

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MEJORAMIENTO DEL DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Rubén E. Padrón T.
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, 2013.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MEJORAMIENTO DEL DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ebert Brea.
PROF. GUÍA: Alexander Cepeda.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Rubén E. Padrón T.
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, 2013.

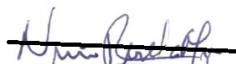
CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 31 de octubre de 2013

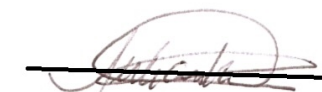
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Rubén E. Padrón T., titulado:

“MEJORAMIENTO DEL DISEÑO DE UNA MÁQUINAS DE INDUCCIÓN”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención Potencia, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. Nerio Ojeda
Jurado


Prof. Alexander Cepeda
Prof. Guía


Prof. Julián Pérez
Jurado

A Dios, a mi familia y amigos.

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Magaly y Alberto, sin su apoyo incondicional no podría ser el profesional que soy actualmente, gracias a sus palabras de aliento en los tiempos más difíciles me ayudaron a levantarme para seguir luchando. Espero que haya seguido el camino que ustedes me forjaron de manera que puedan sentirse orgullosos.

A mis hermanos, Sascha y Carlos, que siempre estuvieron en la cercanía para escucharme y me han dado muchos momentos de felicidad.

A mi novia y amiga Yvelc, gracias a ti que me diste apoyo y cariño cuando no quería seguir luchando, espero que siempre estés a mi lado para que me ayudes a seguir cosechando éxitos, muchas gracias por creer en mí.

A mis compañeros de universidad Diego, Javier, Alberto, Martín y especialmente a Rocco Porco que me apoyo con las ilustraciones de este trabajo de grado. Mi amiga Alejandra Granadillo que me ha ayudado emocional y filosóficamente desde el inicio de mi carrera, lo logramos Alejandra, ya somos profesionales.

A mis tutores Ebert Brea y el Alexander Cepeda, sin su apoyo y colaboración este trabajo de grado nunca hubiese sido posible. Gracias por creer en mis habilidades y conocimientos.

Gracias a los autores L. Simón (2010) por autorizar el uso figuras para la explicación del funcionamiento de máquina de inducción. Igualmente a SIAM por haber aceptado el uso de la definición del Simplex desarrollada por Brandts, Korotov, Křížek, y Šolc (2009), en este trabajo especial de grado.

Rubén E. Padrón T.

MEJORAMIENTO DEL DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

Tutor Académico: Prof. Ebert Brea. **Prof. Guía:** Prof. Alexander Cepeda. **Tesis.** Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. **Mención Potencia.** Año 2013, xvii, 158 h.

Palabras Claves: Algoritmo de búsqueda directa, máquina de inducción, función penalización, método simplex, eficiencia nominal, par nominal, factor de potencia nominal, costos.

Resumen.- En el campo de la ingeniería es de vital importancia mejorar y llegar a diseños óptimos, para tener un mayor desempeño y reducir los costos de producción y operación de los mismos. En este trabajo grado se hace una mejora del diseño de una máquina de inducción trifásica con rotor jaula de ardilla y conexión en estrella con potencia de salida menor a 100 kW, mediante a un algoritmo de búsqueda directa entero mixto llamado Algoritmo Simplex Entero Mixto, debido a que el diseño de la máquina de inducción cuenta con variables reales tales como diámetro interno y externo del estator, ancho y alto de las ranuras del rotor y estator entre otras y variables enteras como número de pares de polos, número de vueltas del conductor por fase entre otros.

ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN	III
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VI
ÍNDICE GENERAL	VII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABLAS	XIII
LISTA DE ACRÓNIMOS	XVII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo General	3
1.1.2. Objetivos Específicos	4
CAPÍTULO II	5
MARCO HISTÓRICO	5
2.1. Máquinas de Inducción	5
2.2. Métodos de Búsqueda Directa	6
2.3. Estudio de Antecedentes	8
CAPÍTULO III	10
MARCO TEÓRICO	10
3.1. Búsqueda Directa	10
3.2. Algoritmo Simplex	10
3.3. Óptimos Globales y Locales	12
3.4. Algoritmo Simplex Entero Mixto	13
3.5. Máquina de Inducción	14
3.5.1. Principio de Funcionamiento	15
3.6. Modelo de diseño de la Máquina de Inducción	18

3.6.1.	Coeficiente de Carter	18
3.6.2.	Coeficientes Conceptuales de Salida	20
3.7.	Construcción de la Máquina de Inducción	26
3.7.1.	Prueba de Materiales	26
3.7.2.	Construcción Rotor	30
3.7.3.	Construcción Estator	40
CAPÍTULO IV		50
MARCO METODOLÓGICO		50
4.1.	Ventajas del Algoritmo Simplex Entero Mixto	50
4.1.1.	Algoritmo del Algoritmo Simplex Entero Mixto (ASEM)	51
4.2.	Procedimiento de Diseño de la Máquina de Inducción	56
4.2.1.	Variables de Decisión	56
4.2.2.	Dimensionamiento del Estator	59
4.2.3.	Dimensionamiento del Rotor	66
4.2.4.	Cálculo de la Corriente de Magnetización	71
4.2.5.	Circuito Equivalente de la Máquina de Inducción	73
4.2.6.	Cálculo de Pérdidas de la Máquina de Inducción	79
4.2.7.	Función Objetivo a Evaluar	82
4.3.	Algoritmo del Modelo Matemático de la Máquina de Inducción	84
4.4.	Herramienta Computacional	101
4.5.	Análisis de Sensibilidad	101
CAPÍTULO V		102
RESULTADOS		102
5.1.	Modelos Prueba de Diseño de Máquina de Inducción	102
5.1.1.	Máquina 1: potencia de 5,5 kW y 2 pares de polos	103
5.1.2.	Máquina 2: potencia de salida 22,380 kW y 3 pares de polos	109
5.1.3.	Máquina 3: potencia 5,5 kW y 2 pares de polos	113
5.2.	Resultados comparativos con Otros Autores	114
5.2.1.	Modelo de Máquina de Inducción de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004)	114
5.2.2.	Modelo de Máquina de Inducción de A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009)	117
5.3.	Análisis de Sensibilidad del Modelo Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004)	119
5.3.1.	Variaciones con función objetivo: eficiencia	120
5.3.2.	Variaciones con función objetivo: Eficiencia	121

CAPÍTULO VI	122
ANÁLISIS DE RESULTADOS	122
6.1. Resultados de Mejora de Diseño	122
6.2. Resultados Análisis de Sensibilidad	125
CAPÍTULO VII	127
CONCLUSIONES	127
CAPÍTULO VIII	129
RECOMENDACIONES	129
APÉNDICE I	130
TABLAS DE EQUIVALENCIAS	130
APÉNDICE II	132
RESTRICCIONES Y FUNCIONES DE PENALIZACIÓN	132
II.1. Restricciones para las Variables de Decisión	132
APÉNDICE III	147
PROPIEDADES MAGNÉTICA DEL NÚCLEO	147
APÉNDICE II	149
EJEMPLO NÚMÉRICO DEL ASEM	149
REFERENCIAS	156

LISTA DE FIGURAS

3.1. Ejemplo de reflexión del Simplex de (W. Spendley y Himsworth, 1962).	11
3.2. Ejemplo de A) Expansión (Xe) B) Contracción (Xc) y C) Enco- gimiento del Simplex propuesto por (W. Spendley y Himsworth, 1962), donde X_r , X_e y X_c , son los puntos reflejados, expandido y contraído, respectivamente.	12
3.3. Sentido del campo y la fuerza en el entre hierro.	16
3.4. Deformación de las líneas de campo en el entre hierro.	17
3.5. Gráfico del flujo producido por la Fuerza Electromotriz (FEM) cuando no hay carga y $i_B = i_C = -i_A/2$ a), densidad de flujo del entre hierro b).	19
3.6. Diagrama fasorial del estator con resistencia estatórica despreciable.	21
3.7. Constante de Esson C_0 vs la potencia aparente del entre hierro S_{gap}	24
3.8. Prueba de elongación del cobre.	26
3.9. Prueba de sobretensión.	27
3.10. Barras de cobre del rotor.	28
3.11. Prueba de concentricidad.	28
3.12. Prueba Epstein.	29
3.13. Prueba Franklin.	30
3.14. Barras de acero en blanco.	31
3.15. Máquina que trabaja el eje del rotor.	32
3.16. Eje del rotor	32

3.17. Fresadora que trabaja el rotor para su acabado final.	33
3.18. Laminas para ser cortadas del rotor y estator.	34
3.19. Corte de laminas A) estator y B) rotor.	34
3.20. Control de calidad de una lamina de rotor o estator para su con- sistencia dimensional.	35
3.21. Apilamiento de las laminas del rotor.	36
3.22. A) Rotor comprimido B) Rotor laminado a fundidor de precisión.	36
3.23. A) Rectificación del orificio del rotor B) Enfriamiento del rotor. .	37
3.24. Balanceo del rotor.	37
3.25. Colocación de las barras de cobre en el rotor.	38
3.26. Rectificación de las barras del rotor.	39
3.27. A) Aplicación de revestido de protección B) Prueba final de vibración.	39
3.28. Laminación del estator.	40
3.29. Compresión del núcleo del estator.	41
3.30. Devanadera produciendo la bobina.	42
3.31. Colocación de encintado a la bobina.	43
3.32. Papel aislante en el estator.	44
3.33. Inserción de las bobinas al estator.	44
3.34. Cámara de vacío.	45
3.35. Estator en girando en horno para mejorar el proceso de barnizado.	46
3.36. Acople de estator y rotor en carcasa.	47
3.37. Ensamblaje de rolineras con sus tapas.	47
3.38. Colocación de ventilador con su respectiva tapa de seguridad . . .	47
3.39. Aplicación de capa de pintura de protección para la carcasa. . . .	48
3.40. Motor de inducción finalizado.	49

4.1. Geometría del estator.	58
4.2. Geometría del rotor.	58
4.3. Geometría del extremo del anillo.	68
III.1. Gráfica B vs H, de los datos de la tabla III.1.	148

LISTA DE TABLAS

5.1. Características generales de los modelos de prueba de diseño de las máquinas de inducción sujetas a la mejora.	102
5.2. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 1, tomando como función objetivo: eficiencia, costos, par y factor de potencia.	104
5.3. Desempeño de la máquina 1 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia, costos, par y factor de potencia.	105
5.4. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 1, tomando como función objetivo: eficiencia.	105
5.5. Desempeño de la máquina 1 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia.	106
5.6. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 1, tomando como función objetivo: factor de potencia.	106
5.7. Desempeño de la máquina 1 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: factor de potencia.	107
5.8. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 1, tomando como función objetivo: Costos.	107
5.9. Desempeño de la máquina 1 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: Costos.	108
5.10. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 2, tomando como función objetivo: eficiencia, costos, par y factor de potencia.	109

5.11. Desempeño de la máquina 2 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia, costos, par y factor de potencia.	110
5.12. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 2, tomando como función objetivo: eficiencia.	110
5.13. Desempeño de la máquina 2 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia.	111
5.14. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 2, tomando como función objetivo: factor de potencia.	111
5.15. Desempeño de la máquina 2 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: factor de potencia.	112
5.16. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 2, tomando como función objetivo: Costos.	112
5.17. Desempeño de la máquina 2 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: costos.	113
5.18. Dimensiones de la máquina 3 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia, costos, par y factor de potencia.	113
5.19. Desempeño de la máquina 3 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia, costos, par y factor de potencia.	114
5.20. Características del modelo de máquina de inducción del autor Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004).	115
5.21. Dimensiones del estator y rotor del diseño original del modelo original y mejorado de la máquina del modelo de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004), tomando como función objetivo: Costos.	115

5.22. Desempeño de la máquina del modelo original de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004) y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: costos.	116
5.23. Dimensiones del estator y rotor del diseño original del modelo original y mejorado de la máquina del modelo de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004), tomando como función objetivo: Eficiencia.	116
5.24. Desempeño de la máquina del modelo original de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004) y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia.	117
5.25. Características del modelo de máquina de inducción del autor A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009).	117
5.26. Dimensiones del estator y rotor del diseño original del modelo original y mejorado de la máquina del modelo de A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009), tomando como función objetivo: Costos.	118
5.27. Desempeño de la máquina del modelo original de A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009) y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: costos (El autor no muestra la mejora de los índices de desempeño par, factor de potencia y eficiencia).	119
5.28. Variaciones de respuesta con pequeñas variables para la función objetivo: costos.	120
5.29. Variaciones de respuesta con pequeñas variables para la función objetivo: costos.	121
I.1. Tabla de equivalencias de variables de decisión físicas a variables matemáticas.	130

I.2. Tabla de equivalencias de variables dependientes físicas a variables matemáticas.	131
II.1. Relación del número de ranuras del rotor N_r , estator N_s y par de polos $2P_1$	133
II.2. Relación valores números de ranuras por polo y numero de polos.	135
III.1. Propiedades magnéticas del material ferromagnético, densidad de flujo (B) y la intensidad (H) del campo magnético.	147
IV.1. Parámetros de sintonización del ASEM.	149

LISTA DE ACRÓNIMOS

1. ASEM: Algoritmo Simplex Entero Mixto.
2. IDE: Entorno de Desarrollo Integrado.
3. FEM: Fuerza Electromotriz.
4. FMM: Fuerza Magnetomotriz.

INTRODUCCIÓN

Desde la invención de las máquinas eléctricas las mismas han jugado un papel sumamente importante en el desarrollo de la industria moderna, tal como la conocemos actualmente. Debido al constante desarrollo de la industria, los fabricantes han llevado sus investigaciones al uso de nuevos materiales y tecnologías para la construcción de las mismas, para obtener mayor eficiencia, par, entre otros índices de desempeño. Los autores Filip y Ondrusek (2000) describen brevemente un procedimiento estándar para diseño de las máquinas eléctricas, indicando que las computadoras en este proceso sólo sirven como calculadoras y dependen netamente del ingreso de parámetros del diseñador para lograr las especificaciones requeridas. Además, los autores enfatizan que este proceso podría necesitar de mucho tiempo si el diseñador no es lo suficiente experimentado, necesitando continuamente asistencia técnica experimentada.

Por otra parte, gracias al desarrollo computacional de esta era los fabricantes pueden llegar a minimizar materiales en el diseño de las máquinas eléctricas, obteniendo resultados satisfactorios al momento de cumplir con los requerimientos de par, potencia, eficiencia y costos exigidos por la industria. Herramientas como los algoritmos evolutivos y de búsqueda directa puede ser una gran solución para estos problemas de diseño.

En el siguiente trabajo se plantea una mejora al diseño de las máquinas eléctricas, enfocándose específicamente en las máquinas de inducción, implementando un algoritmo de búsqueda directa basado en el algoritmo Simplex de Nelder y Mead (1965), este se denomina ASEM desarrollado por Brea (2013), donde el autor (Brea, 2013) expande el método Simplex clásico que solo maneja variables reales,

a un nuevo método que tendrá tanto variables enteras como reales, haciendo del mismo muy aplicable al diseño en el campo de la ingeniería y específicamente en el diseño de las máquinas de inducción donde las variables enteras (par de polos, número de vueltas del devanado del estator, entre otros) no puede ser aproximada a una variable real.

En el **Capítulo 1** se plantea el problema de mejora de diseño de la máquina de inducción y el objetivo general y sus objetivos específicos de este trabajo de grado. Seguidamente, en el **Capítulo 2** (marco histórico) se hace una breve reseña de la evolución de las máquinas de inducción y de los algoritmos de búsqueda directa. Por otra parte, se señalan trabajos anteriores al diseño de las máquinas eléctricas usando algoritmos de optimización como los newtonianos, algoritmos genéticos y sus variantes. Igualmente, en el **Capítulo 3** se presenta el marco teórico, donde se explica el principio de funcionamiento de la máquina de inducción y conceptos sobre su diseño que se usarán en capítulos futuros y el funcionamiento del algoritmo Simplex de Nelder y Mead (1965) y sus variantes con respecto al ASEM.

A continuación, en el **Capítulo 4** se presentan las razones y ventajas de usar un algoritmo de búsqueda directa entero mixto, herramienta fundamental que permitirá la mejora de diseño de la máquina de inducción, mostrando de forma detallada el funcionamiento del ASEM. Igualmente, en el **Capítulo 4** se presenta todo el proceso de diseño de la máquina de inducción, permitiendo el desarrollo del procedimiento algorítmico de la motor de inducción. Finalmente, se muestran los resultados (**Capítulo 5**) con su respectivo análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones (**Capítulo 6**, **Capítulo 7** y **Capítulo 8**, respectivamente).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente el desarrollo de las máquinas eléctricas no puede concebirse sin el uso de nuevas tecnologías y materiales de construcción, lo que hace que los costos de las mismas cada vez sean más elevados si se realizan los diseños de forma convencional. Una de las posibles soluciones de este problema es el uso de herramientas computacionales que faciliten el proceso de diseño mediante simulaciones buscando minimizar los costos de materiales y satisfaciendo las necesidades requeridas en la aplicación de éstas en la industria.

En el siguiente trabajo de grado se planteará el mejoramiento del diseño de una máquina de inducción, utilizando las funciones objetivo de desempeño: par, potencia y eficiencia del modelo equivalente de la máquina de inducción, utilizando como herramienta el ASEM, desarrollado por Brea (2013) para manejar las variables enteras y reales que tendrán las funciones de desempeño del modelo equivalente de la máquina de inducción.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Mejorar el diseño de una máquina de inducción.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Documentar la construcción y uso de la máquina de inducción.
- b) Mejorar el diseño de la máquina de inducción tomando como función objetivo las ecuaciones de desempeño par, potencia y eficiencia del modelo equivalente de la máquina de inducción.
- c) Desarrollar una herramienta computacional que evalúe los parámetros más relevantes de la máquina de inducción, partiendo de las funciones de desempeño par, potencia y pérdidas del modelo equivalente de la máquina de inducción.
- d) Aplicar el algoritmo de búsqueda directa ASEM a objeto de identificar el mejoramiento del diseño de la máquina.
- e) Verificar resultados comparando con investigaciones de optimización previas sobre el diseño de una máquina de inducción.

CAPÍTULO II

MARCO HISTÓRICO

2.1. Máquinas de Inducción

El autor José Aller Aller (2007) afirma que la primera máquina de inducción fue desarrollada por Nikola Tesla a finales del siglo XIX como una solución al problema del uso de la corriente alterna de la época. Unas de las ventajas que señaló Tesla sobre la corriente alterna es la facilidad de variación de tensión mediante el uso de transformadores, facilitando su transmisión a grandes distancias, caso contrario de la corriente continua que presentaba dificultades para la transmisión de la misma. Gracias a la ayuda financiera de Whestinghouse, Tesla pudo impulsar sus ideas para la construcción de la primera planta hidroeléctrica ubicada en las cataratas del Niagara utilizando los generadores de corriente alterna y transformadores elevadores y reductores de tensión para alimentar a los motores de inducción; pieza clave para el desarrollo industrial de la época. Desde ese momento hasta la actualidad la máquina de inducción ha jugado un papel importante en la mayoría de las aplicaciones en la industria, comercio y en el hogar.

Por otra parte; las razones fundamentales que justifican actualmente la aplicación de la máquina inducción es la facilidad que ofrece en la sencillez de su construcción y mantenimiento, una tasa de falla muy reducida actuando en ambientes peligrosos y en la robustez que éstas presentan en operaciones continuas.

2.2. Métodos de Búsqueda Directa

El termino de “búsqueda directa” fue nombrado por primera vez en los años 60 por Robert Hooke y T.A. Jeeves (Robert Michael Lewis, 2000) para describir una examinación secuencial de soluciones de prueba; comparándola con la “mejor” solución obtenida hasta el momento, determinando con cierta estrategia cual será la próxima solución a probar. Esto implica la preferencia (basada en la experiencia) por estrategias de búsqueda que no emplean las clásicas técnicas de análisis, excepto los casos en que se demuestra la ventaja de estos. Esta descripción no es del todo precisa; Hooke y Jeeves pretendieron exponer que los métodos de búsqueda directa son aplicables para buscar óptimos en funciones que no utilicen derivadas explícitamente y en las mismas que solo se puede comparar valores de la función objetivo.

Hooke y Jeeves pretendieron distinguir los métodos de búsqueda directa de los métodos tipo Newton, pero tiempo después Torczon (1990) sentenció:

Los métodos de búsqueda directa se caracterizan por el hecho de que el proceso de toma de decisiones se basa sólo en la información que ofrece la evaluación de la función; estos algoritmos ni requieren ni estiman información de las derivadas para determinar una dirección de descenso.

También autores como Wright (1996) y Trosset (2000) ofrecen definiciones de la búsqueda directa; pero Trosset ofreció una definición más elaborada donde se acomodan variantes estocásticas de la búsqueda directa.

La época dorada de los métodos de búsqueda directa fue el período de 1960-1970; en la misma se desarrollaron algoritmos ampliamente usados y sentaron las

bases de variantes desarrolladas posteriormente. Sin embargo; estos algoritmos fueron relegados ante la comunidad científica, debido al hecho de no existir en sus inicios una teoría que sustente la convergencia de estos métodos, aunque en la práctica demostraron ser robustos y en la mayoría de los casos muy lentos; pero años más tarde aparecieron los primeros resultados referentes a la convergencia de la búsqueda directa.

En el desarrollo y evolución de la búsqueda directa, estos se clasificaron de la siguiente manera:

1. Métodos Simplex: Desarrollado por W. Spendley y Himsworth (1962) y posteriormente mejorado por Nelder y Mead (1965), este ultimo fue bien acogido por la comunidad científica; especialmente dedicada a la ingeniería química y a la medicina (F. H. Walters, 1991). En capítulos posteriores se explicara más detalladamente este método.
2. Métodos de búsqueda multidireccional: Publicados por primera vez en 1989 por Torczon (1990), este se diferencia al método de Nelder-Mead que realiza una búsqueda en una sola dirección que es determinada por el punto en el cual la función alcanza el mayor valor. Los métodos de búsqueda multidireccional incorporan a la estructura de los métodos simplex la idea de buscar en n direcciones distintas.
3. Métodos de búsqueda por patrones: Esta clase de algoritmos fue propuesto por Hooke y Jeeves (1961) y se caracterizan por una serie de movimientos exploratorios que consideran el comportamiento de la función objetivo en un patrón de puntos, los cuales yacen en un entramado racional. La táctica de movimientos de exploración consiste en una estrategia sistemática para ubicar los puntos más próximos en la red de búsqueda de la iteración actual.

2.3. Estudio de Antecedentes

Diseñar una máquina de eléctrica no es una tarea fácil cuando se requiere como variables de diseño un mayor desempeño y menor cantidad de materiales. Esto ha llevado al desarrollo de varias metodologías que tomen en cuenta las exigencias del diseño óptimo de las mismas.

En el campo de la ingeniería eléctrica se encuentran varios trabajos referentes al diseño de las máquinas eléctricas, tales como el trabajo de Filip y Ondrusek (2000) donde aplican algoritmos genéticos al clásico cálculo de diseño del circuito magnético de una máquina sincrónica variando los parámetros de la misma hasta encontrar una solución satisfactoria.

Por otra parte, se tiene el estudio Sobhi-Najafabadi y Göl (2005) quienes se enfocan en el diseño de una máquina sincrónica; usando un algoritmo de optimización determinista llamado SQP proveniente de sus siglas en ingles de “programación secuencial cuadrática”, los autores implementaron el método mediante variaciones del espacio del entre hierro, el factor de carga total, entre otras variables de diseño. Esta técnica arrojó resultados satisfactorios en la obtención del modelo óptimo del generador sincrónico con imán permanente. También se tiene el trabajo de Hao Qi (Qi, 1999), quien empleó una modalidad de algoritmo genético basado en “Tabu List and Sharing Scheme” o su traducción al español “Lista Tabú y Esquema de Reparto” para la optimización del diseño de las máquinas eléctricas. Este documento formuló el problema de diseño mediante una función multidonal (tomando diámetro externo del rotor, potencia nominal, entre otras como funciones objetivos); una vez obtenido los resultados aplicando los algoritmos señalados anteriormente el autor, Hao Qi tomó las posibles soluciones y las dividió en grupos para decidir mediante una red neural entrenada cual de ellas es la solución óptima; este trabajo también se comparó con métodos de

algoritmos genéticos convencionales para verificar la veracidad del modelo, los resultados fueron satisfactorios dando la posibilidad de conseguir un modelo de diseño óptimo para las máquinas eléctricas.

Adicionalmente, los investigadores C. Thanga Raj, S. P. Srivastava, Pramod Agarwal (2008) utilizaron el algoritmo de optimización QI-PSO de sus siglas en ingles “Interpolación Cuadrática basada en optimización de Enjambre de Partículas”, evaluando separadamente las funciones objetivo: eficiencia, par y aumento de temperatura de una máquina de inducción. Los autores señalan que el QI-PSO arrojó buenos resultados comparándolo con el método convencional¹ de diseño y con los algoritmos de optimización “Simulated Annealing” (SA) y “Standard Particle Swarm Optimization” (SPSO).

¹El metodo convencional de diseño se presentará en el capítulo 4, el mismo fue desarrollado por Boldea y Nasar (2010).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. Búsqueda Directa

La búsqueda directa son métodos que no requieren de ninguna información del gradiente de la función objetivo para resolver problemas de optimización; caso contrario a los métodos de optimización tradicionales que usan información del gradiente o la derivada de la función para determinar un punto óptimo, los algoritmos de búsqueda directa buscan una serie de puntos alrededor de uno conocido, buscando un punto que tenga menor valor en la función al punto inicial. La principal utilidad de la búsqueda directa es que estos se pueden aplicar a funciones objetivo no diferenciales o incluso funciones no continuas.

3.2. Algoritmo Simplex

El método simplex fue publicado en 1962 por W. Spendley y Himsworth (1962), hasta ese momento los métodos de búsqueda directa requerían desde $2n$ hasta 2^d evaluaciones de la función objetivo (siendo d la dimensión del espacio), para completar la búsqueda de un punto que provocara un descenso en la función. El aporte del trabajo de W. Spendley y Himsworth (1962) es que sólo serían necesarios $d + 1$ evaluaciones de $f(x)$ para estimar el $\nabla f(x)$.

Por otra parte, los autores Brandts y cols. (2009), definieron el simplex de la siguiente manera:

Se puede decir que un simplex (d -simplex) definido en el espacio euclidiano $\mathbb{R}^d$, siendo d un entero positivo, es un casco o envoltorio convexo de $d + 1$ puntos; los cuales no todos pertenecen al mismo hiperplano definido en el espacio $\mathbb{R}^d$, y cuyos puntos son denominados vértices del simplex. El ángulo diedro θ_{ij} entre dos hipercaras H_i y H_j de un d -simplex con $d \geq 1$ puede ser calculado mediante el producto escalar de las normales unitarias externas n_i y n_j de las hipercaras H_i y H_j , respectivamente, y cuyo valor puede ser determinado a través de $\cos \theta_{ij} = n_i \cdot n_j$. Además, se tiene que el número de ángulos diedros que contiene un d -simplex está dado por $\binom{d+1}{2}$.

El simplex inicial propuesto por Spendley, identifica el “peor” de los vértices (el punto que tiene mayor valor cuando se evalúa $f(x)$) y lo refleja a través del centro de gravedad de los puntos restantes, tomando como estrategia de que el “mejor” punto estará en la dirección opuesta al “peor”. En caso de que el vértice reflejado siga siendo el “peor”, se toma el segundo “peor” vértice y se repite el proceso hasta conseguir la solución. Básicamente el procedimiento consiste en construir un nuevo simplex en cada iteración, realizando reflexiones desde el peor de los puntos, como se muestra en la figura 3.1.

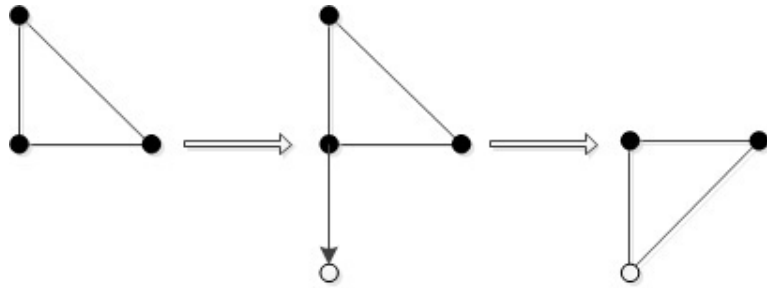


Figura 3.1. Ejemplo de reflexión del Simplex de (W. Spendley y Himsworth, 1962).

Posteriormente en 1965 fue publicado la modificación del simplex por Nelder y Mead (1965). Esta modificación fue una notable mejora del método simplex de

(W. Spendley y Himsworth, 1962), debido a que incorpora otras operaciones además de la reflexión para acelerar el proceso de búsqueda. Las acciones de contracción y expansión son las operaciones que complementan la reflexión del método propuesto por Nelder-Mead, como se observa en la siguiente figura 3.2.

