grosor del conductor

El grosor del conductor será determinado por el motor de referencia, ya que tendrán aproximadamente las mismas corrientes y se considera una disipación parecida. El conductor de la máquina de referencia tiene un diámetro de 0.8 mm con un grosor de la aislación de 0.0425 mm. Sin embargo, se desconoce el tipo de aislación utilizada, además su construcción es compuesta de filamentos, es decir tiene varios conductores por vuelta, por lo que las tensiones entre espiras pueden ser más baja. Mientras que la optimización de la MRC se hará con una sola espira para facilitar el cálculo del factor de llenado. Por lo tanto, para el diámetro del conductor se configurará un mínimo tomando como

referencia al del motor sincrónico que tiene los siguientes datos de bobinado:

$$I_{N\text{peak}} = 267\ \text{A}, \tag{3.3}$$

Lo que implica que el valor de la corriente "RMS" es:

$$I_{N\text{rms}} = \frac{I_{N\text{peak}}}{\sqrt{2}} = 188.78\ \text{A} \tag{3.4}$$

El bobinado del motor de referencia posee 20 conductores por fase, dividida en 2 ramas paralelas, por lo que el valor de corriente que pasa por los 20 conductores con 0.8 mm de diámetro equivale a la mitad de $I_{\text{rms}}$, es decir unos 94.39 A. Luego, calculando la corriente por cada conductor de 0.8 mm en estado nominal, se obtiene un valor de 4.72 mm. Con estos datos y el área de la sección transversal de una espira, se puede determinar la densidad de corriente de referencia.

Área de la sección transversal:

$$A = \pi \left(\frac{0.8}{2}\right)^2 = 0.502\ \text{mm}^2, \tag{3.5}$$

$$J = \frac{I_{\text{rms por espira}}}{A_o}, \tag{3.6}$$

$$J = \frac{4.72}{0.502} = 9.4\ \text{A/mm}^2 \tag{3.7}$$

Considerar que estos valores dependen de la construcción del motor, del factor de llenado y del sistema de enfriamiento de la máquina por lo que el valor anterior solo será una referencia inicial para el diámetro de los conductores de la MRC. A continuación, se determinará un valor mínimo del diámetro de los conductores, en base a la densidad de corriente de referencia, según la configuración de polos de la MRC y de las ramas paralelas utilizadas.

**MRC de 6/4 polos (2 ramas paralelas)**

$$I_{\text{rms por rama}} = \frac{188.78\ \text{A}}{2} = 94.39\ \text{A}, \tag{3.8}$$

$$A_o = \frac{I_{\text{rms por rama}}}{J_{\text{ref}}} = \frac{94.39\ \text{A}}{9.4\ \text{A/mm}^2} = 10.04\ \text{mm}^2, \tag{3.9}$$

$$D_{\text{min}} = 2\sqrt{\frac{A_o}{\pi}} = 3.57\ \text{mm} \tag{3.10}$$

**MRC de 12/8 polos (4 ramas paralelas)**

$$I_{\text{rms por rama}} = \frac{188.78\ \text{A}}{4} = 47.2\,\text{A}, \tag{3.11}$$

$$A_o = \frac{I_{\text{rms por rama}}}{J_{\text{ref}}} = \frac{47,2\,\text{A}}{9.4\ \text{A/mm}^2} = 5.02\ \text{mm}^2 \tag{3.12}$$

$$D_{\text{min}} = 2\sqrt{\frac{A_o}{\pi}} = 2.53\,\text{mm} \tag{3.13}$$

**MRC de 18/12 polos (6 ramas paralelas)**

$$I_{\text{rms por rama}} = \frac{188.78\ \text{A}}{6} = 31.46\,\text{A}, \tag{3.14}$$

$$A_o = \frac{I_{\text{rms por rama}}}{J_{\text{ref}}} = \frac{31.46\,\text{A}}{9.4\ \text{A/mm}^2} = 3.35\ \text{mm}^2, \tag{3.15}$$

$$D_{\text{min}} = 2\sqrt{\frac{A_o}{\pi}} = 2.06\ \text{mm} \tag{3.16}$$

**MRC de 24/16 polos (8 ramas paralelas)**

$$I_{\text{rms por rama}} = \frac{188.78\ \text{A}}{8} = 23.71\ \text{A}, \tag{3.17}$$

$$A_o = \frac{I_{\text{rms por rama}}}{J_{\text{ref}}} = \frac{23.71\ \text{A}}{9.4\ \text{A/mm}^2} = 2.51\ \text{mm}^2, \tag{3.18}$$

$$D_{\text{min}} = 2\sqrt{\frac{A_o}{\pi}} = 1.79\ \text{mm} \tag{3.19}$$

### 3.3.6. Grosor y tipo de aislación del conductor

Para el grosor del aislamiento se utilizará el valor de referencia, el cual es de 0.0425 mm. Se asume que el aislante soporta las condiciones térmicas y tensiones de la máquina “IPM” en su rango de operación, que serán similares a la MRC.

Aunque no se especifica de qué tipo de aislante tiene la máquina de referencia, se asume que es un aislante tipo B el cual soporta hasta 155 °C máximo, por los valores de temperatura obtenidos en la simulación [8].

Por otro lado, a mayor frecuencia se requiere una mayor aislación, debido a que al aumentar la frecuencia hay una mayor inductancia, lo que puede generar mayores "peak" de tensión. Además, a mayores frecuencias se tienen mayores pérdidas en el material dieléctrico, es decir, aumenta el deterioro del material. Debido a que no se encontró literatura que desarrolle este tema teóricamente, solo se encontraron normativas de prueba reales para los aislantes. Por lo tanto, se asume un incremento proporcional a la frecuencia, para asegurarse de que sea un aislante que realmente soporte las condiciones de cada MRC.

Las frecuencias de la MRC dependen de las ramas paralelas que tenga; con dos ramas tiene un rango de frecuencias iguales a los de la máquina de referencia, con cuatro se necesita el doble de frecuencia. Considerando lo anterior, los valores de grosor de la aislación quedarán de la siguiente manera:

| **Polos** | **Ramas paralelas** | **Grosor de aislante (mm)** |
|---|---|---|
| 6S4R | 2 | 0.0425 |
| 12S8R | 4 | 0.085 |
| 18S12R | 6 | 0.1275 |
| 24S16R | 8 | 0.17 |

Tabla 3.3: Ramas paralelas y grosor de aislante según configuración de polos.

### 3.3.7. Ángulo de encendido y ángulo de apagado

Estos parámetros controlan el disparo del controlador para la aplicación correcta de la corriente sobre las bobinas. Los valores de los ángulos deben estar sincronizados con la velocidad para que la máquina trabaje en su forma óptima. El ángulo "ON" inicia el flujo de la corriente por las bobinas del estator y hace que el polo del estator atraiga al del rotor. Este valor es cercano a cero o negativo, para maximizar el torque de arranque y se incrementa con la velocidad, ya que se debe anticipar al movimiento del rotor. Por otro lado, el ángulo "OFF" es el que controla el tiempo durante el cual la bobina del estator está encendida. Su sincronía es importante ya que al no desactivar el polo a tiempo puede generar torque no deseado, además de un "ripple" mayor. En general, se tendrá un rango para el ángulo "ON" de -80° a 60° y el ángulo "OFF" de 80° a 230°, los cuales fueron determinados en base al "paper" "A Multi-objective Optimization Framework for the Design of a High Power-Density Switched Reluctance Motor". Se abarca más allá del rango de valores señalado en el "paper", ya que las MRC son variadas entre sí y pueden dar ángulos optimizados con diferentes valores. Pero debido a los errores que puede producir los valores de los extremos, los rangos serán disminuidos según se considere requerido. En la figura 3.10 se mostrará el gráfico obtenido del "paper" utilizado como referencia para los rangos de los ángulos de control [9].

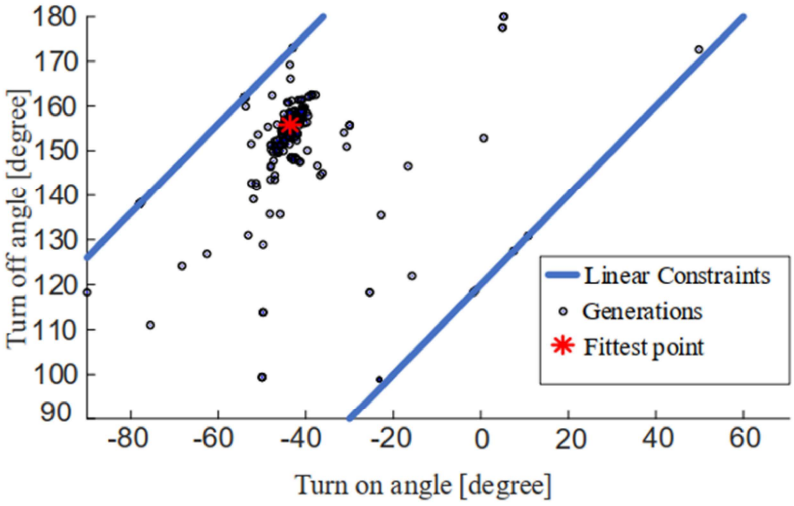



Figura 3.10: Angulos ON/OFF de referencia para una MRC de 18/12 polos.

Un rango acotado de los ángulos se determinará mediante la parametrización de ángulos hecha para MRC. La parametrización para algunas variaciones de motores de 12/8 polos, en las cuales se muestra los ángulos para optimizar el torque en la máquina según su velocidad, se presenta en la tabla 3.4.

| **Variación** | **Ángulos (°)** | **4000** | **5500** |
|---|---|---|---|
| 1104 D4 | Ángulo (°) ON | 10 | 40 |
| | Ángulo (°) Off | 160 | 200 |
| 1307 D4 | Ángulo (°) ON | 10 | 30 |
| | Ángulo (°) Off | 180 | 200 |
| 1956 D4 | Ángulo (°) ON | 10 | 40 |
| | Ángulo (°) Off | 160 | 200 |

Tabla 3.4: Variación de ángulos y velocidades

Considerar que en el programa el ángulo “OFF” no se configura, sino que se utiliza el ancho del pulso. Este ancho sería la resta entre el ángulo “ON” y “OFF”.

## 3.4. Variables para la optimización

Ciertos parámetros dependen de otros (por ejemplo, el diámetro interno del estator depende del diámetro externo del rotor). Por esta razón, se crearon variables auxiliares para cada parámetro. Estas variables se concatenan para formar los parámetros de la máquina, con el objetivo de minimizar los errores en las simulaciones. Se busca que el programa genere la mayor cantidad de casos funcionales

y que los resultados sean fidedignos. Este arreglo comienza con el parámetro central del motor, es decir, el eje. Luego, esta variable se suma al siguiente parámetro junto con otra variable auxiliar.

En la tabla 3.5 se presenta el resumen de la configuración de las variables en cada parámetro, además de mostrar el rango asignado para las variables en el DOE. Los rangos se establecieron inicialmente en función de los parámetros del motor de referencia, comenzando con un amplio rango y luego reducidos mediante parametrizaciones lineales:

| **Parámetros** | **Variables** | **Valor modelo inicial** | **Rango** |
|---|---|---|---|
| "Inner Diameter" rotor | Eje | 30 mm | 20 a 45 mm |
| "Outer Diameter" rotor | Eje+GrosRot | 139 mm | 93 a 160 mm |
| "Length" rotor | LargoRot | 150 mm | 130 a 200 mm |
| "Embrace" rotor | GosorPRot | 0.5 | 0.4 a 0.6 |
| "Yoke thickness" rotor | EspYuRot | 40 mm | 25 a 55 mm |
| "Inner Diameter" estator | Eje+GrosRot+Gap | 140 mm | 93.5 a 161.5 mm |
| "Outer Diameter" estator | Eje+GrosRot+Gap+GrosStator | 200 mm | 143.5 a 266.5 mm |
| "Length" estator | LargoSt | 150 mm | 130 a 200 mm |
| "Embrace" estator | GosorPStator | 0.5 | 0.4 a 0.6 |
| "Yoke thickness" estator | EspYuStator | 15 mm | 5 a 25 mm |
| "End Adjustment" | SalCa | 10 mm | 5 a 40 mm |
| "Turns per Pole" | VpP | 20 mm | 5 a 60 mm |
| "Wire Size" | DiaWire | 4 mm | 1.8 a 6 mm (varía según conf.) |
| Ángulo "ON" Lead Angle of Trigger | Ang_Lead | 0° | -90° a 60° (ajustado según conf.) |
| Ancho del pulso "Trigger Pulse Width" | Ang_trig | 120° | 90° a 180° (ajustado según conf.) |

Tabla 3.5: Parámetros y variables del modelo con sus valores y rangos.

Se debe considerar que los valores en esta tabla serán los base; sin embargo, dependiendo de la MRC optimizada, estos valores pueden cambiar ligeramente. Los valores propuestos están destinados a reducir la cantidad de fallas que pueda tener el programa, asegurando así que las simulaciones en el DOE sean continuas y sin fallos.

## 3.5. "Paper" de referencia inicial

Para guiar el procedimiento de optimización de la MRC y obtener datos de una máquina de referencia en aplicaciones de torque automotriz, se utilizó el artículo "Optimisation of an 80 kW Segmental Rotor Switched Reluctance Machine for Automotive Traction". En este documento se considera el motor del Nissan Leaf 2011, que es idéntico a la máquina del Nissan Leaf 2012, la cual se empleará en esta memoria. Se buscó información adicional sobre esta máquina, y en el programa Ansys Motor-CAD se encontró un ejemplo representativo. En este programa se pueden obtener datos de la máquina en todos los rangos de velocidades.

En la simulación realizada en Ansys Motor-CAD y en otras referencias, se determinó que el torque de arranque de la máquina es de aproximadamente 280 Nm. Sin embargo, en el artículo mencionado, se consideró erróneamente este valor como el torque nominal, calculando una velocidad nominal de 2750 rpm, con una potencia de 80 kW y 280 Nm. En el programa "Ansys Motor-CAD" se estableció que el torque de arranque es de 275.6 Nm, un valor cercano al mencionado anteriormente. Por otro lado, el verdadero valor nominal de torque es de 138.6 Nm con una velocidad de 5500 rpm, diferente al utilizado en el artículo. Aunque la optimización presentada en el documento es válida, la comparación con la máquina de referencia utilizada es incorrecta, ya que no se eligió el verdadero punto de operación nominal de la máquina [10].

En general, el error en el artículo retrasó el desarrollo de esta memoria, dado que inicialmente se utilizaron los puntos de operación erróneos indicados en el mismo.

## 3.6. Previo a optimizar

### 3.6.1. Creación del modelo inicial

Inicialmente, se utilizarán los datos y dimensiones basadas en el motor de referencia sincrónico para una simulación computacional en el programa Ansys Electronics Desktop. Se empleará una herramienta especializada para la simulación de motores llamada RMxprt. Se creará un modelo inicial para cada configuración de polos, incluyendo sus respectivas características calculadas previamente.

### 3.6.2. Procedimiento inicial en el programa Ansys Electronics Desktop

#### Ventana inicial del programa

Al iniciar el programa, se genera un proyecto vacío, en el cual se debe utilizar el módulo RMxprt para la simulación de la máquina rotatoria. Este módulo se encuentra en la pestaña "Desktop" bajo la sección Maxwell, como se presenta en la figura 3.11.

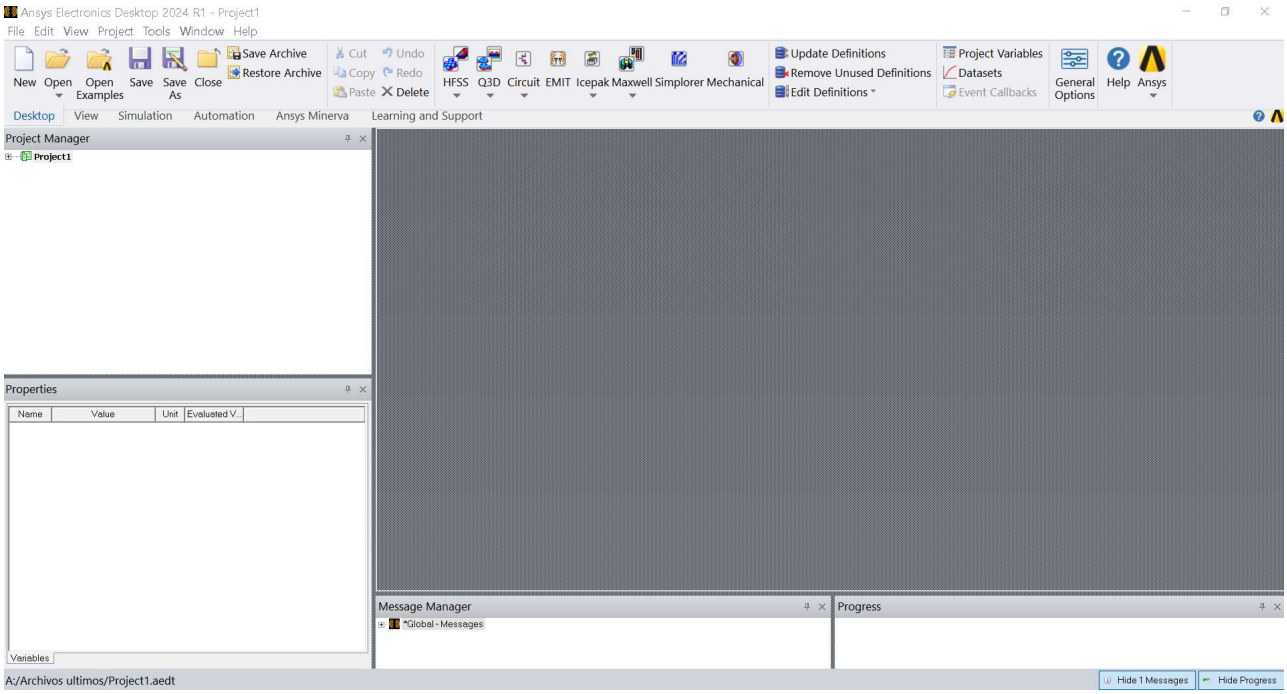



Figura 3.11: Ventana inicial del programa Ansys Electronics Desktop.

### Creación de un módulo RMxprt

En el módulo RMxprt se dispone de una amplia variedad de plantillas para diferentes máquinas rotativas, mostrado en la figura 3.12. Se selecciona el modelo de la MRC en la sección “Generate RMxprt Solutions: Standard”.

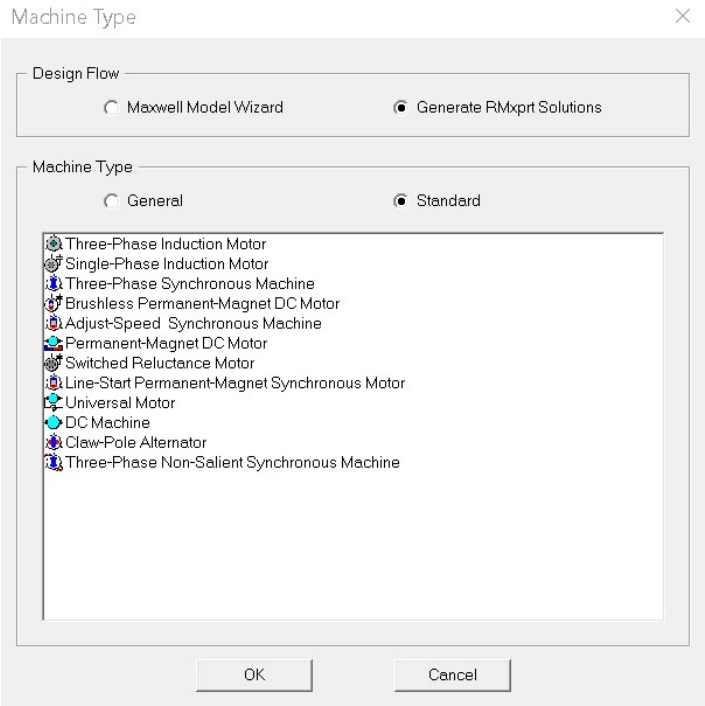



Figura 3.12: Tipo de máquinas disponibles en el módulo RMxprt.

Posteriormente, se asignan los datos iniciales en el modelo para cada configuración de polos. Se considerará únicamente la configuración "12S8R" para ilustrar el procedimiento. Se presenta, en la figura 3.13, los parámetros ajustables del motor desde el programa Ansys Electronics Desktop, luego una explicación de cómo y por qué se realizaron los ajustes.

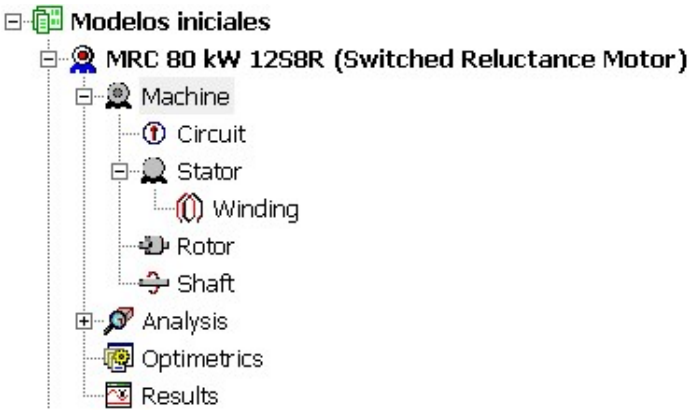



Figura 3.13: Pestañas de configuración para la MRC.

Las pérdidas por fricción y viento se asignarán de acuerdo con el modelo de referencia, mostrado en la figura 3.14. Es conocido que las pérdidas por viento son significativas en las MRC, ya que la forma característica de su rotor puede provocar pérdidas considerables proporcionales a la velocidad de la máquina, afectando la eficiencia. Dado que estas pérdidas varían entre distintas máquinas, se

considerará que los espacios vacíos entre cada polo del rotor estarán rellenados con resina epóxica. Esta medida logrará que el rotor sea completamente liso, permitiendo considerar pérdidas similares a las de la máquina de referencia sincrónica.

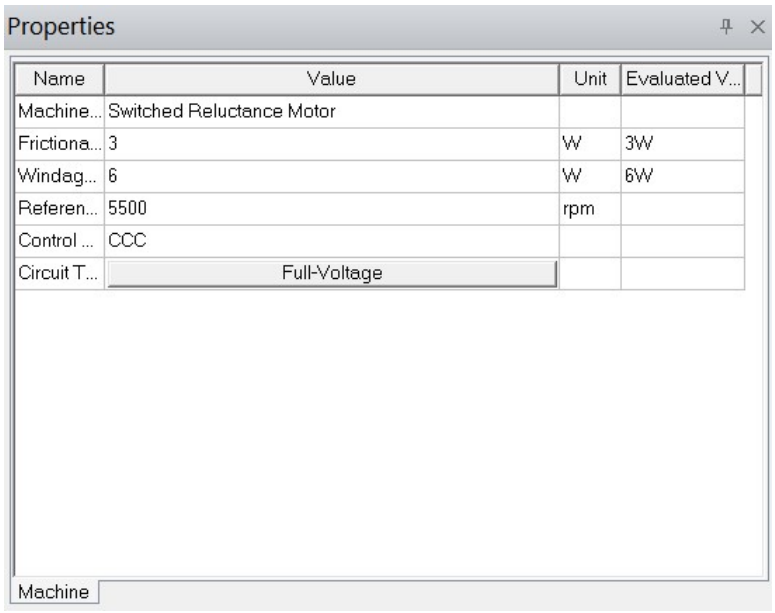



Figura 3.14: Propiedades de la pestaña “Machine”.

Luego, se especifica el tipo de control y circuito, en la misma figura 3.14 y en la figura 3.15. El control tiene dos categorías: “DC” y “CCC” (“Chopped Current Control”). La principal diferencia entre ambas es que en el segundo se puede regular la corriente mínima y máxima en el programa. Se selecciona el control tipo “CCC”, ya que mejora la eficiencia y es el mecanismo utilizado en el motor de referencia.

En cuanto al tipo de circuito, hay tres opciones: “Full-Voltage”, “Half-Voltage” y “Coupled-Coil”. Se elige “Full-Voltage” para maximizar el torque y conocer con precisión la tensión aplicada en la bobina.