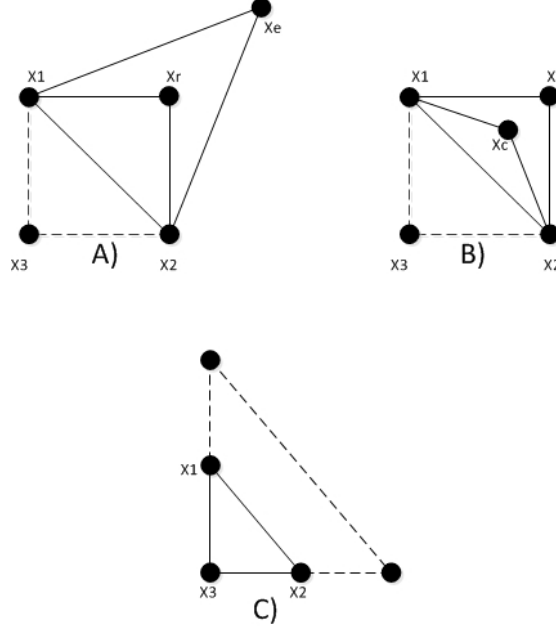


Figura 3.2. Ejemplo de A) Expansión (x_e) B) Contracción (x_c) y C) Encogimiento del Simplex propuesto por (W. Spendley y Himsworth, 1962), donde x_r , x_e y x_c , son los puntos reflejados, expandido y contraído, respectivamente.

3.3. Óptimos Globales y Locales

La forma general de un problema de optimización se presenta de la siguiente manera:

$$(G) \left\{ \begin{array}{l} \text{mín } f(x) \\ \text{sujeto a:} \\ x \in F \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Se supondrá que $F \subseteq \mathbb{R}^n$ y $f: F \rightarrow \mathbb{R}$, donde F es la región factible y f la función objetivo.

Definición 3.1 $\bar{x} \in F$ es un **óptimo global** de (G) sii $f(x) \geq f(\bar{x}) \forall x \in F$.

Definición 3.2 $\bar{x} \in F$ es un **óptimo local** de (G) sii $\exists \varepsilon > 0$, tal que se cumple que $f(x) \geq f(\bar{x}) \forall x \in F$, con $\|x - \bar{x}\| < \varepsilon$.

3.4. Algoritmo Simplex Entero Mixto

El ASEM desarrollado por Brea (2013), es una extensión del método simplex de Nelder y Mead (1965), para la identificación de al menos un óptimo local. El ASEM se basa en una estructura de símplexes, la cual está compuesta por un simplex real de dimensión n y otra por un simplex entero de igual dimensión al simplex real. El ASEM realiza las operaciones sobre el simplex real de reflexión, expansión, contracción y encogimiento; propuestas originalmente por Nelder-Mead y para el simplex entero Brea desarrolló otro grupo de nuevas operaciones para este tipo de variables. Este conjunto de nuevas operaciones junto con las operaciones originales del método de Nelder-Mead garantizan que en cada iteración del ASEM arroje un nuevo punto de prueba definido en el campo numérico de dimensión $2n$ enteros mixtos $\mathbb{R}^n \times \mathbb{Z}^n$, a objeto de identificar un óptimo local entero mixto, sin hacer la conversión de variables enteras a variables reales.

En el campo de la ingeniería los algoritmos enteros mixtos han demostrado ser de suma importancia para encontrar un diseño óptimo, esto se debe al hecho de que en la mayoría de los casos estos poseen variables de diseño tanto reales como enteras, donde las variables enteras no deberían ser transformadas a variables reales. En este trabajo de grado se usó el ASEM, debido a que el diseño de la máquina de inducción dependen de parámetros tanto reales (los diámetros interno

y externos del estator y anchura del cuello de ranura del estator y rotor, entre otros) como enteras (número de par de polos, vueltas por fase, entre otros); a objeto de identificar la mejor configuración de los parámetros para mejorar el diseño de la misma.

3.5. Máquina de Inducción

La máquina de inducción (Aller, 2007) esta compuesta de un estator y un rotor al igual que todo dispositivo de conversión electromecánica de energía. Cuando el estator es alimentado por una red mono o trifásica, produce un flujo que interactúa con el rotor produciendo la circulación de corrientes por el mismo.

Las máquinas de inducción se puede clasificar en dos tipos:

1. rotor de jaula de ardilla.
2. rotor devanado.

El estator está formado por un apilamiento de chapas de material ferromagnético, las cuales en su periferia se disponen unas ranuras y en estas se sitúa un devanado trifásico distribuido, que deberá ser alimentado por una red del mismo tipo; con esta distribución de las ranuras se obtendrá un campo magnético giratorio (distribuido en forma sinusoidal ¹ por el entre hierro) y este producirá un flujo de amplitud constante en todo instante, debido a la simetría de la máquina.

El rotor (al igual que el estator) está constituido por un conjunto de chapas apiladas, formando un cilindro. Además, éste posee ranuras en su circunferencia exterior donde se colocan el devanado o las barras (si es rotor de devanado o jaula de ardilla respectivamente).

¹Esto es una aproximación, el campo magnético giratorio no es una senoide pura.

3.5.1. Principio de Funcionamiento

En este apartado se describirá brevemente el principio de funcionamiento de la máquina de inducción como motor (descrito por el autor Jordi Vidal Bort (2002)), debido a que la mayoría de las aplicaciones que se le dan a los mismos en la industria es como motor.

El devanado trifásico del estator está constituido por tres arrollamientos (desfasados 120°) en el espacio y $2n$ polos²; cuando empiezan a circular corrientes de frecuencia f_1 por los mismos se produce una onda rotativa de Fuerza Magnetomotriz (FMM) distribuida sinusoidalmente³ en la periferia del entre hierro, produciendo un campo giratorio cuya velocidad en r.p.m. viene expresada por la siguiente ecuación:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} [\text{r.p.m.}] . \quad (3.2)$$

La ecuación (3.2) es la velocidad de sincronismo. Este campo giratorio induce una FEM en los conductores o barras del rotor (según el tipo de motor) reaccionando con el flujo del estator y en consecuencia aparecerán corrientes en el rotor. En la figura III.1 se muestra en un determinado instante, el sentido de la inducción B en el entre hierro producida por el estator, cuya distribución espacial es sinusoidal, lo que se representa por medio de una diferencia en la concentración de líneas de B.

De acuerdo con la ley de Faraday, la FEM inducida en un conductor de longitud L que se mueve a una velocidad V dentro de un campo B, tiene el siguiente valor:

²Siendo $n > 0$ donde, $n \in \mathbb{N}$.

³De acuerdo a una forma de onda, cuya fundamental es una sinusoidal.

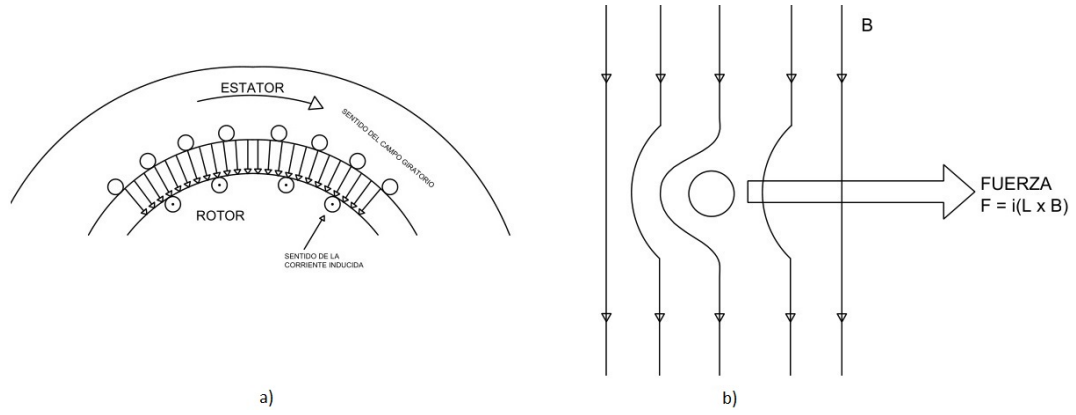


Figura 3.3. Sentido del campo y la fuerza en el entre hierro.

$$e = \int (V \times B) dx = (V \times B)L. \quad (3.3)$$

Para determinar el sentido en la figura 3.3, se considera que el rotor gira en un sentido contrario al campo, esto es para tener en cuenta el movimiento relativo mutuo de ambos sistemas. El sentido de la fuerza que aparecerá en las barras del rotor se obtiene aplicando la ley de Lorentz:

$$F = i(L \times B). \quad (3.4)$$

En la figura 3.3 b) se muestra el sentido de la fuerza y el tipo de deformación que se produce en el campo inductor debido a la corriente que circula por el conductor.

Multiplicando la fuerza por el número de conductores y ranuras del rotor se obtiene el par total generado por la máquina que tenderá a mover el rotor siguiendo el campo giratorio del estator.

Este simple razonamiento aunque arroje resultados correctos, no es del todo

cierto, debido a que en la realidad, los conductores del rotor están situados dentro de las ranuras; de tal forma que el campo B no atraviesa al conductor y en consecuencia la fuerza resultante es nula. Para explicar este fenómeno se debe buscar en la deformación de las líneas de B al circular corriente por los conductores.

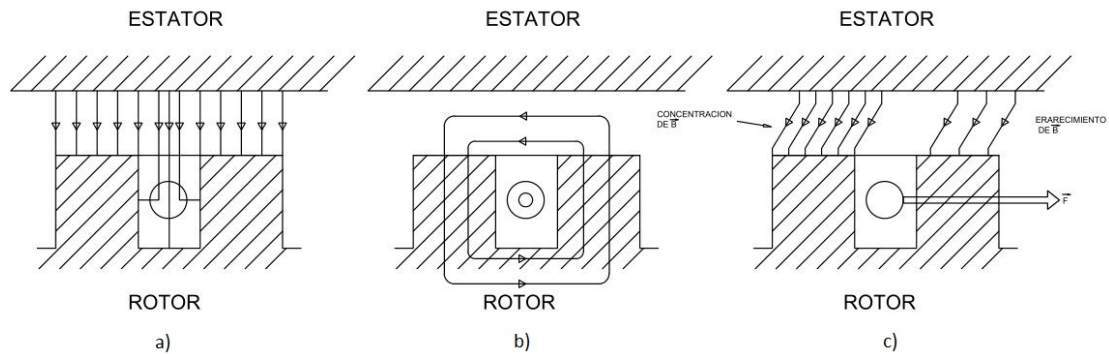


Figura 3.4. Deformación de las líneas de campo en el entre hierro.

En la figura 3.4 se muestra la configuración de la inducción de la ranura y el diente del estator; cuando la intensidad en el conductor es cero, se observa que debido a la menor reluctancia de los dientes, las líneas de B tienden a concentrarse en ellos si atravesar medianamente el conductor.

En la figura 3.4 b) se muestra la forma de las líneas de inducción producidas solo cuando el conductor circula corriente. En la figura se representa la resultante de ambos campos, produciendo una fuerza resultante en el sentido indicado, pero con la diferencia fundamental de que esta fuerza actúa realmente en los dientes y no en los conductores.

En el momento total de estas fuerzas, se origina el par de rotación de la máquina y ésta a su vez obliga a girar al rotor siguiendo el movimiento del campo magnético giratorio; de esta forma cuanto más se aproxima a la velocidad n_1 del campo esta provoca que las corrientes que circulan por el mismo se reduzcan, produciendo una disminución del par electromagnético del motor.

En el caso de que el motor gire a la velocidad de sincronismo n_1 , no habría movimiento del campo giratorio respecto del rotor, desapareciendo con ello la FEM y en consecuencia se anularía la corriente y el par. Debido a esto n_1 representa un límite teórico al que puede girar el rotor de la máquina de inducción.

El motor debe girar a una velocidad inferior a la de sincronismo ($n < n_1$), es decir, a una velocidad de régimen asíncrona.

3.6. Modelo de diseño de la Máquina de Inducción

A continuación se introducirán algunos coeficientes necesarios para la comprensión del método de diseño convencional extraído de los autores Boldea y Nasar (2010) que se presentarán en el capítulo 4. El proceso de diseño depende de los coeficientes de Carter y Esson, donde estos describen el comportamiento magnético y la relación del volumen del estator de la máquina de inducción, respectivamente. Los siguientes se presentan a continuación.

3.6.1. Coeficiente de Carter

El camino de flujo real cuando la corriente en el rotor es cero y la magnitud de corriente de la fase “A” es máxima ($i_A = I\sqrt{2}$) y las fases “B” y “C” $i_B = i_C = -I\sqrt{2}$ producto de la FEM se muestra en la figura 3.5 a)⁴.

En la figura 3.5 b), se muestra el correspondiente flujo radial del entre hierro, como se observa el campo en el mismo es sinusoidal⁵ con una amplitud B_{g1Max} , esto se debe a la ausencia de armónicos de la FMM en el ranurado del estator. En la presencia de aberturas de las ranuras, la densidad de flujo fundamental del

⁴Figura extraída del artículo de “Identificación y Ajuste Paramétrico de una Máquina Trifásica de Inducción Magnética usando Algoritmos Genéticos”, (L. Simón, 2010).

⁵Esto es una aproximación, el flujo posee características sinusoidales con algunas componentes adicionales pero no representa a una sinusoidal pura.

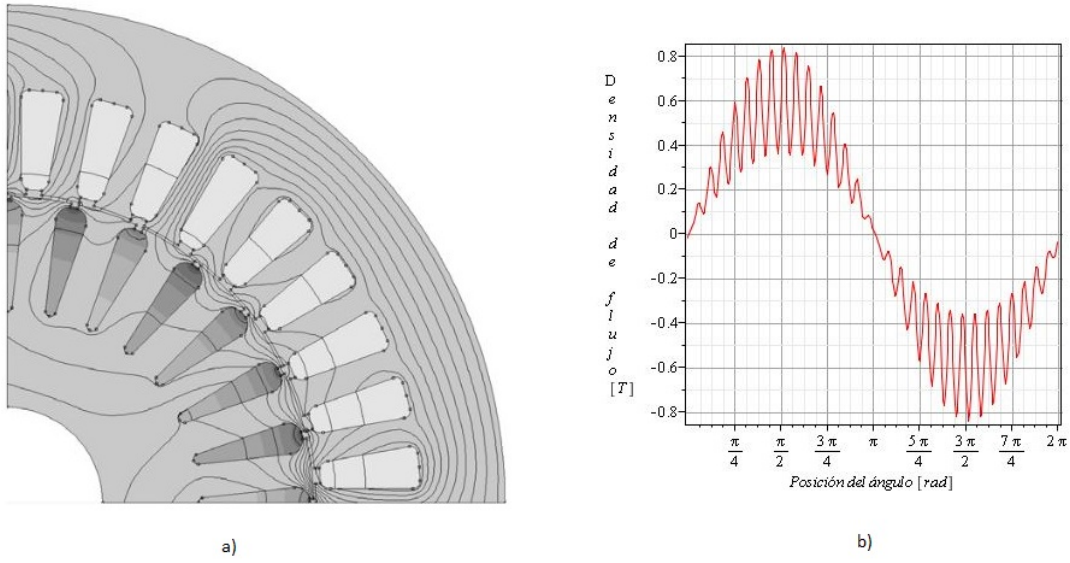


Figura 3.5. Gráfico del flujo producido por la FEM cuando no hay carga y $i_B = i_C = -i_A/2$ a), densidad de flujo del entre hierro b).

entre hierro es B_{g1} . La relación de estas dos amplitudes se denomina coeficiente de Carter (Carter, 1901).

$$K_c = \frac{B_{g1Max}}{B_{g1}}. \quad (3.5)$$

La FEM nos facilita el cálculo del coeficiente de Carter de la figura 3.5, cuando es aplicado en estructuras ranuradas o lisas. Por otra parte, es sencillo de manejar las expresiones analíticas de K_c , basado en los métodos de transformación conformal o flujo de tubos; estos métodos han sido tradicionalmente usados para predecir el comportamiento del flujo magnético en los motores eléctricos (Boldea y Nasar, 2010), estos se aplican suponiendo la ausencia de la saturación del material, el primero divide el entre hierro y el segundo trata las ranuras por separado. Sin embargo, de muchas que se han propuesto, la fórmula de Carter es una de las que se adapta mejor. La expresión de Cartes viene dada por:

$$K_{c1,2} = \frac{\tau_{s,r}}{\tau_{s,r} - \gamma_{1,2}g/2}, \quad (3.6)$$

donde $\tau_{s,r}$ es el paso de ranura del estator y rotor, respectivamente, g es la distancia del entre hierro de la máquina, y $\gamma_{1,2}$ viene dado por la siguiente expresión:

$$\gamma_{1,2} = \frac{2b_{os,r}/g}{5 + (2b_{os,r}/g)}, \quad (3.7)$$

donde generalmente se considera $3g \leq b_{os,r} \leq 8g$, la cual representa la distancia de la apertura de las ranuras del estator y rotor, respectivamente.

Finalmente una buena aproximación del coeficiente de Carter para un ranurado dobles es:

$$K_c = K_{c1}K_{c2}. \quad (3.8)$$

Este coeficiente es fundamental para predecir la magnitud de la FMM producida en el entre hierro que inducirá el flujo magnético que circulará en el rotor cuando en este no circule ninguna corriente.

3.6.2. Coeficientes Conceptuales de Salida

Unos de los problemas de diseño es saber la relación que existe entre el volumen del estator respecto al desempeño de la máquina de inducción (potencia de la máquina, par, entre otros) para esto es necesario calcular la potencia aparente del entre hierro S_{gap} ,

$$S_{gap} = 3E_1 I_{ln}, \quad (3.9)$$

donde E_1 es la FEM del entre hierro por fase y I_{ln} es la corriente nominal (valores en RMS). Esto se basa en el diagrama fasorial figura 3.6 teniendo como supuesto que la resistencia del estator tiene resistencia cero.

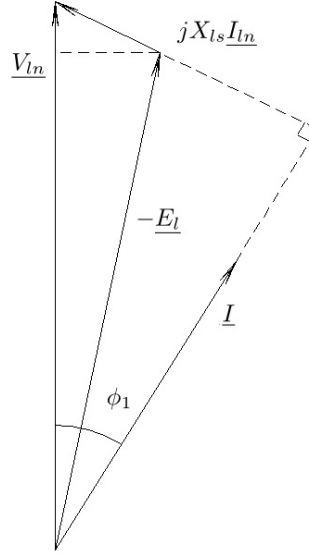


Figura 3.6. Diagrama fasorial del estator con resistencia estat3rica despreciable.

Aproximadamente es:

$$k_e = \frac{E_1}{V_{ln}} = 1 - x_{ls} \sin(\phi_1), \quad (3.10)$$

donde “ x_{ls} ” es:

$$x_{ls} = \frac{X_{ls} I_{ln}}{V_{ln}}. \quad (3.11)$$

El valor en por unidad de la reactancia de fuga del estator se incrementa con el numero de par de polos (P_1) de la m1quina y a su vez el factor de potencia disminuye.

$$k_e = 0,98 - 0,005P_1. \quad (3.12)$$

La potencia aparente de entrada de la máquina es:

$$S_{ln} = \frac{P_n}{\eta_n \cos(\phi_{ln})}, \quad (3.13)$$

donde P_n , η_n y $\cos(\phi_{ln})$ es la potencia real de salida, eficiencia y factor de potencia nominal de la máquina respectivamente; la asignación de estos dos últimos parámetros se basan en la experiencia de diseños pasados.

La eficiencia de las máquinas de inducción crece con la potencia del motor y decrece con el numero de par de polos (este fenómeno también le ocurre al factor de potencia); en motores de rotor bobinado es ligeramente mayor a un motor de jaula de ardilla de la misma potencia de salida y velocidad, debido al que rotor bobinado está hecho de cobre y las pérdidas adicionales de carga (por corrientes parásitas) son menores.

La eficiencia nominal del motor es definida mayormente por las pérdidas parásitas⁶. Por otra parte, la asignación inicial de la eficiencia es para tener un punto de arranque en el proceso de diseño del motor, y de esta manera, se mejora la ejecución de las iteraciones hasta obtener un mejor desempeño.

La FEM E_1 puede ser escrita como función del flujo del entre hierro ϕ ,

$$E_1 = 4f_1 K_f W_1 K_{w1} \phi, \quad (3.14)$$

donde la f_1 es la frecuencia, K_f es el factor de forma (este coeficiente depende

⁶Las perdidas parásitas están entre 0.5 a 1 % de la potencia nominal

de la saturación magnética de los dientes del estator K_{st} ⁷), W_1 es el número de vueltas por fase y K_{w1} es el factor de arrollamiento. El flujo del entre hierro viene dado por la siguiente expresión:

$$\phi = \alpha_i \tau L B_g, \quad (3.15)$$

donde α_i al igual que K_f depende de K_{st} , L es la longitud del estator, B_g es la densidad de flujo en el entre hierro y τ es el paso polar y está definido como:

$$\tau = \frac{\pi D_{is}}{2P_1}. \quad (3.16)$$

Finalmente la potencia aparente del entre hierro es:

$$S_{gap} = K_f \alpha_i K_{w1} \pi^2 D_{is}^2 L \frac{n_1}{60} A_1 B_g, \quad (3.17)$$

donde D_{is} es el diámetro interno del estator, A_1 (corriente específica de carga del estator) y n_1 , los cuales están definidos como:

$$n_1 = \frac{f_1}{P_1}, \quad (3.18)$$

$$A_1 = \frac{6W_1 I_{ln}}{\pi D_{is}}. \quad (3.19)$$

Por otra parte, se puede separar el volumen del estator usando el factor C_0 (constante de Esson) de la siguiente manera:

⁷El factor de saturación K_{st} es la relación que existe entre las componentes fundamentales de la tensión en el entre hierro en condiciones saturadas y no saturadas

$$C_0 = K_f \alpha_i K_{w1} \pi^2 A_1 B_g = \frac{60 S_{gap}}{D_{is}^2 n_1 L}. \quad (3.20)$$

Realmente el factor C_0 no es una constante, debido a que depende de la potencia aparente del entre hierro, la longitud del estator y el número de par de polos entre otros.

Por otra parte, el coeficiente de salida $D_{is}^2 L$ puede ser calculado mediante las ecuaciones (3.20), (3.19) y (3.13), dando como resultado:

$$D_{is}^2 L = \frac{60 K_e P_n}{C_0 n_1 \eta_n \cos(\phi_l n)} \quad (3.21)$$

Boldea y Nasar (2010) presenta en su trabajo valores típicos de C_0 en función S_{gap} , teniendo como parámetros el numero de par de polos para motores de baja potencia (menor a 100 kW), como se puede observar en la siguiente figura.

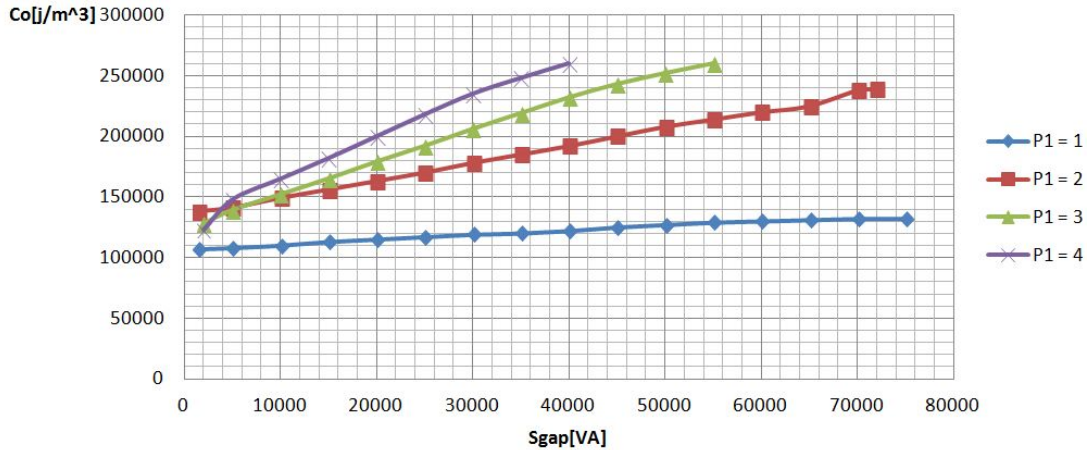


Figura 3.7. Constante de Esson C_0 vs la potencia aparente del entre hierro S_{gap} .

La ecuación (3.21) es una constante de salida y ésta es directamente proporcional al volumen del rotor, de hecho, se podría argumentar que es casi proporcional al par nominal de la máquina. Por otra parte, Boldea y Nasar (2010) señalan que aparentemente para producir más par es necesario menos volumen mientras

aumentan el número de par de polos.

Boldea y Nasar (2010) también mencionan que es común asignar valores a la relación de longitud del apilamiento (λ) para un paso polar determinado.

$$\lambda = \frac{L}{\tau} = \frac{2LP_1}{\pi D_{is}} \quad \forall \quad 0,6 < \lambda < 3,0 \quad (3.22)$$

El diámetro interno del estator es determinado por:

$$D_{is} = \sqrt[3]{\frac{2P_1^2 K_E P_n}{\pi \lambda C_0 f_1 \eta_n \cos(\phi_{ln})}}, \quad (3.23)$$

donde una aproximación a la potencia aparente del entre hierro es:

$$S_{gap} = \frac{K_E P_n}{\eta_n \cos(\phi_{ln})}. \quad (3.24)$$

Finalmente el diámetro interno del estator es:

$$D_{is} = \sqrt[3]{\frac{2P_1^2 S_{gap}}{\pi \lambda C_0 f_1}}, \quad (3.25)$$

la cual es una ecuación estándar de diseño. Sin embargo, ésta no contempla el volumen total de la máquina. Por otra parte, en muchos diseños el diámetro externo del estator están estandarizados. Boldea en su libro tiene relaciones entre los diámetros externos e internos del estator, dependiendo del número de par de polos, valores presentados en el capítulo 4.

3.7. Construcción de la Máquina de Inducción

A continuación se hará una explicación breve del proceso de construcción de la máquina de inducción. Esta información fue extraída de un vídeo explicativo de la empresa Baldor (Baldor, 2010), y los comentarios del locutor fueron traducidos al castellano e igualmente las imágenes pertenecen igualmente al video.

3.7.1. Prueba de Materiales

El proceso de fabricación comienza con las pruebas de los materiales de construcción para verificar si cumplen con las exigencias del fabricante, comprobando muestras de diferentes proveedores de conductores los mismos pasan pruebas de control de calidad tales como elongación, calentamiento y finalmente la verificación de alta tensión, este ultimo permite determinar si el embobinado puede tolerar sobretensiones.



Figura 3.8. Prueba de elongación del cobre.

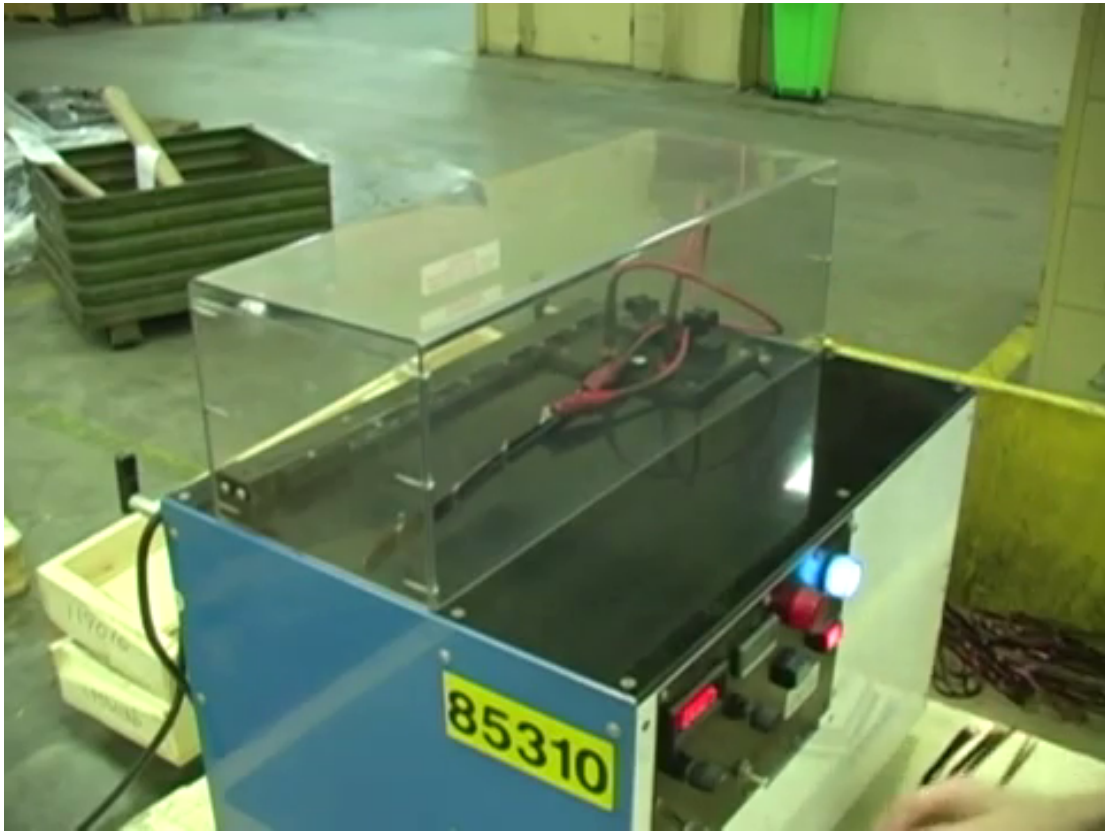


Figura 3.9. Prueba de sobretensión.

Una vez que se completa el control de calidad de los materiales, se hacen pruebas para determinar la concentricidad de las barras de cobre del rotor, esto es fundamental para la eliminación de las fuentes de vibración del motor; así que antes de colocar las barras en el rotor, los técnicos miden la concentricidad de toda la barra (ver figura 3.11).



Figura 3.10. Barras de cobre del rotor.



Figura 3.11. Prueba de concentricidad.

Por otra parte, la laminación de acero utilizado en el estator juega un papel clave en el mantenimiento de un rendimiento eléctrico consistente y eficiente. Por lo tanto, la laminación del acero es sometida a las pruebas tales como Epstein(figura 3.12) y Franklin(figura 3.13), pruebas para medir su composición química, física y sus propiedades de aislamiento.

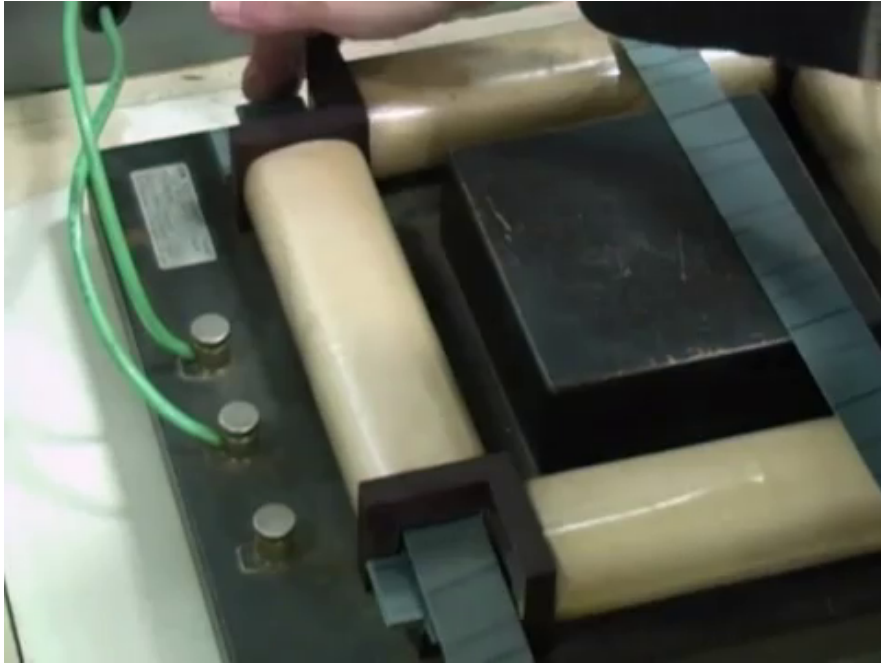


Figura 3.12. Prueba Epstein.



Figura 3.13. Prueba Franklin.

3.7.2. Construcción Rotor

El proceso de producir el eje del rotor comienza con el mecanizado de una barra de acero en blanco(Termino que usan en metalurgia para referirse a un acero no tratado ver figura 3.14).



Figura 3.14. Barras de acero en blanco.

Todas las superficies y el extremo cilíndrico del eje son transformados en un solo proceso como se puede ver en la siguiente figura:



Figura 3.15. Máquina que trabaja el eje del rotor.



Figura 3.16. Eje del rotor

A continuación, la ranura de la chaveta y los orificios céntricos del extremo de

el eje pasan por una fresadora con una tolerancia de ± 0.0005 pulgadas.



Figura 3.17. Fresadora que trabaja el rotor para su acabado final.

Por otra parte, como las bajas vibraciones y la vida útil de los rodamientos es tan importante, el fabricante revisa el acabado y fresa una vez más toda la longitud del eje, incluyendo el núcleo del rotor, donde un perfecto ajuste del eje es esencial para mantener las vibraciones del motor controladas. En todo el proceso de construcción la temperatura de la fábrica es cuidadosamente controlada no sólo por el confort del trabajador, también para lograr la consistencia y alta precisión del mecanizado. Para la construcción del estator y rotor, comienza con la impresión de la laminación. La precisión de la geometría del estator es importante para optimizar la transferencia de calor en el motor. Un buen corte en las ranuras proporciona un borde limpio, esto con el fin de no dañar los conductores durante el proceso de embobinado.



Figura 3.18. Laminas para ser cortadas del rotor y estator.

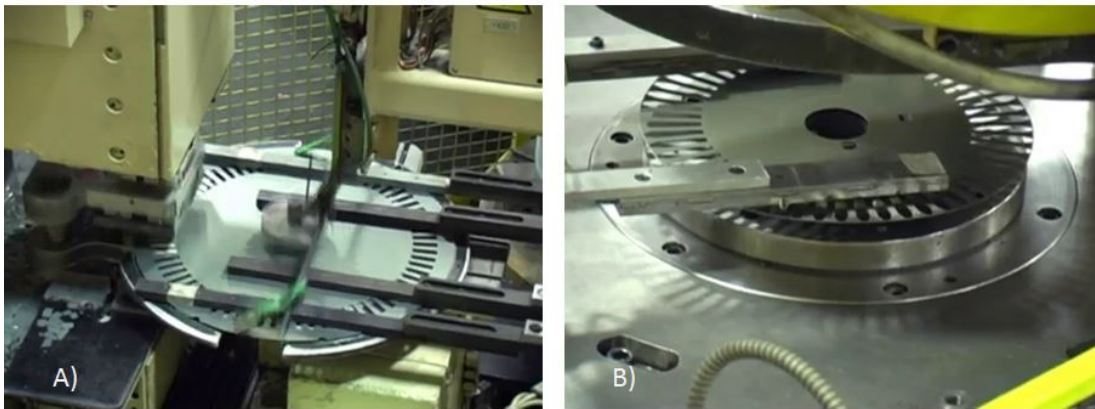


Figura 3.19. Corte de laminas A) estator y B) rotor.

La empresa Baldor al construir la laminación del estator y rotor se permite mantener márgenes de tolerancia muy bajos. Por otra parte, la laminación ayuda a ajustar con mucha facilidad la configuración de las ranuras y cambios finales en el diseño. Luego de terminar la laminación del estator y rotor, se toman muestras aleatorias a objeto de hacer un control de calidad de la consistencia dimensional.



Figura 3.20. Control de calidad de una lamina de rotor o estator para su consistencia dimensional.

Cuando se termina el proceso de laminación del rotor (apilamiento de las laminas figura 3.21), el mismo se comprime desde arriba hacia abajo y a continuación la pila va al fundidor de precisión (ver figura 3.22), donde aluminio fundido entra desde el fondo del núcleo y obliga al aire salir por la parte superior del rotor, este proceso ayuda a evitar la porosidad del rotor.

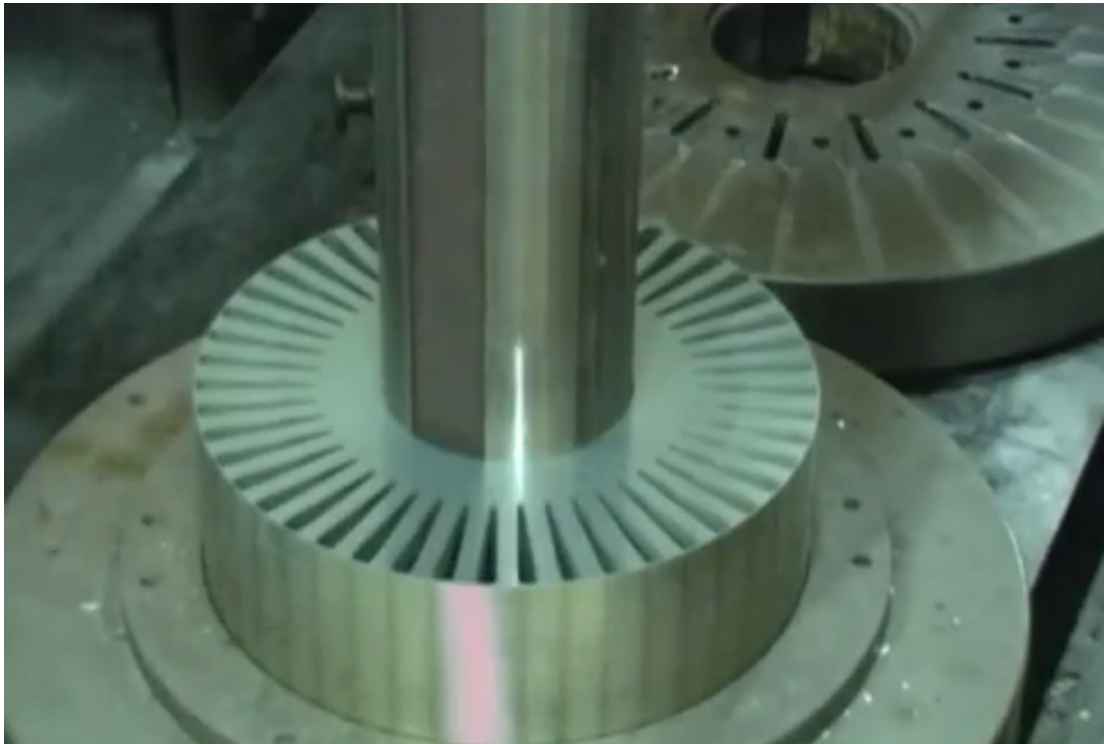


Figura 3.21. Apilamiento de las laminas del rotor.

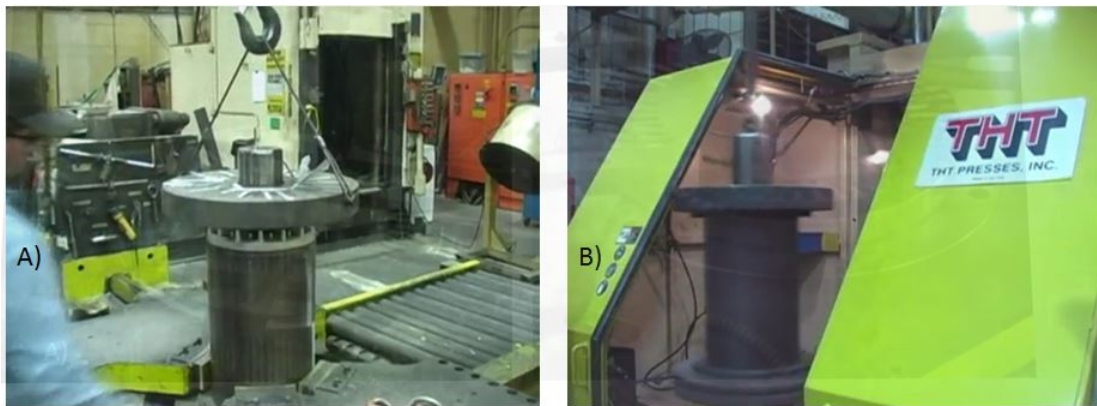


Figura 3.22. A) Rotor comprimido B) Rotor laminado a fundidor de precisión.

Luego del fundidor de precisión, Baldor rectifica el orificio del rotor, esto permite que el tamaño sea el adecuado y el orificio quede perfectamente redondo, lo cual es muy importante para evitar la vibraciones del motor. Después del rectificado, el rotor es calentado para que se expanda y así se acople perfectamente

al eje del motor. Luego se enfría poco a poco para reducir tensiones y vibraciones. Esto se puede ver en la figura 3.23.



Figura 3.23. A) Rectificación del orificio del rotor B) Enfriamiento del rotor.

Finalmente cuando el ensamblado del eje del rotor es realizado, el mismo es balanceado. A continuación, se introducen las barras de cobre en el rotor, estas son capaces de mantener la geometría del rotor cuando el mismo se calienta.

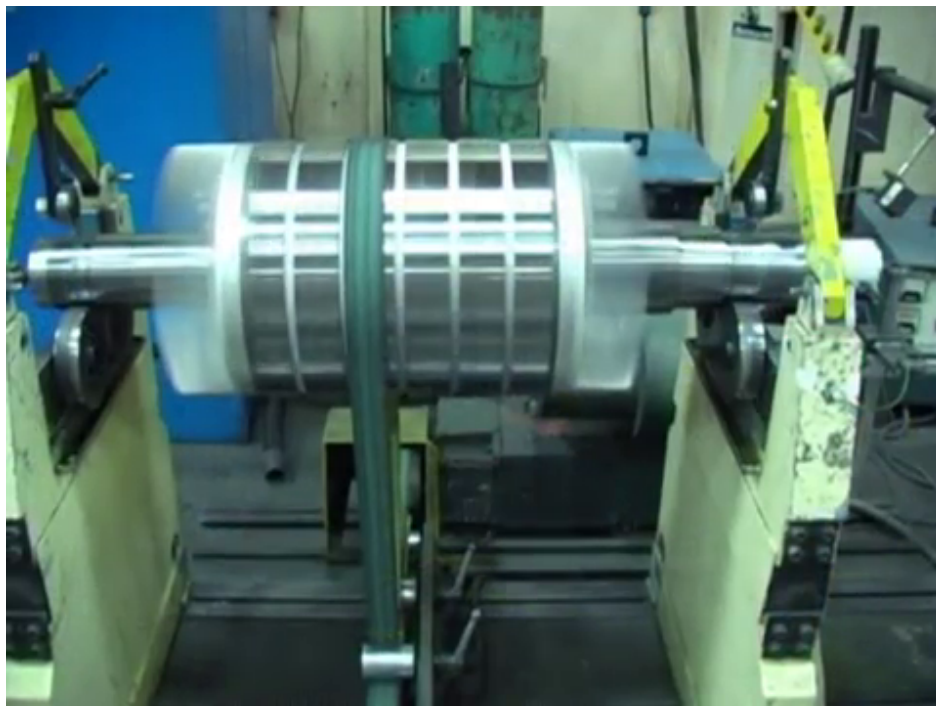


Figura 3.24. Balanceo del rotor.



Figura 3.25. Colocación de las barras de cobre en el rotor.

Cuando las barras están posicionadas las mismas son fijadas a los extremos del final del anillo, mediante un proceso de soldadura exclusivo que evita la deformación y rotura de la barra, a continuación un torno rectifica los anillos a su tamaño correcto.



Figura 3.26. Rectificación de las barras del rotor.

El conjunto es provisto por un revestido de protección y finalmente se procede a la prueba de vibración final del rotor.



Figura 3.27. A) Aplicación de revestido de protección B) Prueba final de vibración.

3.7.3. Construcción Estator

Al igual que el rotor, la precisión y la concentricidad son claves para el ensamblaje de un núcleo de estator de alta calidad. Para asegurar que las láminas estén bien ajustadas entre sí, el núcleo se comprime y se aplican tiras soldadas (figura 3.28).

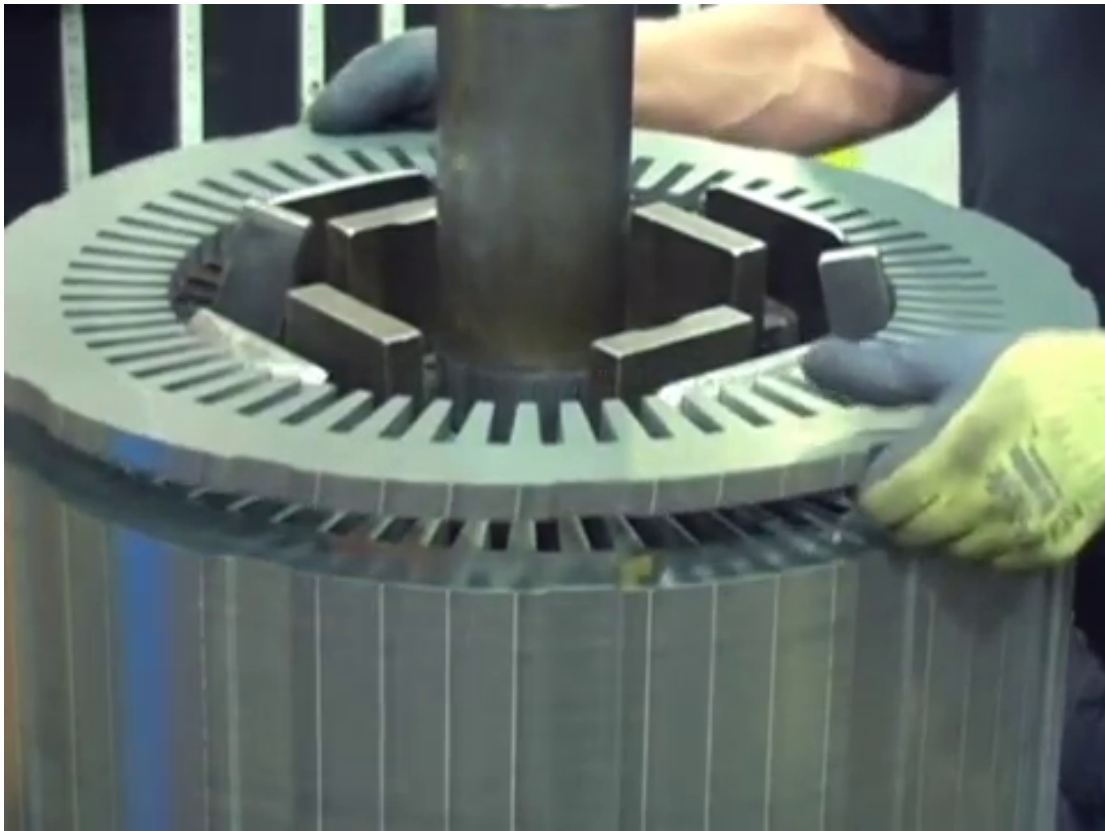


Figura 3.28. Laminación del estator.



Figura 3.29. Compresión del núcleo del estator.

Baldor usa el proceso llamado “Lean and six sigma” el cual permite reducir el embobinado de 21 días a 7.5 horas, todos los subprocesos (arrollado, forma y aislamiento del conductor) son controlados por computadora, por ejemplo, la bobina de la devanadera mantiene la tensión constante en el conductor mientras se construye el diámetro de la bobina, como se aprecia en la figura 3.30.



Figura 3.30. Devanadera produciendo la bobina.

Un robot aplica repetida y confiadamente cinta aislante a la periferia del conductor, durante el encintado la tensión de aislamiento y la superposición se llevan a cabo con las especificaciones más exigentes.



Figura 3.31. Colocación de encintado a la bobina.

Como se pudo observar el proceso es automatizado, pero el proceso de inserción de las bobinas en el estator aun se realiza manualmente. Se inserta papel aislante al estator para facilitar la colocación de las bobinas sin dañar la cinta aislante, como se puede apreciar en la figura 3.32.



Figura 3.32. Papel aislante en el estator.

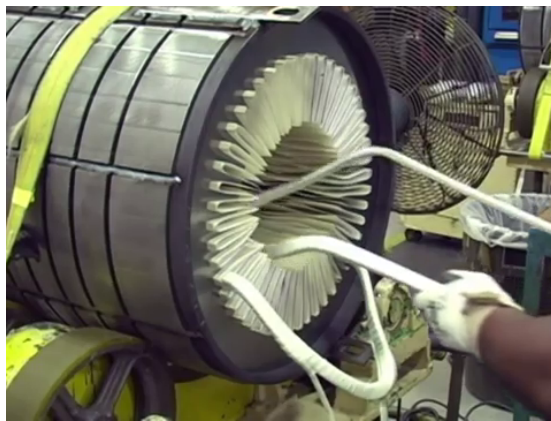


Figura 3.33. Inserción de las bobinas al estator.

A continuación el estator tiene una prueba de sobre tensión, eso permite asegurar la integridad de la bobina, finalmente los técnicos realizar pruebas de rigidez dieléctrica de los embobinados como comprobación final. Luego el estator pasa a una cámara de vacío, esto le da al conjunto rigidez y garantiza que las bobinas estén realmente aisladas. Una vez en la cámara, el estator es sometido al vacío obligando al aire salir de las cintas y los devanados.

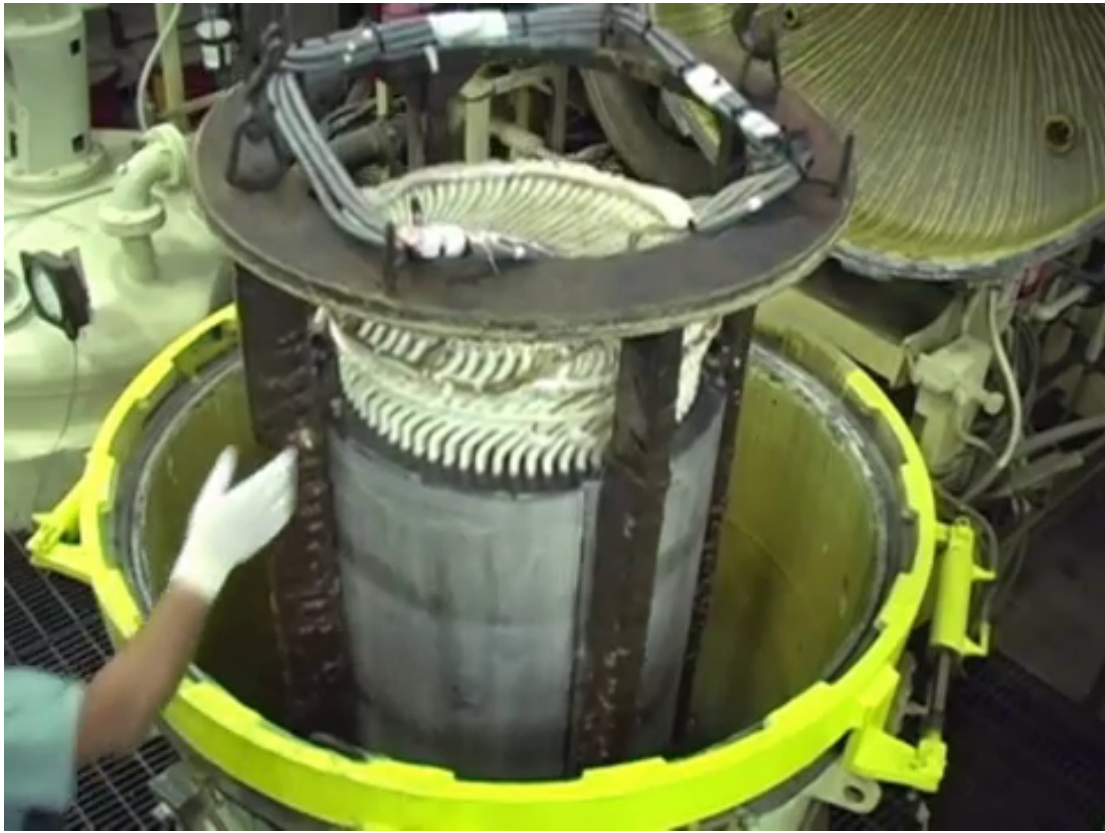


Figura 3.34. Cámara de vacío.

Igualmente el barniz se aplica al vacío y luego se introduce presión para forzar a la resina a adherirse en el conductor y la cinta. Cuando el estator sale de la cámara de vacío se coloca a girar horizontalmente en un horno para que se realice el proceso de curación de la resina, esto a objeto de mejorar la distribución, la penetración y la utilización del barniz (figura 3.35).



Figura 3.35. Estator en girando en horno para mejorar el proceso de barnizado.

A continuación, la carcasa del motor se baja sobre el núcleo del estator, y se inserta el conjunto del eje del rotor. Por último, las rolineras, tapas de rolineras, soportes finales, ventilador y la cubierta del ventilador están instalados para completar el montaje, todas estas etapas se observan en las siguientes figuras.



Figura 3.36. Acople de estator y rotor en carcasa.

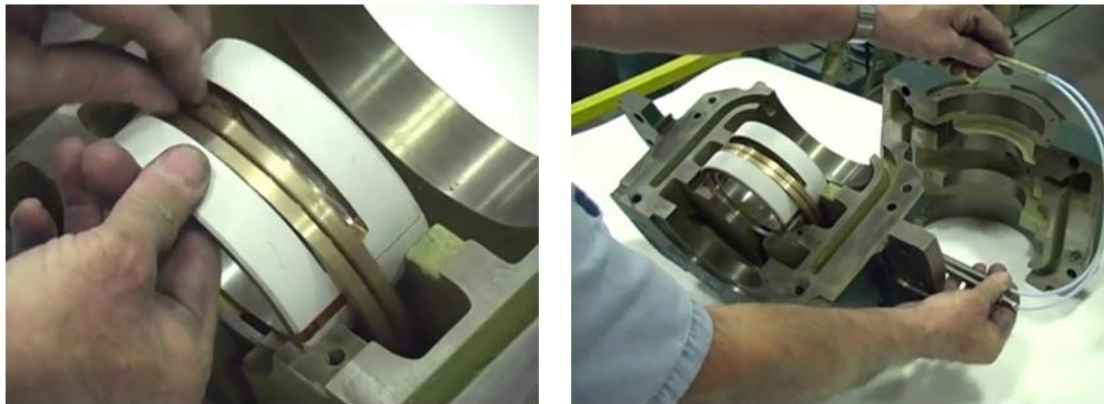


Figura 3.37. Ensamblaje de rolineras con sus tapas.

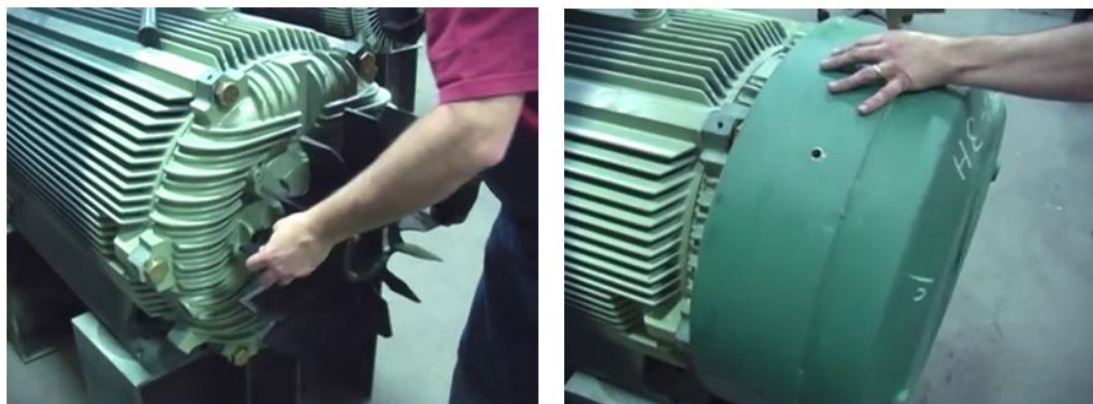


Figura 3.38. Colocación de ventilador con su respectiva tapa de seguridad

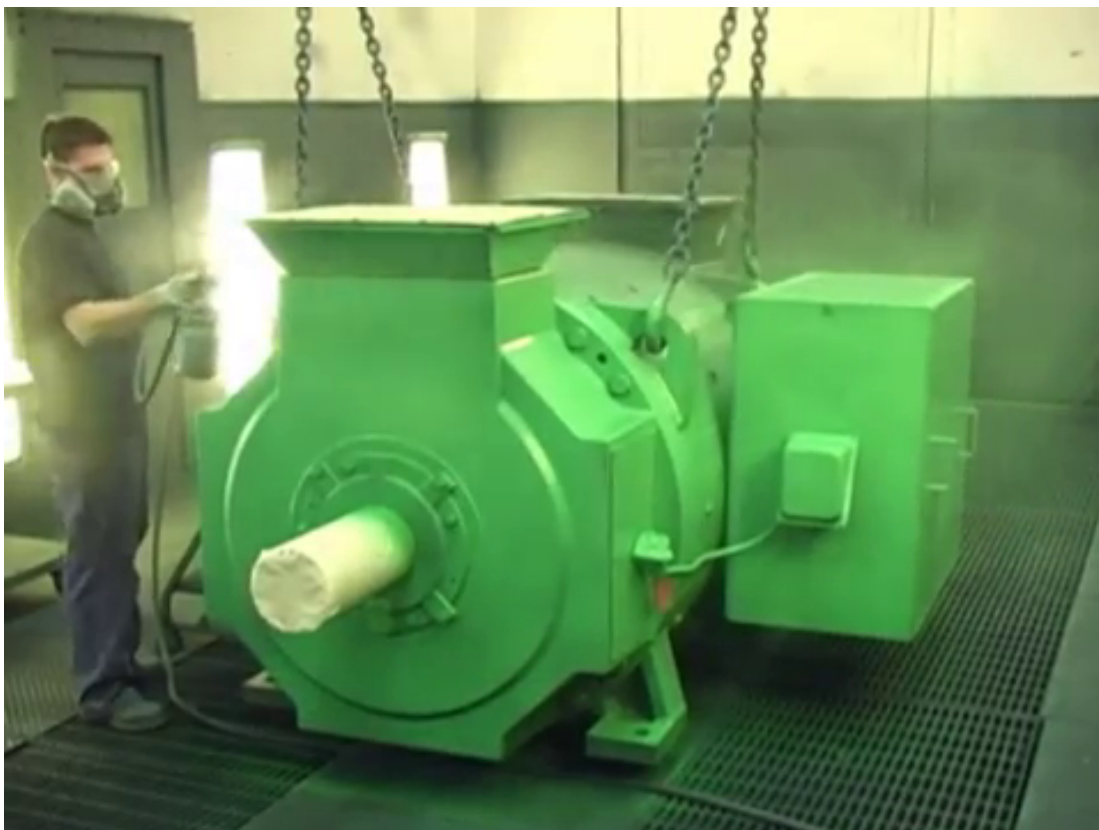


Figura 3.39. Aplicación de capa de pintura de protección para la carcasa.