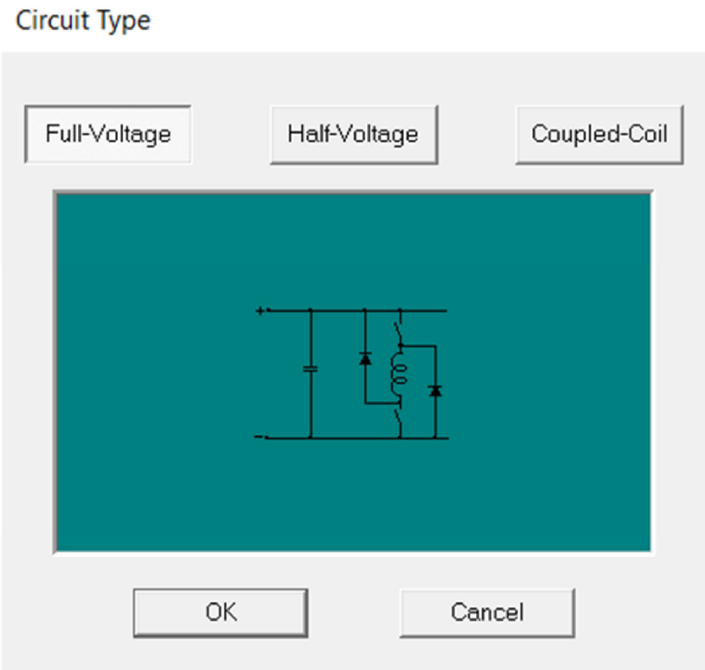



Figura 3.15: Ventana del tipo de circuito.

En la sección del circuito, mostrada en la figura 3.16, los valores de los ángulos “ON” y ancho de pulso se configurarán inicialmente con los valores predeterminados, 0° y 120°, respectivamente, denominados “Ang_lead” y “Ang_trig”. Para la corriente máxima, se configurará el valor máximo permitido por el controlador del motor de referencia, es decir, la que se utilizaba para el arranque, que es de 500 A “peak”.

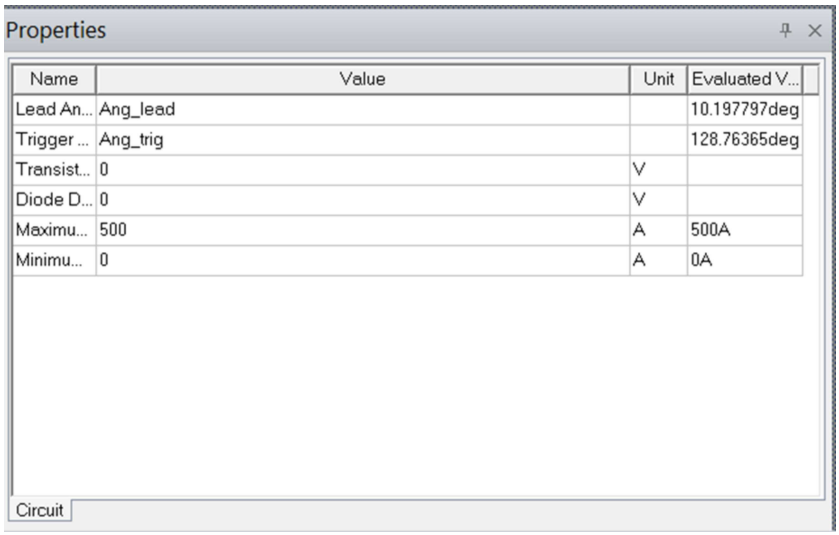



Figura 3.16: Propiedades de la pestaña “Circuit”.

Los parámetros del estator y rotor, figuras 3.17 y 3.18 respectivamente, se configurarán de acuerdo

con la tabla 3.5. El material se seleccionará en función de una aleación de silicio, que es comúnmente utilizada en aplicaciones electromagnéticas. Inicialmente, se elegirá el material del motor de referencia para facilitar la comparación. En caso de que se requiera cambiar el material, se seleccionará aquel que maximice el torque de la máquina y que se encuentre dentro de los rangos de pérdida del material de referencia. Se debe considerar que los cambios en los parámetros provocados por el material elegido son menores, y, en general, influyen de manera proporcional en los valores de torque y eficiencia.

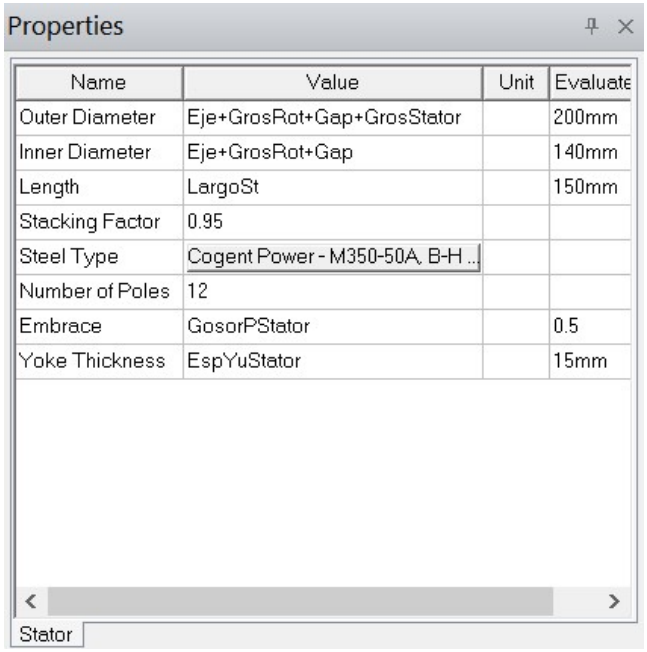



Figura 3.17: Propiedades de la pestaña “Stator”.

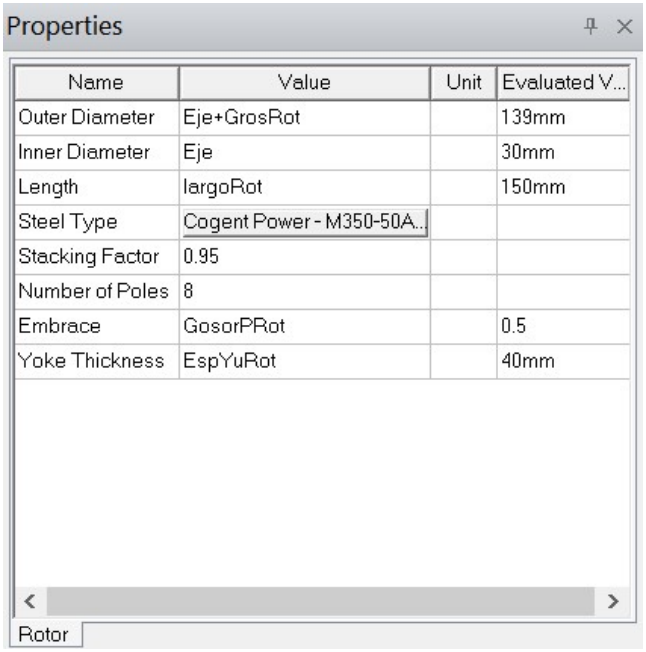



Figura 3.18: Propiedades de la pestaña “Rotor”.

En el bobinado, figura 3.19, se asignará el grosor del aislante calculado para cada configuración, así como los demás valores iniciales. Para el número de espiras, se configurará 1, dado que este valor es crítico para el cálculo del factor de llenado. Aumentar este número complica el cálculo de dicho factor, generando márgenes de error superiores al 15 %, que aumentan conforme se incrementa el número de espiras. Esto se debe a que el programa tiene un orden no controlable de los conductores. Además, llevaría a que el grosor del aislante deba variar en función de las espiras, lo que ocasionaría un factor de llenado con mayores variaciones, afectando negativamente la optimización del diseño.

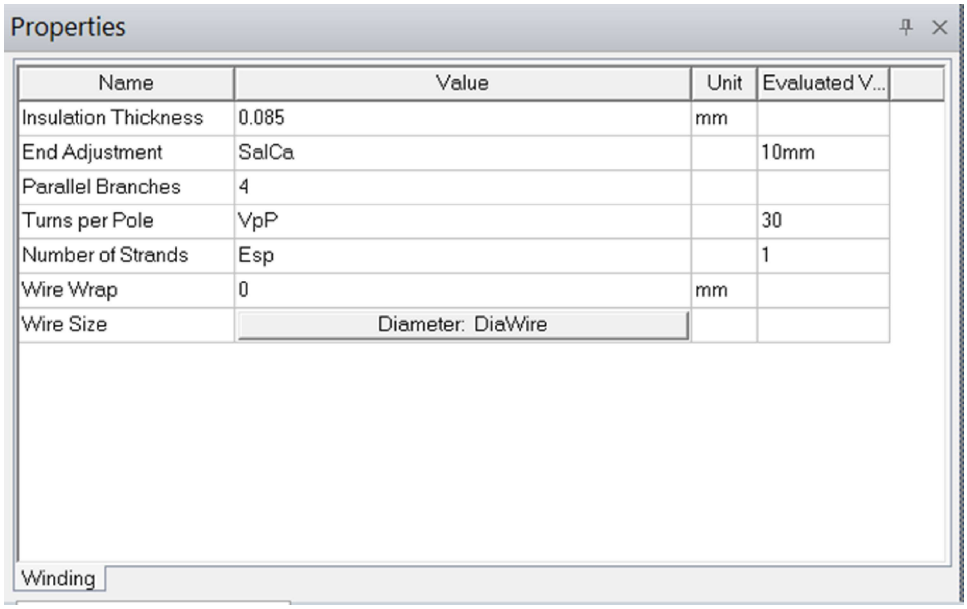



Figura 3.19: Propiedades de la pestaña “Winding”.

Posteriormente, en la sección de “Analysis”, mostrada en la figura 3.20 y 3.21, se configurarán los dos puntos de operación iniciales a 4000 y 5500 rpm, junto con sus respectivas características obtenidas de la máquina de referencia. El tipo de carga se configurará para optimizar la MRC en los puntos de velocidad requeridos, y se asumirá una temperatura cercana a la del motor de referencia, considerando un sistema de refrigeración capaz de mantener esos valores. Se optó por esta configuración, ya que el módulo “RMxprt” no permite el acoplamiento con el módulo “Icepak” para este tipo de máquinas.

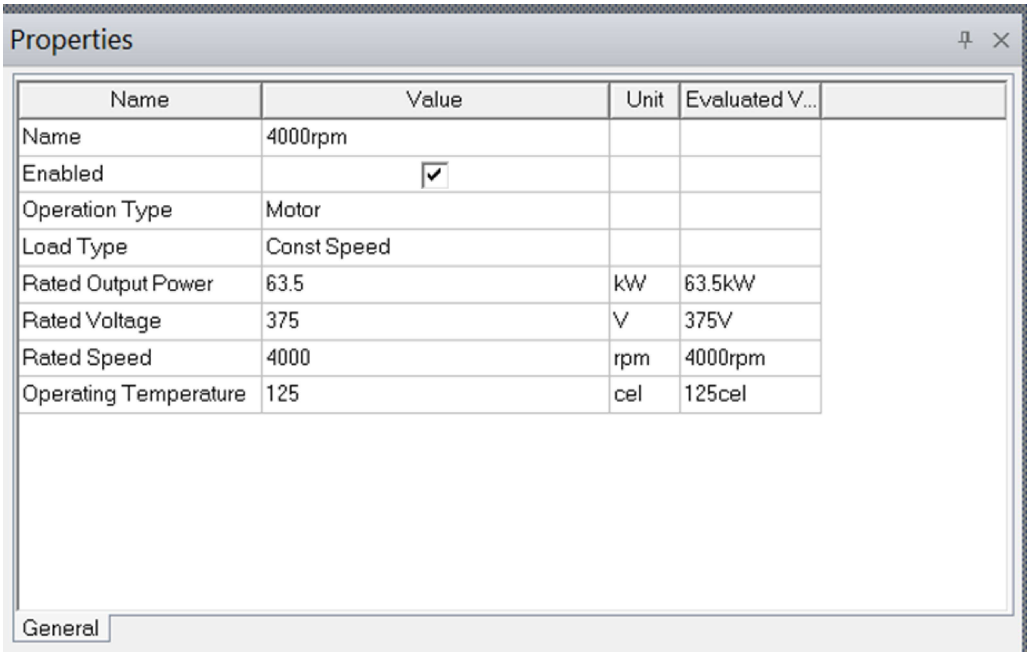



Figura 3.20: Configuración del “Setup” 4000 rpm en la pestaña “Analysis”.

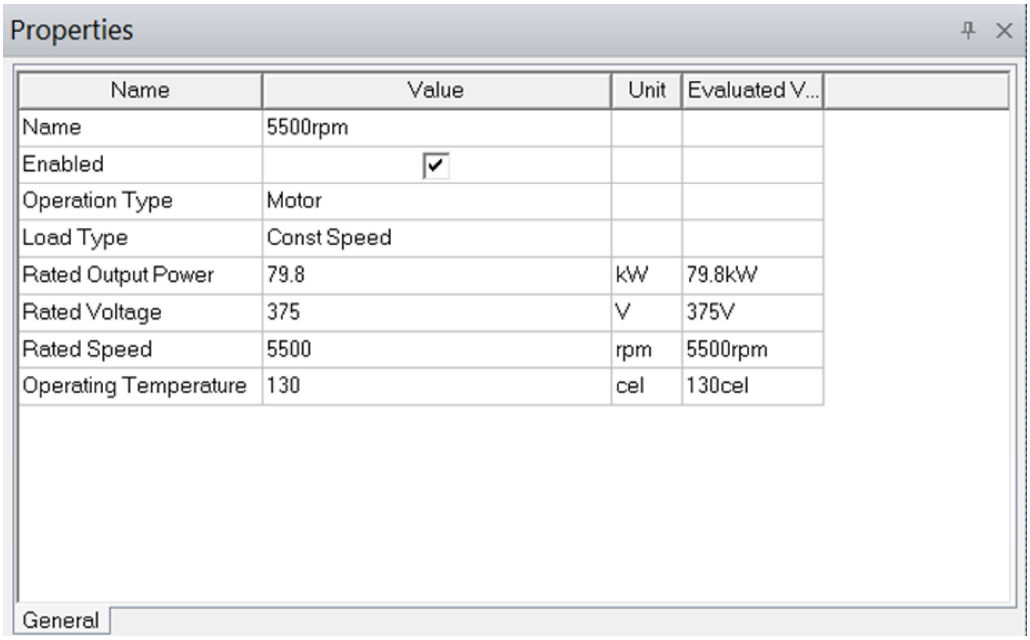



Figura 3.21: Configuración del "Setup" 5500 rpm en la pestaña "Analysis".

La última opción de la máquina es la propiedad del eje, mostrada en la figura 3.22, que determina si es un material magnético o no. Esta opción se dejará desactivada, ya que el impacto general se traduce en la eficiencia y torque de la máquina. Un eje magnético puede resultar en mayores pérdidas, pero mejora el torque, mientras que un eje no magnético presenta la situación opuesta. Por lo tanto, se decidió minimizar las pérdidas asociadas al eje.

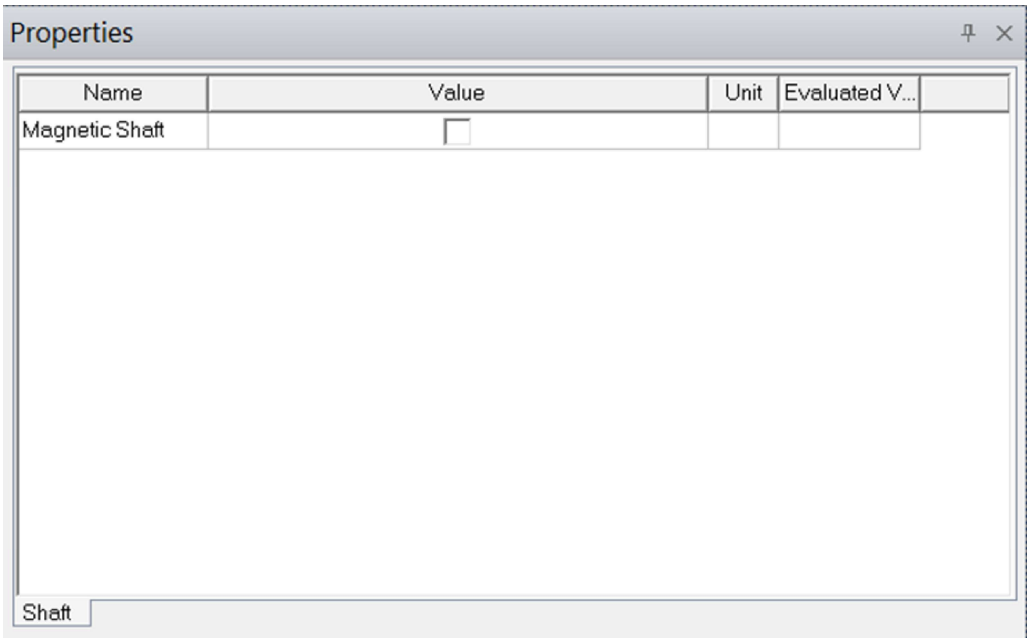



Figura 3.22: Propiedades de la pestaña "Shaft".

### 3.6.3. Parametrización de sus variables

Para obtener una visión general de los parámetros a optimizar y completar los datos iniciales del motor, se realizó un barrido lineal de cada parámetro, manteniendo los demás estáticos. Esto permite observar su implicancia en la eficiencia, torque nominal, peso y otras características del motor. Considerando que estos motores presentan comportamientos no lineales según su topología, estos datos servirán únicamente como guías iniciales en la optimización. Además, la parametrización ayudará a determinar los ángulos aproximados en los cuales se puede entregar una mayor potencia. En las figuras 3.23 y 3.24, se mostrarán algunos datos relevantes sobre los rangos de los ángulos en función de la velocidad para la máquina de "12S8R". Se debe considerar que el comportamiento de las otras configuraciones de polos es similar, pero no idéntico.

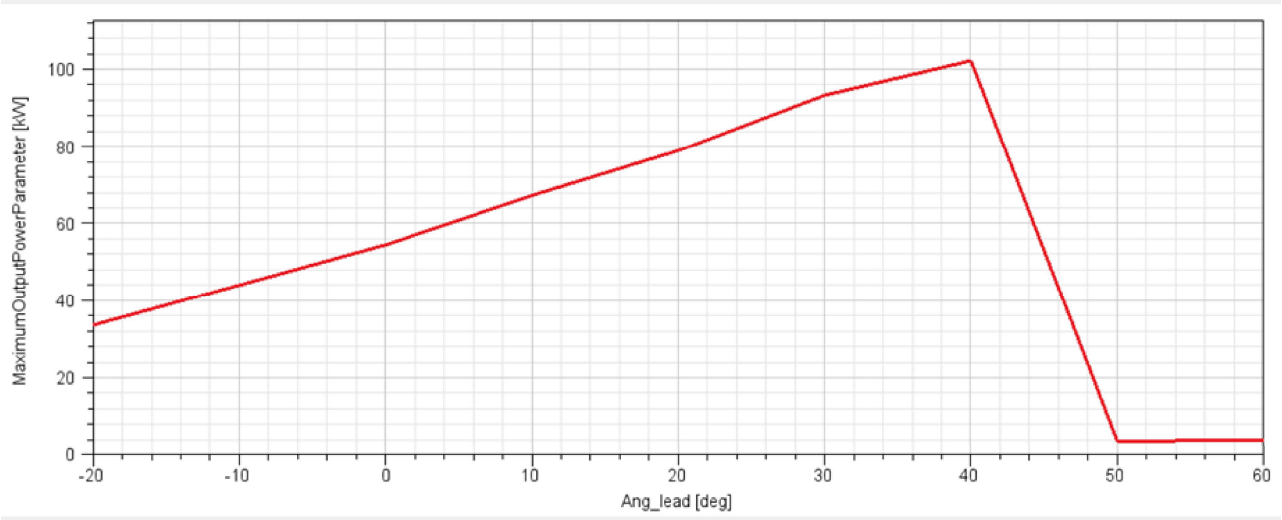



Figura 3.23: Parametrización de la máxima potencia de salida con el parámetro fijado en 160° y velocidad nominal.

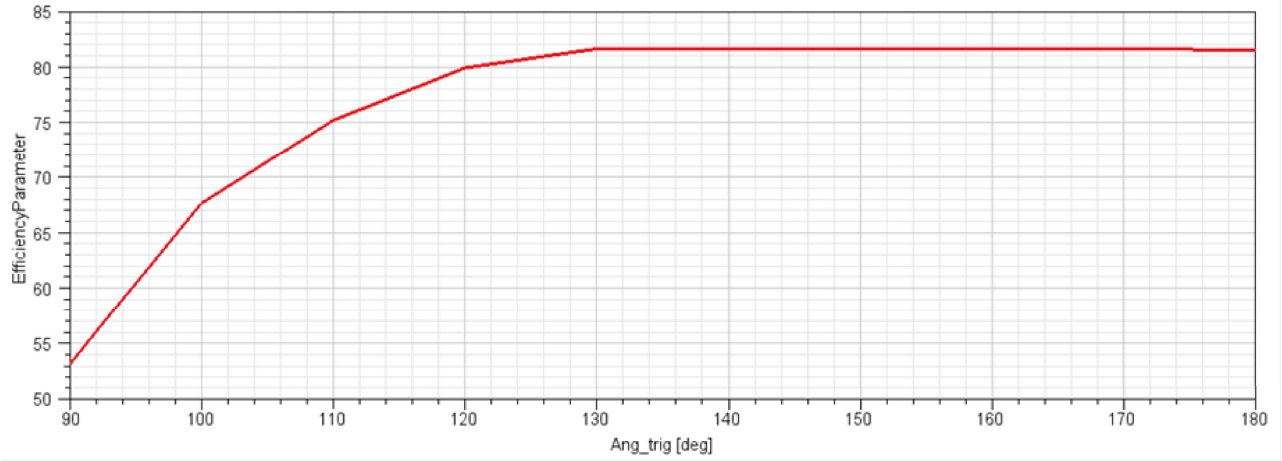



Figura 3.24: Parametrización de la eficiencia de salida con el parámetro fijado en 40° y velocidad nominal.

*Los rangos de simulación para los ángulos serán los mostrados en el procedimiento de parametrización, pero el rango entregado por los gráficos es el resultado de las simulaciones sin errores.

*Para obtener los rangos de los demás parámetros, se eligió la mejor configuración de ángulos para el punto nominal.

### 3.6.4. Procedimiento de parametrización

Es importante mencionar que existirán dos tipos de parametrizaciones realizadas en esta memoria, la primera será para los ángulos del controlador y la segunda para los demás parámetros configurados. Para los dos ángulos, se realizará una parametrización conjunta en los puntos de operación elegidos. Esta parametrización se llevará a cabo primero para determinar los ángulos de funcionamiento de cada velocidad. Luego, la parametrización de las demás variables se realizará en el punto de operación nominal, utilizando los ángulos encontrados para este punto.

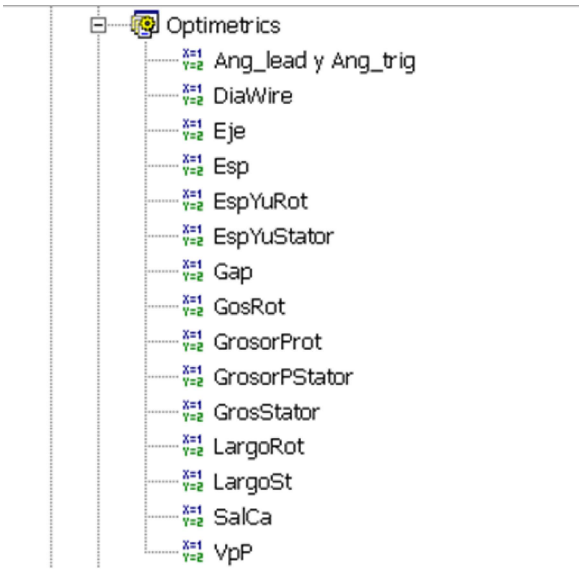



Figura 3.25: Parametrizaciones realizadas para la MRC.

Para todas las parametrizaciones mostradas en la figura 3.25, se ajustarán valores amplios y, mediante la parametrización, se determinarán los rangos del “DOE”. A continuación, se mostrará el procedimiento de la parametrización de los ángulos, empezando por la figura 3.26. La diferencia con la configuración de las demás variables es que estas son individuales y se realizan solo con el punto nominal.