Figura 3.40. Motor de inducción finalizado.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se explicarán los principales aspectos que fundamentan los métodos empleados para alcanzar los objetivos fijados en el presente trabajo de grado.

4.1. Ventajas del Algoritmo Simplex Entero Mixto

La herramienta que permitirá la mejora del diseño de la máquina de inducción es el algoritmo de búsqueda directa llamado Algoritmo Simplex Entero Mixto (ASEM), llamado así por el autor (Brea, 2013), debido a que se basa en el patrón de búsqueda directa conocido como el simplex.

Una de las razones de usar el ASEM en este trabajo de grado radica en la forma que se manejará el problema de diseño, debido a que el mismo tiene variables reales y enteras. Los algoritmos enteros mixtos han venido ocupando un lugar muy importante en el campo de la ingeniería; esto se debe a que muchos diseños contienen variables de diseño enteras mixtas y en la mayoría de los casos no se debería relajar aquellas variables enteras al problema de variables reales usando algoritmos de optimización desarrollados para las mismas.

Debido a que el modelo de diseño planteado es un procedimiento algorítmico y éste no posee una función explícita que dependa directamente de las variables de entrada y en consecuencia no se pueden obtener la derivada de la misma, esto

hace imposible emplear un algoritmo Newtoniano que dependen directamente de una función objetivo y su derivada. Esta es una de las grandes ventajas que tiene el ASEM, y es que no necesita la derivada ni una función objetivo explícita; esto es una gran ventaja debido a que el modelo de diseño de la máquina de inducción es un procedimiento. Esta herramienta nos permitirá evaluar y encontrar un óptimo local mientras que el punto de arranque se encuentre en la zona de factibilidad del procedimiento (es decir que el punto evaluado cumpla al menos con los criterios de diseño explicados en el capítulo anterior).

Brea (2013) señala que el ASEM es un algoritmo que trabaja con problemas irrestrictos; en consecuencia para el procedimiento de mejora de diseño de la máquina de inducción se escogió utilizar el método de funciones de penalización, este tipo de restricción funciona en el caso de que se pruebe un punto que no cumpla un parámetro o una restricción de diseño. A continuación, ésta lo penalizará y sumará un valor a la función objetivo (esto a objeto de desechar el punto en la próxima iteración). Por otra parte, el hecho de que el ASEM no requiere de derivadas, se puede emplear el método de función de penalización sin ningún problema, debido a que en las aristas de cada función de penalización estas no poseen derivadas.

Por último la ventaja que tiene el ASEM respecto al método desarrollado por Nelder y Mead (1965) es que este funciona por etapas garantizando la convergencia del algoritmo a un punto estacionario.

4.1.1. Algoritmo del ASEM

Como se ha dicho anteriormente el ASEM es la herramienta que permitió el mejoramiento de diseño de la máquina de inducción de la siguiente manera:

Para iniciar la búsqueda de un mínimo local, el ASEM inicia con los parámetros definidos previamente por el usuario; el número de etapas $s = 1$ y un punto

de arranque $v_0 \in \mathbb{R}^w \times \mathbb{Z}^w$, donde w es la dimensión máxima del vector real y entero. Con los parámetros definidos el ASEM construye un simplex entero mixto mediante la etapa de CONSTRUCCIÓN DE UN SIMPLEX ENTERO MIXTO. Si el ASEM es ejecutado bajo la modalidad de selección del mejor simplex entero mixto construido, el cual es indicado por el valor $m = 1$, el ASEM ejecutará el MEJORAMIENTO DEL SIMPLEX ENTERO MIXTO¹, e inicia el contador de iteraciones q en cero.

Una vez construido un simplex entero mixto inicial, el ASEM evalúa la función objetivo para cada uno de los vértices del simplex actual de los cuales se desconozcan su valor, ejecutando EVALUACIÓN. Seguidamente; se determina el orden de precedencia de sus vértices (ORDENAMIENTO), lo cual permite determinar el punto de prueba reflejado mediante el paso REFLEXIÓN. Al finalizar este último paso, el ASEM selecciona uno de los cuatro posibles casos, en función de la precedencia del punto de prueba reflejado, denotado por $\mathbf{v}_r$ comparándolo con la evaluación de los puntos $\mathbf{v}_1$, $\mathbf{v}_{\nu-1}$ y $\mathbf{v}_\nu$ ². Si $f(\mathbf{v}_\nu) < f(\mathbf{v}_1)$, el ASEM ejecuta la operación de EXPANSIÓN, donde determina si el vértice $\mathbf{v}_\nu$ será sustituido por el punto $\mathbf{v}_r$ o $\mathbf{v}_e$. Por otra parte, si $f(\mathbf{v}_1) \leq f(\mathbf{v}_r) \leq f(\mathbf{v}_{\nu-1})$, el ASEM reemplaza el vértice $\mathbf{v}_\nu$ por el punto de prueba $\mathbf{v}_r$. Sin embargo, si $f(\mathbf{v}_{\nu-1}) < f(\mathbf{v}_r) < f(\mathbf{v}_\nu)$ el algoritmo sustituye el vértice $\mathbf{v}_\nu$ para luego ejecutar la CONTRACCIÓN. Finalmente, en el caso de de que $f(\mathbf{v}_\nu) \leq f(\mathbf{v}_r)$, el algoritmo igualmente que el caso anterior ejecutará la operación de CONTRACCIÓN.

Una vez del que el ASEM tome una de las opciones de acuerdo a la precedencia de $\mathbf{v}_r$, respecto a $\mathbf{v}_1$, $\mathbf{v}_{\nu-1}$ y $\mathbf{v}_\nu$, el algoritmo determina la CUALIDAD del nuevo simplex de acuerdo al diámetro del simplex real, el cual es denotado por ℓ_x . El valor de ℓ_x es comparado con un criterio de parada $\kappa_x^{[s]}$ de s -ésima etapa, el cual

¹Este procedimiento cambia el sentido de los vértices del simplex para que esté mejor posicionado y se consiga la solución con un menor número de iteraciones.

² ν : número de vértices del simplex.

adquiere distintos valores según la etapa que se esté ejecutando. Si $\kappa_x^{[s]} \leq \ell_x$, el algoritmo ejecuta una nueva iteración dentro de la etapa actual, para decidir si continúa la búsqueda o no, de acuerdo al valor de $\Delta = \|\hat{\mathbf{v}}^{[s]} - \hat{\mathbf{v}}^{[s-1]}\|$. Si $\Delta \geq \varepsilon$, el ASEM asigna $\kappa_x^{[s]} \leftarrow \varphi \kappa_x^{[s]}$; $\Delta_r^{[s]} \leftarrow \rho \Delta_r^{[s]}$ y con $\mathbf{v}_1$ va al paso CONSTRUCCIÓN DE UN SIMPLEX ENTERO MIXTO a fin de arrancar una nueva etapa. En caso contrario, el ASEM reporta $\hat{\mathbf{v}}^{[s]}$ como mínimo ³.

A continuación se muestra el pseudocódigo del ASEM:

Algoritmo 4.1: Algoritmo Simplex Entero Mixto ASEM

Entrada:

- v_0 : Vector de arranque del ASEM de dimensión n ;
- $\kappa_x^{[1]}$: Criterio de parada para la primera etapa;
- $\Delta_r^{[1]}$: Parámetro de tamaño del paso real;
- $\Delta_e^{[1]}$: Parámetro de tamaño del paso entero;
- ε : Parámetro de tolerancia de salida del ASEM;
- φ : Coeficiente de reducción del $\kappa_x^{[s]a}$;
- α_r : Coeficiente de reflexión real;
- α_e : Coeficiente de reflexión entero;
- β_r : Coeficiente de expansión real;
- β_e : Coeficiente de expansión entero;
- γ_r : Coeficiente de contracción real;
- γ_e : Coeficiente de contracción entero;
- δ_r : Coeficiente de encogimiento real;
- δ_e : Coeficiente de encogimiento entero;
- m : Variable lógica;

Ejecute

- Procedimiento 1 (algoritmo 4.2);*
- Procedimiento 2 (algoritmo 4.3);*

Salida:

- $\hat{\mathbf{v}}^{[s]}$: Vector solución de dimensión n ;

^as: etapa del ASEM.

³Un ejemplo numérico se muestra en el apéndice IV.

Algoritmo 4.2: Procedimiento 1

```
inicio
  Ejecute
    | Construcción de un Simplex Entero Mixto de vertices  $\nu = n + 1$ ;
    | Asigne al contador de iteraciones  $q = 0$ ;
  si  $m = 1$  entonces
    Ejecute
      | Mejoramiento del Simplex Entero Mixto;
  fin de si
  Ejecute
    | Evaluación: Evalúe los vertices cuyos valores son desconidos;
    |  $f_i = f(\mathbf{v}_i) \forall i = 1, \dots, \nu$ ;
    | Ordenamiento: Ordene los vértices del simplex actual tal que;
    |  $f(\mathbf{v}_1) \leq f(\mathbf{v}_2) \leq \dots \leq f(\mathbf{v}_{\nu-1}) \leq f(\mathbf{v}_\nu)$ ;
    | Reflexión: Determine el punto reflejado  $\mathbf{v}_r$ ;
  si  $f(\mathbf{v}_r) < f(\mathbf{v}_1)$  entonces
    Ejecute
      | Expansión: Determine el punto expandido  $\mathbf{v}_e$ ;
    si  $f(\mathbf{v}_e) < f(\mathbf{v}_r)$  entonces
      Asigne a:
        |  $f(\mathbf{v}_\nu) \leftarrow f(\mathbf{v}_e)$ ;
      ir a
        | Calidad;
    fin de si
    si  $f(\mathbf{v}_r) \leq f(\mathbf{v}_1)$  entonces
      Asigne a:
        |  $f(\mathbf{v}_\nu) \leftarrow f(\mathbf{v}_r)$ ;
      ir a
        | Calidad;
    fin de si
  fin de si
  si  $f(\mathbf{v}_1) \leq f(\mathbf{v}_r) \leq f(\mathbf{v}_{\nu-1})$  entonces
    Asigne a:
      |  $f(\mathbf{v}_\nu) \leftarrow f(\mathbf{v}_r)$ ;
    ir a
      | Calidad;
  fin de si
fin
```

Algoritmo 4.3: Procedimiento 2

```
Ejecute
si  $f(\mathbf{v}_{\nu-1}) < f(\mathbf{v}_r) < f(\mathbf{v}_\nu)$  entonces
  Asigne a:
  |  $f(\mathbf{v}_\nu) \leftarrow f(\mathbf{v}_r)$ ;
  ir a
  | Contracción;
fin de si
si  $f(\mathbf{v}_\nu) \leq f(\mathbf{v}_r)$  entonces
  Ejecute
  | Contracción: Determine el punto contraído  $\mathbf{v}_c$ ; si  $f(\mathbf{v}_\nu) < f(\mathbf{v}_c)$ 
  entonces
    Ejecute
    | Encogimiento: Construya un simplex encogido  $\mathbf{X}$  y  $\mathbf{Y}$ ;
    ir a
    | Calidad;
  fin de si
  si  $f(\mathbf{v}_c) \leq f(\mathbf{v}_\nu)$  entonces
    Asigne a:
    |  $\mathbf{v}_\nu \leftarrow \mathbf{v}_c$ ;
    Ejecute
    | Calidad: Determine  $\ell_x = \text{diám}(\mathbf{X}^{[q]})$ ;
  fin de si
fin de si
si  $\ell_x \geq \kappa_x^{[s]}$  entonces
  Asigne a:
  |  $q \leftarrow q + 1$ ;
  ir a
  | Evaluación;
si no
  Asigne a:
  |  $s \leftarrow s + 1$ ;
  |  $\hat{\mathbf{v}} \leftarrow \mathbf{v}_1$ ;
  Determine:
  |  $\Delta = \|\hat{\mathbf{v}}^{[s]} - \hat{\mathbf{v}}^{[s-1]}\|$ ;
  si  $\Delta \geq \varepsilon$  entonces
    Asigne a:
    |  $\mathbf{v}_0 \leftarrow \mathbf{v}_1$ ;
    |  $\kappa_x^{[s]} \leftarrow \varphi \kappa_x^{[s]}$ ;
    |  $\Delta_r^{[s]} \leftarrow \rho \Delta_r^{[s]}$ ;
  si no
    Reporte:
    |  $\hat{\mathbf{v}}^{[s]}$  como mínimo;
  fin de si
fin de si
```

4.2. Procedimiento de Diseño de la Máquina de Inducción

En este apartado se explicará el procedimiento de diseño de la máquina inducción, este diseño es para una máquina de rotor jaula de ardilla trifásico, tomando como base el procedimiento para el dimensionamiento de la misma; las variables de decisión para el procedimiento estarán divididas en variables reales y enteras, debido al tipo de algoritmo de búsqueda directa que se utilizará. Todas las distancias están dadas en metros.

4.2.1. Variables de Decisión

Las variables de decisión que se tomarán para este diseño son sugeridas por Boldea y Nasar (2010), los autores aseguran que estas son las variables más significativas para el diseño de la máquina de inducción⁴. Las variables de decisión son las siguientes:

Variables Reales

- 1) D_{is} : Diámetro interno del estator.
- 2) D_{out} : Diámetro externo del estator.
- 3) b_{os} : Distancia de la boquilla de entrada de la ranura del estator.
- 4) h_{os} : Altura boquilla de entrada del estator de la ranura.
- 5) h_w : Altura de la base de la ranura del estator.
- 6) b_{ts} : Distancia entre ranuras del estator.
- 7) b_{tr} : Distancia entre ranuras del rotor.

⁴Las variables de decisión se supondrán como datos conocidos, por esta razón no se mostrará el cálculo de las mismas.

- 8) d_2 : Diámetro interno inferior de la ranura del rotor.
- 9) a : Ancho de la salida del extremo del anillo del rotor.
- 10) b : Largo de la salida del extremo del anillo del rotor.
- 11) h_{cr} : Espesor de la chapa de apilamiento.
- 12) D_{co} : Diámetro del conductor no normalizado.

Variables enteras

- 1) P_1 : Par de polos.
- 2) q : Número de Ranuras por Polo del estator.
- 3) w_1 : Número de vueltas por fase del estator.
- 4) a_1 : Número de caminos paralelos de corriente.
- 5) n_{cd} : Número de conductores por ranura.
- 6) N_r : Número de ranuras del rotor.

La geometría del estator y rotor se muestra en las siguientes figuras 4.1 y 4.2.

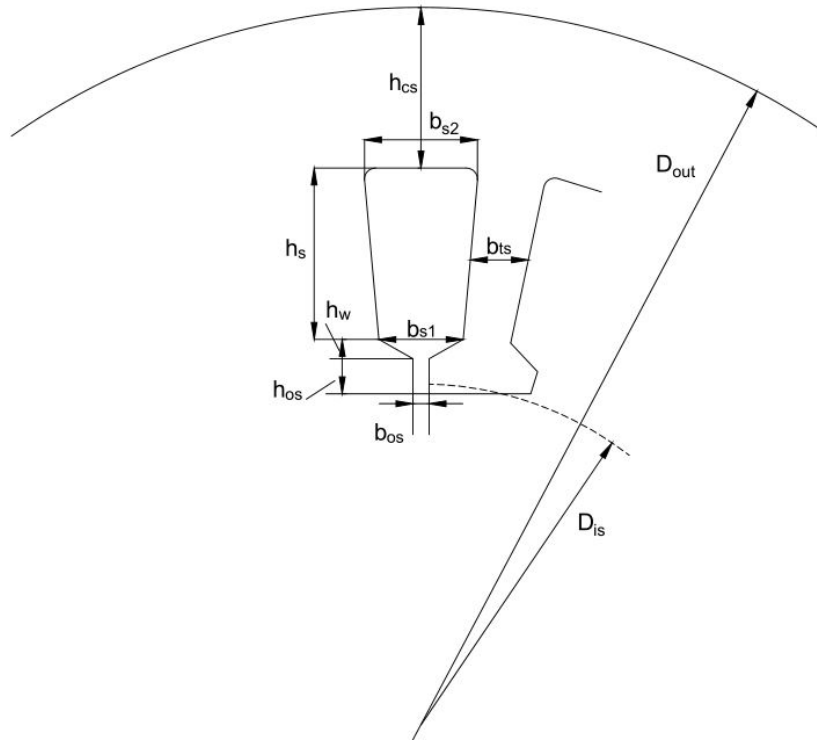


Figura 4.1. Geometría del estator.

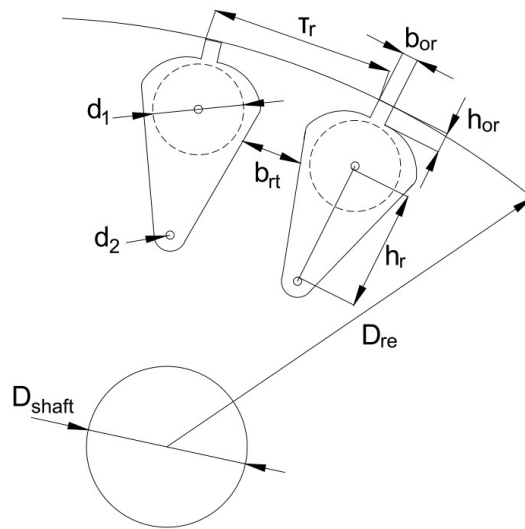


Figura 4.2. Geometría del rotor.

4.2.2. Dimensionamiento del Estator

Para determinar el volumen que tendrá el estator se requiere la densidad de energía en el entre hierro. Para esto es necesario calcular la potencia aparente del mismo (S_{gap}).

$$S_{gap} = \frac{k_e P_n}{\eta \cos(\phi_l)}, \quad (4.1)$$

donde P_n es la potencia de salida del motor en Watts, η es la eficiencia buscada de la máquina de inducción, $\cos(\phi_l)$ se refiere al factor de potencia y finalmente, k_e es en valor por unidad, de la reactancia de fuga del estator.

$$k_e = 0,98 - 0,005P_1. \quad (4.2)$$

Teniendo la potencia aparente del entre hierro se procede a calcular la constante de Esson (c_0), la cual es la densidad de energía en el entre hierro. Este valor depende del números de par de polos P_1 de la máquina, como se puede observar en la figura 3.7. Las curvas interpoladas para cada par de polos P_1 son:

$$c_0 = \begin{cases} 5 \times 10^{-11} S_{gap}^3 + 4 \times 10^{-6} S_{gap}^2 + 0,3477 S_{gap} + 106491, & \forall P_1 = 1; \\ 2 \times 10^{-12} S_{gap}^3 + 2 \times 10^{-7} S_{gap}^2 + 1,4201 S_{gap} + 134834, & \forall P_1 = 2; \\ -3 \times 10^{-10} S_{gap}^3 + 1 \times 10^{-5} S_{gap}^2 + 2,5705 S_{gap} + 124317, & \forall P_1 = 3; \\ 6 \times 10^{-10} S_{gap}^3 - 7 \times 10^{-5} S_{gap}^2 + 5,4034 S_{gap} + 116593, & \forall P_1 = 4. \end{cases} \quad (4.3)$$

Con la constante de Esson se tiene la densidad de energía del entre hierro, esto nos permite calcular la relación de longitud de apilamiento λ :

$$\lambda = \frac{2P_1^2 S_{gap}}{\pi D_{is}^3 f c_0}, \quad (4.4)$$

donde, f es la frecuencia eléctrica del sistema en Hz. Sujeto a:

$$\lambda = \begin{cases} 0,6 \leq \lambda \leq 1,0, & \forall 2P_1 = 2; \\ 1,2 \leq \lambda \leq 1,8, & \forall 2P_1 = 4; \\ 1,6 \leq \lambda \leq 2,2, & \forall 2P_1 = 6; \\ 2 \leq \lambda \leq 3, & \forall 2P_1 = 8. \end{cases} \quad (4.5)$$

Teniendo λ se calcula la longitud del apilamiento, el paso polar y paso de ranuras del estator L , τ y τ_s , respectivamente.

$$L = \frac{\lambda \pi D_{is}}{2P_1}, \quad (4.6)$$

$$\tau = \frac{\pi D_{is}}{2P_1}, \quad (4.7)$$

$$\tau_s = \frac{\tau}{3q}. \quad (4.8)$$

En la metodología descrita por Boldea y Nasar (2010) señalan la relación existente entre el diámetro interno y externo del estator k_D el cual viene dado por

$$k_D = \frac{D_{is}}{D_{out}}. \quad (4.9)$$

La ecuación (4.9) como muchas otras usadas a lo largo de esta metodología son resultado de experiencias pasadas en el diseño de las máquinas de inducción.

Igualmente los autores señalan que k_D depende del número de par de polos de la máquina:

$$k_D = \begin{cases} 0,43 \leq k_D \leq 0,63, & \forall 2P_1 = 2; \\ 0,57 \leq k_D \leq 0,72, & \forall 2P_1 = 4; \\ 0,62 \leq k_D \leq 0,75, & \forall 2P_1 = 6; \\ 0,66 \leq k_D \leq 0,79, & \forall 2P_1 = 8. \end{cases} \quad (4.10)$$

Igualmente la distancia del entre hierro g viene dada por las siguientes expresiones:

a) Para $2P_1 = 2$:

$$g = (0,1 + 0,02\sqrt[3]{P_n})1 \times 10^{-3} \quad (4.11)$$

b) Para $2P_1 \geq 2$:

$$g = (0,1 + 0,012\sqrt[3]{P_n})1 \times 10^{-3} \quad (4.12)$$

El número de ranuras del estator N_s viene dado por:

$$N_s = 2P_1 q m, \quad (4.13)$$

donde m representa el número de fases de la máquina.

A continuación se procede a calcular el factor de devanado c_{13} , para esto se necesita respectivamente el factor de zona y el factor de paso k_{q1} y k_{y1} .

$$k_{q1} = \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi}{6}\right)}{q \text{sen}\left(\frac{\pi}{6q}\right)} \quad (4.14)$$

$$k_{y1} = 0,9397 \quad (4.15)$$

$$c_{13} = k_{q1}k_{y1} \quad (4.16)$$

Teniendo el número de vueltas por fase w_1 y suponiendo un valor de diente de saturación k_{st} igual a 0,4 (este valor se supondrá para todos los casos de estudio) para obtener el coeficiente de expansión c_1 y el factor de forma c_2 , los cuales permiten calcular el flujo magnético (ϕ) y la densidad de flujo (B_g) del entre hierro. Los coeficientes c_1 y c_2 se calculan por las siguientes ecuaciones:

$$c_1 = -0,0145(k_{st} + 1)^4 + 0,1495(k_{st} + 1)^3 - 0,5842(k_{st} + 1)^2 + 1,0713(k_{st} + 1) + 0,018 \quad (4.17)$$

$$c_2 = 0,0051(k_{st} + 1)^4 - 0,0452(k_{st} + 1)^3 + 0,1526(k_{st} + 1)^2 - 0,2673(k_{st} + 1) + 1,2643 \quad (4.18)$$

con c_2 calculado se determina el flujo ϕ del entre hierro, por la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{K_e \frac{V_l}{\sqrt{3}}}{4c_2c_{13}fw_1}, \quad (4.19)$$

donde V_l es el voltaje de línea de la máquina.

La densidad de flujo del entre hierro B_g es:

$$B_g = \frac{\phi}{c_1\tau L} \quad (4.20)$$

sujeto a:

$$B_g = \begin{cases} (0,5 \leq B_g \leq 0,75)T, & \forall 2P_1 = 2; \\ (0,65 \leq B_g \leq 0,78)T, & \forall 2P_1 = 4; \\ (0,7 \leq B_g \leq 0,82)T, & \forall 2P_1 = 6; \\ (0,75 \leq B_g \leq 0,85)T, & \forall 2P_1 = 8. \end{cases} \quad (4.21)$$

Con la corriente nominal de la máquina I_{n1} y el área de la sección transversal del conductor A_{co} , se calcula la densidad de corriente del estator J_{cos} :

$$I_{n1} = \frac{P_n}{\eta \cos(\phi_l) \sqrt{3} V_l}, \quad (4.22)$$

$$A_{co} = \frac{D_{co}^2 \pi a_1}{4}, \quad (4.23)$$

$$J_{cos} = \frac{I_{n1}}{A_{co} a_1}, \quad (4.24)$$

sujeto a:

$$J_{cos} = \begin{cases} (4 \leq J_{cos} \leq 7) \frac{A}{mm^2}, & \forall 2 \leq 2P_1 \leq 4; \\ (5 \leq J_{cos} \leq 8) \frac{A}{mm^2}, & \forall 5 \leq 2P_1 \leq 8. \end{cases} \quad (4.25)$$

Teniendo el diámetro del conductor D_{co} , se calcula el área de la ranura del estator A_{su} , para todos los procesos de diseño de este trabajo de grado se utilizó una ranura para el estator de forma trapezoidal ⁵ como se muestra en la figura 4.1 (página 58).

⁵Esta configuración es la más adecuada para máquinas de potencia menores a 100 kW.

$$A_{su} = \frac{\pi D_{co}^2 a_1 n_{cd}}{4c_3}, \quad (4.26)$$

donde c_3 es el factor de llenado de la ranura del estator, este valor se asumirá constante igual a 0,4.

Calculando la densidad de flujo de los dientes del estator B_{ts} , tenemos:

$$B_{ts} = \frac{B_g \tau_s}{b_{ts} c_4}, \quad (4.27)$$

donde c_4 representa el factor de apilamiento igual a 0.96 (constante en el proceso de diseño). Sujeto a:

$$(1,5 \leq B_{ts} \leq 1,6)T. \quad (4.28)$$

Para el cálculo del ancho inferior (b_{s1}) y superior (b_{s2}) de las ranuras del estator mostrados en la figura 4.1, se empleará:

$$b_{s1} = \frac{\pi(D_{is} + (2h_{os}) + (2h_w))}{N_s} - b_{ts}, \quad (4.29)$$

$$b_{s2} = \sqrt{(4A_{su} \operatorname{Tg}\left(\frac{\pi}{N_s}\right) 1 \times 10^{-6}) + (b_{s1}^2)}. \quad (4.30)$$

Una vez obtenido los valores b_{s1} y b_{s2} , se calcula la altura de la ranura h_s , la cual viene dada por la siguiente expresión:

$$h_s = \frac{2A_{su}}{b_{s1} + b_{s2}} 1 \times 10^{-6}. \quad (4.31)$$

A continuación se calcula las FMM del entre hierro (Fmm_g), de las ranuras estator (Fmm_{ts}) y rotor(Fmm_{tr}), esto a objeto de validar el diseño del estator posteriormente.

$$Fmm_g = \frac{c_5 g B_g}{\mu_0}, \quad (4.32)$$

donde c_5 es el coeficiente de Carter, este se supondrá para todos los casos de estudio 1.2, debido a que los autores aseguran que es una buena aproximación, μ_0 es el coeficiente de permitibilidad magnética del aire.

La FMM⁶ de las ranuras del estator viene dada por:

$$Fmm_{ts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w), \quad (4.33)$$

donde H_{ts} denota la intensidad del campo magnético del estator, valor de tabla III.1.