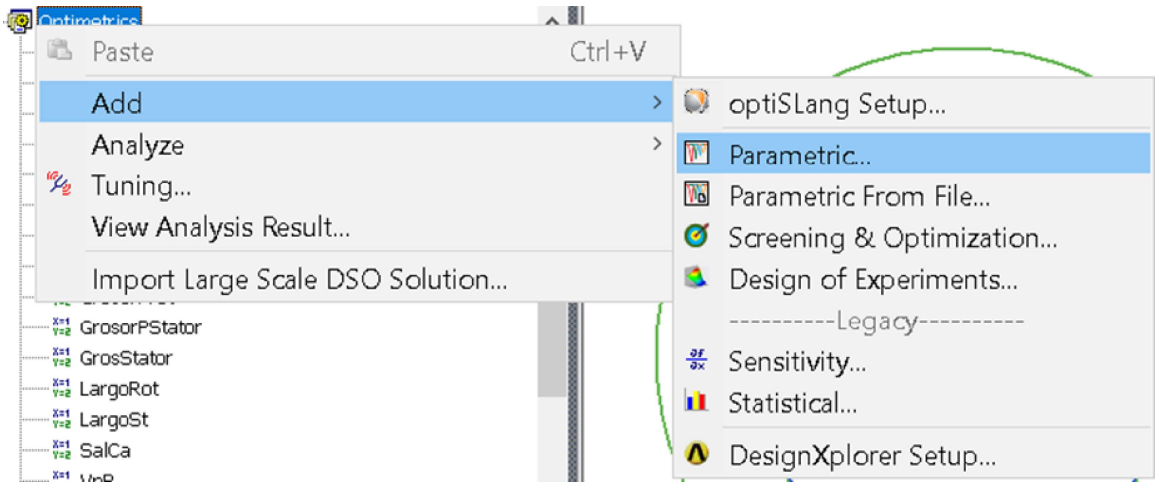



Figura 3.26: Añadir parametrización.

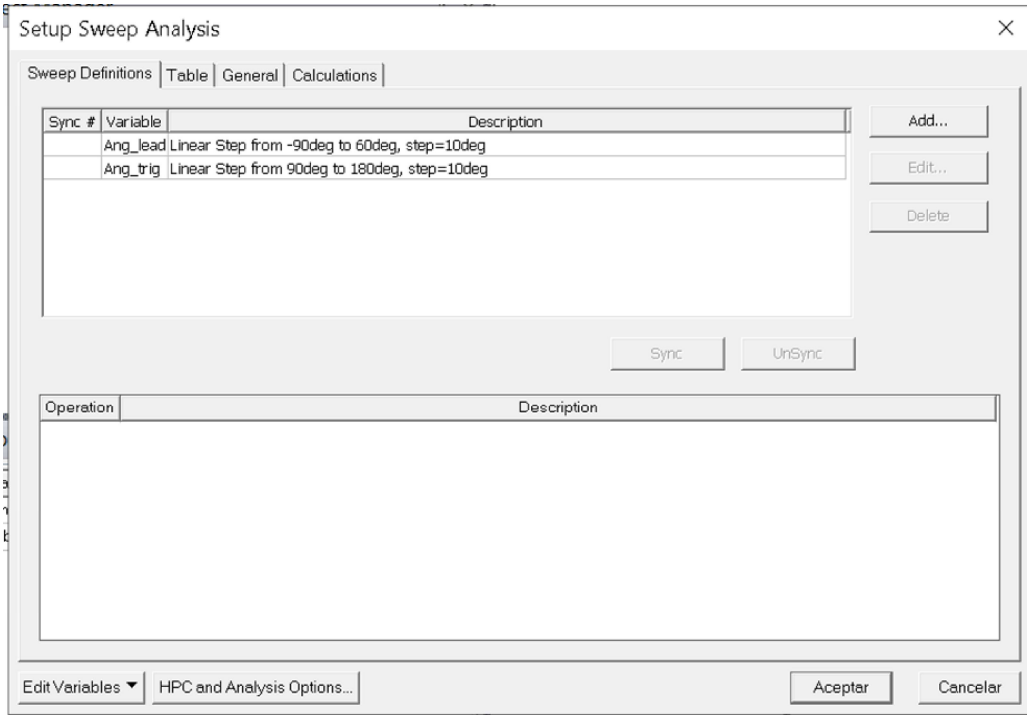



Figura 3.27: Configuración de la parametrización en la pestaña "Sweep Definitions".

En la pestaña de “Optimetrics“ ” se agrega una solución paramétrica y se añade un paso lineal para cada variable, mostrado en las figuras 3.26 y 3.27.

Luego, se configuran los “Setup” que se requieren analizar, presentado en la figura 3.28. Además, se eligen los valores iniciales de las demás variables del proyecto. Es importante mencionar que se analizaron otros puntos de operación, además de los utilizados en esta memoria, ya que inicialmente se había planificado utilizar más puntos de operación, pero debido a limitaciones del programa, estos valores no fueron considerados.

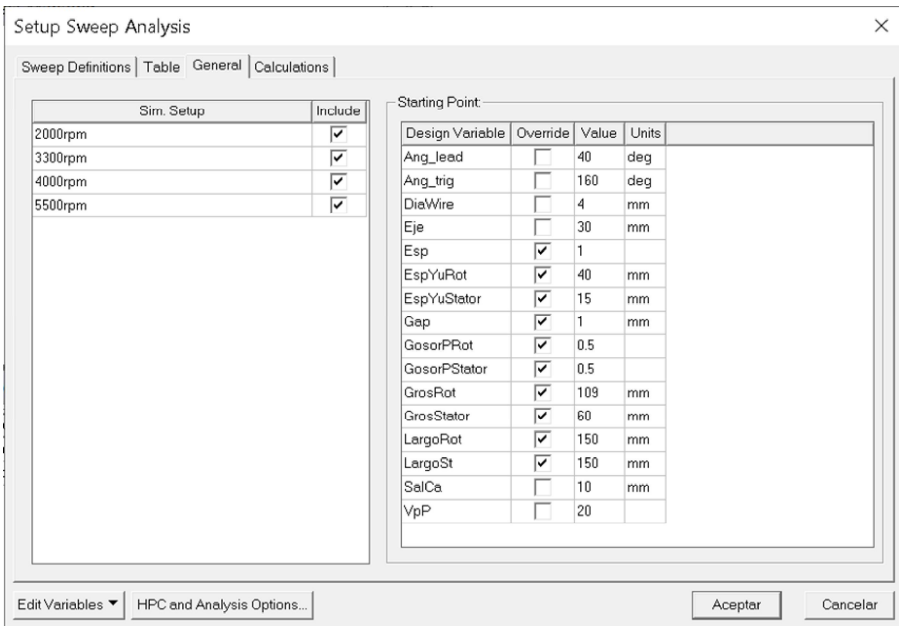



Figura 3.28: Configuración de la parametrización en la pestaña General.

Por último, se eligen todas las características que se requieren analizar en la simulación, como lo indica en la figura 3.29.

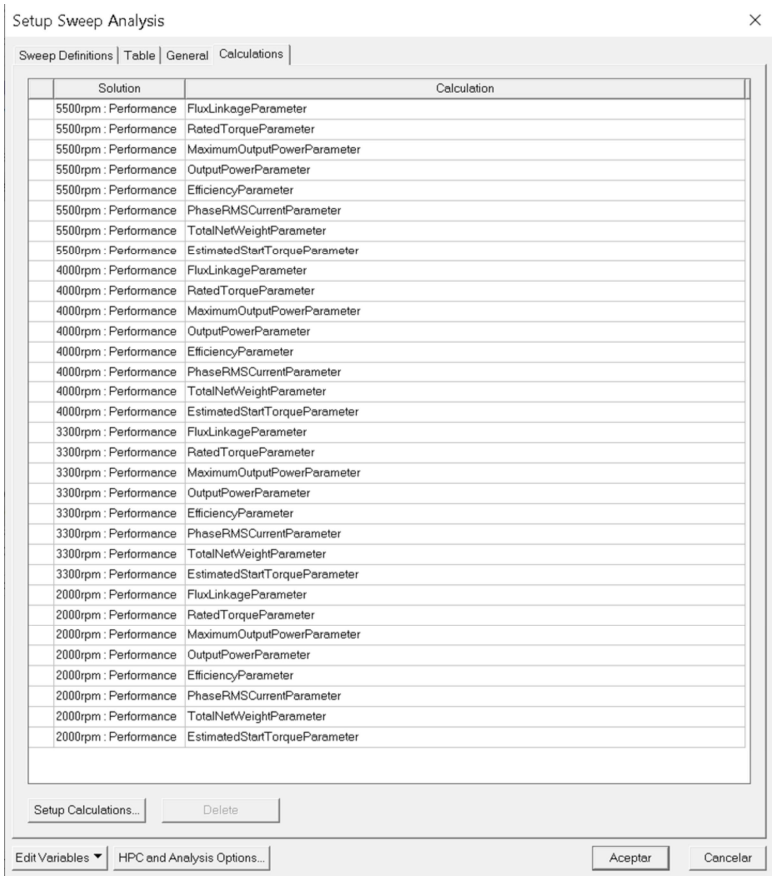



Figura 3.29: Características definidas para analizar.

### 3.6.5. Función "Cost"

El objetivo de la función "Cost" es ser minimizada. En general, un valor más cercano a cero indica que la máquina tiene mejores especificaciones. Esta función se compone de las características más importantes de la MRC que se optimizarán. Las características consideradas son la eficiencia, el torque, el peso y el factor de llenado.

**Eficiencia, E (%)**

La eficiencia se desea maximizar. Lo ideal es alcanzar un valor igual o mayor a la eficiencia del motor de referencia, que es aproximadamente del 96 %. Sin embargo, se ajusta a 100 % para considerar un mayor peso. La fórmula mostrada a continuación incluye el factor $K_e$, que es variable y se ajustará dependiendo del proceso de optimización y la simulación específica. La formulación es la siguiente:

$$\text{Cost}(E) = -(100 - E_1) \cdot K_e \tag{3.20}$$

**Peso, P (kg)**

El peso se minimizará y se considerará aceptable si se aproxima al valor del peso del motor de

referencia, aunque se ajustará a un valor ligeramente más bajo, 30 kg, para aumentar la relevancia de este parámetro. La formulación es la siguiente:

$$\text{Cost}(P) = (30 - P) \cdot K_p \tag{3.21}$$

**Volumen, V (l)**

Otro parámetro relevante a minimizar es el volumen activo de la máquina, que se calculará con el diámetro exterior del estator y su longitud, incluyendo las cabezas de bobinas. El valor ajustado en la fórmula 3.23 será el del volumen del motor de referencia.

$$V = \pi \cdot D_s^2 \cdot L_t \cdot 0.25, \tag{3.22}$$

$$\text{Cost}(V) = (3.9 - V) \cdot K_v \tag{3.23}$$

$D_s$: Diámetro exterior del estator

$L_t$: Longitud total del estator, incluyendo cabezas de bobinas

**Torque, T (Nm)**

Este parámetro dependerá del punto de operación y su valor debe ser preciso. Es decir, no se busca minimizar o maximizar el torque, sino mantener el valor correspondiente al punto de operación en cuestión ($T_{po}$). Por lo tanto, se utilizará la función de valor absoluto para que, al ser minimizado, este se mantenga en el valor del torque deseado. La formulación es la siguiente:

$$\text{Cost}(T_1) = -\frac{|\text{Tpo} - T_1|}{K_t} \tag{3.24}$$

**Factor de llenado de espacios o "Fill Factor" ("FF")**

Un desafío importante al optimizar la MRC es el factor de llenado de espacio por los conductores en los polos del estator. Este parámetro está definido internamente y no puede ajustarse ni limitarse directamente desde el programa. Por ello, se incluyó como una variable de limitación dentro de la configuración del optimizador. El valor del factor de llenado se calculó de forma aproximada, con un error general inferior al 6 %. Para este cálculo, se utilizaron las áreas internas y externas del estator, obteniendo el área total al restarlas. Esta área incluye tanto el área de los polos como el área entre polos, que corresponde al espacio disponible para los conductores y es esencial para calcular el factor de llenado. El área de los polos se determina mediante la variable "GrosorPStator", un porcentaje que relaciona el grosor de los polos con el diámetro interior del estator, indicando qué proporción del perímetro interior ocupan los polos. Posteriormente, para calcular el factor de llenado, se evalúa el área ocupada por los conductores considerando su diámetro total (incluyendo aislación), el número

de vueltas por polo y la configuración de polos. En la figura 3.30, se presenta las áreas y variables mencionadas.

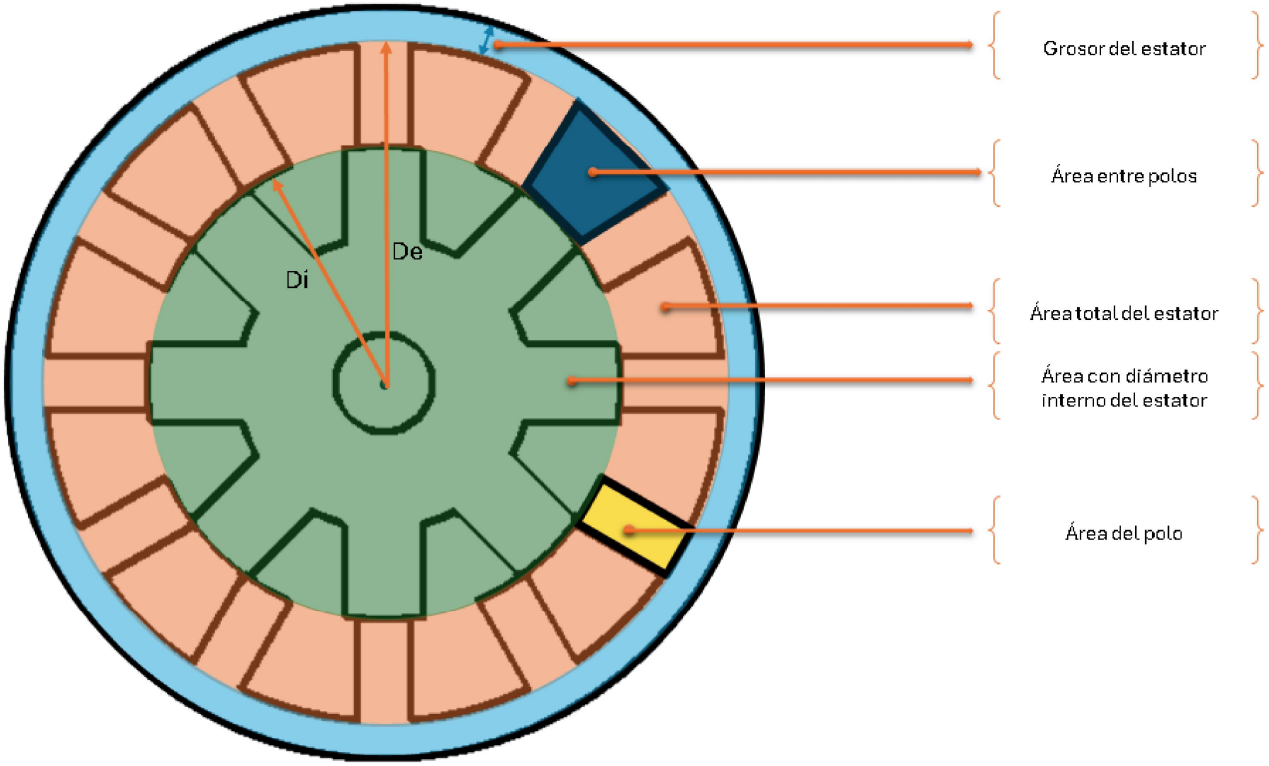



Figura 3.30: Descripción de áreas de la MRC.

La formulación es la siguiente, considerando que la fórmula del "Fill Factor" es una proporción en porcentaje entre el área de los conductores y el área entre polos:

$$A_{ts} = A_{de} - A_{di}, \tag{3.25}$$

$$A_{tp} = P_{di} \cdot \text{GrosorPStator} \cdot (D_e - D_i), \tag{3.26}$$

$$A_{ep} = A_{ts} - A_{tp}, \tag{3.27}$$

$$FF = 100 \cdot \left( \frac{A_{tc}}{A_{ep}} \right), \tag{3.28}$$

$$\text{Cost}(FF) = -|50 - FF| \cdot K_f, \tag{3.29}$$

$A_{de}$: Área con el diámetro externo del estator, restándole el grosor del estator.

$A_{di}$: Área con el diámetro interior del estator.

$A_{tp}$: Aproximación del área total de los polos.

$P_{di}$: Perímetro del estator con el diámetro interior.

$A_{ep}$: Área total entre los polos.

$A_{tc}$: Área total transversal de los conductores.

$FF$: Factor de llenado de espacios.

$A_{ts}$: Área total del estator.

$D_e$: Diámetro exterior.

$D_i$: Diámetro interior.

$K_f$: Coeficiente para el factor de llenado.

**Función "cost" completa**

Finalmente, la función "cost" completa será la suma de todas las demás funciones:

$$\text{Cost}(E,P,V,T,FF) = -(100-E)\cdot K_e + (30-P)\cdot K_p + (3.9-V)\cdot K_v - |\text{Tpo}-T|\cdot K_t - |50-FF|\cdot K_f \tag{3.30}$$

Al dejar la expresión de la función "Cost" de esta manera, se tendrá un mayor control para la optimización. Se podrán modificar las constantes $K$ para ajustar la función a los requerimientos de cada modelo. En los casos donde exista más de un solo punto de optimización, habrá más factores de torque y eficiencia.

# Capítulo 4

# Simulación y resultados

## 4.1. Optimización

La optimización comenzará por el módulo “Design of Experiment”, mencionado en la sección teórica, el cual reducirá el número de experimentos. Se considerarán los rangos para las variables mencionados en la tabla de la sección “Variables para la optimización”. Los mejores resultados que entregue esta herramienta se optimizarán con el algoritmo multiobjetivo adaptativo que posee el módulo “Optimization”, centrándose en optimizar las características del motor, como la eficiencia, peso, torque, volumen y factor de llenado ideales para los puntos de operación seleccionados. Luego, para las variantes optimizadas más prometedoras, se observará el comportamiento transitorio en Maxwell 2D para analizar el torque variable producido.

Inicialmente, la optimización se centrará en filtrar las configuraciones de polos que sean idóneas para las características deseadas. Tras encontrar la configuración o configuraciones adecuadas, se crearán nuevos “DOE” con más ejemplos y se optimizarán las mejores opciones. Se creará un gráfico de Pareto para comparar las múltiples soluciones optimizadas, considerando la densidad de potencia y eficiencia. En la figura 4.1, se mostrará un diagrama que resume la optimización realizada.

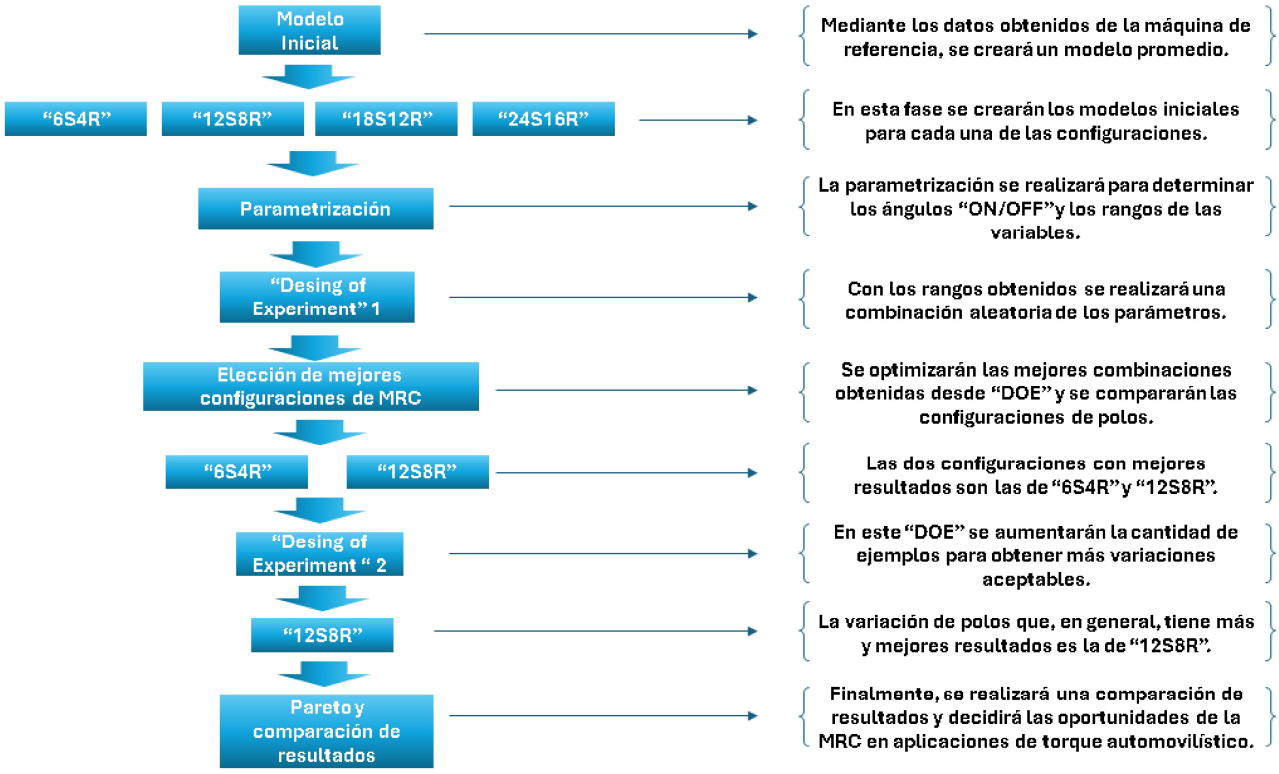



Figura 4.1: Esquema general del proceso de optimización.

### 4.1.1. Módulo: “Design of Experiments (DOE)”

En esta herramienta se analizarán los rangos de las variables en los modelos iniciales para reducir la cantidad de simulaciones necesarias para la optimización. El algoritmo seleccionado para la realización del “DOE” será el diseño de relleno de espacios óptimos (DRE), dado que los parámetros estarán configurados para un extenso número de variaciones, buscando una distribución uniforme con un menor número de puntos y mayor información. Por lo tanto, para la configuración del DRE, se elegirá la opción de Máxima-Mínima Distancia.

Es importante mencionar que las elecciones de las diferentes alternativas estarán guiadas por el “cost” asignado, siempre que cumplan con los rangos del factor de llenado. Esta característica es esencial, ya que se han optimizado ejemplos con un factor de llenado superior al 60 % , lo cual, en la mayoría de los casos, produce resultados falsos o no significativos.

### 4.1.2. Procedimiento del módulo: “Design of Experiments”

A continuación, se presenta el procedimiento realizado para la configuración del “DOE”, iniciando desde su creación en el programa.

En la pestaña de “Optimetrics”, se creará un “Design of Experiments”,mostrado en la figura 4.2, configurando el tipo de diseño en “Optimal Space-Filing Design” y su subtipo en “Max-min Distance”, realizado en la figura 4.3. El número máximo de ciclos que tendrá el algoritmo para generar los puntos de diseño será de diez; este valor afecta la calidad del diseño, pero también implica un mayor tiempo de simulación. Por lo tanto, se dejó en el valor recomendado por el programa para veinte variables. El número de ejemplos se configuró entre 2000 y 4000, debido a las limitaciones computacionales, ya que un número mayor ocasionaba que el programa se detuviera al generar la matriz de las variables.

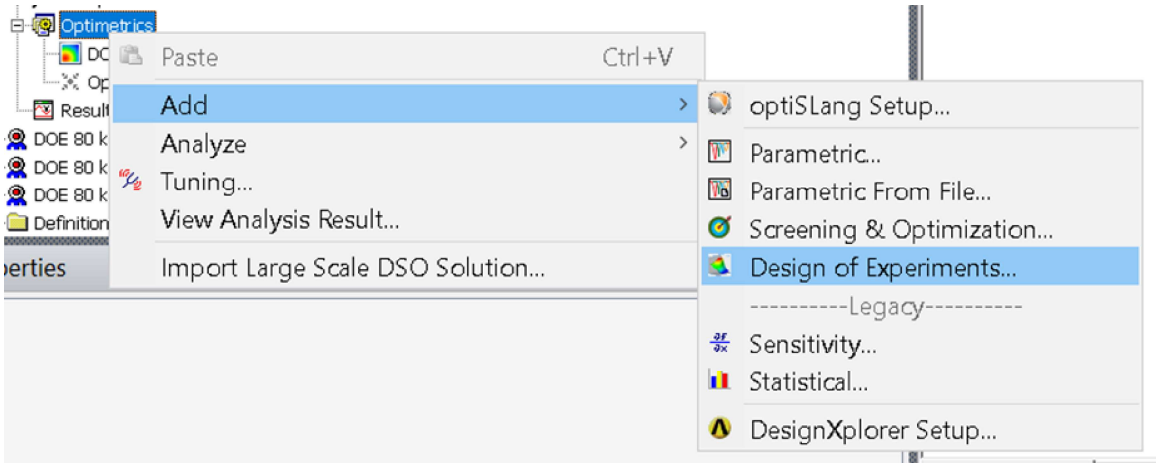



Figura 4.2: Añadir el “Design of experiments”.

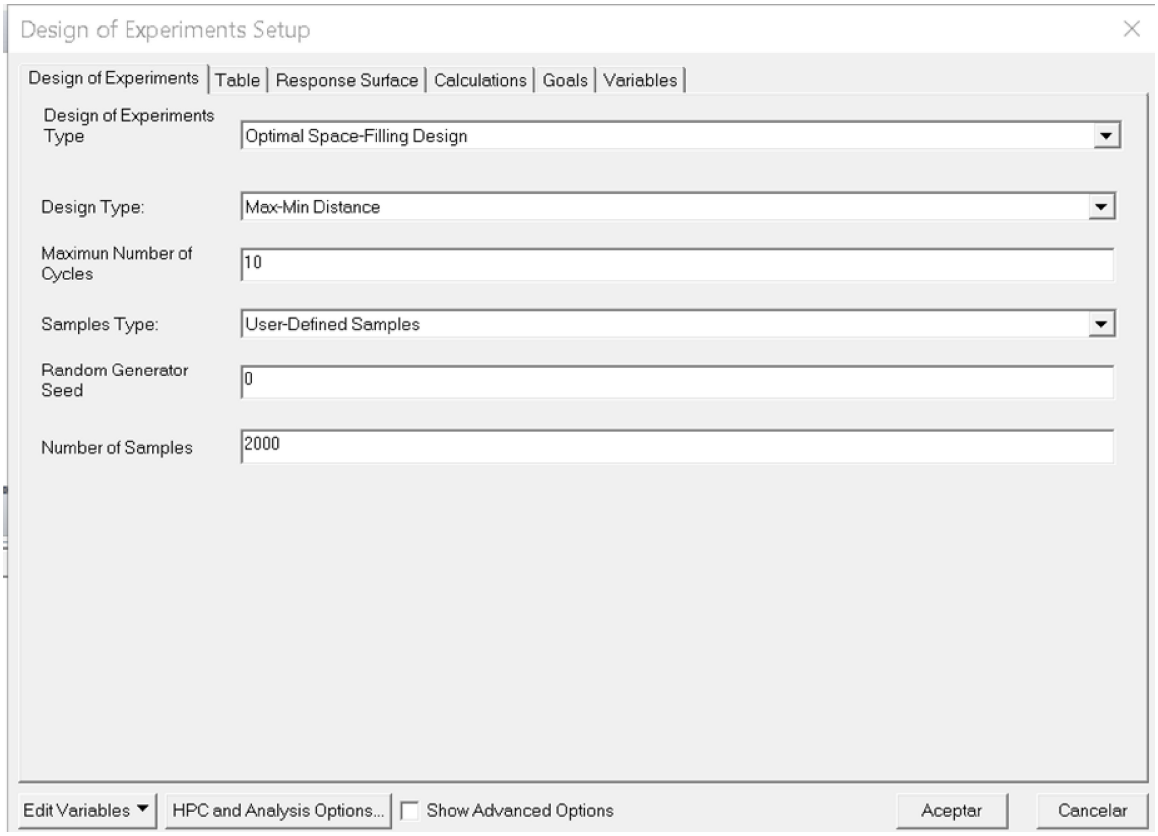



Figura 4.3: Configuración inicial del “Design of Experiments”.

En la figura 4.4, se prepararon los cálculos que el “DOE” debería mostrar, destacando las características buscadas para la primera fase de optimización del motor de “12S8R” polos. En la pestaña “Calculations”, se debe seleccionar la solución y su respectivo cálculo de características deseadas. Además, se configuran los cálculos del factor de llenado y el volumen de la máquina, facilitando la identificación de qué máquinas entregan información verídica y cuáles entregan información falsa, dado que el programa puede calcular ejemplos con un factor de llenado irreal.

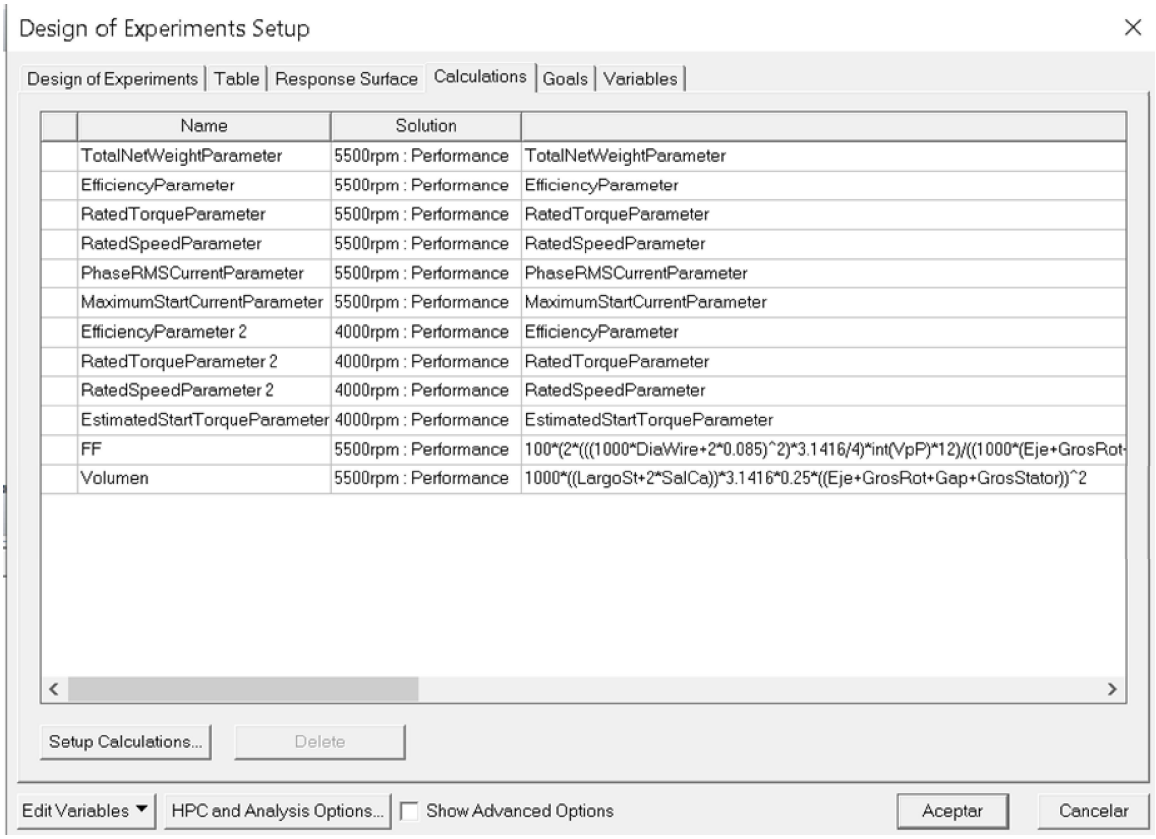



Figura 4.4: Configuración de cálculos en el “Design of Experiments”.

Para filtrar los ejemplos con las mejores características, se configura la función “Cost”,en la pestaña "Goal"mostrado en la figura 4.5 en el “DOE”, que posee factores “K” iniciales para optimizar. Estos factores se decidieron en función de optimizaciones anteriores, considerando que cada uno de estos factores del “Cost” está igualado a 0 como meta.

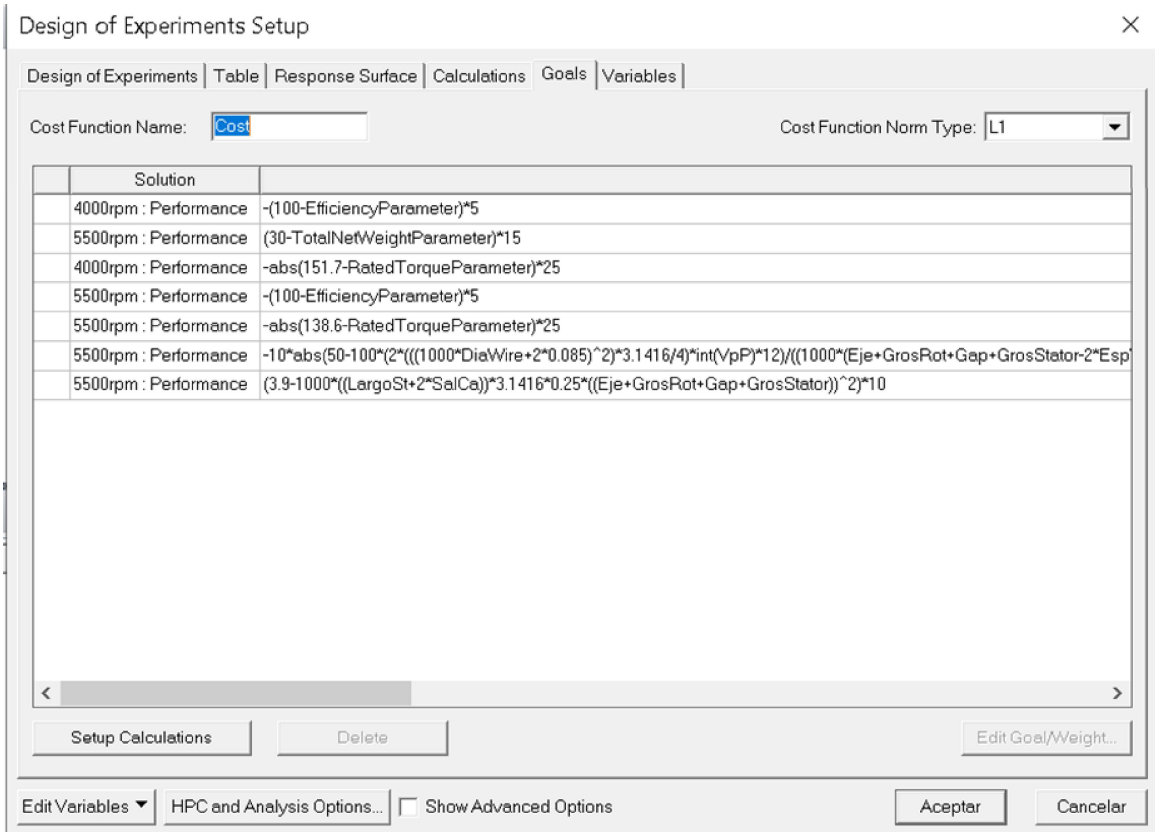
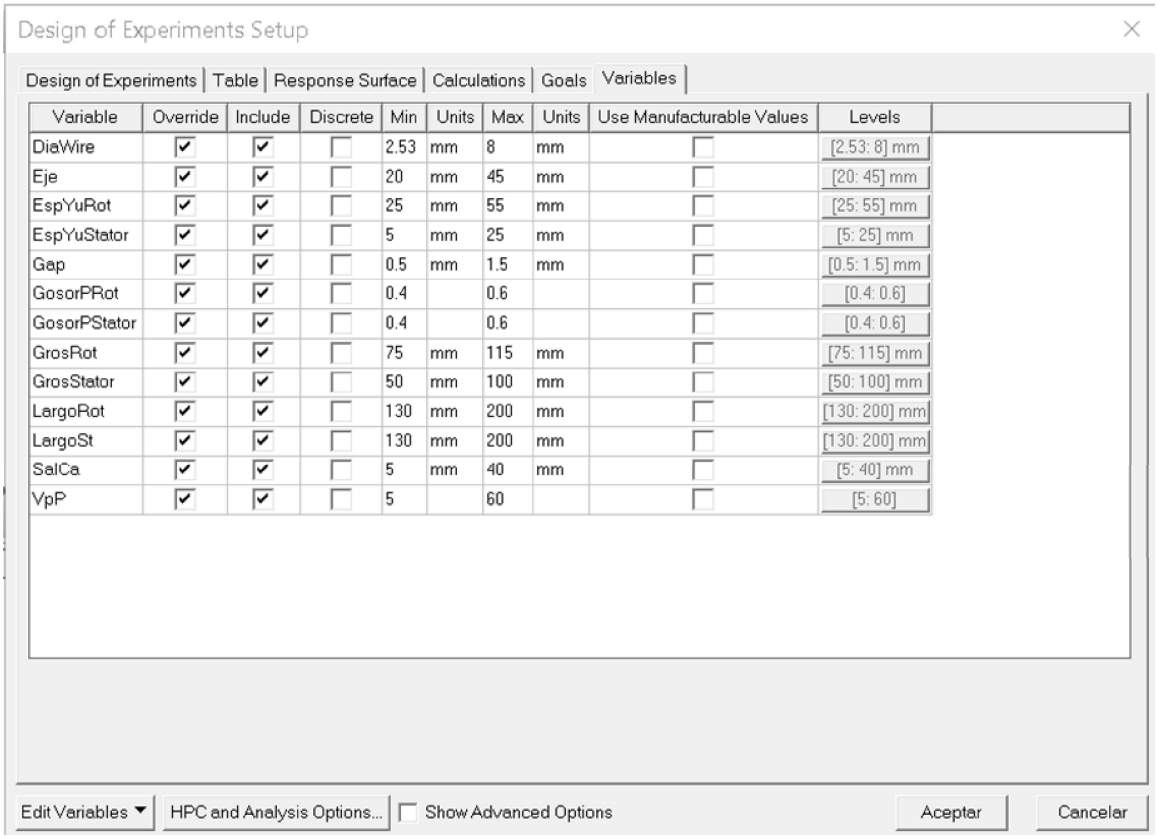



Figura 4.5: Configuración de la función “Cost” en el “Design of Experiments”.

Por último, se configuran las variables y rangos, que fueron inicialmente obtenidos en base al motor de referencia y posteriormente acotados con la herramienta paramétrica, mostrado en la figura 4.6.




| Variable | Override | Include | Discrete | Min | Units | Max | Units | Use Manufacturable Values | Levels |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DiaWire | ✓ | ✓ | | 2.53 | mm | 8 | mm | | [2.53: 8] mm |
| Eje | ✓ | ✓ | | 20 | mm | 45 | mm | | [20: 45] mm |
| EspYuRot | ✓ | ✓ | | 25 | mm | 55 | mm | | [25: 55] mm |
| EspYuStator | ✓ | ✓ | | 5 | mm | 25 | mm | | [5: 25] mm |
| Gap | ✓ | ✓ | | 0.5 | mm | 1.5 | mm | | [0.5: 1.5] mm |
| GosorPRot | ✓ | ✓ | | 0.4 | | 0.6 | | | [0.4: 0.6] |
| GosorPStator | ✓ | ✓ | | 0.4 | | 0.6 | | | [0.4: 0.6] |
| GrosRot | ✓ | ✓ | | 75 | mm | 115 | mm | | [75: 115] mm |
| GrosStator | ✓ | ✓ | | 50 | mm | 100 | mm | | [50: 100] mm |
| LargoRot | ✓ | ✓ | | 130 | mm | 200 | mm | | [130: 200] mm |
| LargoSt | ✓ | ✓ | | 130 | mm | 200 | mm | | [130: 200] mm |
| SalCa | ✓ | ✓ | | 5 | mm | 40 | mm | | [5: 40] mm |
| VpP | ✓ | ✓ | | 5 | | 60 | | | [5: 60] |

Figura 4.6: Configuración de los rangos de las variables en el “Design of Experiments”.

### 4.1.3. Módulo: “Optimization”

En la optimización, se utilizará la función objetivo “Cost” para optimizar el diseño del motor según las especificaciones deseadas. Las características a optimizar incluyen la eficiencia, el peso activo, el volumen activo, el factor de llenado y el torque de la máquina. Esta última característica debe mantenerse en los valores nominales o en el valor de torque de otro punto de operación de la máquina de referencia.

La función “Cost” creada se basa en los parámetros del motor base, los puntos a optimizar y las características propias del programa “Ansys Electronics Desktop” y su interfaz. Por lo tanto, se considera más eficiente configurar que el punto ideal de optimización se alcanza cuando la función “Cost” es mínima; es decir, en general, a menor valor del “Cost”, mejores características posee la máquina. Sin embargo, este valor está relacionado con los valores de los factores K, por lo que no necesariamente una variante es mejor que otra solo por tener un menor “Cost”. Para las comparativas, se generará un “Cost” unitario que muestre verídicamente las mejores configuraciones.

### 4.1.4. Procedimiento del módulo: “Optimization”

En esta sección se presentan los pasos para la configuración del módulo de optimización en la primera fase. Este procedimiento se realizará inmediatamente después de la simulación de “DOE” para optimizar los mejores ejemplos obtenidos.

Desde la pestaña “Optimetrics”, se elige el módulo de “Screening & Optimization”, mostrado en la figura 4.7. En la figura 4.8, se configurarán las subfunciones de la función “Cost” y el ajuste del algoritmo optimizador a “Adaptive Multiple-Objective (Random Search)”. Se configura internamente para que posea una variación estimada de 625, lo que en realidad entrega aproximadamente 1030 variaciones. Esta configuración se establece porque la optimización tiende a estabilizarse con esta cantidad de variaciones, como se muestra en la figura 4.9, por lo que realizar una mayor cantidad es un desperdicio de recursos computacionales. Es relevante mencionar que el tiempo que demora el programa en simular las 1030 variaciones es de aproximadamente una hora.

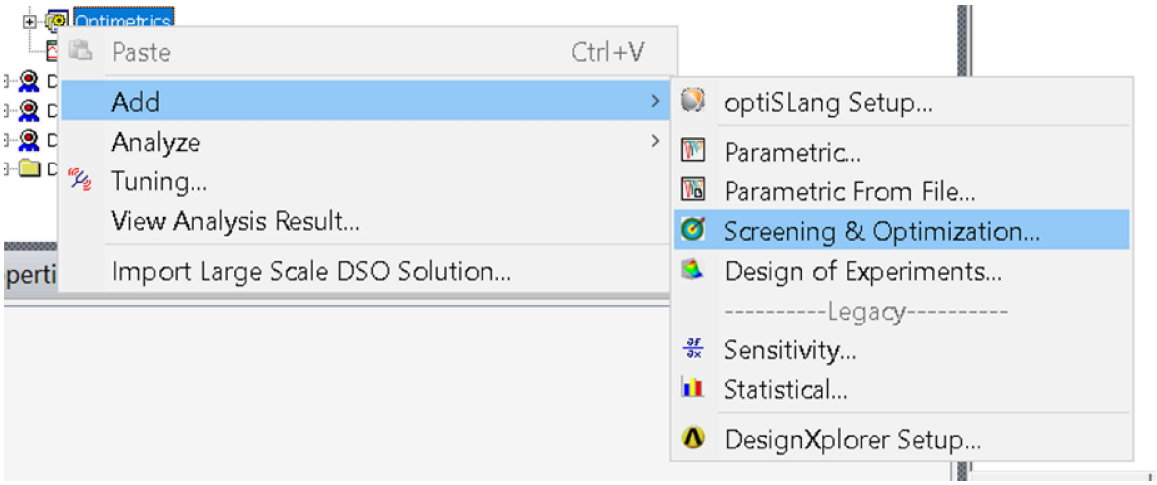



Figura 4.7: Añadir módulo de “Optimization”.

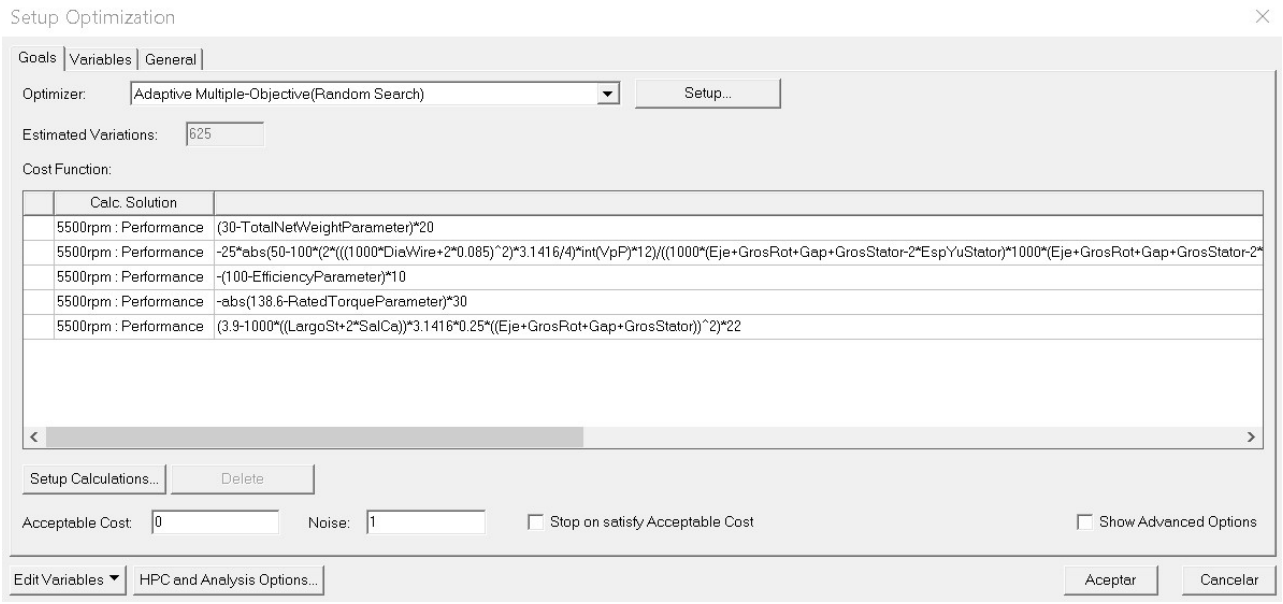



Figura 4.8: Configuración general del módulo “Optimization”.