Cálculo de h_{cs} (ver figura 4.1):

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{is} + (2(h_{os} + h_w + h_s)))}{2} \quad (4.34)$$

La densidad de flujo de las chapas del estator B_{cs} es:

⁶Valor medio de la FMM (todas las FMM calculadas en este trabajo de grado sera el valor medio de la misma).

$$B_{cs} = \frac{\phi}{2Lh_{cs}}, \quad (4.35)$$

sujeto a:

$$(1, 4 \leq B_{ts} \leq 1, 7)T \quad (4.36)$$

4.2.3. Dimensionamiento del Rotor

Para el dimensionamiento del rotor (escogiendo la configuración de la figura 4.2 de la página 58 ⁷); se calcula el paso de ranura τ_r (conociendo el valor de N_r ⁸), con este valor se calculará la densidad de flujo B_{tr} :

$$\tau_r = \frac{\pi(D_{is} + (2g))}{N_r}, \quad (4.37)$$

la densidad B_{tr} es:

$$B_{tr} = \frac{B_g \tau_r}{c_4 b_{tr}}, \quad (4.38)$$

sujeto a:

$$(1, 5 \leq B_{tr} \leq 1, 8)T. \quad (4.39)$$

En esta metodología se tomarán por recomendación de los autores (Boldea y Nasar, 2010) constantes el ancho b_{or} y alto de la ranura del rotor h_{or} , $1,5 \times 10^{-3}$ y $0,5 \times 10^{-3}$ respectivamente, para calcular el diámetro d_1 y la distancia h_r entre el centro de d_1 y d_2 y así obtener el área efectiva de la ranura del rotor A_b .

$$d_1 = \frac{\pi(D_{is} - (2h_{or})) - (N_r b_{tr})}{\pi + N_r} \quad (4.40)$$

⁷Igualmente al estator, esta configuración es común para motores de potencia menor a 100 kW.

⁸Existe combinaciones entre el número de ranuras del rotor y estator, esto a objeto de evitar la presencias de par parásitos, fuerzas radiales, ruido y vibraciones. Las combinaciones se presentan en la tabla II.1 de la página 133.

$$h_r = \frac{d_1 - d_2}{2 \operatorname{Tg} \left(\frac{\pi}{N_r} \right)}. \quad (4.41)$$

El área efectiva de la ranura del rotor es:

$$A_b = \frac{\pi}{8}(d_1^2 + d_2^2) + \left(\frac{d_1 + d_2}{4} \frac{d_1 - d_2}{\operatorname{Tg} \left(\frac{\pi}{N_r} \right)} \right) \quad (4.42)$$

Una vez obtenida el área efectiva de la ranura del motor A_b , se calcula la densidad de corriente de la barra del rotor J_b , para esto se requiere calcular la corriente de la misma I_b .

$$I_b = \frac{2c_6 m w_1 c_{13} I_{n1}}{N_r}, \quad (4.43)$$

donde c_6 representa la constante que divide los efectos de las FMM del estator y rotor (si $c_6 = 1$ las FMM del rotor y estator tendrían la misma magnitud) y se rige por la siguiente ecuación:

$$c_6 = 0,8 \cos(\phi_l) + 0,2, \quad (4.44)$$

la densidad de corriente en la barra J_b es:

$$J_b = \frac{I_b}{A_b \times 10^6}, \quad (4.45)$$

este valor esta sujeto a la aplicación o tipos de barras del rotor de la máquina. A continuación se muestran los valores según su aplicación:

$$J_b = \begin{cases} (2,2 \leq J_b \leq 4,5) \frac{A}{mm^2} & \text{Para barras de aluminio} \\ (5,5 \leq J_b \leq 7,5) \frac{A}{mm^2} & \text{Rotor de barra profunda} \\ (6,5 \leq J_b \leq 7) \frac{A}{mm^2} & \text{Cargas de alta inercia y alta velocidad nominal} \end{cases} \quad (4.46)$$

Dimensionamiento de la Sección Transversal del Extremo del Anillo

Para el dimensionamiento de los extremos del anillo, se tomarán como valores conocidos a y b , siguiendo la geometría de la figura 4.3.

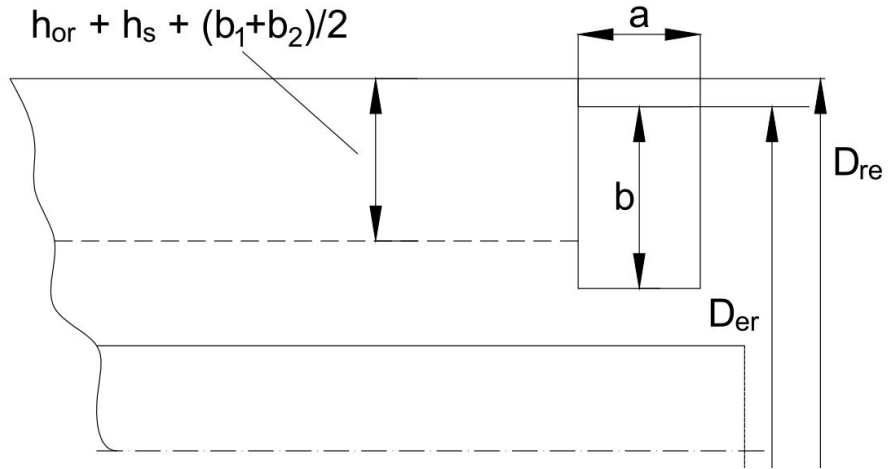


Figura 4.3. Geometría del extremo del anillo.

Dado los valores a y b , sujeto a:

$$(1, 1x_a \leq b \leq 1, 2x_a), \quad (4.47)$$

donde x_a es:

$$x_a = (h_r + h_{or} + \frac{d_1 + d_2}{2}). \quad (4.48)$$

El área efectiva del extremo del anillo A_{er} es:

$$A_{er} = ab, \quad (4.49)$$

la longitud del diámetro de extremo del anillo D_{er} es:

$$D_{er} = D_{is} - 2g - d_1, \quad (4.50)$$

generalmente Boldea y Nasar (2010) señalan que la relación entre D_{er} y D_{re} , esta sujeta a:

$$(3 \times 10^{-3} \leq (D_{re} - D_{er}) \leq 4 \times 10^{-3})m \quad (4.51)$$

A continuación se calculará la corriente del extremo del anillo I_{er} para verificar los valores de la densidad de corriente J_{er} de la sección:

$$I_{er} = \frac{I_b}{2\text{sen}(\frac{\pi P_1}{N_r})}. \quad (4.52)$$

La densidad de corriente de la barra J_{er} es:

$$J_{er} = \frac{I_{er}}{A_{er}} \frac{A}{1 \times 10^6 \text{ mm}^2}, \quad (4.53)$$

sujeto a:

$$(0,7J_b \leq J_{er} \leq 0,8J_b) \frac{A}{\text{mm}^2}. \quad (4.54)$$

A continuación se calcula la FMM de los dientes del rotor Fmm_{tr} , para validar las magnitudes respecto a la FMM del estator Fmm_{ts} .

$$Fmm_{tr} = H_{tr}(h_r + h_{or} + \frac{d_1 + d_2}{2}) \quad (4.55)$$

donde H_{tr} , denota la intensidad del campo magnético para B_{tr} (ver tabla III.1 página 147).

Una vez calculada la FMM del rotor se comparará con la FMM del estator, esto a objeto de validar el proceso de diseño de la máquina de inducción, Boldea y Nasar (2010) señalan que las magnitudes de las FMM tienen que estar cercanas al orden de magnitud (no más de un 20 % respecto a la mayor magnitud); esto se debe a que la FMM producida por la corriente de carga del estator tiene que contrarrestar la FMM del rotor.

Ahora se procede a verificar la densidad de flujo de la laminación del rotor B_{cr} con la siguiente expresión:

$$B_{cr} = \frac{\phi}{2Lh_{cr}}, \quad (4.56)$$

sujeto a:

$$(1,4 \leq B_{cr} \leq 1,7)T. \quad (4.57)$$

El diámetro máximo del eje del rotor $D_{ShaftMax}$:

$$D_{ShaftMax} = D_{is} - (2g) - 2(h_{or} + \frac{d_1 + d_2}{2} + h_r + h_{cr}). \quad (4.58)$$

Diámetro mínimo del eje del rotor $D_{ShaftMin}$:

$$D_{ShaftMin} = \sqrt[3]{\frac{T_{en}16}{\pi\sigma}} \quad (4.59)$$

donde T_{en} es el par nominal, suponiendo un deslizamiento nominal igual a 0,02 y éste es determinado por

$$T_{en} = \frac{P_1 P_n}{2\pi f(1 - 0,02)}, \quad (4.60)$$

y σ es la resistencia de torsión del material.

Si el diámetro mínimo del eje del estator es mayor a su diámetro máximo, se debe comenzar el proceso de diseño y escoger un valor de D_{is} mayor, que cumpla con el criterio de diseño.

4.2.4. Cálculo de la Corriente de Magnetización

Para conocer el valor de la corriente de magnetización de la máquina de inducción se procede a calcular del coeficiente de Carter c_5 ⁹. Este coeficiente está definido matemáticamente por

$$c_5 = k_{c1} k_{c2}, \quad (4.61)$$

donde k_{c1} y k_{c2} son determinados por la siguiente expresión

$$k_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1}, \quad (4.62)$$

$$k_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2}, \quad (4.63)$$

⁹Boldea y Nasar (2010) señalan que aunque 1.2 es una buena aproximación para cálculos anteriores, para la corriente de magnetización es recomendable calcular el coeficiente de Carter.

donde γ_1 y γ_2 representan la dispersión magnetica del estator y rotor, respectivamente y se rigen por las siguientes ecuaciones:

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{(5g) + b_{os}}, \quad (4.64)$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{(5g) + b_{or}}. \quad (4.65)$$

Una vez determinado el coeficiente de Carter, se calcula las FMM en el entre hierro a través de

$$Fmm_g = \frac{c_5 g B_g}{\mu_0}. \quad (4.66)$$

Para FMM de la laminación del estator Fmm_{cs} se tiene:

$$Fmm_{cs} = \frac{(0,88 \exp(-0,4B_{cs}^2)\pi(D_{out} - h_{cs})H_{cs})}{2P_1}. \quad (4.67)$$

En cuanto a la FMM de la laminación del rotor Fmm_{cr} , ésta puede ser determinado por

$$Fmm_{cr} = \frac{(0,88 \exp(-0,4B_{cr}^2)\pi(D_{shaftN} + h_{cr})H_{cr})}{2P_1}, \quad (4.68)$$

donde H_{cr} y H_{cs} denotan las intensidades de campo magnético para las densidades B_{cr} y B_{cs} respectivamente (ver tabla III.1 página 147), D_{shaftN} es el diámetro normalizado del eje del rotor (para este trabajo de grado se supondrá el diámetro máximo $D_{ShaftMax}$).

La FMM total de la máquina Fmm_T es:

$$Fmm_T = 2(Fmm_g + Fmm_{ts} + Fmm_{tr} + Fmm_{cr} + Fmm_{cs}). \quad (4.69)$$

Finalmente la corriente de magnetización de la máquina de inducción en Amp es:

$$I_\mu = \frac{\pi P_1 Fmm_T}{6\sqrt{2}w_1 c_{13}}. \quad (4.70)$$

4.2.5. Circuito Equivalente de la Máquina de Inducción

En esta sección se procederá a calcular el circuito equivalente del motor de inducción de la siguiente manera:

Resistencia de fase del estator

Con el número de ranuras por polos (y) se calcula la longitud final de conexión (l_{end}) y la longitud de la bobina de la resistencia de fase del estator (l_c).

$$y = 0,7778\tau, \quad (4.71)$$

donde τ es el paso polar.

La longitud final de conexión dependiendo del número de pares de polos es:

$$l_{end} = \begin{cases} 2y - 0,04, & \forall 2P_1 = 2; \\ 2y - 0,02, & \forall 2P_1 = 4; \\ \frac{\pi y}{2} + 0,018, & \forall 2P_1 = 6; \\ 2,2y - 0,012, & \forall 2P_1 = 8. \end{cases} \quad (4.72)$$

La longitud de la bobina es:

$$l_c = 2(L + l_{end}). \quad (4.73)$$

Para la clase de aislamiento se supondrá constante (tipo F a 80°C)

La resistencia del cobre en Ωm del cobre a 80°C es:

$$\rho_{(Co80)} = \rho_{(Co20)} c_7, \quad (4.74)$$

donde $\rho_{(Co20)}$ es la resistencia del cobre a 20°C y es igual a $1,78 \times 10^{-8} [\Omega\text{m}]$ y c_7 es la constante de temperatura que permite la conversión de la resistencia del material de 20°C a 80°C y tiene el valor de 1,2198.

Finalmente la resistencia R_s del estator viene dada por la siguiente expresión:

$$R_s = \rho_{(Co80)} \frac{l_c w_1}{A_{co} a_1 \times 10^{-6}} \quad (4.75)$$

Resistencia del rotor a velocidad cero

Para el cálculo de la resistencia del rotor, se requiere el largo del segmento del anillo l_{er} , este es calculado por:

$$l_{er} = \frac{\pi(D_{er} - b)}{N_r}. \quad (4.76)$$

El efecto pelicular c_8 de la resistencia de la barra del rotor es:

$$c_8 = \xi \frac{\sinh(2\xi) + \sin(2\xi)}{\cos(2\xi)}, \quad (4.77)$$

donde:

$$\xi = b_s(20e - 3)\sqrt{S}, \quad (4.78)$$

donde S representa el deslizamiento de la máquina.

$$b_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\rho_{(Al20)}}} \quad (4.79)$$

donde $\rho_{(Al20)}$, es la resistencia térmica del aluminio a 20°C igual a $3,1 \times 10^{-8} [\Omega m]$.

Resistencias de las barras del rotor a 80°C $R_{be(80)}$ es:

$$R_{be(80)} = \rho_{(Al20)} c_7 \left(\frac{L c_8}{A_b} + \frac{l_{er}}{2 A_{er} \left(\sin\left(\frac{\pi P_1}{N_r}\right)^2 \right)} \right). \quad (4.80)$$

La resistencia del rotor a $S = 1$ es:

$$R_r^{S=1} = \frac{4m}{N_r} (w_1 c_{11})^2 R_{be(80)}. \quad (4.81)$$

Reactancia de Fuga del Estator

La reactancia de fuga del estator viene dado por la siguiente ecuación:

$$x_{sl} = \frac{2\mu_0 2\pi f L w_1^2}{P_1 q} (\lambda_S + \lambda_{ds} + \lambda_{ec}), \quad (4.82)$$

donde λ_S , λ_{ds} , λ_{ec} son los coeficientes del extremo del anillo.

$$\lambda_S = \left(\frac{2h_s}{3(b_{s1} + b_{s2})} + \frac{2h_w}{(b_{os} + b_{s1})} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right) 0,833 \quad (4.83)$$

$$\lambda_{ds} = \frac{0,9c_{13}qc_{11}^2C_s\gamma_{ds}}{c_5g(k_{st} + 1)}, \quad (4.84)$$

donde γ_{ds} depende del número de ranuras por polo q :

$$\gamma_{ds} = \begin{cases} (0,11\text{sen}(\phi_1) + 0,28)1 \times 10^{-2}, & \forall q = 8; \\ (0,11\text{sen}(\phi_1) + 0,41)1 \times 10^{-2}, & \forall q = 6; \\ (0,14\text{sen}(\phi_1) + 0,76)1 \times 10^{-2}, & \forall q = 4; \\ (0,18\text{sen}(\phi_1) + 1,24)1 \times 10^{-2}, & \forall q = 3; \\ (0,25\text{sen}(\phi_1) + 2,6)1 \times 10^{-2}, & \forall q = 2; \\ 9,51 \times 10^{-2}, & \forall q = 1. \end{cases} \quad (4.85)$$

$$\phi_1 = -\pi(0,8333). \quad (4.86)$$

$$C_s = 1 - \frac{0,033b_{os}^2}{g\tau_s}. \quad (4.87)$$

$$\lambda_{ec} = \frac{0,34q}{L}(l_{end} - (0,5\tau)). \quad (4.88)$$

Reactancia de Fuga del Rotor

La reactancia de fuga del rotor x_{lr} viene dada por la siguiente expresión:

$$x_{lr} = 4m \left(\frac{(w_1 c_{11})^2}{N_r} \right) x_{be} \quad (4.89)$$

donde x_{be} es la reactancia equivalente de la barra del rotor.

$$x_{be} = 2\pi f \mu_0 L (\lambda_r c_9 + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \quad (4.90)$$

donde λ_r significa el diferencial de ranura y es determinado por:

$$\lambda_r = 0,66 + \frac{2h_r}{3(d_1 + d_2)} + \frac{h_{or}}{b_{or}}, \quad (4.91)$$

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9\tau_r\gamma_{dr}}{c_5 g} \left(\frac{N_r}{6P_1} \right)^2, \quad (4.92)$$

$$\gamma_{dr} = 9 \left(\left(\frac{6P_1}{N_r} \right)^2 \right) 1 \times 10^{-2}, \quad (4.93)$$

$$\lambda_{er} = \frac{2,3(D_{er} - b)}{4N_r L (\sin(\frac{\pi P_1}{N_r}))^2} \left(\log_{10} \left(\frac{4,7(D_{er} - b)}{b + (2a)} \right) \right) \quad (4.94)$$

$$c_9 = \frac{3(\sinh(2\xi) + \sin(2\xi))}{2\xi(\cosh(2\xi) - \cos(2\xi))} \quad (4.95)$$

Para velocidad cero ($S = 1$) las reactancias tanto del rotor como del estator son reducidas debido a la saturación del camino de flujo. Boldea y Nasar (2010) señalan que la reactancia del estator es disminuida del 80 % al 70 % de su valor original y el rotor del 70 % al 60 % de su valor original. Para este trabajo se

supondrá una reducción del 75 % y 65 % para el estator y rotor, respectivamente.

$$x_{sl(sat)}^{S=1} = x_{sl}0,75, \quad (4.96)$$

$$x_{lr(sat)}^{S=1} = x_{lr}0,65. \quad (4.97)$$

Para el deslizamiento nominal las constantes se tomarán como $c_9 = c_8 = 1$ (efecto pelicular de la resistencias y reactancias de fuga del rotor), y a continuación se calculan nuevamente las resistencias y reactancias del rotor usando las ecuaciones (4.80) y (4.90) y así obtener $R_r^{S=S_n}$ y $x_{rl}^{S=S_n}$, respectivamente, para el deslizamiento nominal.

Reactancia de Magnetización

La reactancia de magnetización x_m viene dada por la siguiente expresión:

$$x_m = \sqrt{\left(\frac{V_l}{\frac{\sqrt{3}}{I_\mu}}\right)^2 - R_s^2 - x_{sl}}. \quad (4.98)$$

Corrigiendo las reactancias x_m , $x_{lr(sat)}^{S=1}$ y $x_{rl}^{S=S_n}$, se obtiene:

$$x'_m = x_m c_{10}, \quad (4.99)$$

$$x_{lr(sat)}^{S=1} = x_{lr(sat)}^{S=1} + x_{rl(skew)}^{S=1}, \quad (4.100)$$

$$x_{rl}^{S=S_n} = x_{rl}^{S=S_n} + x_{rl(skew)}^{S=1}, \quad (4.101)$$

donde $x_{rl(skew)}^{S=1}$ es la reactancia de corrección asimétrica del rotor.

$$x_{rl(skew)}^{S=1} = x_m(1 - (c_{10}^2)), \quad (4.102)$$

donde c_{10} es coeficiente de corrección asimétrica de las reactancias del rotor y viene dado por la siguiente expresión:

$$c_{10} = \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi}{2} \frac{c_{13}}{\tau}\right)}{\frac{\pi}{2} \frac{c_{13}}{\tau}}. \quad (4.103)$$

4.2.6. Cálculo de Pérdidas de la Máquina de Inducción

En este apartado se calculará las Pérdidas de la máquina de inducción. Las ecuaciones sugeridas por Boldea y Nasar (2010) para el cálculo de las pérdidas son producto de la experiencia de los autores en el diseño de la máquina de inducción. Las Pérdidas son:

Pérdidas del Cobre

$$P_{co} = 3R_s(I_{n1}^2). \quad (4.104)$$

Pérdidas del Rotor

$$P_{Al} = 3R_r^{S=S_n}(c_6^2)(I_{n1}^2). \quad (4.105)$$

Pérdidas de Ventilación o Mecánicas

Las Pérdidas de ventilación o mecánicas vienen dadas por expresiones empíricas (Boldea y Nasar, 2010), estas dependen del número de par de polos (P_1) y a su vez son directamente proporcional a la potencia de salida nominal (P_n) del motor de inducción.

$$P_{Vent} = \begin{cases} P_{Vent} = 0,03P_n, & \forall P_1 = 1, \\ P_{Vent} = 0,012P_n, & \forall P_1 = 2, \\ P_{Vent} = 0,008P_n, & \forall P_1 = 3 \text{ y } 4. \end{cases} \quad (4.106)$$

Pérdidas por Corrientes Parásitas

Estas Pérdidas igualmente son directamente proporcional a la potencia de salida de la máquina, Boldea y Nasar (2010) explican que esa es una buena aproximación a la misma, debido a experimentos pasados.

$$P_{Stray} = 0,001P_n. \quad (4.107)$$

Pérdidas en el Núcleo

Las Pérdidas en el núcleo magnético de la máquina de inducción se dividen en:

a) Pérdidas fundamentales en el diente del estator P_{t1} :

$$P_{t1} = 1,62 \left(\frac{60}{50} \right)^{1,3} B_{ts}^{1,7} G_{t1}, \quad (4.108)$$

donde G_{t1} es el peso del estator y viene dado por la siguiente expresión:

$$G_{t1} = 7800N_s b_{ts}(h_s + h_w + h_{os})Lc_4. \quad (4.109)$$

b) Pérdidas en el borde externo del estator P_{y1} :

$$P_{y1} = 1,62 \left(\frac{60}{50} \right)^{1,3} B_{cs}^{1,7} G_{y1}, \quad (4.110)$$

donde el G_{y1} representa el peso del borde externo del estator y viene dado por la siguiente expresión:

$$G_{y1} = 7800 \left(\frac{\pi}{4} (D_{out}^2 - (D_{out} - (2h_{cs}))^2) \right) Lc_4 \quad (4.111)$$

c) Pérdidas por flujo pulsante en los dientes del núcleo P_{siron} .

$$P_{siron} = 0,5e - 4 \left[N_r \frac{60}{P_1} c_{11} B_{ps}^2 G_{t1} + (N_s \frac{60}{P_1} c_{12} B_{pr})^2 G_{tr} \right], \quad (4.112)$$

donde c_{11} y c_{12} son constantes que dependen de la densidad de flujo de los dientes del estator y rotor, respectivamente. Las densidades de flujo B_{ps} y B_{pr} son directamente proporcional a la densidad de flujo del entre hierro B_g y finalmente G_{tr} es el peso en Kg del rotor.

$$c_{12} = \frac{1}{2,2 - B_{ts}}, \quad (4.113)$$

$$c_{11} = \frac{1}{2,2 - B_{tr}}, \quad (4.114)$$

$$B_{ps} = (k_{c2} - 1)B_g, \quad (4.115)$$

$$B_{pr} = (k_{c1} - 1)B_g, \quad (4.116)$$

$$G_{tr} = 7800 Lc_4 N_r \left(h_r + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) b_{tr}. \quad (4.117)$$

Pérdidas Totales de la Máquina de Inducción

Las Pérdidas totales P_{Total} son:

$$P_{Total} = P_{co} + P_{Al} + P_{Vent} + P_{Stray} + P_{t1} + P_{y1} + P_{siron}. \quad (4.118)$$

4.2.7. Función Objetivo a Evaluar

Una vez finalizado el proceso de diseño se procede a evaluar la función objetivo, la misma está conformada por las funciones de desempeño de la máquina de inducción, estas son los costos de materiales de construcción y los inversos del par, eficiencia y factor de potencia en condiciones nominales. Estas se describen:

1. Inverso de la Eficiencia nominal ¹⁰

$$f_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{P_n + P_{Total}(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{P_n} \quad (4.119)$$

2. Inverso del par nominal:

$$f_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{2\pi 60(1 - S_n(\mathbf{x}, \mathbf{y}))}{P_n} \quad (4.120)$$

donde, S_n es el deslizamiento nominal y viene dado por la siguiente expresión:

$$S_n(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{P_{Al}(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{P_n + P_{Al}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + P_{Vent} + P_{Stray}} \quad (4.121)$$

3. Inverso de factor de potencia:

$$f_3(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{3 \frac{V_l}{\sqrt{3}} I_{n1} \frac{1}{f_2(x,y)}}{P_n} \quad (4.122)$$

¹⁰ $\mathbf{x}$ y $\mathbf{y}$ representan los vectores de las variables de diseño reales y enteras de la máquina de inducción (ver página 56).

4. Función de costos:

$$f_4(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = W_{fe}(\mathbf{x}, \mathbf{y})Fe_{Cost} + W_s(\mathbf{x}, \mathbf{y})Cu_{Cost} + C_p(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \quad (4.123)$$

donde W_{fe} es el peso del hierro del estator y rotor. Se determina de la siguiente manera:

$$W_{fe}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = G_{tr}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + G_{t1}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + G_{y1}(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \quad (4.124)$$

Fe_{Cost} es costo del hierro en \$/Kg, Cu_{Cost} es el costo del cobre en \$/Kg, W_{fe} representa peso del hierro del estator y rotor, W_s es el peso del cobre en Kg.

$$W_s(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 8960LN_sA_{co}(\mathbf{x}, \mathbf{y})c_{11}, \quad (4.125)$$

y C_p es el costo del corte del material.

$$C_p(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0,1(W_{fe}(\mathbf{x}, \mathbf{y})Fe_{Cost} + W_s(\mathbf{x}, \mathbf{y})Cu_{Cost}) \quad (4.126)$$

La función a minimizar es:

$$\underset{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{y} \in \mathbb{Z}^m}{\text{minimice}} \left[\sum_{k=1}^4 (\alpha_k f_k(\mathbf{x}, \mathbf{y})) + \sum_{i=1}^{42} p_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \right] \quad (4.127)$$

donde:

$p_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})$: Función de penalización ver apéndice II.

α_i : Peso de ponderación de las funciones objetivos sujeto a:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = 1, \quad (4.128)$$

$$0 \leq \alpha_i \leq 1; i = 1...n. \quad (4.129)$$

4.3. Algoritmo del Modelo Matemático de la Máquina de Inducción

En la definición del modelo se tomaron en cuenta las variables de diseño más significativas sugeridas por Boldea y Nasar (2010), estas a su vez se separaron en variables enteras y reales. Una vez identificadas las variables de diseño se procedió a realizar el modelo matemático de la máquina de inducción; llevando las variables físicas a términos matemáticos ¹¹, a objeto de verificar si el mismo es factible para el estudio.

Como función objetivo para el ASEM se tomó el modelo matemático de la máquina de inducción como se muestra en el algoritmo 4.4; este tiene como parámetros de entrada la potencia de salida, la eficiencia y el factor de potencia nominal buscado del motor, a su vez, es necesario que el usuario ingrese la resistencia de torsión del acero que se usará de la barra del rotor y los costos de los materiales de construcción; y el tipo de barras que tendrá el rotor o aplicación que tendrá el motor. Finalmente, se ingresará un punto factible para que el ASEM construya un simplex entero mixto con las variables de decisión expuestas en este capítulo.

El algoritmo de diseño de la máquina de inducción fue dividido en siete procedimientos principales, comenzando con el diseño de las ranuras y el diámetro del estator y rotor; en estos procedimientos se calcula todo lo referente al dimensionamiento de las ranuras (paso polar, ancho de la abertura de la ranura, entre otros) y a los valores de densidad de flujo, corriente y FMM de la máquina para su respectiva verificación. Finalizado el dimensionamiento físico del estator y

¹¹La conversión de variables físicas a variables matemáticas se encuentran en el apéndice I

rotor se calcula la corriente de magnetización, circuito equivalente y pérdidas de la máquina de inducción para llegar al procedimiento de función objetivo donde se evaluarán los índices de desempeño deseados con sus respectivas funciones de penalización¹².

¹² $k_i = 1 \times 10^3$ donde $i = 1 \cdots 42$, esta representa el peso de las funciones de penalización usadas en este trabajo de grado.