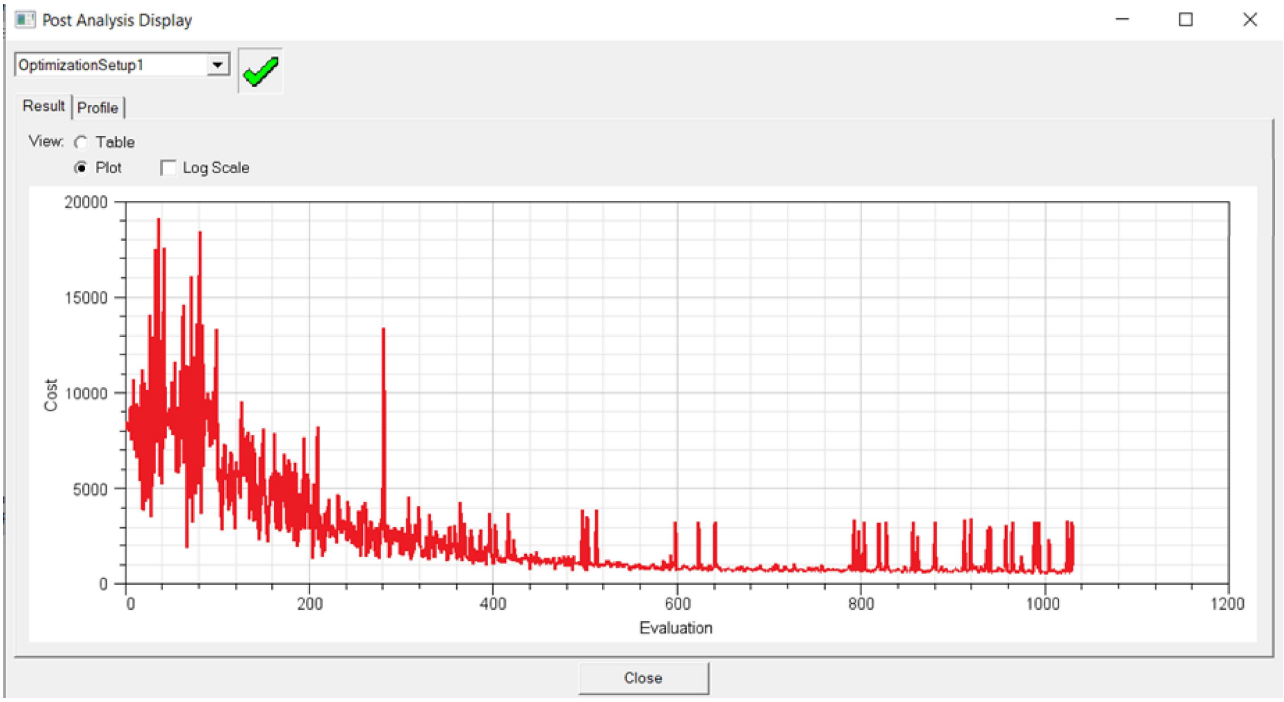
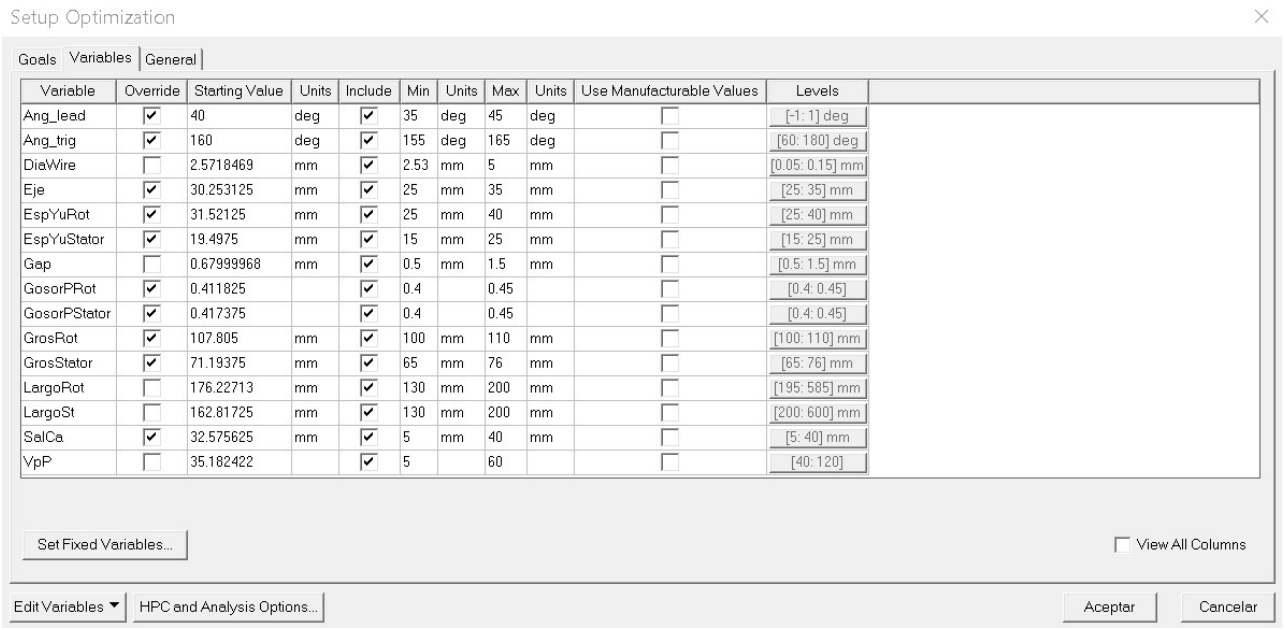



Figura 4.9: Ejemplo de estabilización de la curva de optimización.

Por último en la figura 4.10, se ajustan las variables y su rango para la optimización, las cuales dependen de cada máquina, ya que se acotan en un ±10 % del valor inicial de cada ejemplo funcional obtenido del “DOE”. Esta acotación es necesaria para asegurar que el optimizador no falle en casi ninguna variación, de lo contrario, la optimización se desploma. Se acotan las variables más pro-

blemáticas que pueden generar errores, mientras que las demás se mantienen en rangos amplios del "DOE".




| Variable | Override | Starting Value | Units | Include | Min | Units | Max | Units | Use Manufacturable Values | Levels |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ang_lead | ☑ | 40 | deg | ☑ | 35 | deg | 45 | deg | ☐ | [-1: 1] deg |
| Ang_trig | ☑ | 160 | deg | ☑ | 155 | deg | 165 | deg | ☐ | [60: 180] deg |
| DiaWire | ☐ | 2.5718469 | mm | ☑ | 2.53 | mm | 5 | mm | ☐ | [0.05: 0.15] mm |
| Eje | ☑ | 30.253125 | mm | ☑ | 25 | mm | 35 | mm | ☐ | [25: 35] mm |
| EspYuRot | ☑ | 31.52125 | mm | ☑ | 25 | mm | 40 | mm | ☐ | [25: 40] mm |
| EspYuStator | ☑ | 19.4975 | mm | ☑ | 15 | mm | 25 | mm | ☐ | [15: 25] mm |
| Gap | ☐ | 0.67999968 | mm | ☑ | 0.5 | mm | 1.5 | mm | ☐ | [0.5: 1.5] mm |
| GosorPRot | ☑ | 0.411825 | | ☑ | 0.4 | | 0.45 | | ☐ | [0.4: 0.45] |
| GosorPStator | ☑ | 0.417375 | | ☑ | 0.4 | | 0.45 | | ☐ | [0.4: 0.45] |
| GrosRot | ☑ | 107.805 | mm | ☑ | 100 | mm | 110 | mm | ☐ | [100: 110] mm |
| GrosStator | ☑ | 71.19375 | mm | ☑ | 65 | mm | 76 | mm | ☐ | [65: 76] mm |
| LargoRot | ☐ | 176.22713 | mm | ☑ | 130 | mm | 200 | mm | ☐ | [195: 585] mm |
| LargoSt | ☐ | 162.81725 | mm | ☑ | 130 | mm | 200 | mm | ☐ | [200: 600] mm |
| SalCa | ☑ | 32.575625 | mm | ☑ | 5 | mm | 40 | mm | ☐ | [5: 40] mm |
| VpP | ☐ | 35.182422 | | ☑ | 5 | | 60 | | ☐ | [40: 120] |

Figura 4.10: Configuración de rangos de variables para la optimización.

### 4.1.5. Primera fase de optimización

En esta primera fase se llevará a cabo una optimización conjunta para las cuatro configuraciones de polos elegidas: "6S8R", "12S8R", "18S12R" y "24S16R". Se realizará un "DOE" de 2000 ejemplos para cada configuración y se seleccionarán las mejores máquinas para optimizarlas. Las características generales se compararán en una función "Cost" con constantes K iguales, con la intención de crear un filtro para identificar la configuración óptima. Esta optimización se efectuará considerando dos puntos de operación. En la figura 4.11, se presenta un diagrama de cajas de cada configuración, a menor valor de la función "Cost", más cercanos estarán los resultados a los valores óptimos.

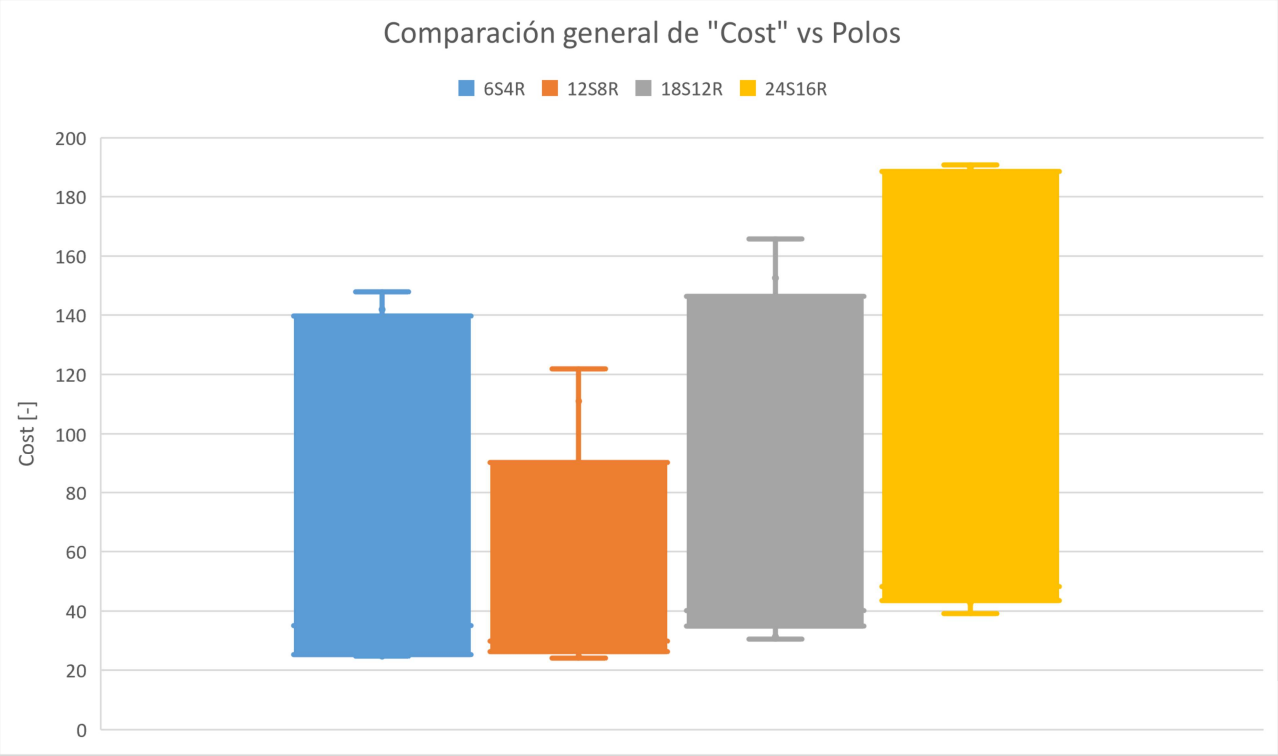



Figura 4.11: Diagrama de cajas: Comparación general de “Cost” vs Configuración de polos.

Como se observa en el gráfico anterior, las configuraciones con mejores características en general son las “12S8R” y “6S4R”. Por lo tanto, en la siguiente fase se optimizarán estas dos configuraciones.

### 4.1.6. Segunda fase de optimización

En esta fase se optimizarán las configuraciones “12S8R” y “6S4R”, filtrándose las mejores opciones para crear un gráfico de Pareto que muestre la densidad de potencia gravimétrica y volumétrica en función de la eficiencia. Estos gráficos mostrará el comportamiento general de la MRC optimizada. La optimización se llevará a cabo en base al punto de operación nominal, debido a que el programa presenta una limitación significativa que impide abordar múltiples puntos de optimización de manera realista. Esta limitación afecta el control adecuado de las variables para un rango específico de velocidades, lo que repercute en los ángulos “ON” y “OFF” del controlador, los cuales no pueden ser idénticos para todo el rango de velocidades. Estos ángulos son cruciales para controlar el torque, la eficiencia y otras características de la máquina, por lo que deben ser precisos para cada velocidad. Por lo tanto, la optimización centrada en el punto de operación nominal solo servirá para comparar las características de la MRC con la máquina de referencia, sin ofrecer una solución adecuada y optimizada para todo el rango de velocidades. En las figuras 4.12 y 4.13, se presentan los gráficos de densidad de potencia de la MRC considerando las mejores variaciones optimizadas.

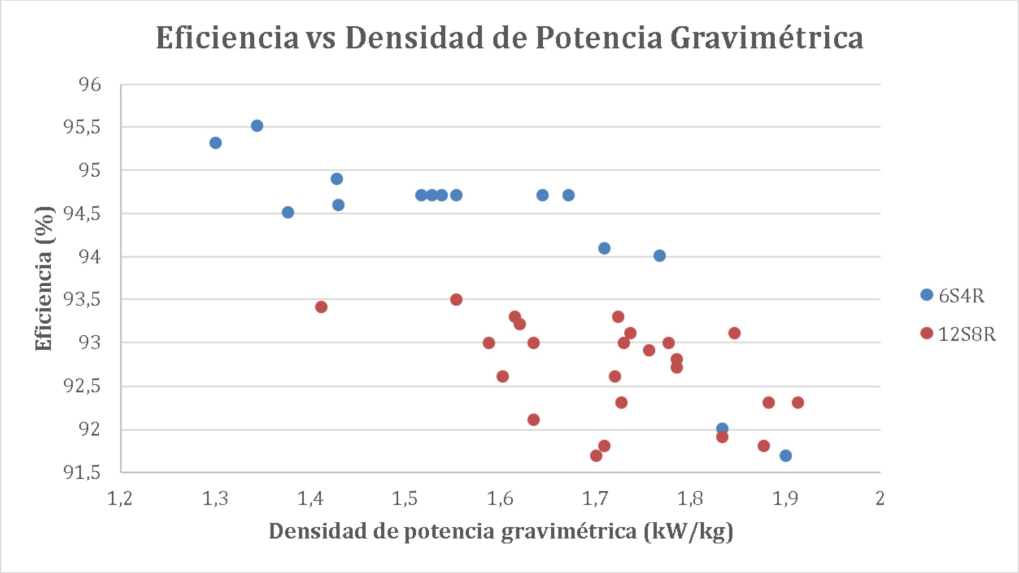



Figura 4.12: Gráfico de Pareto: eficiencia vs densidad de potencia gravimétrica.

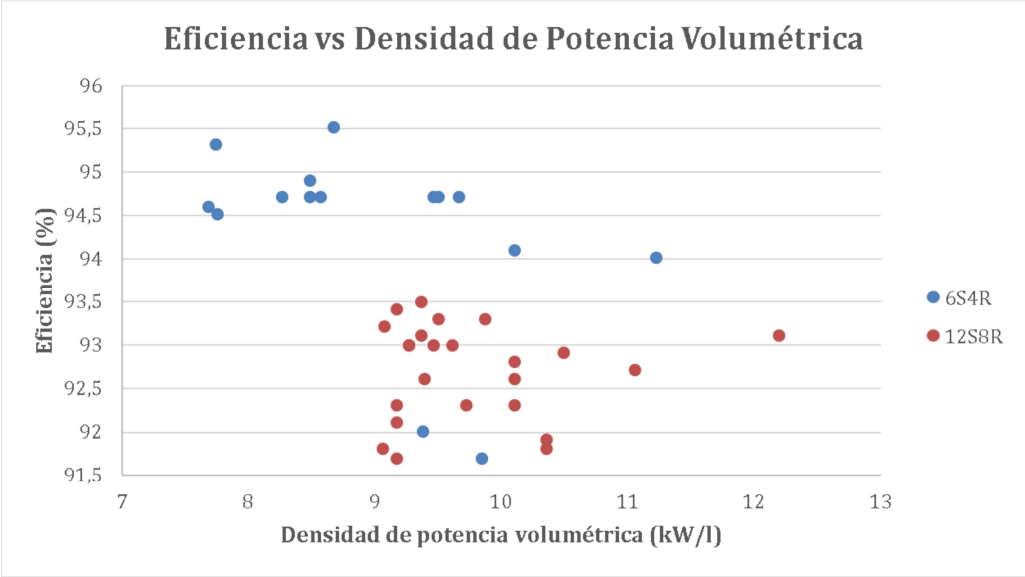



Figura 4.13: Gráfico de Pareto: eficiencia vs densidad de potencia volumétrica.

En general, estos gráficos muestran las características de la MRC. Aunque la configuración “6S4R” destaca por su eficiencia, tiende a ser más grande y pesada, lo cual son dos características fundamentales en el torque automotriz. Al comparar la MRC con la máquina de referencia sincrónica de imanes permanentes, se observa que la MRC es inferior en todas sus características, tanto en eficiencia como en volumen y peso. Sin embargo, todas las MRC presentan un torque de arranque mayor que el de la máquina de referencia, aunque la limitación de los ángulos en el programa impide considerar esto como una característica verídica.

### 4.1.7. Optimización transitoria

La optimización transitoria se realizó con algunas variaciones finales optimizadas, aunque se consideran resultados no concluyentes. Esto se debe a que no existe un acoplamiento entre los módulos; aunque el programa puede crear simulaciones Maxwell 2D o 3D desde el módulo RMxprt y analizar sus características transitorias, parámetros críticos como el peso y el factor de llenado real no se incluyen en la optimización. Es posible realizar cálculos matemáticos aproximados utilizando áreas y variables para obtener estas características, pero ello disminuiría la veracidad de las simulaciones. En resumen, el traspaso del modelo desde el módulo RMxprt al Maxwell 2D o 3D es útil para observar las características transitorias de las máquinas, pero no para llevar a cabo una optimización topológica.

Por otro lado, se consideró realizar un proceso para enlazar ambos módulos dentro del programa. Sin embargo, debido a que la programación en Python se encuentra en fase beta y sus aplicaciones están centradas principalmente en el análisis de antenas y la creación de modelos simples simulables en Maxwell 2D, este proceso no se llevó a cabo. El programa aún está en desarrollo para la simulación de máquinas eléctricas rotativas, especialmente para las MRC.

## 4.2. Comparación de la máquina de referencia con la MRC en Maxwell 2D

En esta sección se comparará la máquina de referencia con una de las máquinas optimizadas en Maxwell 2D, el cual simula su comportamiento transitorio. Esta comparación se realiza con el propósito de simular ambas máquinas en el mismo software y módulo. Para la máquina de referencia, se exportaron los datos desde Motor-CAD, mientras que para la MRC optimizada, se exportó el modelo desde RMxprt.

### 4.2.1. Controlador transitorio de la MRC

El controlador para la MRC se creó en Simplored, un entorno enfocado en la realización de circuitos eléctricos. Su optimización es estática, lo que significa que los ángulos “ON” y “OFF” no varían durante la simulación. Está compuesto por seis “IGBT” con diodos volantes para limitar las sobre tensiones y diodos en serie para liberar la energía almacenada por las bobinas de la MRC. El controlador mostrado a continuación se optimizó para el modelo “Doe 80 kW 12S8R 110 D4”, elegido para la comparación transitoria.

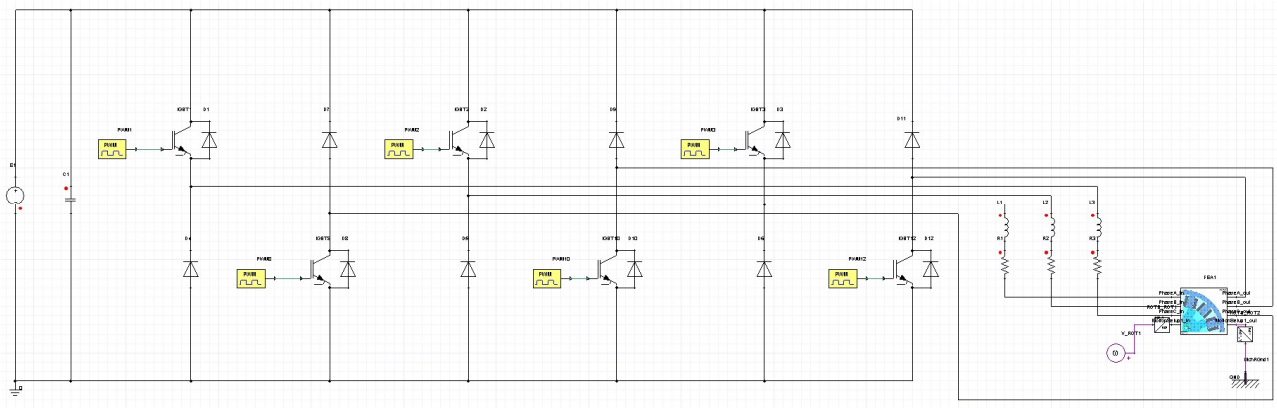


Figura 4.14: Circuito de control de la MRC

### 4.2.2. Comparación de torque

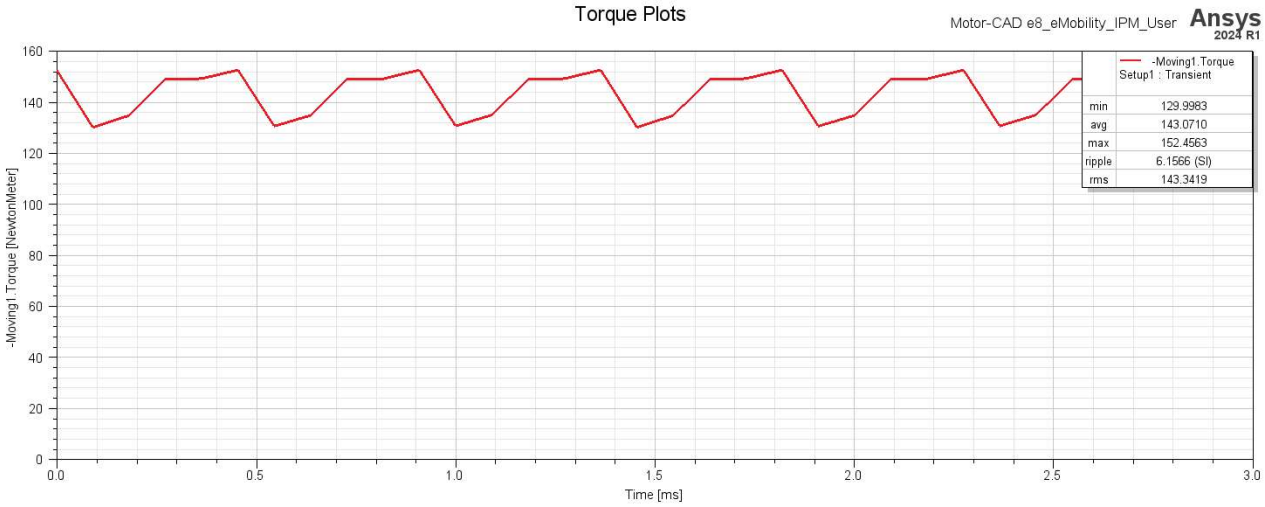



Figura 4.15: Torque transitorio de la máquina sincrónica de referencia.

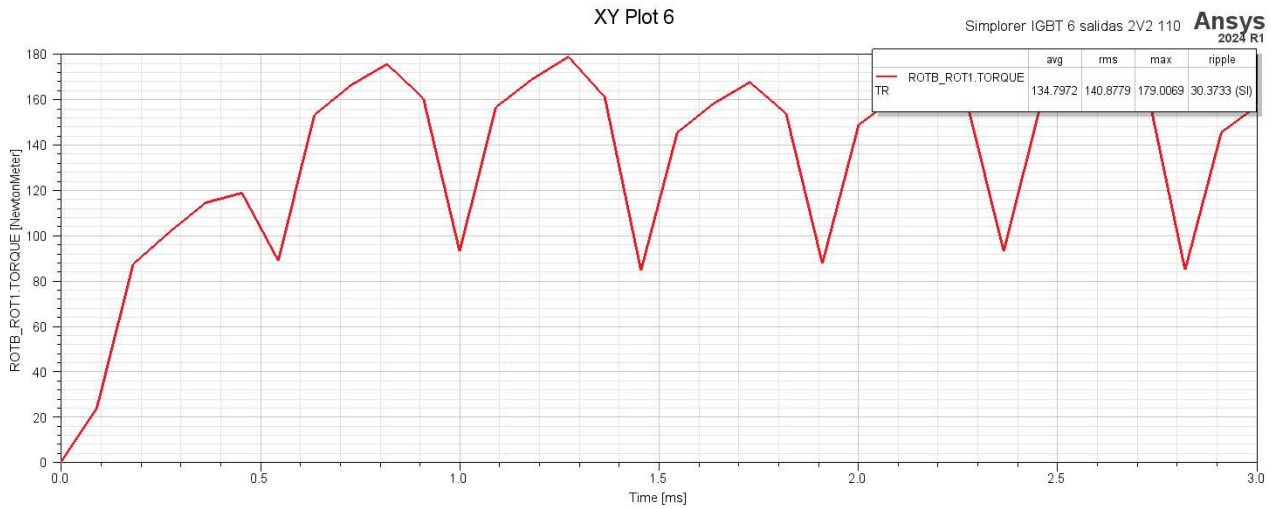



Figura 4.16: Torque transitorio de la MRC variación “12S8R” 110 D4.

Se puede observar, en las figuras 4.15 y 4.16, que la principal diferencia en el torque de las máquinas es su variación, la MRC posee un torque variable aproximadamente 5 veces mayor que el de la máquina sincrónica.

### 4.2.3. Comparación de tensiones

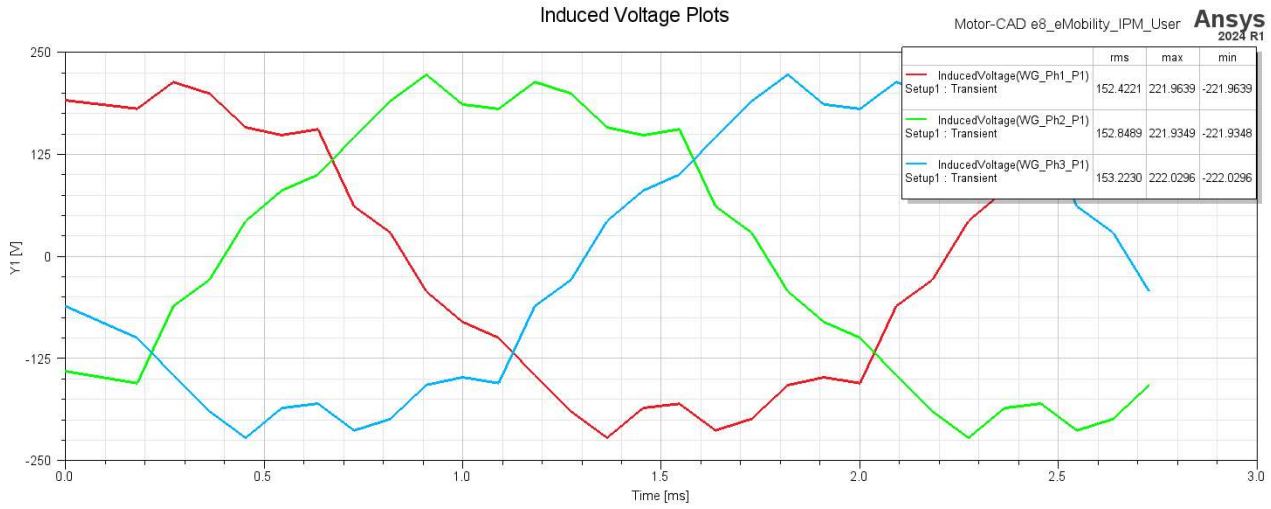



Figura 4.17: Tensión transitoria de la máquina sincrónica de referencia.

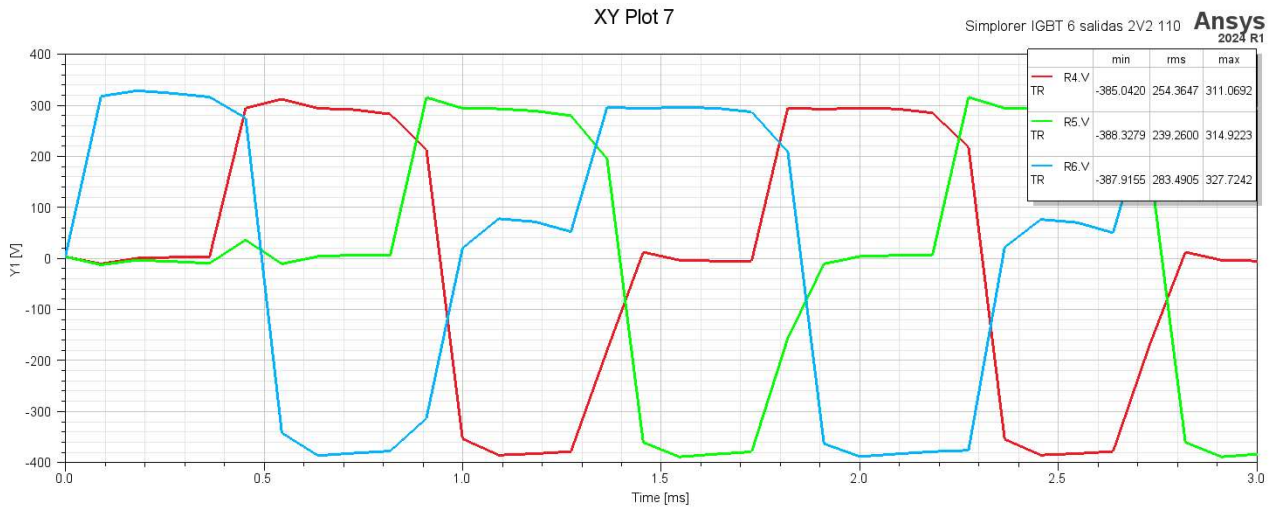



Figura 4.18: Tensión transitoria de la MRC variación “12S8R” 110 D4.

Las tensiones presentadas en las figuras 4.17 y 4.18, son propias de las características de cada máquina y su controlador. En este caso, se utiliza un control orientado al campo con inversores “PWM” para la máquina sincrónica “IPM” y un control de conmutación por IGBT para la MRC. Como dato adicional, la tensión negativa generada por la MRC puede ser almacenada, lo que disminuye la carga de la fuente de alimentación; esto se logra mediante un controlador adecuado y un sistema de condensadores.

### 4.2.4. Comparación de corrientes

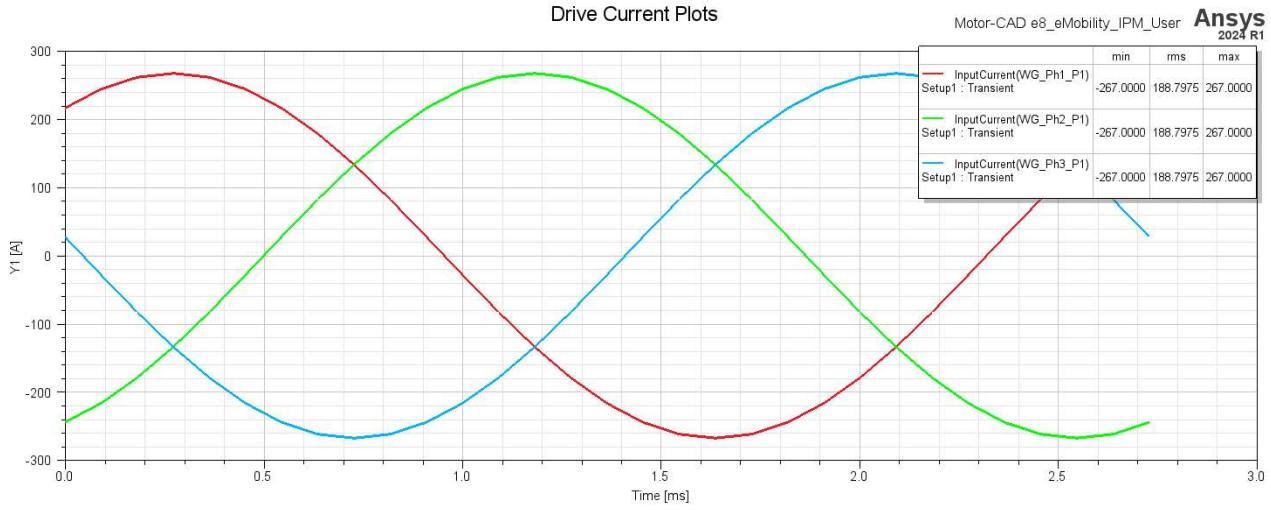



Figura 4.19: Corriente transitoria de la máquina sincrónica de referencia.

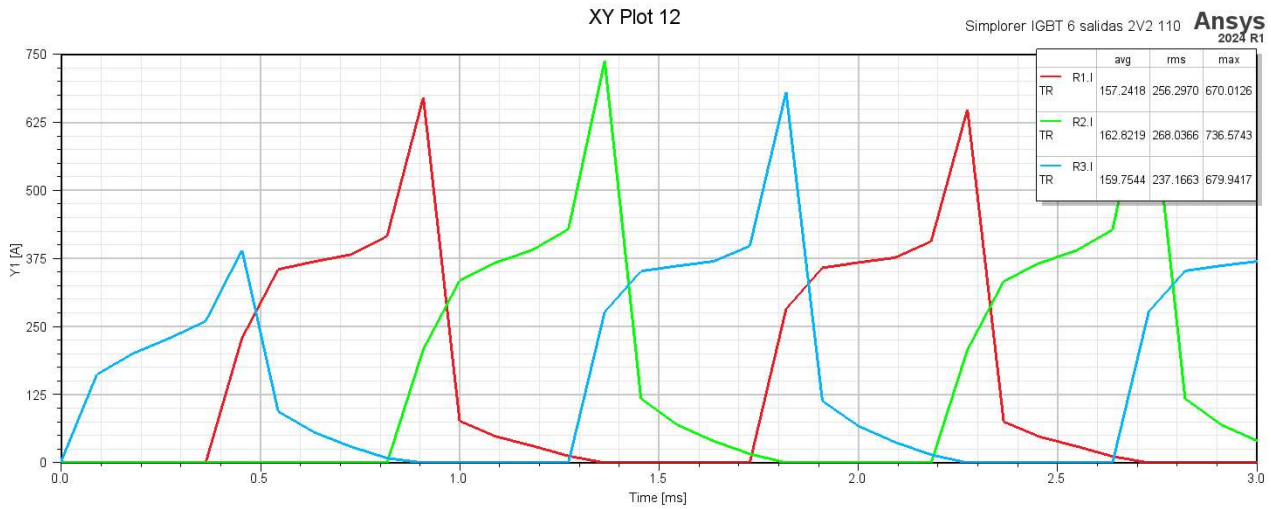



Figura 4.20: Corriente transitoria de la MRC variación 12S8R 110 D4.

En las corrientes, presentadas en las figuras 4.19 y 4.20, se puede observar una de las mayores diferencias entre las máquinas. Para la máquina sincrónica, se presenta una corriente suave y sinusoidal, mientras que para la MRC, la corriente es positiva y presenta un “peak” cuando los polos están alineados. Estos "picos"de corriente pueden ser reducidos mediante un control más preciso.

## 4.3. Problemas y dificultades de los programas utilizados

### 4.3.1. Programa para la optimización, Ansys Electronics Desktop

El programa Ansys Electronics Desktop presenta características variadas y puede ser utilizado para una amplia gama de aplicaciones, aunque aún no se encuentra completamente desarrollado. Posee limitaciones significativas, especialmente para la MRC, ya que, aunque el programa pueda simular y optimizarla, no está totalmente dedicado a este tipo de máquina. A continuación, se detallan los problemas y limitaciones encontrados al simular y optimizar la MRC.

Aunque el programa permite realizar ciertos comandos mediante código Python, su funcionalidad, especialmente para el módulo RMxprt, es prácticamente nula, debido a que los comandos están desactualizados y presentan inconsistencias. A menudo, las funciones especificadas en la documentación oficial no coinciden con las implementadas en el programa, lo que dificulta su uso debido a discrepancias en el número o tipo de variables. Por lo tanto, no fue posible utilizar un código de programación para acelerar y automatizar la optimización. En contraste, los códigos para los módulos Maxwell son más completos y funcionan correctamente, aunque aún están limitados, ya que el sistema basado en Python se encuentra en fase Beta.

Otro punto relevante es el tratamiento de variables propias del sistema, como el factor de llenado para la MRC, el cual no se puede obtener directamente desde el programa. Esto conlleva a la necesidad

de crear una aproximación del valor, resultando en una optimización menos precisa. Además, para este tipo de máquina, el factor de llenado no puede ser limitado o configurado, a diferencia de las máquinas sincrónicas que tienen un parámetro configurable para restringir esta variable. El programa tampoco limitaba el factor de llenado, lo que podría resultar en casos erróneos con un llenado mayor al 100 %.

Un aspecto esencial que se debe abordar es la configuración de ángulos. Aunque no se exponga en esta memoria, se intentó crear una función para los ángulos "ON" y "OFF" que dependiera de la velocidad de la máquina, lo cual no fue posible. No se pudo obtener ni modificar en "tiempo real" los ángulos de la máquina; los cambios podían ser realizados por el optimizador, pero este, a pesar de ser multiobjetivo, no permitía implementar un rango de ángulos específicos para una cierta velocidad. Los ángulos podían ser modificados, pero solo para una velocidad y optimizar en base a esta, lo que limitaba considerablemente la optimización. Se percibe que el programa fue diseñado principalmente para recrear máquinas ya optimizadas y realizar su modelado computacional, en lugar de desarrollar nuevas máquinas desde el programa. Es probable que una mejor implementación de los códigos Python mejore las limitaciones actuales y permita crear optimizaciones adecuadas. Principalmente debido a este problema, no se optimizó para todo el rango de velocidades, como se había previsto, y finalmente se realizó una optimización en base al punto de operación nominal para la comparación.

Por último, el modelado en 2D o 3D que se puede crear desde RMxprt hacia Maxwell no es 100 % verídico en el bobinado, aunque la estructura de la máquina se recrea de manera idéntica. Con relación a su estructura, no existen parámetros que controlen los bordes e intersecciones de los polos con su estructura base, lo que podría suavizar las transiciones y evitar la concentración de esfuerzos mecánicos. Además, los módulos RMxprt y Maxwell no se encuentran acoplados de manera óptima; solo se puede analizar una simulación en un punto de operación específico desde RMxprt a Maxwell.

### 4.3.2. Programa Ansys Motor-CAD

Este programa es bastante completo y está 100 % dedicado a las máquinas eléctricas rotativas, incluso puede simular ciclos de trabajo especiales para automóviles eléctricos, aunque para las MRC se encuentra incompleto. A continuación, se mencionan los problemas encontrados.

La importación de modelos de MRC desde Ansys Electronics Desktop hacia Motor-CAD no es posible. Aunque se puede transformar un modelo para Motor-CAD desde AED, el programa no puede leer el contenido, lo que provoca que se congele y no responda. Se creyó inicialmente que este problema se debía a las variables establecidas en los parámetros de la máquina o al mal uso del programa, por lo que se probó con los ejemplos ya preparados en AED, pero el error persistía, impidiendo cargar cualquier máquina de este tipo. Sin embargo, desde el programa Ansys Motor-CAD, sí era posible exportar modelos a Maxwell 2D. Inicialmente se previó analizar el comportamiento tanto mecánico como térmico en este programa, pero no fue posible debido a este error.

Este programa está especializado en motores, exceptuando las MRC, ya que los comandos de optimización no pueden ser utilizados para este tipo de máquina y el módulo “Lab” no funciona adecuadamente. En el módulo “Lab”, se pueden explorar todas las características de otras máquinas en el rango de velocidad deseado y calcular las diferentes pérdidas y puntos de operación deseados, combinando de la mejor manera todos los fenómenos que afectan a las máquinas. Además, cuenta con una herramienta especial para la simulación de máquinas para automóviles, que permite analizar la máquina en un ciclo de trabajo. Incluye ciclos incorporados que son específicos para automóviles. Por lo tanto, si funcionara adecuadamente para la MRC, la comparación realizada en esta memoria sería completa e incluso se podrían simular máquinas completamente funcionales para cualquier vehículo eléctrico.

# Capítulo 5

# Conclusiones

La conclusión de esta memoria se dividirá en tres aspectos: primero, la máquina de reluctancia conmutada (MRC), que es el foco principal de este trabajo; segundo, el programa de elementos finitos utilizado para optimizar la máquina, Ansys Electronics Desktop; y, por último, el programa utilizado para obtener los datos de referencia, Ansys Motor-CAD.

## Máquina de reluctancia conmutada

La MRC presenta varios aspectos positivos que la hacen apta para aplicaciones que requieren una máquina robusta capaz de soportar condiciones extremas de funcionamiento y temperatura. Además, se caracteriza por un bajo costo y capacidades moderadas de producción y mantenimiento, aunque su diseño en el entrehierro limita su desempeño en estos aspectos. Su control, aunque costoso, le permite posicionarse favorablemente en todos los rangos de velocidades, especialmente a bajas velocidades, compitiendo con otras máquinas del mercado. Sin embargo, sus características de rendimiento, en particular su volumen, peso y torque variable, no la hacen competitiva para aplicaciones de torque automotriz.

Por otro lado, las características de la MRC pueden ser aprovechadas en otras áreas de vehículos eléctricos, que están en crecimiento en el mercado, como los camiones eléctricos de carga o los camiones de aplicación minera. Para la industria del torque automotriz, las alternativas como los motores sincrónicos y asincrónicos superan a la MRC en este ámbito.

Finalmente, a diferencia de otras máquinas rotatorias, la MRC se encuentra desactualizada o incompleta en los programas utilizados, lo que representa una desventaja en comparación con las máquinas predominantes en el mercado del torque automotriz. No se tiene conocimiento de si otros programas de simulación presentan el mismo problema, por lo que este aspecto no se consideró en la comparación.

## Programa para la optimización Ansys Electronics Desktop

El programa Ansys Electronics Desktop cuenta con una amplia selección de herramientas que pueden ser utilizadas en diversas aplicaciones. Sin embargo, presenta limitaciones significativas en la simulación de la MRC, a pesar de disponer de herramientas para realizar optimizaciones. Las restricciones en variables intrínsecas, la existencia de puntos únicos de operación, la falta de acoplamiento entre módulos y el escaso desarrollo de mecanismos para su programación hacen que sea una herramienta poco flexible para realizar optimizaciones completas. En general, se observa que abarca demasiados temas y áreas diferentes, lo que provoca inconsistencias operativas en múltiples ámbitos. A pesar de estos problemas, con las debidas actualizaciones en su programación en Python,

este programa podría convertirse en una herramienta potente para el desarrollo de componentes y productos eléctricos y electrónicos en el futuro.

## Programa Ansys Motor-CAD

Este programa, especializado en motores, sería una herramienta mucho más adecuada para la investigación realizada en esta memoria que el programa Ansys Electronics Desktop, si estuviera más completo para las MRC. Especialmente para máquinas de electromovilidad sincrónicas, se destaca como una herramienta de gran utilidad. Entre sus ventajas se encuentran los acoplamientos eficientes entre sus módulos, la rapidez de simulación, la exactitud del modelado tanto en estructura como en bobinado, y su potente modelado de laboratorio con herramientas especiales para ciclos de operación de automóviles eléctricos. En un contexto de crecimiento exponencial en esta área, se convierte en un programa esencial en la industria automotriz, y es probable que muchos motores de automóviles actuales se desarrollen utilizando este software.

## Trabajo futuro

En este punto se propondrán trabajos futuros que podrían llevarse a cabo cuando los programas Ansys adquiridos por la universidad se encuentren en una fase más actualizada y completa.

En primer lugar, cuando el programa Ansys Electronics Desktop alcance un desarrollo más avanzado en su código Python, se podría construir un código que mejore la optimización, acoplando los módulos, configurando todo el rango de velocidades y probando diferentes controladores que disminuyan el "ripple" de torque. También se podrían evaluar las condiciones de esfuerzos mecánicos y térmicos de la MRC.

Además, se sugiere probar diferentes rangos de potencia para las MRC, ya que en esta memoria se utilizó una potencia general baja. Esto permitiría verificar si se obtienen mejores condiciones de rendimiento al aplicar potencias más altas en automóviles.

Otra propuesta es realizar una investigación similar a la presentada en esta memoria, pero enfocándose en vehículos más pesados, como todoterrenos, camiones de carga o vehículos utilizados en la industria minera.

Finalmente, se podrían realizar optimizaciones de otros tipos de máquinas en los programas Ansys, como las máquinas de inducción, que, en general, presentan buenas características para aplicaciones de torque automotriz.

# Referencias


[1] B. Bilgin, *Switched reluctance motor drives: Fundamentals to applications*. CRC Press, 2019.

[2] Nissan, "Presentación del nissan leaf 2012," https://www.auto-brochures.com/makes/Nissan/Leaf/Nissan_US_Leaf_2012.pdf.

[3] Ansys Inc., *Maxwell Help, Release 2024 R1*, January 2024.

[4] E. Oberg, F. Jones, H. Horton, and H. Ryffel, *Machinery's Handbook*, 27th ed. Industrial Press Inc., 2004.

[5] A. Hughes and B. Drury, *Electric Motor and Drives, Fundamentals, Types and Applications*, 4th ed. Newnes, 2013.

[6] A. Hand, *Motor Maintenance and Troubleshooting*, 2nd ed. McGraw-Hill, 2011.

[7] EVSpecifications, "Comparación y datos nissan leaf 2011-2012," https://www.evspecifications.com/en/comparison/dca06981.

[8] International Electrotechnical Commission, *Electrical Insulation – Thermal Evaluation and Designation*, 4th ed. Geneva, 2007.

[9] M. Abdollahi, N. Vaks, and B. Bilgin, "A multi-objective optimization framework for the design of a high power-density switched reluctance motor," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022.

[10] J. Widmer, R. Martin, and B. Mecrow, "Optimization of an 80-kw segmental rotor switched reluctance machine for automotive traction," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015.

# Capítulo 6

# Anexos

## 6.1. Información extra del motor de referencia

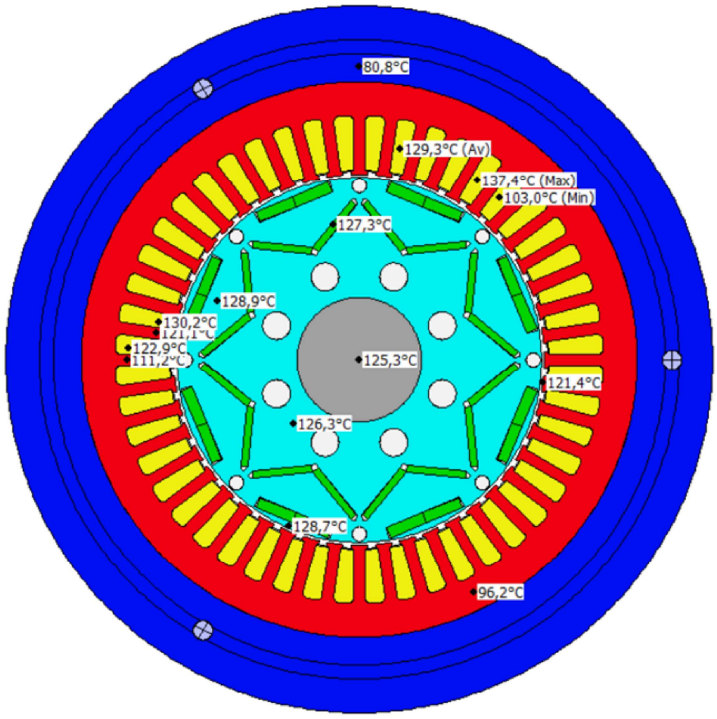



Figura 6.1: Temperaturas del motor de referencia formato radial.

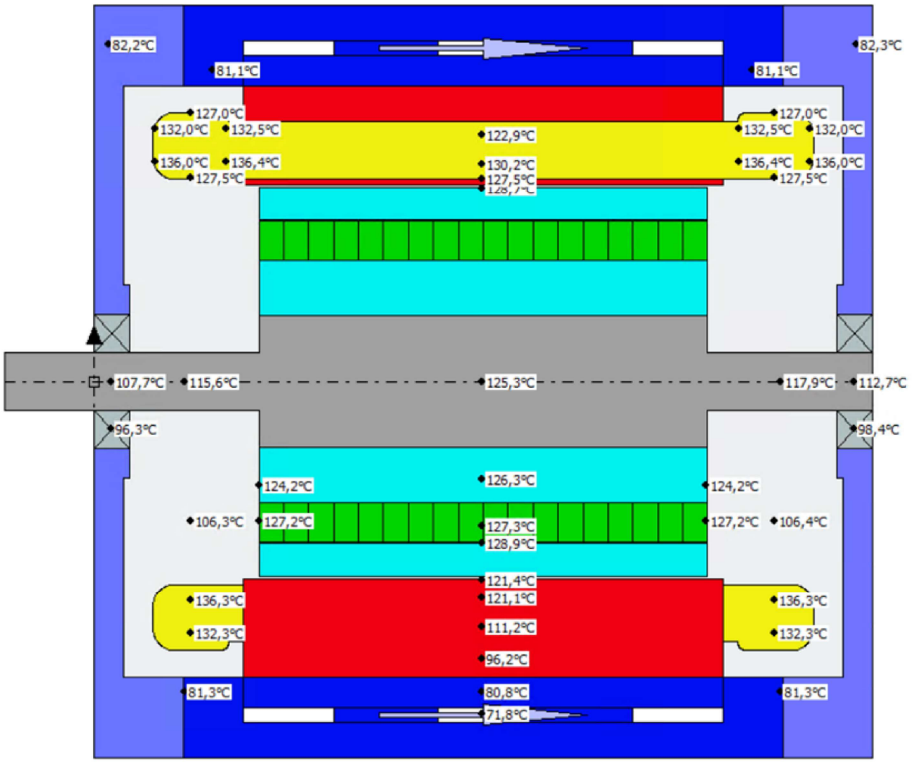



Figura 6.2: Temperaturas del motor de referencia formato axial.