Algoritmo 4.4: Dimensionamiento de la máquina de inducción.

inicio**Entrada:**

α_1 : Potencia de salida de la máquina;
 α_2 : Eficiencia buscada de la máquina;
 α_3 : Factor de potencia buscada de la máquina;
 α_4 : Resistencia de torsión del acero de la barra del rotor;
 α_5 : Precio del hierro en \$;
 α_6 : Precio del cobre en \$;
 α_7 : Tipo de barra o aplicación (barra aluminio $\alpha_7 = 0$, rotor de barra profunda $\alpha_7 = 1$ y motor de alta velocidad nominal y cargas de alta inercia $\alpha_7 = 2$);
 x_1 : Diámetro interno del estator " D_{is} ";
 x_2 : Diámetro interno del estator " D_{out} ";
 x_3 : Distancia de la dimensión del estator " b_{os} ";
 x_4 : Distancia de la dimensión del estator " h_{os} ";
 x_5 : Distancia de la dimensión del estator " h_w ";
 x_6 : Distancia de la dimensión del estator " b_{ts} ";
 x_7 : Distancia de la dimensión del rotor " b_{tr} ";
 x_8 : Longitud del diámetro del radio pequeño de la ranura del rotor " d_2 ";
 x_9 : Longitud referente al extremo del anillo del rotor "a";
 x_{10} : Longitud referente al extremo del anillo del rotor "b";
 x_{11} : Altura del back core del rotor " h_{cr} ";
 x_{12} : Diámetro del conductor no normalizado " D_{co} ";
 y_1 : Par de polos;
 y_2 : Número de Ranuras por Polo del estator;
 y_3 : Número de vueltas por fase;
 y_4 : Número de caminos paralelos de corriente;
 y_5 : Número de conductores por ranura;
 y_6 : Número de ranuras del rotor;

Salida:

$f_1(x, y)$: Inverso de la Eficiencia;
 $f_2(x, y)$: Inverso de la Torque nominal;
 $f_3(x, y)$: Inverso de factor de potencia;
 $f_4(x, y)$: Función de costos;
 $P(x, y)$: Función de Penalización;

Ejecute

Dimensionamiento del Estator;
Dimensionamiento del Rotor;
Cálculo Corriente de Magnetización;
Cálculo Circuito Equivalente;
Cálculo de Perdidas;
Cálculo de Función Objetivo;
Cálculo de Función de Penalización;

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \left[\sum_{k=1}^4 (\alpha_k g_k(\mathbf{x}, \mathbf{y})) + \sum_{i=1}^{42} p_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \right];$$

fin

Para el dimensionamiento del estator se llaman tres procedimientos (algorit-

mos 4.6, 4.7 y 4.8), como se muestra a continuación:

Algoritmo 4.5: Dimensionamiento del estator.

Ejecute

Procedimiento 3 (algoritmo 4.6);
 Procedimiento 4 (algoritmo 4.7);
 Procedimiento 5 (algoritmo 4.8);

En el procedimiento 3 (algoritmo 4.6) se obtiene la longitud del estator, el paso polar y de ranura, mediante el calculo de la potencia aparente del entre hierro (z_8), la relación de apilamiento y la constante de Esson, por medio de la configuración del par de polos de la máquina y el resto de las variables de decisión (vector real $\mathbf{x}$ y entero $\mathbf{y}$).

Algoritmo 4.6: Procedimiento 3.

```
Calcule:
   $z_9 = 0,98 - 0,005y_1;$ 
   $z_8 = \frac{z_9\alpha_1}{\alpha_2\alpha_3};$ 
   $Val = 1;$ 
si  $y_1 = 1$  entonces
  |  $Val = 0;$ 
  |  $c_0 = 5e - 11z_8^3 + 4e - 6z_8^2 + 0,3477z_8 + 106491;$ 
fin de si
si  $y_1 = 2$  entonces
  |  $Val = 0;$ 
  |  $c_0 = 2e - 12z_8^3 + 2e - 7z_8^2 + 1,4201z_8 + 134834;$ 
fin de si
si  $y_1 = 3$  entonces
  |  $c_0 = -3e - 10z_8^3 + 1e - 5z_8^2 + 2,5705z_8 + 124317;$ 
fin de si
si  $y_1 = 4$  entonces
  |  $Val = 0;$ 
  |  $c_0 = 6e - 10z_8^3 - 7e - 5z_8^2 + 5,4034z_8 + 116593;$ 
fin de si
si  $Val = 0$  entonces
  | Continuar con el proceso de diseño.;
si no
  | Repetir Procedimiento hasta conseguir un valor de  $y_1$ 
  | que satisfaga una de las condiciones;
fin de si
   $z_{11} = \frac{2y_1^2z_8}{\pi x_1^3 z_{10} c_0};$ 
   $z_{12} = \frac{z_{11}\pi x_1}{2y_1};$ 
   $z_{13} = \frac{\pi x_1}{2y_1};$ 
   $z_{14} = \frac{z_{13}}{3y_2};$ 
   $c_{14} = \frac{x_1}{x_2};$ 
```

El procedimiento 4 calcula la distancia del entre hierro en metros (z_{16}), dependiendo del número de par de polos, permitiendo calcular el flujo magnético de la máquina (z_{19}), la densidad de flujo del entre hierro (z_{22}) y de las chapas del estator (z_{27}), el ancho de la apertura de la boquilla de la ranura del estator (z_{28}) y el área de ranura del estator (z_{26}).

Algoritmo 4.7: Procedimiento 4.

Calcule:
si $2y_1 = 2$ **entonces**
 $z_{16} = (0,1 + 0,02\sqrt[3]{\alpha_1})1 \times 10^{-3};$
fin de si
si $2y_1 > 2$ **entonces**
 $z_{16} = (0,1 + 0,012\sqrt[3]{\alpha_1})1 \times 10^{-3};$
fin de si
 $z_{15} = 2y_1y_2z_{20};$
 $z_{17} = \frac{\text{sen}(\frac{\pi}{6})}{y_2\text{sen}(\frac{\pi}{6y_2})};$
 $z_{18} = 0,9397;$
 $c_{13} = z_{17}z_{18};$
 $c_{14} = \frac{x_1}{x_2};$
 $c_{15} = 0,4;$
 $c_1 = -0,0145(c_{15} + 1)^4 + 0,1495(c_{15} + 1)^3 - 0,5842(c_{15} + 1)^2 +$
 $1,0713(c_{15} + 1) + 0,018;$
 $c_2 = 0,0051(c_{15} + 1)^4 - 0,0452(c_{15} + 1)^3 + 0,1526(c_{15} + 1)^2 -$
 $0,2673(c_{15} + 1) + 1,2643;$
 $z_{19} = \frac{z_9 \frac{z_{21}}{\sqrt{3}}}{4c_2c_{13}z_{10}y_3};$
 $z_{22} = \frac{z_{19}}{c_1z_{13}z_{12}};$
 $z_{23} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2\alpha_3\sqrt{3}z_{21}};$
 $z_{24} = \frac{x_{12}^2\pi y_4}{4};$
 $z_{25} = \frac{z_{23}}{z_{24}y_4};$
 $c_3 = 0,4;$
 $z_{26} = \frac{\pi x_{12}^2 y_4 y_5}{4c_3};$
 $c_4 = 0,96;$
 $z_{27} = \frac{z_{22}z_{14}}{x_6c_4};$
 $z_{28} = \frac{\pi(x_1 + (2x_4) + (2x_5))}{z_{15}} - x_6;$

En el procedimiento 5 (algoritmo 4.8), se calcula el ancho y alto de la ranura del estator (z_{29} y z_{30} , respectivamente), finalmente se obtiene las FMM del entre hierro (z_{31}) y del estator (z_{32}).

Algoritmo 4.8: Procedimiento 5.

Calcule:

$$z_{29} = \sqrt{(4z_{26} \operatorname{Tg}\left(\frac{\pi}{z_{15}}\right)1 \times 10^{-6}) + (z_{28}^2)};$$

$$z_{30} = \frac{2z_{26}}{z_{28} + z_{29}}1 \times 10^{-6};$$

$$\mu_0 = 4\pi 1 \times 10^{-7};$$

$$c_5 = 1, 2;$$

$$z_{31} = \frac{c_5 z_{16} z_{22}}{\mu_0};$$

Ejecute

Buscar intensidad del campo magnético z_{34} para un z_{27} ;

$$z_{32} = z_{34}(z_{30} + x_4 + x_5);$$

$$z_{35} = \frac{x_2 - (x_1 + (2(x_4 + x_5 + z_{30})))}{2};$$

$$z_{36} = \frac{z_{19}}{2z_{12}z_{35}};$$

Para el dimensionamiento del rotor (algoritmo 4.9), se obtiene el paso de ranura del rotor (z_{37}), la altura de la ranura (z_{40}), luego calcular las densidades de corriente de las barras del rotor (z_{44}) y del extremo del anillo (z_{46}), a continuación se obtiene la FMM del rotor y finalmente se obtiene el diámetro mínimo y máximo del rotor (z_{52} y z_{51} , respectivamente).

Algoritmo 4.9: Dimensionamiento del Rotor.

Calcule:

$$\begin{aligned} z_{37} &= \frac{\pi(x_1 + (2z_{16}))}{y_6}; \\ z_{38} &= \frac{z_{22}z_{37}}{c_4x_7}; \\ z_{39} &= 1,5 \times 10^{-3}; \\ z_{40} &= 0,5 \times 10^{-3}; \\ z_{41} &= \frac{\pi(x_1 - (2z_{40})) - (y_6x_7)}{\pi + y_6}; \\ z_{42} &= \frac{z_{41} - x_8}{2 \operatorname{Tg}(\frac{\pi}{y_6})}; \\ z_{43} &= \frac{\pi}{8}(z_{41}^2 + x_8^2) + \left(\frac{z_{41} + x_8}{4} \frac{z_{41} - x_8}{\operatorname{Tg}(\frac{\pi}{y_6})}\right); \\ z_{45} &= \frac{2c_6z_{20}y_3c_{13}z_{23}}{y_6}; \\ c_6 &= 0,8\alpha_3 + 0,2; \\ z_{44} &= \frac{z_{45}}{z_{43}1 \times 10^6}; \\ z_{47} &= (z_{42} + z_{40} + \frac{z_{41} + x_8}{2}); \\ z_{46} &= x_9x_{10}; \\ z_{48} &= \frac{z_{45}}{2\operatorname{sen}(\frac{\pi y_1}{y_6})}; \\ z_{49} &= \frac{z_{48}}{z_{46}1 \times 10^6}; \end{aligned}$$

Ejecute

Buscar intensidad del campo magnético z_{50} para un z_{38} ;

$$\begin{aligned} z_{33} &= z_{50}(z_{42} + z_{40} + \frac{z_{41} + x_8}{2}); \\ z_{60} &= \frac{z_{19}}{2z_{12}x_{11}}; \\ z_{51} &= x_1 - (2z_{16}) - 2(z_{40} + \frac{z_{41} + x_8}{2} + z_{42} + x_{11}); \\ z_{53} &= \frac{y_1\alpha_1}{2\pi z_{10}(1 - 0,02)}; \\ z_{52} &= \sqrt[3]{\frac{z_{53}16}{\pi\alpha_4}}; \end{aligned}$$

Por otra parte, el algoritmo 4.10 calcula la corriente de magnetización de la máquina de inducción, inicialmente se calcula el coeficiente de Carter (c_5), así se calcula nuevamente FMM del entre hierro para obtener la FMM total de la máquina de inducción (z_{64}) y finalmente obtener la corriente de magnetización del motor (z_{65}).

Algoritmo 4.10: Cálculo corriente de magnetización.

Calcule:

$$\begin{aligned} z_{54} &= \frac{x_3^2}{(5z_{16}) + x_3}; \\ z_{55} &= \frac{z_{39}^2}{(5z_{16}) + z_{39}}; \\ z_{56} &= \frac{z_{14}^2}{z_{14} - z_{54}}; \\ z_{57} &= \frac{z_{37}^2}{z_{37} - z_{55}}; \\ C_5 &= z_{56} z_{57}; \\ z_{31} &= \frac{C_5 z_{16} z_{22}}{\mu_0}; \end{aligned}$$

Ejecute

Buscar intensidad del campo magnético z_{59} y z_{62} para z_{36} y z_{60} respectivamente;

$$\begin{aligned} z_{58} &= \frac{(0,88 \exp(-0,4z_{36}^2) \pi (x_2 - z_{35}) z_{59})}{2y_1}; \\ z_{63} &= \frac{(0,88 \exp(-0,4z_{60}^2) \pi (z_{61} + x_{11}) z_{62})}{2y_1}; \\ z_{64} &= 2(z_{31} + z_{32} + z_{33} + z_{63} + z_{58}); \\ C_{15} &= \frac{z_{64}}{2z_{31}} - 1; \\ z_{65} &= \frac{\pi y_1 z_{64}}{6\sqrt{2y_3 C_{13}}}; \end{aligned}$$

El cálculo del circuito equivalente de la máquina de inducción se muestra en el algoritmo 4.11 y este se desglosa en los procedimientos 6 y 7.

Algoritmo 4.11: Cálculo del circuito equivalente de la máquina de inducción.

Calcule:

Procedimiento 6 (algoritmo 4.12);
Procedimiento 7 (algoritmo 4.13);

El procedimiento 6 calcula las resistencia (z_{69}) y reactancia (z_{76}) de los devanados del estator, mediante la longitud del final de conexión (z_{66}), luego el procedimiento calcula la resistencia (z_{75}) a deslizamiento 1.

Algoritmo 4.12: Procedimiento 6.

Calcule:
└ $z_{68} = 0,7778z_{13};$
si $2y_1 = 2$ **entonces**
└ $z_{66} = 2z_{68} - 0,04;$
fin de si
si $2y_1 = 4$ **entonces**
└ $z_{66} = 2z_{68} - 0,02;$
fin de si
si $2y_1 = 6$ **entonces**
└ $z_{66} = \frac{\pi z_{68}}{2} + 0,018;$
fin de si
si $2y_1 = 8$ **entonces**
└ $z_{66} = 2,2z_{68} - 0,012;$
fin de si
└ $z_{67} = 2(z_{12} + z_{66});$
└ $c_7 = 1,2198;$
└ $\rho_{(Co20)} = 1,78 \times 10^{-8};$
└ $\rho_{(Co80)} = \rho_{(Co20)}(c_7);$
└ $z_{69} = \rho_{(Co80)} \frac{z_{67}y_3}{z_{24}y_{41}e^{-6}};$
└ $z_{70} = 1;$
└ $z_{71} = x_1 - 2z_{16} - z_{41};$
└ $z_{72} = \frac{\pi(z_{71}-b)}{y_6};$
└ $\rho_{(Al20)} = 3,1 \times 10^{-8};$
└ $z_{73} = \sqrt{\frac{\pi z_{10}\mu_0}{\rho_{(Al20)}}};$
└ $\xi = z_{73}(20e - 3)\sqrt{z_{70}};$
└ $c_8 = \xi \frac{\sinh(2\xi) + \sin(2\xi)}{\cos(2\xi)};$
└ $z_{74} = \rho_{(Al20)}c_7\left(\frac{z_{12}c_8}{z_{43}} + \frac{z_{72}}{2z_{46}(\sin(\frac{\pi y_1}{y_6})^2)}\right);$
└ $z_{75} = \frac{4z_{20}}{y_6}(y_3c_{11})^2z_{74};$
└ $\lambda_S = \left(\frac{y_6}{3(z_{28}+z_{29})} + \frac{2x_5}{(x_3+z_{28})} + \frac{x_4}{x_3}\right)(0,833);$
└ $z_{76} = \frac{2\mu_0 2\pi z_{10} z_{12} y_3^2}{y_1 y_2}(\lambda_S + \lambda_{ds} + \lambda_{ec});$
└ $\phi_1 = -\pi(0,8333);$
└ $z_{77} = 1 - \frac{0,033x_3^2}{z_{16}z_{14}};$
si $y_2 = 8$ **entonces**
└ $\gamma_{ds} = (0,11\sin(\phi_1) + 0,28)1 \times 10^{-2};$
fin de si
si $y_2 = 6$ **entonces**
└ $\gamma_{ds} = (0,11\sin(\phi_1) + 0,41)1 \times 10^{-2};$
fin de si
si $y_2 = 4$ **entonces**
└ $\gamma_{ds} = (0,14\sin(\phi_1) + 0,76)1 \times 10^{-2};$
fin de si
si $y_2 = 3$ **entonces**
└ $\gamma_{ds} = (0,18\sin(\phi_1) + 1,24)1 \times 10^{-2};$
fin de si

El procedimiento 7, calcula la reactancia del rotor (z_{78}) cuando el deslizamiento es 1, luego se re calcula las resistencia(z_{82}) y reactancia(z_{83}) del rotor, a objeto de obtener su valor a deslizamiento nominal mediante la modificación de las variables $c_9 = c_8 = 1$. Finalmente se corrigen las variables mediante la constante c_{10} para así obtener el circuito equivalente de la máquina de inducción.

Algoritmo 4.13: Procedimiento 7.

Calcule:
si $y_2 = 2$ **entonces**
 $\gamma_{ds} = (0,25\text{sen}(\phi_1) + 2,6)1 \times 10^{-2}$;
fin de si
si $y_2 = 1$ **entonces**
 $\gamma_{ds} = 9,5 \times 10^{-2}$;
fin de si
 $\lambda_{ds} = \frac{0,9c_{13}y_2c_{11}^2z_{77}\gamma_{ds}}{c_5z_{16}(c_{15}+1)}$;
 $\lambda_{ec} = \frac{0,34y_2}{z_{12}}(z_{66} - (0,5z_{13}))$;
 $z_{76} = \frac{2\mu_02\pi z_{10}z_{12}y_3^2}{y_1y_2}(\lambda_S + \lambda_{ds} + \lambda_{ec})$;
 $c_9 = \frac{3(\text{senh}(\frac{2\xi}{2}) + \text{sen}(2\xi))}{2\xi(\cosh(2\xi) - \cos(2\xi))}$;
 $\lambda_{er} = \frac{2,3(z_{71}-b)}{y_6z_{12}4(\text{sen}(\frac{\pi y_1}{y_6}))^2}(\log_{10}(\frac{4,7(z_{71}-b)}{b+(2a)}))$;
 $\gamma_{dr} = 9((\frac{6y_1}{y_6})^2)1 \times 10^{-2}$;
 $\lambda_{dr} = \frac{0,9z_{37}\gamma_{dr}(\frac{y_6}{6y_1})^2}{c_5g}$;
 $\lambda_r = 0,66 + \frac{2z_{42}}{3(z_{41}+x_8)} + \frac{z_{40}}{z_{39}}$;
 $z_{79} = 2\pi z_{10}\mu_0z_{12}(\lambda_r c_9 + \lambda_{dr} + \lambda_{er})$;
 $z_{78} = 4z_{20}(\frac{(y_3c_{11})^2}{y_6})z_{79}$;
 $c_8 = 1$;
 $c_9 = 1$;
 $z_{74} = \rho(Al20)C_7(\frac{z_{12}c_8}{z_{43}} + \frac{z_{72}}{2z_{46}(\text{sen}(\frac{\pi y_1}{y_6})^2)})$;
 $z_{82} = \frac{4z_{20}}{y_6}(y_3c_{11})^2z_{74}$;
 $\lambda_S = (\frac{2z_{30}}{3(z_{28}+z_{29})} + \frac{2x_5}{(x_3+z_{28})} + \frac{x_4}{x_3})(0,833)$;
 $\lambda_{er} = \frac{2,3(z_{71}-b)}{y_6z_{12}4(\text{sen}(\frac{\pi y_1}{y_6}))^2}(\log_{10}(\frac{4,7(z_{71}-b)}{b+(2a)}))$;
 $\gamma_{dr} = 9((\frac{6y_1}{y_6})^2)1 \times 10^{-2}$;
 $\lambda_{dr} = \frac{0,9z_{37}\gamma_{dr}(\frac{y_6}{6y_1})^2}{c_5z_{16}}$;
 $\lambda_r = 0,66 + \frac{2z_{42}}{3(z_{41}+x_8)} + \frac{z_{40}}{z_{39}}$;
 $z_{79} = 2\pi f\mu_0z_{12}(\lambda_r c_9 + \lambda_{dr} + \lambda_{er})$;
 $z_{83} = 4z_{20}(\frac{(y_3c_{11})^2}{y_6})z_{79}$;
 $z_{80} = z_{76}0,75$;
 $z_{81} = z_{78}0,65$;
 $z_{84} = \sqrt{(\frac{(\frac{z_{21}}{\sqrt{3}})}{z_{65}})^2 - z_{69}^2 - z_{76}}$;
 $c_{10} = \frac{\text{sen}(\frac{\pi}{2}\frac{c_{13}}{z_{13}})}{\frac{\pi}{2}\frac{c_{13}}{z_{13}}}$;
 $z'_{84} = z_{84}c_{10}$;
 $z_{85} = z_{84}(1 - (c_{10}^2))$;
 $z_{85} = z_{84}(1 - (c_{10}^2))$;
 $z_{83} = z_{83} + z_{85}$;
 $z_{81} = z_{81} + z_{85}$;

El calculo de las pérdidas de la máquina de inducción se muestra en el algorit-

mo 4.14, se obtiene las perdidas totales (z_{102}), mediante el calculo de las perdidas del cobre (z_{86}), del rotor (z_{87}), por ventilación (z_{88}), por corrientes parásitas (z_{89}) y finalmente las perdidas en el núcleo (z_{94}).

Algoritmo 4.14: Cálculo de pérdidas de la máquina de inducción.

Calcule:

$$\begin{cases} z_{86} = 3z_{69}(z_{23}^2); \\ z_{87} = 3z_{82}(c_6^2)(z_{23}^2); \end{cases}$$

si $y_1 = 1$ **entonces**

$$\begin{cases} z_{88} = 0,03\alpha_1; \end{cases}$$

fin de si

si $y_1 = 2$ **entonces**

$$\begin{cases} z_{88} = 0,012\alpha_1; \end{cases}$$

fin de si

si $y_1 = 3$ **y** 4 **entonces**

$$\begin{cases} z_{88} = 0,008\alpha_1; \end{cases}$$

fin de si

$$z_{89} = 0,001\alpha_1;$$

$$z_{91} = 7800z_{15}x_6(z_{30} + x_5 + x_4)z_{12}c_4;$$

$$z_{90} = 1,62\left(\frac{60}{50}\right)^{1,3}z_{27}^{1,7}z_{91};$$

$$z_{93} = 7800\left(\frac{\pi}{4}(x_2^2 - (x_2 - (2z_{35})))^2\right)z_{12}c_4;$$

$$z_{92} = 1,62\left(\frac{60}{50}\right)^{1,3}z_{36}^{1,7}z_{93};$$

$$z_{88} = 0,008\alpha_1;$$

$$c_{11} = \frac{1}{2,2-z_{38}};$$

$$c_{12} = \frac{1}{2,2-z_{27}};$$

$$z_{96} = (k_{c2} - 1)z_{22};$$

$$z_{95} = (k_{c1} - 1)z_{22};$$

$$z_{100} = 7800z_{12}c_4y_6\left(z_{42} + \frac{z_{41}+x_8}{2}\right)x_7;$$

$$z_{94} = 0,5e - 4\left[\left(y_6\frac{60}{y_1}c_{11}z_{96}\right)^2z_{91} + \left(z_{15}\frac{60}{y_1}c_{12}z_{95}\right)^2z_{100}\right];$$

$$z_{102} = z_{86} + z_{87} + z_{88} + z_{89} + z_{90} + z_{92} + z_{94};$$

El algoritmo 4.15 se encarga de calcular los indices de desempeño de la máquina de inducción, eficiencia (g_1), par nominal (g_2), factor de potencia (g_3) y finalmente los costos (g_4), con su respectivo peso de ponderación.

Algoritmo 4.15: Cálculo función objetivo.

Calcule:

$$\begin{aligned} g_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &= \frac{\alpha_1 + z_{102}}{\alpha_1}; \\ z_{97} &= \frac{z_{87}}{\alpha_1 + z_{87} + z_{88} + z_{89}}; \\ g_2(x, y) &= \frac{2\pi 60(1 - z_{97})}{\alpha_1}; \\ g_3(x, y) &= \frac{3 \frac{z_{21}}{\sqrt{3}} z_{23} \frac{1}{g_2(x, y)}}{\alpha_1}; \\ z_{98} &= z_{100} + z_{91} + z_{93}; \\ z_{99} &= 8960 z_{12} z_{15} z_{24} c_{11}; \\ z_{101} &= 0,1(z_{98}\alpha_5 + z_{99}\alpha_6); \\ g_4(x, y) &= z_{98}\alpha_5 + z_{99}\alpha_6 + z_{101}; \end{aligned}$$

Finalmente, se tiene las funciones de penalización que se encargarán de sumarle valor a la función objetivo, para que el ASEM descarte puntos que no cumplan con las condiciones de diseño de la máquina de inducción.

Algoritmo 4.16: Funciones de penalización.

Calcule:

Penalización 1 (algoritmo 4.17);
Penalización 1 (algoritmo 4.18);
Penalización 3 (algoritmo 4.19);

Algoritmo 4.17: Penalización 1.

Calcule:

$$\begin{aligned} p_1 &= k_1 \max(-x_1; 0); \\ p_2 &= k_2 \max(-x_2; 0); \\ p_3 &= k_3 (\max(-x_3 + 2 \times 10^{-3}; 0) + \max(x_3 - 8z_{16}; 0)); \\ p_4 &= k_4 (\max(-x_4 + 0,5 \times 10^{-3}; 0) + \max(x_4 - 1 \times 10^{-3}; 0)); \\ p_5 &= k_5 (\max(-x_5 + 1 \times 10^{-3}; 0) + \max(x_5 - 4 \times 10^{-3}; 0)); \\ p_6 &= k_6 \max(-x_6 + 3,5 \times 10^{-3}; 0); \\ p_7 &= k_7 \max(-x_7; 0); \\ p_8 &= k_8 \max(-x_8; 0); \\ p_9 &= k_9 \max(-x_9; 0); \\ p_{10} &= k_{10} \max(-x_{10}; 0); \\ p_{11} &= k_{11} \max(-x_{11}; 0); \\ p_{12} &= k_{12} (\max(-x_{12}; 0) + \max(x_{12} + 1,3 \times 10^{-3}; 0)); \\ p_{13} &= k_{13} (\max(-y_1 + 1; 0) + \max(y_1 - 4; 0)); \\ p_{14} &= k_{14} (\max(-y_2 + 1; 0) + \max(y_2 - 8; 0)); \end{aligned}$$

si $2y_1 = 2$ **entonces**

$$\begin{aligned} p_{15} &= k_{15} (\max(|y_2 - 4|; 0) \max(|y_2 - 6|; 0) \max(|y_2 - 8|; 0)); \\ p_{23} &= k_{23} (\max(-z_{11} + 0,6; 0) + \max(z_{11} - 1; 0)); \\ p_{24} &= k_{24} (\max(-c_{14} + 0,43; 0) + \max(c_{14} - 0,63; 0)); \\ p_{25} &= k_{25} (\max(-z_{22} + 0,5; 0) + \max(z_{22} - 0,75; 0)); \end{aligned}$$

fin de si

si $2y_1 = 4$ **entonces**

$$\begin{aligned} p_{15} &= k_{15} \max(|y_2 - 2|; 0) \max(|y_2 - 3|; 0) \max(|y_2 - 4|; 0) \max(|y_2 - 6|; 0); \\ p_{23} &= k_{23} (\max(-z_{11} + 1,2; 0) + \max(z_{11} - 1,8; 0)); \\ p_{24} &= k_{24} (\max(-c_{14} + 0,57; 0) + \max(c_{14} - 0,72; 0)); \\ p_{25} &= k_{25} (\max(-z_{22} + 0,65; 0) + \max(z_{22} - 0,78; 0)); \end{aligned}$$

fin de si

si $2y_1 = 6$ **entonces**

$$\begin{aligned} p_{15} &= k_{15} (\max(|y_2 - 2|; 0) \max(|y_2 - 3|; 0) \max(|y_2 - 4|; 0) \max(|y_2 - 6|; 0)); \\ p_{23} &= k_{23} (\max(-z_{11} + 1,6; 0) + \max(z_{11} - 2,2; 0)); \\ p_{24} &= k_{24} (\max(-c_{14} + 0,62; 0) + \max(c_{14} - 0,75; 0)); \\ p_{25} &= k_{25} (\max(-z_{22} + 0,7; 0) + \max(z_{22} - 0,82; 0)); \end{aligned}$$

fin de si

si $2y_1 = 8$ **entonces**

$$\begin{aligned} p_{15} &= k_{15} (\max(|y_2 - 2|; 0) \max(|y_2 - 3|; 0)); \\ p_{23} &= k_{23} (\max(-z_{11} + 2; 0) + \max(z_{11} - 3; 0)); \\ p_{24} &= k_{24} (\max(-c_{14} + 0,66; 0) + \max(c_{14} - 0,79; 0)); \\ p_{25} &= k_{25} (\max(-z_{22} + 0,75; 0) + \max(z_{22} - 0,85; 0)); \end{aligned}$$

fin de si

$$\begin{aligned} p_{16} &= k_{16} \max(-y_3; 0); \\ p_{17} &= k_{17} \max(-y_4; 0); \\ p_{18} &= k_{18} \max(y_5 - \frac{y_4 y_3}{y_1 y_2}; 0); \\ p_{19} &= k_{19} \max(-y_5; 0); \\ p_{20} &= k_{20} (y_5 \% 2)^a; \end{aligned}$$

^aEl operador % devuelve el resto de la división entre y_5 y 2.