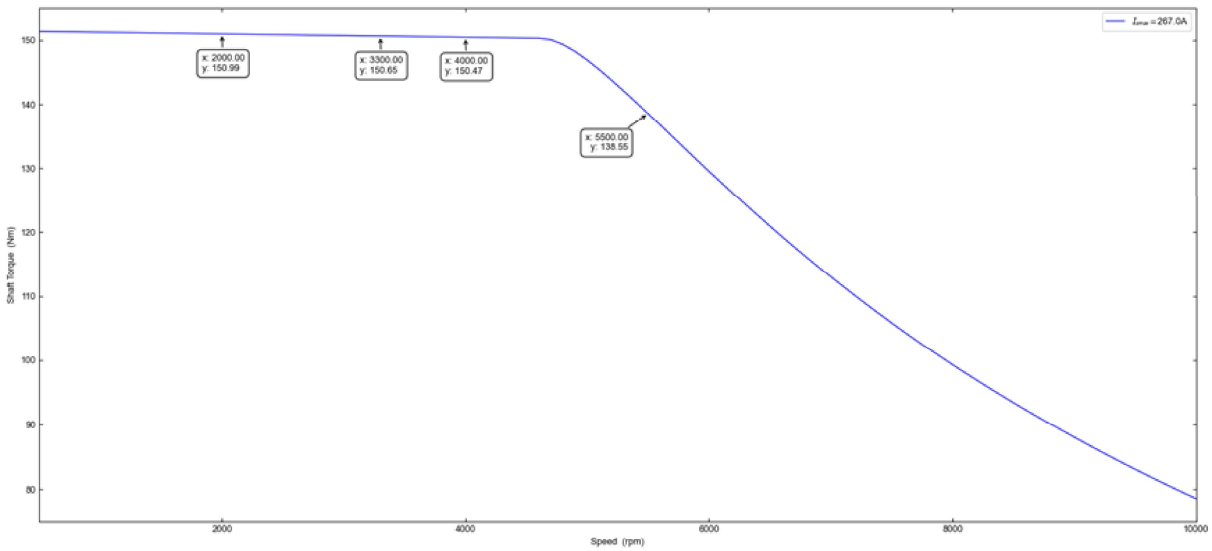



Figura 6.3: Gráfica de torque del motor de referencia.

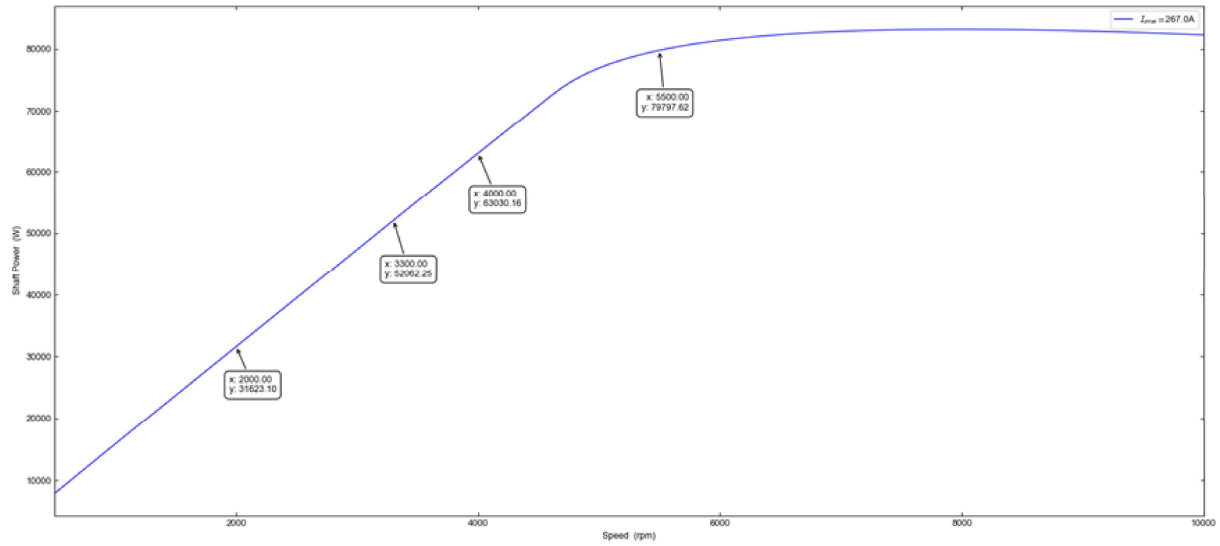



Figura 6.4: Gráfica de potencia del motor de referencia.

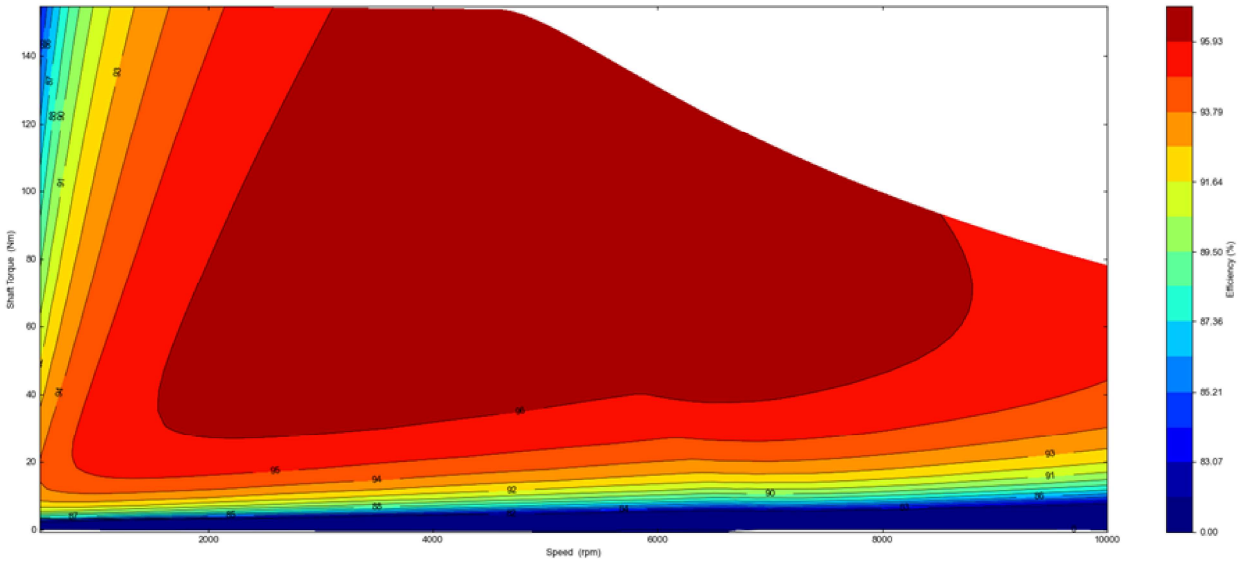



Figura 6.5: Gráfica de eficiencia del motor de referencia.

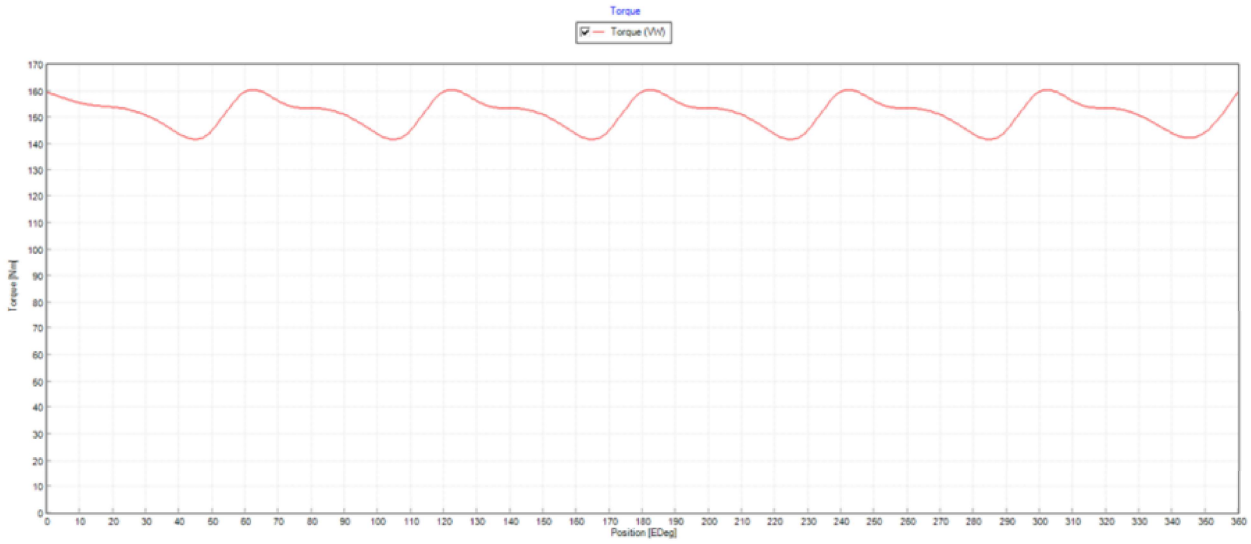
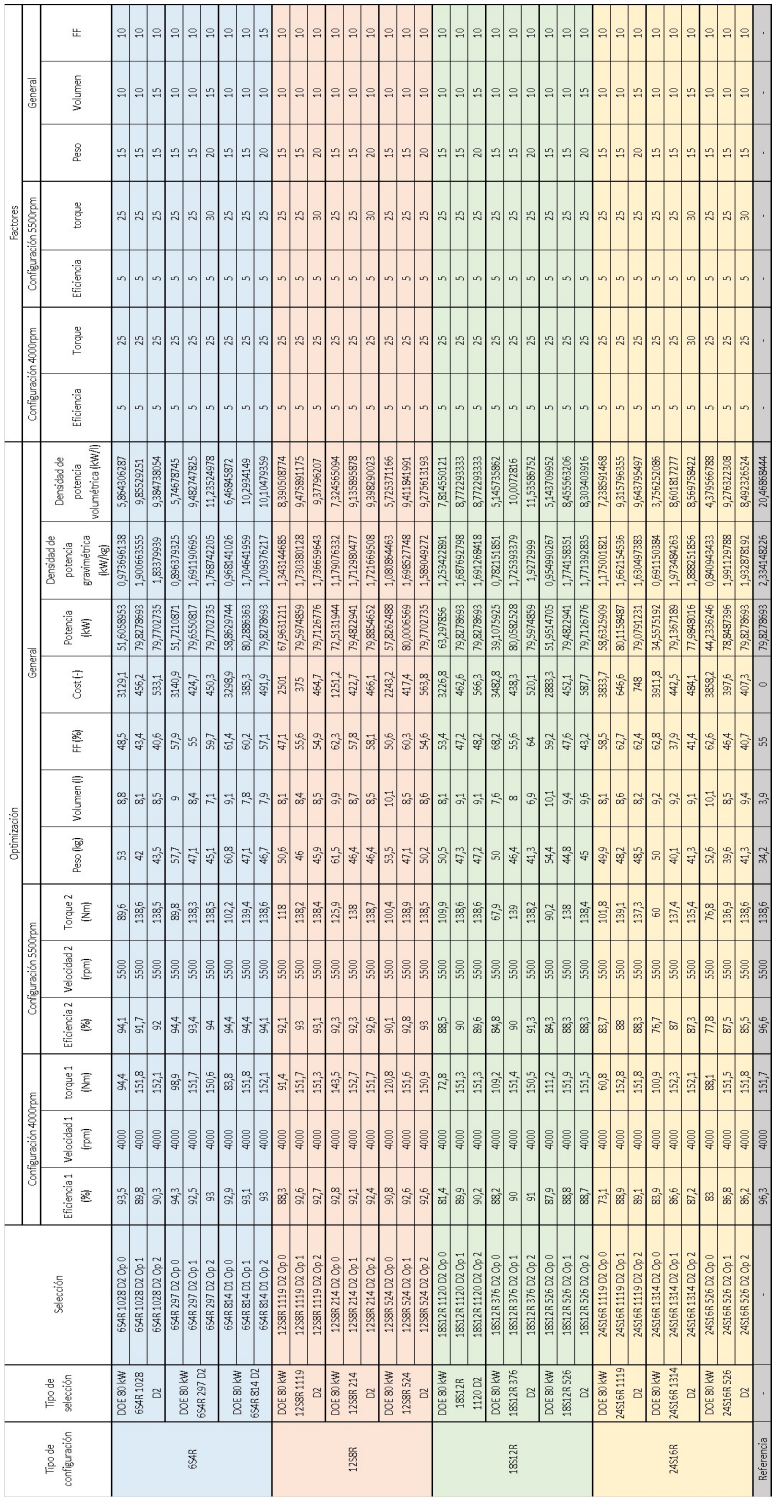



Figura 6.6: Gráfica de torque nominal del motor de referencia.

## 6.2. Datos de la optimización



| Tipo de configuración | Tipo de selección | Selección | Optimización | | | | | | | | | | | | | Factores | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Configuración 4000rpm | | | Configuración 5500rpm | | | | General | | | | | Configuración 4000rpm | | | Configuración 5500rpm | | | General | | |
| | | | Eficiencia 1 (%) | Velocidad 1 (rpm) | torque 1 (Nm) | Eficiencia 2 (%) | Velocidad 2 (rpm) | Torque 2 (Nm) | Peso (kg) | Volumen (l) | FF (%) | Cost (-) | Potencia (kW) | Densidad de potencia gravimétrica (kW/kg) | Densidad de potencia volumétrica (kW/l) | Eficiencia | Torque | Eficiencia | torque | Peso | Volumen | FF |
| 654R | DOE 80 kW | 654R 1028 D2 Op 0 | 95,5 | 4000 | 94,4 | 94,1 | 5500 | 89,6 | 53 | 8,8 | 48,5 | 3129,1 | 51,60588933 | 0,973696138 | 5,8963062B7 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | 654R 1028 D2 | 654R 1028 D2 Op 1 | 89,8 | 4000 | 151,8 | 91,7 | 5500 | 138,6 | 42 | 8,1 | 43,4 | 456,2 | 79,82789693 | 1,900663555 | 9,85592951 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | D2 | 654R 1028 D2 Op 2 | 90,3 | 4000 | 152,1 | 92 | 5500 | 138,5 | 43,5 | 8,5 | 40,6 | 533,1 | 79,77702735 | 1,85379939 | 9,384738054 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 15 | 10 |
| | DOE 80 kW | 654R 297 D2 Op 0 | 94,3 | 4000 | 98,9 | 94,4 | 5360 | 89,8 | 57,7 | 9 | 57,9 | 3140,9 | 51,72116871 | 0,895739325 | 5,746787845 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | 654R 297 D2 | 654R 297 D2 Op 1 | 92,5 | 4000 | 151,7 | 93,4 | 5500 | 138,3 | 47,1 | 8,4 | 55 | 424,7 | 79,65508817 | 1,691190665 | 9,482747825 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 654R 297 D2 Op 2 | 93 | 4000 | 150,6 | 94 | 5500 | 138,5 | 45,1 | 7,1 | 59,7 | 450,3 | 79,77702735 | 1,768742205 | 11,23524978 | 5 | 25 | 5 | 30 | 20 | 15 | 10 |
| | DOE 80 kW | 654R 814 D1 Op 0 | 92,9 | 4000 | 83,8 | 94,4 | 5500 | 102,2 | 60,8 | 9,1 | 61,4 | 3329,9 | 59,89639744 | 0,968541026 | 6,46845872 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | 654R 814 D1 | 654R 814 D1 Op 1 | 93,1 | 4000 | 151,8 | 94,4 | 5500 | 139,4 | 47,1 | 7,8 | 60,2 | 385,3 | 80,28885983 | 1,704941959 | 10,2534149 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 654R 814 D1 Op 2 | 93 | 4000 | 152,1 | 94,1 | 5500 | 138,6 | 46,7 | 7,9 | 57,1 | 491,9 | 79,82789693 | 1,709376217 | 10,10479359 | 5 | 25 | 5 | 25 | 20 | 10 | 15 |
| 1238R | DOE 80 kW | 1238R 1119 D2 Op 0 | 88,3 | 4000 | 91,4 | 92,1 | 5500 | 118 | 50,6 | 8,1 | 47,1 | 2501 | 67,96312111 | 1,343144685 | 8,390150874 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | 1238R 1119 | 1238R 1119 D2 Op 1 | 92,6 | 4000 | 151,7 | 93 | 5500 | 138,2 | 46 | 8,4 | 55,6 | 375 | 79,55748359 | 1,730380128 | 9,47589011 75 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | D2 | 1238R 1119 D2 Op 2 | 92,7 | 4000 | 151,3 | 93,1 | 5500 | 138,4 | 45,9 | 8,5 | 54,9 | 464,7 | 79,77267776 | 1,736659643 | 9,377796207 | 5 | 25 | 5 | 30 | 20 | 10 | 10 |
| | DOE 80 kW | 1238R 214 D2 Op 0 | 90,8 | 4000 | 149,5 | 92,3 | 5500 | 125,9 | 61,5 | 9,9 | 62,3 | 1251,2 | 72,51319944 | 1,179076332 | 7,324555094 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | 1238R 214 | 1238R 214 D2 Op 1 | 92,1 | 4000 | 152,7 | 92,3 | 5500 | 138 | 46,4 | 8,7 | 57,8 | 422,7 | 79,48322941 | 1,712980477 | 9,133895878 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | D2 | 1238R 214 D2 Op 2 | 92,4 | 4000 | 153,7 | 92,6 | 5360 | 138,7 | 46,4 | 8,5 | 58,1 | 466,1 | 79,38544652 | 1,721669508 | 9,398290023 | 5 | 25 | 5 | 30 | 20 | 10 | 10 |
| | DOE 80 kW | 1238R 524 D2 Op 0 | 90,8 | 4000 | 120,8 | 90,1 | 5500 | 100,4 | 53,5 | 10,1 | 50,6 | 2243,2 | 57,82624088 | 1,080864463 | 5,725371166 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | 1238R 524 | 1238R 524 D2 Op 1 | 92,6 | 4000 | 151,6 | 92,8 | 5500 | 138,9 | 47,1 | 8,5 | 60,3 | 417,4 | 80,00065569 | 1,698527748 | 9,411941991 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | D2 | 1238R 524 D2 Op 2 | 92,6 | 4000 | 150,9 | 93 | 5500 | 138,5 | 50,2 | 8,6 | 54,6 | 563,8 | 79,77702735 | 1,588048272 | 9,275613193 | 5 | 25 | 5 | 25 | 20 | 10 | 10 |
| 18512R | DOE 80 kW | 18512R 1120 D2 Op 0 | 81,4 | 4000 | 72,8 | 88,5 | 5500 | 109,9 | 50,5 | 8,1 | 53,4 | 3226,8 | 63,2975B6 | 1,253422891 | 7,824550121 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | 18512R | 18512R 1120 D2 Op 1 | 89,9 | 4000 | 151,3 | 90 | 5300 | 138,6 | 47,3 | 9,1 | 47,2 | 462,6 | 79,82789693 | 1,687962798 | 8,772293333 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | 1120 D2 | 18512R 1120 D2 Op 2 | 90,2 | 4000 | 151,3 | 89,6 | 5500 | 138,6 | 47,2 | 9,1 | 48,2 | 566,3 | 79,82789693 | 1,691269418 | 8,772293333 | 5 | 25 | 5 | 25 | 20 | 15 | 10 |
| | DOE 80 kW | 18512R 376 D2 Op 0 | 88,2 | 4000 | 109,2 | 84,8 | 5500 | 67,9 | 50 | 7,6 | 68,2 | 3482,8 | 39,10759525 | 0,782151851 | 5,145715862 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | 18512R 376 | 18512R 376 D2 Op 1 | 90 | 4000 | 151,4 | 90 | 5500 | 139 | 46,4 | 8 | 55,6 | 493,3 | 80,10582528 | 1,725393379 | 10,00728 16 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | D2 | 18512R 376 D2 Op 2 | 91 | 4000 | 150,5 | 91,3 | 5500 | 138,2 | 41,3 | 6,9 | 64 | 520,1 | 79,55748839 | 1,9272999 | 11,53586752 | 5 | 25 | 5 | 25 | 20 | 10 | 10 |
| | DOE 80 kW | 18512R 526 D2 Op 0 | 87,9 | 4000 | 111,2 | 84,3 | 5500 | 90,2 | 54,4 | 10,1 | 59,2 | 2883,3 | 51,98514705 | 0,954990357 | 5,143709952 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | 18512R 526 | 18512R 526 D2 Op 1 | 89,8 | 4000 | 151,9 | 88,3 | 5360 | 138 | 44,8 | 9,4 | 47,6 | 452,1 | 79,74822941 | 1,774158551 | 8,455363206 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | D2 | 18512R 526 D2 Op 2 | 88,7 | 4000 | 151,5 | 88,3 | 5500 | 138,4 | 45 | 9,6 | 43,2 | 587,7 | 79,71267776 | 1,771392835 | 8,303403916 | 5 | 25 | 5 | 25 | 20 | 15 | 10 |
| | DOE 80 kW | 24516R 1119 D2 Op 0 | 73,1 | 4000 | 60,8 | 83,7 | 5500 | 101,8 | 49,9 | 8,1 | 58,5 | 3833,7 | 58,63235909 | 1,175001821 | 7,238591468 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | 24516R 1119 | 24516R 1119 D2 Op 1 | 88,9 | 4000 | 151,8 | 88 | 5500 | 139,1 | 48,2 | 8,6 | 62,7 | 645,6 | 80,11594587 | 1,662154536 | 9,215796355 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | D2 | 24516R 1119 D2 Op 2 | 89,1 | 4000 | 151,8 | 88,3 | 5500 | 137,3 | 48,5 | 8,2 | 62,4 | 748 | 79,07914231 | 1,639497383 | 9,045795497 | 5 | 25 | 5 | 25 | 20 | 15 | 10 |
| | DOE 80 kW | 24516R 1314 D2 Op 0 | 83,9 | 4000 | 100,9 | 76,7 | 5300 | 60 | 50 | 9,2 | 62,8 | 3911,8 | 34,55755192 | 0,691150384 | 3,756252086 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | 24516R 1314 | 24516R 1314 D2 Op 1 | 86,6 | 4000 | 152,3 | 87 | 5500 | 137,4 | 40,1 | 9,2 | 37,9 | 442,5 | 79,13671789 | 1,973494263 | 8,601817277 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | D2 | 24516R 1314 D2 Op 2 | 87,2 | 4000 | 153,1 | 87,3 | 5500 | 135,4 | 41,3 | 9,1 | 41,4 | 484,1 | 77,29483116 | 1,888651856 | 8,569758422 | 5 | 30 | 5 | 30 | 15 | 15 | 10 |
| | DOE 80 kW | 24516R 526 D2 Op 0 | 83 | 4000 | 88,1 | 77,8 | 5500 | 76,8 | 52,6 | 10,1 | 62,6 | 3838,2 | 44,23362246 | 0,940434233 | 4,579566788 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | 24516R 526 | 24516R 526 D2 Op 1 | 86,8 | 4000 | 151,5 | 87,5 | 5500 | 136,9 | 39,6 | 8,5 | 46,4 | 397,6 | 78,98457396 | 1,991129788 | 9,276322308 | 5 | 25 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | D2 | 24516R 526 D2 Op 2 | 86,2 | 4000 | 151,8 | 85,5 | 5500 | 138,6 | 41,3 | 9,4 | 40,7 | 407,3 | 79,82789693 | 1,932878592 | 8,649236524 | 5 | 25 | 5 | 30 | 15 | 10 | 10 |
| Referencia | - | - | 96,3 | 4000 | 153,7 | 96,6 | 5300 | 138,6 | 34,2 | 3,9 | 55 | 0 | 79,82789693 | 2,334148216 | 20,46868444 | - | - | - | - | - | - | - |

Figura 6.7: Datos de la primera fase de optimización.