Algoritmo 4.18: Penalización 2.

Calcule:

si $2y_1 = 2$ **entonces**

si $z_{15} = 24$ **entonces**

$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-y_6 + 18; 0) + \text{máx}(y_6 - 34; 0));$
 $p_{22} = k_{22}(\text{máx}(|y_6 - 18|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 20|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 22|; 0)$
 $\text{máx}(|y_6 - 28|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 30|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 33|; 0)$
 $\text{máx}(|y_6 - 34|; 0));$

fin de si

si $z_{15} = 36$ **entonces**

$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-y_6 + 25; 0) + \text{máx}(y_6 - 43; 0));$
 $p_{22} = k_{22}(\text{máx}(|y_6 - 25|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 27|; 0);$
 $\text{máx}(|y_6 - 28|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 29|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 30|; 0)$
 $\text{máx}(|y_6 - 43|; 0));$

fin de si

si $z_{15} = 48$ **entonces**

$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-y_6 + 30; 0) + \text{máx}(y_6 - 41; 0));$
 $p_{22} = k_{22}(\text{máx}(|y_6 - 30|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 37|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 39|; 0)$
 $\text{máx}(|y_6 - 40|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 41|; 0));$

fin de si

fin de si

si $2y_1 = 4$ **entonces**

si $z_{15} = 24$ **entonces**

$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-y_6 + 16; 0) + \text{máx}(y_6 - 36; 0));$
 $p_{22} = k_{22}(\text{máx}(|y_6 - 16|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 18|; 0)$
 $\text{máx}(|y_6 - 20|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 30|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 33|; 0)$
 $\text{máx}(|y_6 - 34|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 35|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 36|; 0));$

fin de si

si $z_{15} = 36$ **entonces**

$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-y_6 + 28; 0) + \text{máx}(y_6 - 48; 0));$
 $p_{22} = k_{22}(\text{máx}(|y_6 - 28|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 30|; 0)$
 $\text{máx}(|y_6 - 32|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 34|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 45|; 0)$
 $\text{máx}(|y_6 - 48|; 0));$

fin de si

si $z_{15} = 48$ **entonces**

$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-y_6 + 36; 0) + \text{máx}(y_6 - 59; 0));$
 $p_{22} = k_{22}(\text{máx}(|y_6 - 36|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 40|; 0)$
 $\text{máx}(|y_6 - 44|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 57|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 59|; 0));$

fin de si

si $z_{15} = 72$ **entonces**

$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-y_6 + 42; 0) + \text{máx}(y_6 - 76; 0));$
 $p_{22} = k_{22}(\text{máx}(|y_6 - 42|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 48|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 54|; 0)$
 $\text{máx}(|y_6 - 56|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 60|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 61|; 0)$
 $\text{máx}(|y_6 - 62|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 68|; 0) \text{ máx}(|y_6 - 76|; 0));$

fin de si

fin de si

Algoritmo 4.19: Penalizacion 3.

Calcule:

si $2y_1 = 8$ **entonces**

si $z_{15} = 72$ **entonces**

$$\begin{cases} p_{21} = k_{21}(\max(-y_6 + 69; 0) + \max(y_6 - 80; 0)); \\ p_{22} = k_{22}(\max(|y_6 - 69|; 0) \max(|y_6 - 75|; 0) \max(|y_6 - 80|; 0)); \end{cases}$$

fin de si

si $z_{15} = 90$ **entonces**

$$\begin{cases} p_{21} = k_{21}(\max(-y_6 + 86; 0) + \max(y_6 - 94; 0)); \\ p_{22} = k_{22}(\max(|y_6 - 86|; 0) \max(|y_6 - 87|; 0) \max(|y_6 - 93|; 0) \max(|y_6 - 94|; 0)); \end{cases}$$

fin de si

fin de si

si $2y_1 = 2$ **y** 4 **entonces**

$$p_{26} = k_{26}(\max(-z_{25} + 4; 0) + \max(z_{25} - 7; 0));$$

fin de si

si $2y_1 = 6$ **y** 8 **entonces**

$$p_{26} = k_{26}(\max(-z_{25} + 4; 0) + \max(z_{25} - 7; 0));$$

fin de si

$$\begin{cases} p_{27} = k_{27}(\max(-x_6 + 1,5; 0) + \max(x_6 - 1,6; 0)); \\ p_{28} = k_{28} \max(-z_{28}; 0); \\ p_{29} = k_{29} \max(-((4z_{26} \operatorname{Tg}(\frac{\pi}{z_{15}})1 \times 10^{-6}) + (z_{28}^2)); 0); \\ p_{30} = k_{30} \max(-z_{32}; 0); \\ p_{31} = k_{31} \max(-z_{35}; 0); \\ p_{32} = k_{32}(\max(-z_{36} + 1, 4; 0) + \max(z_{36} - 1, 7; 0)); \\ p_{33} = k_{33}(\max(-x_7 + 1,5; 0) + \max(x_7 - 1,8; 0)); \\ p_{34} = k_{34} \max(-z_{42}; 0); \\ p_{35} = k_{35}(\max(-z_{43}; 0)); \\ p_{34} = k_{34} \max(-z_{42}; 0); \\ p_{34} = k_{34} \max(-z_{42}; 0); \end{cases}$$

si $\alpha_7 = 0$ **entonces**

$$p_{36} = k_{36}(\max(-z_{44} + 2, 2; 0) + \max(z_{44} - 4, 5; 0));$$

fin de si

si $\alpha_7 = 1$ **entonces**

$$p_{36} = k_{36}(\max(-z_{44} + 5, 5; 0) + \max(z_{44} - 7, 5; 0));$$

fin de si

si $\alpha_7 = 2$ **entonces**

$$p_{36} = k_{36}(\max(-z_{44} + 6, 5; 0) + \max(z_{44} - 7; 0));$$

fin de si

$$\begin{cases} p_{37} = k_{37}(\max(-x_{10} + (1, 1z_{47}); 0) + \max(x_{10} - (1, 2z_{47}); 0)); \\ p_{38} = k_{38} \max(-z_{46}; 0); \\ p_{39} = k_{39} \max(-z_{49} + (0, 7z_{44}); 0) + \max(z_{49} - (0, 8z_{44}); 0); \\ p_{39} = k_{39} \max(-z_{49} + (0, 7z_{44}); 0) + \max(z_{49} - (0, 8z_{44}); 0); \\ p_{40} = k_{40} \max(|z_{32} - z_{33}| - (0, 2 \max(z_{32}, z_{33})); 0); \\ p_{41} = k_{41}(\max(-z_{60} + 1, 4; 0) + \max(z_{60} - 1, 7; 0)); \\ p_{42} = k_{42} \max(z_{52} - z_{51}; 0); \end{cases}$$

4.4. Herramienta Computacional

Una vez definido el algoritmo de diseño de la máquina de inducción con sus respectivas funciones de penalización, se procedió a elaborar la herramienta computacional que permitirá que el ASEM encuentre una mejora del diseño, este modelo fue desarrollado en el compilador de código libre QT Creator este es un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) desarrollado por Nokia y posteriormente obtenido por Digia, el mismo esta basado en el lenguaje de alto nivel c++. Se escogió esta herramienta debido a su facilidad y flexibilidad para programar el ASEM y el algoritmo de diseño de la máquina de inducción.

4.5. Análisis de Sensibilidad

Para determinar la variación de la respuesta de la solución final encontrada por el ASEM, se realizará un estudio de sensibilidad a objeto de determinar cuales son las variables de decisión, que al introducirles una pequeña variación, modifican la respuesta significativamente, esto se conseguirá de la siguiente manera:

$$\left. \frac{\delta f(\mathbf{x})}{\delta x_i} \right|_{\mathbf{x}'} \cong \frac{f(\mathbf{x}' + (0, 0, \dots, 1, 0, 0)^T h) - f(\mathbf{x}')}{h} \quad (4.130)$$

donde $i = 1, \dots, n$, siendo n el número de variables de decisión de la función objetivo y $\mathbf{x}'$ el vector solución. Por otra parte, la variación de las variables de decisión se analizarán individualmente, es decir, se analiza la sensibilidad de la solución debido a la modificación de una variable a la vez, suponiendo que todos los demás permanecen sin alteración alguna.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados sometidos a la mejora del diseño aplicando la metodología y función objetivo del procedimiento algorítmico mostrado en el capítulo 4. Los resultados a continuación se dividen en dos secciones, la primera en modelos de prueba donde se aplicó la metodología y la segunda son dos modelos de máquinas de inducción reales de los autores Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004) y A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009). Todos los modelos presentados en este capítulo son máquinas de inducción trifásicas jaula de ardilla.

5.1. Modelos Prueba de Diseño de Máquina de Inducción

Tabla 5.1. Características generales de los modelos de prueba de diseño de las máquinas de inducción sujetas a la mejora.

Característica	Valor
Velocidad [rpm]	1800
Voltaje de entrada [V]	460
Frecuencia [Hz]	60
Tipo de conexión	Estrella
Factor de potencia buscado	0,83
Eficiencia buscada	0,895
Clase de aislamiento	F
Temperatura de alza	Clase B

La metodología explicada en capítulos anteriores se aplicó a tres modelos de

estudios, la máquina 1 y 3, tienen potencia de salida de 5.5kW y 2 pares de polos, con diferentes índices de desempeño, mientras, que la máquina 2 tiene potencia de salida 22,380 kW y 3 pares de polos. A continuación se muestran los resultados de la mejora del diseño¹ de las máquinas tomando como función objetivo eficiencia, par, factor de potencia y costos en conjunto² y por separado, como se muestra a continuación:

La función objetivo a evaluar es:

$$\underset{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{y} \in \mathbb{Z}^m}{\text{minimice}} \left[\sum_{k=1}^4 (\alpha_k f_k(\mathbf{x}, \mathbf{y})) + \sum_{i=1}^{42} p_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \right], \quad (5.1)$$

donde $k = 1..4$ y se estudiaron cuatro posibles casos

1. Función objetivo par, eficiencia, factor de potencia y costo en conjunto la ponderación de los α_k es: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0,25$.
2. Función objetivo eficiencia: $\alpha_1 = 1$ y $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0$.
3. Función objetivo costos: $\alpha_2 = 1$ y $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0$.
4. Función objetivo factor de potencia: $\alpha_3 = 1$ y $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_4 = 0$.
5. Función objetivo par nominal: $\alpha_4 = 1$ y $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$.

5.1.1. Máquina 1: potencia de 5,5 kW y 2 pares de polos

En las tablas a continuación muestran la configuración de diseño original y la mejora realizada por el ASEM y con sus respectivos índices de desempeño. Los resultados según su función objetivo fueron los siguientes:

¹Ver figuras 4.1 y 4.2 para detallar las geometrías del estator y rotor (todas las unidades estan dadas en metros).

²Las funciones tendrán la misma ponderación al ser evaluadas en conjunto.

Con función objetivo: Par, eficiencia, factor de potencia y costo en conjunto

Tabla 5.2. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 1, tomando como función objetivo: eficiencia, costos, par y factor de potencia.

	Diseño Original	Diseño Mejorado		Diseño Original	Diseño Mejorado
	Estator			Rotor	
$D_{is}(x_1)$	0,107	0,107	$b_{tr}(x_7)$	0,00549	0,00549
$D_{out}(x_2)$	0,171	0,171	$h_{cr}(x_{13})$	0,01212	0,01212
$b_{os}(x_3)$	0,0022	0,0022	$N_r(y_6)$	28	28
$h_{os}(x_4)$	0,00085	0,00085	$d_2(x_{10})$	0,00195	0,00195
$h_w(x_5)$	0,001	0,001	$d_1(z_{41})$	0,00576	0,00576
$b_{ts}(x_6)$	0,004219	0,004219	$\tau_r(z_{37})$	0,01207	0,01208
$D_{co}(x_{14})$	$0,95 \times 10^{-3}$	$0,96 \times 10^{-3}$	$b_{or}(z_{39})$	0,0015	0,0015
$w_1(y_3)$	180	180	$h_{or}(z_{40})$	0,0005	0,0005
$a_1(y_4)$	2	2	$h_r(z_{42})$	0,0169	0,0169
$n_{cd}(y_5)$	30	30	$D_{shatftN}(z_{61})$	0,03963	0,03963
$N_s(z_{15})$	36	36	$D_{re}(z_{103})$	0,101	0,101
$q(y_2)$	3	3	$D_{er}(z_{71})$	0,0975	0,0975
$h_{cs}(z_{35})$	0,01450	0,01420	$a(x_{11})$	0,01063	0,01063
$b_{s2}(z_{29})$	0,00820	0,00823	$b(x_{12})$	0,023061	0,023061
$b_{s1}(z_{28})$	0,00544	0,00544			
$h_s(z_{30})$	0,01561	0,01594			
$g(z_{16})$	0,00031	0,00031			
$\tau_s(z_{14})$	0,00933	0,00933			
$\tau(z_{13})$	0,08403	0,08403			

Tabla 5.3. Desempeño de la máquina 1 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia, costos, par y factor de potencia.

	Desempeño	
	Diseño Original	Diseño Mejorado
Función Objetivo	11,4096	11,3321
FP	0,84489	0,84388
Par [Nm]	30,11	30,11
Eficiencia	0,8792	0,8802
N. Eval. función	0	71
Costo Material [\$]	43,28	42,974
Costo kWh anual [\$]	1369,96	1368,43
Costo Total [\$]	1413,24	1411,41
Ahorro en [W]		6,94
Ahorro en [\$]		1,83
P. Entrada [W]	6255,51	6248,57

Con función objetivo: Eficiencia

Tabla 5.4. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 1, tomando como función objetivo: eficiencia.

	Diseño Original	Diseño mejorado	Diseño Original	Diseño mejorado
	Estator		Rotor	
$D_{is}(x_1)$	0,107	0,107	$b_{tr}(x_7)$	0,00549
$D_{out}(x_2)$	0,171	0,183	$h_{cr}(x_{13})$	0,01212
$b_{os}(x_3)$	0,0022	0,0022	$N_r(y_6)$	28
$h_{os}(x_4)$	0,00085	0,00085	$d_2(x_{10})$	0,00195
$h_w(x_5)$	0,001	0,001	$d_1(z_{41})$	0,00576
$b_{ts}(x_6)$	0,004219	0,004219	$\tau_r(z_{37})$	0,01207
$D_{co}(x_{14})$	$0,95 \times 10^{-3}$	$0,95 \times 10^{-3}$	$b_{or}(z_{39})$	0,0015
$w_1(y_3)$	180	180	$h_{or}(z_{40})$	0,0005
$a_1(y_4)$	2	3	$h_r(z_{42})$	0,0169
$n_{cd}(y_5)$	30	30	$D_{shatftN}(z_{61})$	0,03963
$N_s(z_{15})$	36	36	$D_{re}(z_{103})$	0,101
$q(y_2)$	3	3	$D_{er}(z_{71})$	0,0975
$h_{cs}(z_{35})$	0,01450	0,01440	$a(x_{11})$	0,01063
$b_{s2}(z_{29})$	0,00820	0,00924	$b(x_{12})$	0,023061
$b_{s1}(z_{28})$	0,00544	0,00544		
$h_s(z_{30})$	0,01561	0,02172		
$g(z_{16})$	0,00031	0,00031		
$\tau_s(z_{14})$	0,00933	0,00933		
$\tau(z_{13})$	0,08403	0,08403		

Tabla 5.5. Desempeño de la máquina 1 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia.

	Desempeño	
	Diseño Original	Diseño Mejorado
función Objetivo	1,13736	1,1179
FP	0,8448	0,8304
Par [Nm]	30,1084	30,1084
Eficiencia	0,8792	0,8945
N. Eval función	0	71
Costo Material [\$]	43,28	48,39
Costo kWh anual [\$]	2739,92	2693,12
Costo Total [\$]	2783,20	2741,52
Ahorro en [W]		106,8312
Ahorro en [\$]		46,79
P. Entrada [W]	6255,51	6148,69

Con función objetivo: Factor de potencia

Tabla 5.6. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 1, tomando como función objetivo: factor de potencia.

	Diseño Original	Diseño mejorado	Diseño Original	Diseño mejorado
	Estator		Rotor	
$D_{is}(x_1)$	0,107	0,107	$b_{tr}(x_7)$	0,00549
$D_{out}(x_2)$	0,171	0,183	$h_{cr}(x_{13})$	0,01212
$b_{os}(x_3)$	0,0022	0,0022	$N_r(y_6)$	28
$h_{os}(x_4)$	0,00085	0,00085	$d_2(x_{10})$	0,00195
$h_w(x_5)$	0,001	0,001	$d_1(z_{41})$	0,00576
$b_{ts}(x_6)$	0,00422	0,00422	$\tau_r(z_{37})$	0,01207
$D_{co}(x_{14})$	$0,95 \times 10^{-3}$	$0,94 \times 10^{-3}$	$b_{or}(z_{39})$	0,0015
$w_1(y_3)$	180	180	$h_{or}(z_{40})$	0,0005
$a_1(y_4)$	2	2	$h_r(z_{42})$	0,0169
$n_{cd}(y_5)$	30	30	$D_{shatftN}(z_{61})$	0,03963
$N_s(z_{15})$	36	36	$D_{re}(z_{103})$	0,101
$q(y_2)$	3	3	$D_{er}(z_{71})$	0,0975
$h_{cs}(z_{35})$	0,01450	0,01490	$a(x_{11})$	0,01063
$b_{s2}(z_{29})$	0,00820	0,00812	$b(x_{12})$	0,023061
$b_{s1}(z_{28})$	0,00544	0,00544		
$h_s(z_{30})$	0,01561	0,01529		
$g(z_{16})$	0,00031	0,00031		
$\tau_s(z_{14})$	0,00933	0,00933		
$\tau(z_{13})$	0,08403	0,08403		

Tabla 5.7. Desempeño de la máquina 1 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: factor de potencia.

	Desempeño	
	Diseño Original	Diseño Mejorado
Función Objetivo	1,1374	1,1179
FP	0,8449	0,8459
Par [Nm]	30,11	30,11
Eficiencia	0,8792	0,8781
N. Eval función	0	71
Costo Material [\$]	43,28	43,59
Costo kWh anual [\$]	2739,92	2743,42
Costo Total [\$]	2783,20	2787,01
Ahorro en [W]		-8,01
Ahorro en [\$]		-3,81
P. Entrada [W]	6255,52	6263,52

Con función objetivo: Costos

Tabla 5.8. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 1, tomando como función objetivo: Costos.

	Diseño Original	Diseño mejorado		Diseño Original	Diseño mejorado
Estator			Rotor		
$D_{is}(x_1)$	0,107	0,107	$b_{tr}(x_7)$	0,00549	0,00422
$D_{out}(x_2)$	0,171	0,171	$h_{cr}(x_{13})$	0,01212	0,01212
$b_{os}(x_3)$	0,0022	0,0022	$N_r(y_6)$	28	28
$h_{os}(x_4)$	0,00085	0,00085	$d_2(x_{10})$	0,00195	0,00195
$h_w(x_5)$	0,001	0,001	$d_1(z_{41})$	0,00576	0,00576
$b_{ts}(x_6)$	0,00422	0,00422	$\tau_r(z_{37})$	0,01207	0,01208
$D_{co}(x_{14})$	$0,95 \times 10^{-3}$	$0,99 \times 10^{-3}$	$b_{or}(z_{39})$	0,0015	0,0015
$w_1(y_3)$	180	180	$h_{or}(z_{40})$	0,0005	0,0005
$a_1(y_4)$	2	2	$h_r(z_{42})$	0,0169	0,0169
$n_{cd}(y_5)$	30	30	$D_{shatftN}(z_{61})$	0,03963	0,03963
$N_s(z_{15})$	36	36	$D_{re}(z_{103})$	0,101	0,101
$q(y_2)$	3	3	$D_{er}(z_{71})$	0,0975	0,0975
$h_{cs}(z_{35})$	0,01450	0,01320	$a(x_{11})$	0,01063	0,01063
$b_{s2}(z_{29})$	0,00820	0,00840	$b(x_{12})$	0,02306	0,02306
$b_{s1}(z_{28})$	0,00544	0,00544			
$h_s(z_{30})$	0,01561	0,01690			
$g(z_{16})$	0,00031	0,00031			
$\tau_s(z_{14})$	0,00933	0,00930			
$\tau(z_{13})$	0,08403	0,84040			

Tabla 5.9. Desempeño de la máquina 1 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: Costos.

	Desempeño	
	Diseño Original	Diseño Mejorado
Función Objetivo	43,2845	42,2267
FP	0,8449	0,8459
Par [Nm]	30,1085	30,1085
Eficiencia	0,8792	0,8825
N. Eval función	0	71
Costo Material [\$]	43,2845	42,2267
Costo kWh anual [\$]	2739,92	2729,62
Costo Total [\$]	2783,20	2771,84
Ahorro en [W]		23,51
Ahorro en [\$]		11,35
P. Entrada [W]	6255,5177	6232,0121

Con función objetivo: Par

No hubo cambios en el diseño cuando se toma como función objetivo el par de la máquina.

5.1.2. Máquina 2: potencia de salida 22,380 kW y 3 pares de polos

Con función objetivo: Par, eficiencia, factor de potencia y costos en conjunto

Tabla 5.10. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 2, tomando como función objetivo: eficiencia, costos, par y factor de potencia.

	Diseño Original	Diseño mejorado		Diseño Original	Diseño mejorado
	Estator			Rotor	
$D_{is}(x_1)$	0,191	0,191	$b_{tr}(x_7)$	0,00735	0,00735
$D_{out}(x_2)$	0,276	0,276	$h_{cr}(x_{13})$	0,01644	0,01644
$b_{os}(x_3)$	0,002	0,002	$N_r(y_6)$	38	38
$h_{os}(x_4)$	0,001	0,001	$d_2(x_{10})$	0,00678	0,00678
$h_w(x_5)$	0,002	0,0015	$d_1(z_{41})$	0,00772	0,00772
$b_{ts}(x_6)$	0,00548	0,00548	$\tau_r(z_{37})$	0,0159	0,0159
$D_{co}(x_{14})$	$0,65 \times 10^{-3}$	$0,68 \times 10^{-3}$	$b_{or}(z_{39})$	0,0025	0,0025
$w_1(y_3)$	108	108	$h_{or}(z_{40})$	0,0005	0,0005
$a_1(y_4)$	4	4	$h_r(z_{42})$	0,00569	0,00569
$n_{cd}(y_5)$	48	48	$D_{shatftN}(z_{61})$	0,1303	0,1303
$N_s(z_{15})$	54	54	$D_{re}(z_{103})$	0,1824	0,1824
$q(y_2)$	3	3	$D_{er}(z_{71})$	0,1789	0,1789
$h_{cs}(z_{35})$	0,01732	0,01570	$a(x_{11})$	0,01538	0,01538
$b_{s2}(z_{29})$	0,00856	0,00875	$b(x_{12})$	0,10154	0,10154
$b_{s1}(z_{28})$	0,00592	0,00592			
$h_s(z_{30})$	0,02267	0,02430			
$g(z_{16})$	0,00044	0,00044			
$\tau_s(z_{14})$	0,0111	0,0111			
$\tau(z_{13})$	0,1	0,1			

Tabla 5.11. Desempeño de la máquina 2 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia, costos, par y factor de potencia.

Desempeño		
	Diseño Original	Diseño Mejorado
Función Objetivo	27,3522	26,5355
FP	0,8760	0,8770
Par [Nm]	186,01	186,01
Eficiencia	0,8880	0,8869
N. Eval función	0	321
Costo Material [\$]	105,97	103,87
Costo kWh anual [\$]	5519,39	5503,28
Costo Total [\$]	5625,37	5607,15
Ahorro en [W]		73,58
Ahorro en [\$]		18,22
P. Entrada [W]	25202,70	25129,13

Con función objetivo: Eficiencia

Tabla 5.12. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 2, tomando como función objetivo: eficiencia.

	Diseño Original	Diseño mejorado		Diseño Original	Diseño mejorado
Estator			Rotor		
$D_{is}(x_1)$	0,191	0,191	$b_{tr}(x_7)$	0,00735	0,00735
$D_{out}(x_2)$	0,276	0,276	$h_{cr}(x_{13})$	0,01644	0,01644
$b_{os}(x_3)$	0,002	0,002	$N_r(y_6)$	38	38
$h_{os}(x_4)$	0,001	0,001	$d_2(x_{10})$	0,00678	0,00678
$h_w(x_5)$	0,002	0,0015	$d_1(z_{41})$	0,00772	0,00772
$b_{ts}(x_6)$	0,00548	0,00548	$\tau_r(z_{37})$	0,0159	0,0158
$D_{co}(x_{14})$	$0,65 \times 10^{-3}$	$0,66 \times 10^{-3}$	$b_{or}(z_{39})$	0,0025	0,0025
$w_1(y_3)$	108	108	$h_{or}(z_{40})$	0,0005	0,0005
$a_1(y_4)$	4	4	$h_r(z_{42})$	0,00569	0,00569
$n_{cd}(y_5)$	48	48	$D_{shatftN}(z_{61})$	0,1303	0,1303
$N_s(z_{15})$	54	54	$D_{re}(z_{103})$	0,1824	0,1824
$q(y_2)$	3	3	$D_{er}(z_{71})$	0,1789	0,1789
$h_{cs}(z_{35})$	0,01732	0,01674	$a(x_{11})$	0,01538	0,01538
$b_{s2}(z_{29})$	0,00856	0,00863	$b(x_{12})$	0,10154	0,10154
$b_{s1}(z_{28})$	0,00592	0,00592			
$h_s(z_{30})$	0,02267	0,02325			
$g(z_{16})$	0,00044	0,00044			
$\tau_s(z_{14})$	0,0111	0,0111			
$\tau(z_{13})$	0,1	0,1			

Tabla 5.13. Desempeño de la máquina 2 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia.

Desempeño		
	Diseño Original	Diseño Mejorado
Función Objetivo	1,1260	1,1248
FP	0,8760	0,8750
Par [Nm]	186,01	186,01
Eficiencia	0,8880	0,8890
N. Eval función	0	65
Costo Material [\$]	105,97	107,14
Costo kWh anual [\$]	5519,39	5513,18
Costo Total [\$]	5625,37	5620,32
Ahorro en [W]		28,35
Ahorro en [\$]		5,05
P. Entrada [W]	25202,70	25174,35

Con función objetivo: Factor de potencia

Tabla 5.14. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 2, tomando como función objetivo: factor de potencia.

	Diseño Original	Diseño mejorado	Diseño Original	Diseño mejorado
	Estator		Rotor	
$D_{is}(x_1)$	0,191	0,191	$b_{tr}(x_7)$	0,00735
$D_{out}(x_2)$	0,276	0,276	$h_{cr}(x_{13})$	0,01644
$b_{os}(x_3)$	0,002	0,002	$N_r(y_6)$	38
$h_{os}(x_4)$	0,001	0,001	$d_2(x_{10})$	0,00678
$h_w(x_5)$	0,002	0,0015	$d_1(z_{41})$	0,00772
$b_{ts}(x_6)$	0,00548	0,00548	$\tau_r(z_{37})$	0,01207
$D_{co}(x_{14})$	$0,65 \times 10^{-3}$	$0,64 \times 10^{-3}$	$b_{or}(z_{39})$	0,0025
$w_1(y_3)$	108	108	$h_{or}(z_{40})$	0,0005
$a_1(y_4)$	4	4	$h_r(z_{42})$	0,00569
$n_{cd}(y_5)$	48	48	$D_{shatftN}(z_{61})$	0,1303
$N_s(z_{15})$	54	54	$D_{re}(z_{103})$	0,1824
$q(y_2)$	3	3	$D_{er}(z_{71})$	0,1789
$h_{cs}(z_{35})$	0,01732	0,01791	a (x_{11})	0,01538
$b_{s2}(z_{29})$	0,00856	0,00849	b (x_{12})	0,10154
$b_{s1}(z_{28})$	0,00592	0,00592		
$h_s(z_{30})$	0,02267	0,02209		
g (z_{16})	0,00044	0,00044		
$\tau_s(z_{14})$	0,0111	0,0111		
$\tau(z_{13})$	0,1	0,1		

Tabla 5.15. Desempeño de la máquina 2 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: factor de potencia.