| Tipo de configuracion | Tipo de selección | Selección | Optimización | | | | | | | | | | Factores | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Configuración 5500rpm | | | General | | | | | | | Configuración 5500rpm | | General | | | |
| | | | Eficiencia (%) | Velocidad (rpm) | torque (Nm) | Peso (kg) | Volumen (l) | FF (%) | Cost (-) | Potencia (kW) | Densidad de potencia gravimétrica (kW/kg) | Densidad de potencia volumétrica (kW/l) | Eficiencia | Torque | Peso | Volumen | FF |
| 6S4R | DOE 80 kW 6S4R 1254 D4 | 6S4R 1254 D4 Op 0 | 95 | 5500 | 71,1 | 62,5 | 8,7 | 48,5 | 3613,8 | 40,9506602 | 0,655210564 | 4,706972441 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 6S4R 1254 D4 Op 1 | 94,8 | 5500 | 138,8 | 52,2 | 8,8 | 60,6 | 417,1 | 79,9430611 | 1,531476265 | 9,084438757 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 6S4R 1254 D4 Op 2 | 94,7 | 5500 | 138,7 | 51,4 | 8,4 | 58,2 | 535,5 | 79,8854652 | 1,55419193 | 9,510174428 | 5 | 25 | 20 | 10 | 15 |
| | | 6S4R 1254 D4 Op 3 | 94,5 | 5500 | 138,1 | 49 | 7,7 | 59,6 | 569,3 | 79,53989 | 1,623263061 | 10,32985584 | 5 | 25 | 25 | 10 | 15 |
| | DOE 80 kW 6S4R 1701 D4 | 6S4R 1701 D4 Op 0 | 94 | 5500 | 102,4 | 58,9 | 9,9 | 41,8 | 2668,4 | 58,9781661 | 1,001327098 | 5,957390513 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 6S4R 1701 D4 Op 1 | 94,7 | 5500 | 139,1 | 56,2 | 9,8 | 61,9 | 497,6 | 80,1158487 | 1,425548908 | 8,175086597 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 6S4R 1701 D4 Op 2 | 94,7 | 5500 | 138,6 | 55,8 | 9,7 | 60,9 | 633,5 | 79,8278693 | 1,430606977 | 8,22967725 | 5 | 25 | 20 | 15 | 15 |
| | | 6S4R 1701 D4 Op 3 | 94,8 | 5500 | 138,6 | 55,2 | 9,2 | 60,1 | 758,4 | 79,8278693 | 1,446157053 | 8,676942318 | 5 | 25 | 25 | 15 | 20 |
| | DOE 80 kW 6S4R 63 D4 | 6S4R 63 D4 Op 0 | 94 | 5500 | 98,7 | 64,7 | 10,4 | 52,7 | 2512,1 | 56,8471191 | 0,878626261 | 5,466069141 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 6S4R 63 D4 Op 1 | 94,7 | 5500 | 139,4 | 48 | 8,3 | 58,6 | 378,6 | 80,2886363 | 1,672679922 | 9,673329669 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 6S4R 63 D4 Op 2 | 94,7 | 5500 | 138,2 | 48,4 | 8,4 | 58,2 | 485,2 | 79,5974859 | 1,644576154 | 9,475891175 | 5 | 25 | 20 | 10 | 15 |
| | | 6S4R 63 D4 Op 3 | 94,7 | 5500 | 138,5 | 46,5 | 7,8 | 60,2 | 408,9 | 79,7702735 | 1,715489752 | 10,22695814 | 5 | 30 | 20 | 10 | 16 |
| | DOE 80 kW 6S4R 2255 D4 | 6S4R 2255 D4 Op 0 | 93,9 | 5500 | 67,7 | 60,3 | 8,9 | 61 | 4105,7 | 38,9924008 | 0,646640146 | 4,381168631 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 6S4R 2255 D4 Op 1 | 95,3 | 5500 | 138,6 | 61,4 | 10,3 | 58,6 | 582,1 | 79,8278693 | 1,300128165 | 7,750278576 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 6S4R 2255 D4 Op 2 | 95,5 | 5500 | 138,6 | 59,4 | 9,2 | 60,6 | 727,8 | 79,8278693 | 1,343903524 | 8,676942318 | 5 | 25 | 20 | 15 | 15 |
| | | 6S4R 2255 D4 Op 3 | 94,9 | 5500 | 138,6 | 55,9 | 9,4 | 58,8 | 787,8 | 79,8278693 | 1,428047752 | 8,492326524 | 5 | 30 | 25 | 15 | 17 |
| | DOE 80 kW 6S4R 948 D4 | 6S4R 948 D4 Op 0 | 93,2 | 5500 | 66,2 | 62,3 | 9,3 | 55,8 | 4390,5 | 38,1284628 | 0,61201385 | 4,099834714 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 6S4R 948 D4 Op 1 | 94,5 | 5500 | 138,8 | 58,1 | 10,3 | 52,5 | 588,1 | 79,9430611 | 1,3759563 | 7,761462239 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 6S4R 948 D4 Op 2 | 95,3 | 5500 | 139,1 | 56,6 | 9,9 | 62,9 | 711,9 | 80,1158487 | 1,415474358 | 8,092509965 | 5 | 25 | 20 | 20 | 15 |
| | | 6S4R 948 D4 Op 3 | 94,6 | 5500 | 138,8 | 55,9 | 10,4 | 54,2 | 1047,9 | 79,9430611 | 1,430108427 | 7,686832794 | 5 | 25 | 30 | 20 | 20 |
| | DOE 80 kW 6S4R 970 D4 | 6S4R 970 D4 Op 0 | 93,1 | 5500 | 60,4 | 81,4 | 12,7 | 59 | 4537,7 | 34,7879027 | 0,427369811 | 2,739204933 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 6S4R 970 D4 Op 1 | 94,7 | 5500 | 139,3 | 52,9 | 9,7 | 59,4 | 459 | 80,2310404 | 1,516654828 | 8,271241277 | 5 | 25 | 15 | 10 | 10 |
| | | 6S4R 970 D4 Op 2 | 94,7 | 5500 | 138,6 | 51,9 | 9,3 | 58,3 | 605,7 | 79,8278693 | 1,538109236 | 8,583641863 | 5 | 25 | 20 | 20 | 15 |
| | | 6S4R 970 D4 Op 3 | 94,7 | 5500 | 138,6 | 52,2 | 9,4 | 59 | 716,5 | 79,8278693 | 1,529269527 | 8,492326524 | 5 | 25 | 25 | 20 | 15 |
| Referencia | - | - | 96,6 | 5500 | 138,6 | 34,2 | 3,9 | 55 | 0 | 79,8278693 | 2,334148226 | 20,46868444 | - | - | - | - | - |

Figura 6.8: Datos de la segunda fase de optimización configuración “6S4R”.

| Tipo de configuración | Tipo de selección | Selección | Optimización | | | | | | | | | | Factores | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Configuración 5500rpm | | | General | | | | | | | Configuración 5500rpm | | | General | | | | |
| | | | Eficiencia (%) | Velocidad (rpm) | torque (Nm) | Peso (kg) | Volumen (l) | FF (%) | Cost (-) | Potencia (kW) | Densidad de potencia gravimétrica (kW/kg) | Densidad de potencia volumétrica (kW/l) | Eficiencia | Torque | Peso | Volumen | FF | | | |
| 12S8R | DOE 80 kW 12S8R 1214 D4 | 12S8R 1214 D4 Op 0 | 91,6 | 5500 | 103,9 | 54,8 | 9 | 41,8 | 1239,5 | 59,8421041 | 1,092009198 | 6,649122674 | 5 | 25 | 10 | 5 | 10 | | | |
| | | 12S8R 1214 D4 Op 1 | 93,4 | 5500 | 138,6 | 56,5 | 8,7 | 55,9 | 315,2 | 79,8278693 | 1,412882643 | 9,175617164 | 5 | 25 | 10 | 5 | 10 | | | |
| | | 12S8R 1214 D4 Op 2 | 92,1 | 5500 | 138,6 | 48,8 | 8,7 | 41,7 | 549,2 | 79,8278693 | 1,635816994 | 9,175617164 | 5 | 25 | 20 | 5 | 10 | | | |
| | | 12S8R 1214 D4 Op 3 | 93 | 5500 | 138,6 | 49,8 | 8,6 | 47,2 | 683,4 | 79,8278693 | 1,635816944 | 9,282310387 | 5 | 25 | 30 | 10 | 10 | | | |
| | | 12S8R 1214 D4 Op 4 | 91,8 | 5500 | 138,6 | 46,7 | 8,8 | 38,7 | 870,6 | 79,8278693 | 1,709376217 | 9,071348787 | 5 | 25 | 40 | 10 | 10 | | | |
| | | 12S8R 1214 D4 Op 5 | 92,3 | 5500 | 138,6 | 46,2 | 8,2 | 41,3 | 1035,7 | 79,8278693 | 1,727875959 | 9,735106016 | 5 | 25 | 50 | 10 | 10 | | | |
| | | 12S8R 1214 D4 Op 6 | 91,7 | 5500 | 138,6 | 46,9 | 8,7 | 41 | 1401,9 | 79,8278693 | 1,702086766 | 9,175617164 | 5 | 25 | 65 | 25 | 10 | | | |
| | DOE 80 kW 12S8R 1791 D4 | 12S8R 1791 D4 Op 0 | 93,7 | 5500 | 103,9 | 37,5 | 7 | 238,6 | 2861 | 59,8421041 | 1,595789442 | 8,548872009 | 5 | 25 | 10 | 5 | 10 | | | |
| | | 12S8R 1791 D4 Op 1 | 94,3 | 5500 | 138,3 | 38,1 | 7,1 | 149,3 | 931,6 | 79,6550817 | 2,09068456 | 11,2190256 | 5 | 25 | 10 | 5 | 10 | | | |
| | | 12S8R 1791 D4 Op 2 | 94,2 | 5500 | 138,5 | 38,3 | 6,8 | 148,5 | 1004,8 | 79,7702735 | 2,082774764 | 11,73092257 | 5 | 25 | 20 | 5 | 10 | | | |
| | | 12S8R 1791 D4 Op 3 | 93,7 | 5500 | 138,4 | 43,6 | 6,5 | 128,9 | 1681,3 | 79,7126776 | 1,828272422 | 12,26348886 | 10 | 30 | 25 | 10 | 20 | | | |
| | | 12S8R 1791 D4 Op 4 | 94,3 | 5500 | 141,1 | 41,3 | 5,6 | 132,6 | 2483 | 81,2617766 | 1,967742517 | 14,51210106 | 10 | 35 | 30 | 10 | 30 | | | |
| | | 12S8R 1791 D4 Op 5 | 89,8 | 5500 | 91,2 | 39,4 | 6,8 | 95,8 | 3182,7 | 52,52742292 | 1,333183481 | 7,724621936 | 10 | 35 | 40 | 10 | 30 | | | |
| | | 12S8R 1791 D4 Op 6 | 72 | 5500 | 63,2 | 30 | 5,5 | 63,3 | 4373,7 | 36,40058869 | 1,213352896 | 6,618288524 | 10 | 50 | 40 | 10 | 50 | | | |
| | DOE 80 kW 12S8R 2067 D4 | 12S8R 2067 D4 Op 0 | 92,6 | 5500 | 120,4 | 54,4 | 8,4 | 58,1 | 817,2 | 69,34542218 | 1,274732019 | 8,255407362 | 5 | 25 | 10 | 5 | 10 | | | |
| | | 12S8R 2067 D4 Op 1 | 93,2 | 5500 | 138,6 | 48,1 | 7,9 | 61,8 | 252,9 | 79,8278693 | 1,659623063 | 10,10479359 | 5 | 25 | 10 | 5 | 10 | | | |
| | | 12S8R 2067 D4 Op 2 | 92,6 | 5500 | 138,6 | 49,8 | 7,9 | 57,6 | 441,9 | 79,8278693 | 1,602969264 | 10,10479359 | 5 | 25 | 20 | 5 | 10 | | | |
| | | 12S8R 2067 D4 Op 3 | 93,7 | 5500 | 138,6 | 42 | 7,4 | 77,7 | 578,7 | 79,8278693 | 1,900663555 | 10,78754991 | 5 | 25 | 30 | 10 | 10 | | | |
| | | 12S8R 2067 D4 Op 4 | 93,5 | 5500 | 138,5 | 41,3 | 6,8 | 72,5 | 584,4 | 79,7702735 | 1,931483619 | 11,73092257 | 5 | 25 | 30 | 10 | 15 | | | |
| | | 12S8R 2067 D4 Op 5 | 93,4 | 5500 | 138,9 | 43,5 | 7,3 | 66,1 | 673,8 | 80,0006569 | 1,839095561 | 10,9589441 | 5 | 25 | 35 | 10 | 15 | | | |
| | | 12S8R 2067 D4 Op 6 | 93,3 | 5500 | 138,3 | 44,8 | 7,6 | 69,9 | 920,3 | 79,6550817 | 1,778015217 | 10,48093181 | 5 | 25 | 40 | 15 | 20 | | | |
| | DOE 80 kW 12S8R 2641 D4 | 12S8R 2641 D4 Op 0 | 91 | 5500 | 102,9 | 42,2 | 9,1 | 48,9 | 1071,8 | 59,26614454 | 1,404411029 | 6,512763232 | 5 | 25 | 10 | 5 | 10 | | | |
| | | 12S8R 2641 D4 Op 1 | 92,3 | 5500 | 138,6 | 42,4 | 8,7 | 55,7 | 170,3 | 79,8278693 | 1,882732767 | 9,175617164 | 5 | 25 | 10 | 5 | 10 | | | |
| | | 12S8R 2641 D4 Op 2 | 92,3 | 5500 | 136,9 | 40,8 | 8,5 | 60,6 | 333,4 | 78,84873961 | 1,932567147 | 9,276322308 | 5 | 25 | 20 | 5 | 10 | | | |
| | | 12S8R 2641 D4 Op 3 | 91,8 | 5500 | 138,6 | 42,5 | 7,7 | 56,7 | 355,7 | 79,8278693 | 1,878302808 | 10,36725576 | 5 | 25 | 25 | 10 | 10 | | | |
| | | 12S8R 2641 D4 Op 4 | 92,9 | 5500 | 138 | 40,6 | 7,1 | 64,4 | 437,6 | 79,48229411 | 1,957691974 | 11,19468931 | 5 | 25 | 30 | 10 | 10 | | | |
| | | 12S8R 2641 D4 Op 5 | 92,4 | 5500 | 138,4 | 41 | 7,6 | 60,8 | 500,9 | 79,7126776 | 1,944211649 | 10,48851021 | 5 | 25 | 35 | 10 | 10 | | | |
| | | 12S8R 2641 D4 Op 6 | 92,6 | 5500 | 138,3 | 41,3 | 7,3 | 58,4 | 518,2 | 79,6550817 | 1,928694473 | 10,91165503 | 5 | 30 | 35 | 15 | 15 | | | |
| | Referencia | - | 96,6 | 5500 | 138,6 | 34,2 | 3,9 | 55 | 0 | 79,8278693 | 2,334148226 | 20,46869444 | - | - | - | - | - | | | |

Figura 6.9: Datos de la segunda fase de optimización configuración “12S8R” Op. 1.

| Tipo de configuracion | Tipo de selección | Selección | Optimización | | | | | | | | | Factores | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Configuración 5500rpm | | | General | | | | | | Configuración 5500rpm | | | General | | | |
| | | | Eficiencia (%) | Velocidad (rpm) | torque (Nm) | Peso (kg) | Volumen (l) | FF (%) | Cost (-) | Potencia (kW) | Densidad de potencia gravimétrica (kW/kg) | Densidad de potencia volumétrica (kW/l) | Eficiencia | Torque | Peso | Volumen | FF |
| 12S8R | DOE 80 kW 12S8R 110 D4 | 12S8R 110 D4 Op 0 | 89,7 | 5500 | 92,1 | 47,3 | 8,7 | 71,4 | 1649,8 | 53,0457 92 | 1,1214755517 | 6,097217466 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 110 D4 Op 1 | 92,5 | 5500 | 138,6 | 47,6 | 7,9 | 67,3 | 349,8 | 79,82786 93 | 1,677056078 | 10,10479359 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 110 D4 Op 2 | 92,6 | 5500 | 138,3 | 43,3 | 7,5 | 60,6 | 492,8 | 79,65590817 | 1,839609278 | 10,62067756 | 10 | 25 | 20 | 20 | 20 |
| | | 12S8R 110 D4 Op 3 | 92 | 5500 | 137,6 | 40,2 | 7,2 | 60,3 | 456,8 | 79,25191 07 | 1,971440564 | 11,00720982 | 10 | 27 | 20 | 22 | 22 |
| | | 12S8R 110 D4 Op 4 | 91,9 | 5500 | 138,5 | 43,5 | 7,7 | 58 | 467,6 | 79,7702735 | 1,83379939 | 10,35977577 | 10 | 30 | 20 | 22 | 25 |
| | DOE 80 kW 12S8R 177 D4 | 12S8R 177 D4 Op 0 | 93,3 | 5500 | 98,1 | 44 | 7,2 | 101,3 | 1733 | 56,5015439 | 1,284125997 | 7,847436649 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 177 D4 Op 1 | 93 | 5500 | 138,6 | 46,7 | 7,6 | 74,3 | 395,4 | 79,82786 93 | 1,709376217 | 10,50366702 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 177 D4 Op 2 | 93,5 | 5500 | 138,6 | 44,3 | 7,2 | 73,7 | 665,8 | 79,82786 93 | 1,801983506 | 11,08720407 | 5 | 25 | 25 | 15 | 15 |
| | | 12S8R 177 D4 Op 3 | 93,6 | 5500 | 139,2 | 45,1 | 7,1 | 71,2 | 797,2 | 80,1734445 | 1,777681697 | 11,29203444 | 5 | 25 | 25 | 15 | 25 |
| | | 12S8R 177 D4 Op 4 | 94 | 5500 | 138,6 | 42,8 | 6,1 | 81,4 | 1148,5 | 79,82786 93 | 1,865137134 | 13,08653596 | 5 | 25 | 25 | 15 | 35 |
| | DOE 80 kW 12S8R 45 D4 | 12S8R 45 D4 Op 0 | 91,6 | 5500 | 87,9 | 44,1 | 7,4 | 71,8 | 1704,3 | 50,6267656 | 1,14799922 | 6,841454813 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 45 D4 Op 1 | 94 | 5500 | 138,6 | 41,6 | 5,7 | 86 | 420,5 | 79,82786 93 | 1,918939167 | 14,00488836 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 45 D4 Op 2 | 93,1 | 5500 | 138,8 | 48,1 | 7,2 | 69,2 | 459,5 | 79,9430611 | 1,662017901 | 11,10320292 | 5 | 25 | 10 | 10 | 20 |
| | | 12S8R 45 D4 Op 3 | 92,5 | 5500 | 138,5 | 45,5 | 6,5 | 71,2 | 793,1 | 79,7702735 | 1,753192823 | 12,27234976 | 10 | 25 | 20 | 10 | 30 |
| | DOE 80 kW 12S8R 95 D4 | 12S8R 95 D4 Op 0 | 90,8 | 5500 | 88,4 | 56,2 | 9,7 | 50,7 | 1626,8 | 50,9147449 | 0,905956316 | 5,248942777 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 95 D4 Op 1 | 92,9 | 5500 | 138,5 | 45,4 | 7,6 | 57,1 | 229,9 | 79,7702735 | 1,757054482 | 10,49608861 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 95 D4 Op 2 | 93,1 | 5500 | 137,6 | 42,9 | 6,5 | 57,9 | 305,7 | 79,2519107 | 1,847363885 | 12,19260164 | 10 | 30 | 12 | 15 | 15 |
| | | 12S8R 95 D4 Op 3 | 92,8 | 5500 | 138,6 | 44,7 | 7,9 | 57 | 310 | 79,82786 93 | 1,785858374 | 10,10479359 | 10 | 35 | 12 | 15 | 15 |
| Referencia | - | - | 96,6 | 5500 | 138,6 | 34,2 | 3,9 | 55 | 0 | 79,82786 93 | 2,334148226 | 20,46868444 | - | - | - | - | - |

Figura 6.10: Datos de la segunda fase de optimización configuración “12S8R” Op. 2.

| Tipo de configuracion | Tipo de selección | Selección | Optimización | | | | | | | | | | Factores | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Configuración 5500rpm | | | General | | | | | Configuración 5500rpm | | General | | |
| | | | Eficiencia (%) | Velocidad (rpm) | torque (Nm) | Peso (kg) | Volumen (l) | FF (%) | Cost (-) | Potencia (kW) | Densidad de potencia gravimétrica (kW/kg) | Densidad de potencia volumétrica (kW/l) | Eficiencia | Torque | Peso | Volumen | FF |
| 12S8R | DOE 80 kW 12S8R 1481 D4 | 12S8R 1481 D4 Op 0 | 89,9 | 5500 | 76,8 | 42,8 | 7,8 | 33,2 | 1930,4 | 44,23362246 | 1,033495901 | 5,670977508 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 1481 D4 Op 1 | 93,5 | 5500 | 138,4 | 51,3 | 8,5 | 57,4 | 297,5 | 79,71267776 | 1,553853364 | 9,377962017 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 1481 D4 Op 2 | 93,3 | 5500 | 138,6 | 49,4 | 8,4 | 54,8 | 555,4 | 79,82786693 | 1,615948772 | 9,503317777 | 5 | 30 | 20 | 20 | 15 |
| | | 12S8R 1481 D4 Op 3 | 93 | 5500 | 138,6 | 44,9 | 8,3 | 47,1 | 693,5 | 79,82786693 | 1,777903549 | 9,617815582 | 5 | 30 | 30 | 20 | 15 |
| | DOE 80 kW 12S8R 2805 D4 | 12S8R 2805 D4 Op 0 | 91,3 | 5500 | 89,4 | 58,5 | 10,3 | 61,8 | 1739,2 | 51,4907036 | 0,880182967 | 4,999097436 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 2805 D4 Op 1 | 93,2 | 5500 | 138,7 | 49,3 | 8,8 | 56,5 | 278,4 | 79,88546652 | 1,620394832 | 9,077893772 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 2805 D4 Op 2 | 93,3 | 5500 | 137,1 | 45,8 | 8 | 57,5 | 574,5 | 78,9639313 | 1,724103305 | 9,870491418 | 10 | 25 | 25 | 15 | 15 |
| | | 12S8R 2805 D4 Op 3 | 93,2 | 5500 | 138,7 | 45,8 | 8,2 | 62 | 603 | 79,88546652 | 1,744224131 | 9,742129902 | 10 | 30 | 25 | 15 | 15 |
| | DOE 80 kW 12S8R 665 D4 | 12S8R 665 D4 Op 0 | 91,8 | 5500 | 86,2 | 49,6 | 7,1 | 90,1 | 1979,2 | 49,64763591 | 1,000960401 | 6,992624775 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 665 D4 Op 1 | 92,3 | 5500 | 138,6 | 41,7 | 7,9 | 58,3 | 211 | 79,82786693 | 1,914337394 | 10,10479359 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 665 D4 Op 2 | 92,5 | 5500 | 138,6 | 40,8 | 7,2 | 68,2 | 335,9 | 79,82786693 | 1,956565425 | 11,08710407 | 10 | 25 | 10 | 15 | 10 |
| | | 12S8R 665 D4 Op 3 | 92,5 | 5500 | 138,6 | 42,5 | 7,6 | 64,2 | 357,7 | 79,82786693 | 1,878302808 | 10,50366702 | 10 | 25 | 10 | 15 | 15 |
| | DOE 80 kW 12S8R 707 D4 | 12S8R 707 D4 Op 0 | 87,3 | 5500 | 72,2 | 46,5 | 7,7 | 45,6 | 1970,5 | 41,5842148 | 0,894284188 | 5,400547371 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 707 D4 Op 1 | 92,8 | 5500 | 138,4 | 41,7 | 7,2 | 62,6 | 244,2 | 79,7126776 | 1,911575002 | 11,07120522 | 5 | 25 | 10 | 10 | 10 |
| | | 12S8R 707 D4 Op 2 | 93 | 5500 | 138,8 | 44,2 | 7,1 | 61,2 | 276,4 | 79,94306611 | 1,803866654 | 11,25958606 | 5 | 30 | 10 | 10 | 15 |
| | | 12S8R 707 D4 Op 3 | 92,7 | 5500 | 138,3 | 44,6 | 7,2 | 57,6 | 245,7 | 79,65508817 | 1,78598838 | 11,0632058 | 5 | 30 | 10 | 10 | 20 |
| Referencia | - | - | 96,6 | 5500 | 138,6 | 34,2 | 3,9 | 55 | 0 | 79,82786693 | 2,334148226 | 20,46869444 | - | - | - | - | - |

Figura 6.11: Datos de la segunda fase de optimización configuración “12S8R” Op. 3.