	Desempeño	
	Diseño Original	Diseño Mejorado
Función Objetivo	1,1415	1,1401
FP	0,8760	0,8770
Par [Nm]	186,01	186,01
Eficiencia	0,8880	0,8869
N. Eval función	0	65
Costo Material [\$]	105,97	108,28
Costo kWh anual [\$]	5519,39	5526,24
Costo Total [\$]	5625,37	5634,52
Ahorro en [W]		-31,26
Ahorro en [\$]		-9,15
P. Entrada [W]	25202,70	25233,96

Con función objetivo: Costos

Tabla 5.16. Dimensiones del estator y rotor del diseño original y mejorado de la máquina 2, tomando como función objetivo: Costos.

	Diseño Original	Diseño mejorado		Diseño Original	Diseño mejorado
	Estator			Rotor	
$D_{is}(x_1)$	0,191	0,19268	$b_{tr}(x_7)$	0,00735	0,00735
$D_{out}(x_2)$	0,276	0,276	$h_{cr}(x_{13})$	0,01644	0,01644
$b_{os}(x_3)$	0,002	0,002	$N_r(y_6)$	38	38
$h_{os}(x_4)$	0,001	0,001	$d_2(x_{10})$	0,00678	0,00678
$h_w(x_5)$	0,002	0,0015	$d_1(z_{41})$	0,00772	0,00772
$b_{ts}(x_6)$	0,00548	0,00535	$\tau_r(z_{37})$	0,0159	0,0158
$D_{co}(x_{14})$	$0,65 \times 10^{-3}$	$0,68 \times 10^{-3}$	$b_{or}(z_{39})$	0,0025	0,0025
$w_1(y_3)$	108	109	$h_{or}(z_{40})$	0,0005	0,0005
$a_1(y_4)$	4	4	$h_r(z_{42})$	0,00569	0,00569
$n_{cd}(y_5)$	48	48	$D_{shatftN}(z_{61})$	0,1303	0,1303
$N_s(z_{15})$	54	54	$D_{re}(z_{103})$	0,1824	0,1824
$q(y_2)$	3	3	$D_{er}(z_{71})$	0,1789	0,1789
$h_{cs}(z_{35})$	0,01732	0,01554	$a(x_{11})$	0,01538	0,01538
$b_{s2}(z_{29})$	0,00856	0,00891	$b(x_{12})$	0,10154	0,10154
$b_{s1}(z_{28})$	0,00592	0,00611			
$h_s(z_{30})$	0,02267	0,02405			
$g(z_{16})$	0,00044	0,00044			
$\tau_s(z_{14})$	0,0111	0,0111			
$\tau(z_{13})$	0,1	0,1			

Con función objetivo: Par

No hubo cambios en el diseño cuando se toma como función objetivo el par de la máquina.

Tabla 5.17. Desempeño de la máquina 2 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: costos.

	Desempeño	
	Diseño Original	Diseño Mejorado
Función Objetivo	107,1358	100,5651
FP	0,8760	0,8770
Par [Nm]	186,01	186,01
Eficiencia	0,8880	0,8869
N. Eval función	0	861
Costo Material [\$]	105,97	100,57
Costo kWh anual [\$]	5519,39	5490,33
Costo Total [\$]	5625,37	5590,90
Ahorro en [W]		132,69
Ahorro en [\$]		34,47
P. Entrada [W]	25202,70	25070,01

5.1.3. Máquina 3: potencia 5,5 kW y 2 pares de polos

Con función objetivo: Par, eficiencia, factor de potencia y costos en conjunto

Tabla 5.18. Dimensiones de la máquina 3 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia, costos, par y factor de potencia.

	Diseño Original	Diseño mejorado	Diseño Original	Diseño mejorado
	Estator		Rotor	
$D_{is}(x_1)$	0,111	0,111	$b_{tr}(x_7)$	0,00596
$D_{out}(x_2)$	0,190	0,190	$h_{cr}(x_{13})$	0,01382
$b_{os}(x_3)$	0,002	0,002	$N_r(y_6)$	28
$h_{os}(x_4)$	0,001	0,001	$d_2(x_{10})$	0,00173
$h_w(x_5)$	0,002	0,002	$d_1(z_{41})$	0,00574
$b_{ts}(x_6)$	0,00476	0,00476	$\tau_r(z_{37})$	0,01580
$D_{co}(x_{14})$	$1,15 \times 10^{-3}$	$1,15 \times 10^{-3}$	$b_{or}(z_{39})$	0,00150
$w_1(y_3)$	108	108	$h_{or}(z_{40})$	0,00050
$a_1(y_4)$	2	2	$h_r(z_{42})$	0,01778
$n_{cd}(y_5)$	30	30	$D_{shatftN}(z_{61})$	0,03987
$N_s(z_{15})$	36	36	$D_{re}(z_{103})$	0,10464
$q(y_2)$	3	3	$D_{er}(z_{71})$	0,10114
$h_{cs}(z_{35})$	0,01549	0,01549	$a(x_{11})$	0,01102
$b_{s2}(z_{29})$	0,00913	0,00913	$b(x_{12})$	0,02220
$b_{s1}(z_{28})$	0,00536	0,00536		
$h_s(z_{30})$	0,02209	0,02209		
$g(z_{16})$	0,00031	0,00031		
$\tau_s(z_{14})$	0,00969	0,00969		
$\tau(z_{13})$	0,08718	0,08718		

Igualmente el ASEM en los casos restantes para este caso de estudio no consiguió mejorar el modelo de la máquina de inducción.

Tabla 5.19. Desempeño de la máquina 3 original y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia, costos, par y factor de potencia.

	Desempeño	
	Diseño Original	Diseño Mejorado
Función Objetivo	1,2057	1,2057
FP	0,8293	0,8293
Par [Nm]	30,06	30,06
Eficiencia	0,8957	0,8957
N. Eval función	0	71
Costo Material [\$]	50,56	50,56
Costo kWh anual [\$]	1344,76	1344,76
Costo Total [\$]	1395,32	1395,32
Ahorro en [W]		0,00
Ahorro en [\$]		0,00
P. Entrada [W]	6140,45	6140,45

5.2. Resultados comparativos con Otros Autores

El siguiente apartado se presentan los resultados de la mejora de la máquina de inducción, tomando en cuenta los modelos de los autores Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004) y A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009), sus trabajos titulados “Design Optimization of Induction Motor by Genetic Algorithm and Comparison with Existing Motor” y “Application of Genetic Algorithms in the Design Optimization of Three Phase Induction Motor”, respectivamente, estos trabajos se escogieron debido a la semejanzas de sus variables de decisión con las variables presentadas en este trabajo de grado.

5.2.1. Modelo de Máquina de Inducción de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004)

Para el modelo de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004) se tomó como función objetivo el costo y la eficiencia (ecuación 5.1). La máquina de inducción tiene las siguientes características ³, a su vez la máquina tiene 2 pares de polos y 1.5 kW de potencia nominal.

³Al no contar con suficiente información sobre el modelo de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004) (clase de aislamiento y temperatura de alza, entre otras características) se asumieron valores

Tabla 5.20. Características del modelo de máquina de inducción del autor Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004).

Característica	Valor
Velocidad [rpm]	3000
Voltaje de entrada [V]	380
Frecuencia [Hz]	50
Tipo de conexión	Estrella
Factor de potencia buscado	0,85
Eficiencia buscada	0,785
Clase de aislamiento	F
Temperatura de alza	Clase B

Los resultados se muestran a continuación:

Con función objetivo: Costos

Tabla 5.21. Dimensiones del estator y rotor del diseño original del modelo original y mejorado de la máquina del modelo de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004), tomando como función objetivo: Costos.

Diseño Original		Diseño mejorado	Diseño Original		Diseño mejorado
Estator			Rotor		
$D_{is}(x_1)$	0,0673	0,0682	$b_{tr}(x_7)$	0,003981	0,003981
$D_{out}(x_2)$	0,132	0,132	$h_{cr}(x_{13})$	0,01461	0,01461
$b_{os}(x_3)$	0,002	0,0022	$N_r(y_6)$	22	22
$h_{os}(x_4)$	0,0006	0,0006	$d_2(x_{10})$	0,00143	0,00222
$h_w(x_5)$	0,0015	0,0015	$d_1(z_{41})$	0,00480	0,00491
$b_{ts}(x_6)$	0,00373	0,00373	$\tau_r(z_{37})$	0,009697	0,009812
$D_{co}(x_{14})$	$0,85 \times 10^{-3}$	$0,85 \times 10^{-3}$	$b_{or}(z_{39})$	0,0015	0,0015
$w_1(y_3)$	344	356	$h_{or}(z_{40})$	0,0005	0,0005
$a_1(y_4)$	1	1	$h_r(z_{42})$	0,01172	0,00931
$n_{cd}(y_5)$	86	86	$D_{shatftN}(z_{61})$	0,03946	0,011554
$N_s(z_{15})$	24	24	$D_{re}(z_{103})$	0,06188	0,062531
$q(y_2)$	4	4	$D_{er}(z_{71})$	0,05838	0,059031
$h_{cs}(z_{35})$	0,01443	0,01418	$a(x_{11})$	0,01418	0,01418
$b_{s2}(z_{29})$	0,00979	0,00986	$b(x_{12})$	0,01537	0,01537
$b_{s1}(z_{28})$	0,005631	0,005742			
$h_s(z_{30})$	0,015816	0,01582			
$g(z_{16})$	0,00031	0,00031			
$\tau_s(z_{14})$	0,00881	0,00892			
$\tau(z_{13})$	0,105714	0,1071			

Tabla 5.22. Desempeño de la máquina del modelo original de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004) y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: costos.

	Desempeño				
	Diseño Original	Mejora ASEM	Mejora Autor	Mejora ASEM [%]	Mejora Autor [%]
Función Objetivo	12,6100	11,7200	11,8300	7,06	6,19
FP	0,8306	0,8104	0,8538	-2,43	2,79
Par [Nm]	2,85	2,85	2,77	0,00	-2,83
Eficiencia	0,7989	0,8223	0,7817	2,93	-2,15
N. Eval función	0	351	NA	-	-
Costo Material [\$]	12,61	11,72	11,83	7,06	6,19
Costo Kwh anual [\$]	411,19	399,49	420,24	2,85	-2,20
Costo Total [\$]	423,80	411,21	432,07	2,97	-1,95
Ahorro en [W]		53,43	-41,31	-	-
Ahorro en [\$]		12,59	-8,27	-	-
P. Entrada [W]	1877,58	1824,15	1918,89	2,85	-2,20

Con función objetivo: Eficiencia

Tabla 5.23. Dimensiones del estator y rotor del diseño original del modelo original y mejorado de la máquina del modelo de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004), tomando como función objetivo: Eficiencia.

	Diseño Original	Diseño mejorado		Diseño Original	Diseño mejorado
	Estator			Rotor	
$D_{is}(x_1)$	0,0673	0,6728	$b_{tr}(x_7)$	0,003981	0,003981
$D_{out}(x_2)$	0,132	0,132	$h_{cr}(x_{13})$	0,01461	0,01461
$b_{os}(x_3)$	0,0022	0,0022	$N_r(y_6)$	22	22
$h_{os}(x_4)$	0,0006	0,0006	$d_2(x_{10})$	0,00143	0,00143
$h_w(x_5)$	0,0015	0,0015	$d_1(z_{41})$	0,004801	0,004798
$b_{ts}(x_6)$	0,00373	0,00373	$\tau_r(z_{37})$	0,009697	0,00967
$D_{co}(x_{14})$	$0,85 \times 10^{-3}$	$0,85 \times 10^{-3}$	$b_{or}(z_{39})$	0,0015	0,0015
$w_1(y_3)$	344	340	$h_{or}(z_{40})$	0,0005	0,0005
$a_1(y_4)$	1	1	$h_r(z_{42})$	0,01172	0,01172
$n_{cd}(y_5)$	86	86	$D_{shatftN}(z_{61})$	0,003946	0,006789
$N_s(z_{15})$	24	24	$D_{re}(z_{103})$	0,06188	0,06187
$q(y_2)$	4	4	$D_{er}(z_{71})$	0,05838	0,05837
$h_{cs}(z_{35})$	0,01443	0,01444	$a(x_{11})$	0,01418	0,01418
$b_{s2}(z_{29})$	0,00979	0,00980	$b(x_{12})$	0,01537	0,01585
$b_{s1}(z_{28})$	0,005631	0,005628			
$h_s(z_{30})$	0,015816	0,01582			
$g(z_{16})$	0,00031	0,00031			
$\tau_s(z_{14})$	0,00881	0,00881			
$\tau(z_{13})$	0,105714	0,10569			

Tabla 5.24. Desempeño de la máquina del modelo original de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004) y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: eficiencia.

	Desempeño				
	Diseño Original	Mejora ASEM	Mejora Autor	Mejora ASEM [%]	Mejora Autor [%]
Función Objetivo	1,2517	1,2161	1,2255	2,85	2,10
FP	0,8306	0,8104	0,8501	-2,43	2,35
Par [Nm]	2,85	2,85	2,89	0,00	1,38
Eficiencia	0,7989	0,8223	0,8160	2,93	2,14
N. Eval función	0	351	NA	-	-
Costo Material [\$]	12,61	11,72	13,39	7,06	-6,19
Costo Kwh anual [\$]	411,19	399,49	402,57	2,85	2,10
Costo Total [\$]	423,80	411,21	415,96	2,97	1,85
Ahorro en [W]		53,43	39,35	-	-
Ahorro en [\$]		12,59	7,84	-	-
P. Entrada [W]	1877,58	1824,15	1838,24	2,85	2,10

5.2.2. Modelo de Máquina de Inducción de A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009)

Para el modelo de A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009) se cuentan con las siguientes características:

Tabla 5.25. Características del modelo de máquina de inducción del autor A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009).

Característica	Valor
Velocidad [rpm]	1500
Voltaje de entrada [V]	400
Frecuencia [Hz]	50
Tipo de conexión	Estrella
Factor de potencia buscado	0,85
Eficiencia buscada	0,785
Clase de aislamiento	F
Temperatura de alza	Clase B

Igualmente para el modelo de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004) a los parámetros que se desconocían su valor, se asumieron. La máquina de A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009) tiene 2 pares de polos y

una potencia nominal de salida de 0,746 kW. Por otra parte, la función objetivo tomada para el estudio fue de la de los costos de los materiales de construcción, el resultado se muestra en las siguientes tablas:

Con función objetivo: Costos

Tabla 5.26. Dimensiones del estator y rotor del diseño original del modelo original y mejorado de la máquina del modelo de A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009), tomando como función objetivo: Costos.

	Diseño Original	Diseño mejorado		Diseño Original	Diseño mejorado
	Estator			Rotor	
$D_{is}(x_1)$	0,0696	0,0696	$b_{tr}(x_7)$	0,002957	0,002957
$D_{out}(x_2)$	0,122	0,1221	$h_{cr}(x_{13})$	0,0091	0,0091
$b_{os}(x_3)$	0,0020	0,002	$N_r(y_6)$	34	34
$h_{os}(x_4)$	0,0010	0,0010	$d_2(x_{10})$	0,00180	0,00180
$h_w(x_5)$	0,0040	0,004	$d_1(z_{41})$	0,003097	0,003097
$b_{ts}(x_6)$	0,00294	0,00294	$\tau_r(z_{37})$	0,006484	0,006484
$D_{co}(x_{14})$	$0,35 \times 10^{-3}$	$0,35 \times 10^{-3}$	$b_{or}(z_{39})$	0,0015	0,0015
$w_1(y_3)$	588	588	$h_{or}(z_{40})$	0,0005	0,0005
$a_1(y_4)$	2	2	$h_r(z_{42})$	0,006977	0,006977
$n_{cd}(y_5)$	196	196	$D_{shatftN}(z_{61})$	0,003108	0,0031081
$N_s(z_{15})$	36	36	$D_{re}(z_{103})$	0,06596	0,06596
$q(y_2)$	3	3	$D_{er}(z_{71})$	0,06246	0,06246
$h_{cs}(z_{35})$	0,00889	0,00889	$a(x_{11})$	0,008093	0,0080932
$b_{s2}(z_{29})$	0,00617	0,00617	$b(x_{12})$	0,00993	0,00993
$b_{s1}(z_{28})$	0,004	0,004000			
$h_s(z_{30})$	0,01236	0,01236			
$g(z_{16})$	0,000281	0,00028			
$\tau_s(z_{14})$	0,00607	0,00607			
$\tau(z_{13})$	0,0547	0,05470			

Tabla 5.27. Desempeño de la máquina del modelo original de A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009) y con el diseño mejorado, tomando como función objetivo: costos (El autor no muestra la mejora de los índices de desempeño par, factor de potencia y eficiencia).

	Desempeño				
	Diseño Original	Mejora ASEM	Mejora Autor	Mejora ASEM [%]	Mejora Autor [%]
Función Objetivo	15,6400	15,6400	12,8100	0,00	18,09
FP	0,9016	0,9016	-	0,00	-
Par [Nm]	5,30	5,30	-	0,00	-
Eficiencia	0,7400	0,7400	-	0,00	-
N. Eval función	0	0	-	-	-
Costo Material [\$]	15,64	15,64	12,81	0,00	18,09
Costo Kwh anual [\$]	220,78	220,78	-	0,00	-
Costo Total [\$]	236,42	236,42	12,81	0,00	-
Ahorro en [W]		0,00	-	-	-
Ahorro en [\$]		0,00	-	-	-
P. Entrada [W]	1008,11	1008,11	-	0,00	-

5.3. Análisis de Sensibilidad del Modelo Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004)

A continuación se mostrará el resultado del análisis de sensibilidad de la respuesta de mejora del modelo de máquina de inducción de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004).

5.3.1. Variaciones con función objetivo: eficiencia

Tabla 5.28. Variaciones de respuesta con pequeñas variables para la función objetivo: costos.

Variable	$\nabla f(x)$	h
x_1	-2	0,0001
x_2	-0,35	0,001
x_3	1,29	0,0001
x_4	0,76	0,0001
x_5	0,81	0,0001
x_6	4,32	0,00001
x_7	-209,84	0,00001
x_8	5,101	0,00001
x_9	-1,51	0,00001
x_{10}	-1,84	0,00001
x_{11}	0	0,0001
x_{12}	-0,17	0,01

5.3.2. Variaciones con función objetivo: Eficiencia

Tabla 5.29. Variaciones de respuesta con pequeñas variables para la función objetivo: costos.

Variable	$\nabla f(x)$	h
x_1	-450,05	0,0001
x_2	313,2	0,001
x_3	0	0,0001
x_4	-208,38	0,0001
x_5	-214,99	0,0001
x_6	78,16	0,00001
x_7	-562,75	0,00001
x_8	-524,22	0,00001
x_9	0	0,00001
x_{10}	0	0,00001
x_{11}	0	0,0001
x_{12}	-10,21	0,01

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizará los resultados arrojados para la mejora de los tres casos de estudio de prueba y los modelos de los autores Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004) y A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009). El análisis se dividirá por cada caso como se puede observar a continuación:

6.1. Resultados de Mejora de Diseño

1. Máquina de Inducción 1:

Para el caso de cuando se toma como función objetivo el par, eficiencia, factor de potencia y costos de materiales de construcción como se muestran las tablas 5.2 y 5.3 (teniendo estas el mismo peso de ponderación); se observa que el calibre de conductor aumentó, el ASEM consiguió una solución, donde se mejora la eficiencia y el costo de material, caso contrario al factor de potencia debido a que tuvo una pequeña disminución y el par nominal se mantuvo constante (como en todas pruebas realizadas por el ASEM); se puede observar que la potencia ahorrada al igual que costo ahorrado no es significativo cuando se toma como mejora las variables de desempeño en conjunto.

Por otra parte, cuando se toma como función objetivo la eficiencia (tablas 5.4 y 5.5 página 105), se observa que el diámetro externo del estator aumenta igualmente como el número de conductores en paralelo; esta sí mejora

significativamente respecto al caso cuando se toman como función objetivo todas las variables de desempeño en conjunto. Se observa que hay un ahorro monetario de 41,68 dólares anuales; esto es debido a que la eficiencia de la máquina aumenta, obteniendo como resultado la disminución de la energía que consume la misma y a largo plazo ahorrar una cantidad sustancial en costos de operación, haciendo esta solución viable para su construcción. Cuando se mejora el factor de potencia (ver tablas 5.6 y 5.7 página 106) el ASEM igualmente llega una solución como en los casos anteriores, pero se observa que esta solución no es viable debido a que el costo de la máquina aumenta y disminuye su eficiencia, en consecuencia esta solución produciría pérdidas si es implementada.

Cuando se tomó como función objetivo los costos de materiales (tablas 5.8 y 5.9) de la máquina el ASEM no fue capaz de conseguir una solución que cumpla con los criterios de salida del algoritmo de búsqueda directa, igualmente se obtuvo una mejora respecto al diseño original de la máquina, que produce ganancias a mayor plazo que la solución dada por el ASEM cuando se mejora la eficiencia.

Para la función par, en ninguno de los 3 casos tuvo cambios significativos.

2. Máquina de inducción 2:

Para el caso de la máquina de inducción 2, el ASEM igualmente llegó a una solución satisfactoria. Para el caso de las variables de desempeño en conjunto con el mismo peso de ponderación como se muestra en las tablas 5.10 y 5.11; se observa un aumento del calibre del conductor D_{co} y disminución de la altura de la base de la ranura del estator, en la tabla 5.11 se observa aumento de la eficiencia de la máquina y disminución tanto en el factor de potencia (la disminución de ésta no es muy significativa) como en los costos, dando un ahorro en potencia de 73.58 W y un ahorro monetario de 18,21 dólares, ahorro que se reflejará a largo plazo en los costos de operación de

la máquina de inducción.

Igualmente como en la mejora del diseño de la máquina de inducción 1, la máquina 2 tiene resultados similares; dando una solución viable para la eficiencia y no factible para el factor de potencia. Por otra parte, cuando se mejora el costo (tablas 5.16 y 5.17), se logra la solución más viable de todas respecto al punto económico de operación de la máquina, debido a que se aumenta la eficiencia, el ahorro en materiales y costos de operación; obteniendo un ahorro de 132,69 Watt y 34,48 dólares, en caso del par nominal el cambio no es significativo debido a que disminuye en solo 1 unidad.

3. Máquina de inducción 3:

En este caso el ASEM no logró conseguir un óptimo local para todos los casos de estudio; esto significa que el punto de arranque aparentemente es un punto inmejorable, es decir, este punto es la mejor configuración para obtener mayor desempeño de la máquina de inducción examinándolo desde el punto de vista de costos de materiales y operación, factor de potencia, eficiencia y par.

4. Máquina de inducción de Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004):

Para el modelo de los autores Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004) el ASEM encontró para los dos casos de estudio (eficiencia y costos) pequeñas mejoras al diseño. Para el caso de los costos de los materiales el ASEM pudo localizar una solución con resultados parecidos a los del autores (tabla 5.22, pag. 116) logrando disminuir los costos en 1 \$ aproximadamente. Por otra parte, cuando se quiso mejorar la eficiencia el ASEM localizó una respuesta muy significativa de 0,82 respecto al diseño original de los autores, la cual es 0,79 (ver tabla 5.24, pag. 116). Sin embargo, los autores Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004) consiguieron aplicando algoritmos genéticos una eficiencia de 0,81 validando que el ASEM encontró

una solución válida para la mejora de diseño de la máquina de inducción.

5. Máquina de inducción de A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009):

Para el caso del modelo de A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009) el ASEM no logró encontrar un óptimo local para el caso de estudio de costos, caso contrario a la solución encontrada por A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009), donde los autores logran conseguir una mejora aproximada del 20 % (alrededor de 3 \$) del costos de los materiales utilizando algoritmos genéticos, mejora significativa para el ahorro a largo plazo de la construcción en masa de máquinas de inducción.

Para el modelo de A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009) el ASEM como se dijo anteriormente no pudo localizar mejora alguna, esto probablemente se deba a que la geometría de la máquina es distinta a la descrita por Boldea y Nasar (2010) y el punto de arranque no es el más adecuado para que el método de búsqueda directa entero mixto encuentre un óptimo local.

Como se pudo observar el ASEM llegó a una solución en la mayoría de los casos, demostrando la convergencia del mismo a un punto estacionario para un número reducido de evaluaciones de la función objetivo; demostrando que los algoritmos de búsqueda directa entero mixtos tienen gran aplicación para el mejoramiento del diseño de las máquinas de inducción.

6.2. Resultados Análisis de Sensibilidad

Para el estudio de sensibilidad se sometió al estudio al modelo de máquina de inducción de los autores Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu (2004), debido a que el ASEM pudo localizar una mejora para la funciones objetivo eficiencia y costos.

Para el caso de la respuesta obtenida para la función objetivo costos (tabla 5.28, pág. 120) las variaciones son muy significativas para todas las pequeñas variaciones de la mayoría de las variables decisión, excepto las variables b_{os} , a , b , h_{cr} y w_1 (ver página 56), donde la respuesta no muestra ninguna variación. Esto demuestra que para las variables como diámetro externo e interno del estator, altura de la ranura del estator, entre otras, la función es sensible a pequeñas variaciones de las mismas.

Para el caso de estudio de la eficiencia se obtuvo una respuesta las variables de decisión excepto b_{tr} (distancia entre ranuras del rotor), la respuesta tuvo variaciones aceptables, demostrando que la función objetivo eficiencia no es tan sensible a pequeñas variaciones de las variables de decisión.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

Las ventajas del algoritmo del Algoritmo Simplex Entero Mixto ASEM son:

1. Variables enteras mixtas: Como bien dice su nombre, el ASEM trabaja con variables tanto enteras como reales; esto es de mucha importancia debido a que en el ámbito de la ingeniería algunas variables enteras no pueden ser relajadas y trabajadas como variables reales (por ejemplo en este trabajo de grado el número de vueltas por fase del estator W_1 , es una variable netamente entera y no puede tener una aproximación de una variable real).
2. Cuando no se tiene una función objetivo explícita: El ASEM (como todos los métodos de búsqueda directa) no requieren de una función explícita y tampoco depende de las derivadas de la misma como los algoritmos Newtonianos.
3. Las funciones de penalización no tienen derivada: Como el ASEM es un algoritmo que trabaja como problemas irrestrictos, se utilizó el método de función de penalización, este método no puede ser usado para algoritmos que dependan de la derivada, debido a que en las aristas de cada función no poseen derivada. Por otra parte, el ASEM demuestra ser un algoritmo muy robusto para los problemas de optimización enteros mixtos.

En la mayoría de las pruebas de mejoramiento de diseño de la máquina de inducción, el ASEM pudo identificar un valor mejorado; demostrando ser una herramienta muy poderosa para diseños de problemas enteros mixtos en el campo de ingeniería, para este caso en particular logró el desempeño deseado en la mejora del diseño de la máquina de inducción para diferentes niveles de potencia y configuración en su diseño.

El ASEM pudo identificar puntos que cumplan con las restricciones de diseño y a su vez dar soluciones viables (excepto en la mejora del factor de potencia) que serían fácilmente implementadas, para el ahorro como en materiales y en los costos de operación de la máquina. Se observó que la función de desempeño par no es sensible para las variaciones de las variables de decisión (diámetro interno y externo del estator, altura de la boquilla de entrada del estator, entre otras).

CAPÍTULO VIII

RECOMENDACIONES

Como recomendaciones a los efectos de profundizar el procedimiento de diseño, se plantean los siguientes aspectos a considerar:

1. modelar el diseño de la carcasa de la máquina de inducción, para llegar a una mejora desde el punto de vista de los costos de materiales y de esta forma implementar el diseño de la misma;
2. verificar mediante los principios de optimalidad las soluciones encontradas por el ASEM, a objeto de identificar si la solución es un óptimo local o global;
3. utilizar algoritmos de búsqueda directa como el ASEM para el diseño de un motor bobinado y otros tipos de máquinas eléctricas, tales como la de imán permanente o sincrónicas, debido a que éstas igualmente tienen variables de diseño tanto enteras como reales.

Apéndice I

TABLAS DE EQUIVALENCIAS

Tabla I.1. Tabla de equivalencias de variables de decisión físicas a variables matemáticas.

Entrada			
Variables Reales	Variables Enteras:	Parámetros	Constantes
$x_1: D_{is}$	$y_1: P_1$	$\alpha_1: P_n$	$c_{14}: k_D$
$x_2: D_{out}$	$y_2: q$	$\alpha_2: \eta$	$c_{15}: k_{st}$
$x_3: b_{os}$	$y_3: w_1$	$\alpha_3: \cos(\phi_l)$	
$x_4: h_{os}$	$y_4: a_1$	$\alpha_4: \sigma$	
$x_5: h_w$	$y_5: n_{cd}$	$\alpha_5: Fe_{Cost}$	
$x_6: b_{ts}$	$y_6: N_r$	$\alpha_6: Cu_{Cost}$	
$x_7: b_{tr}$		$\alpha_7: \text{Tipo de rotor o aplicación}$	
$x_8: d_2$			
$x_9: a$			
$x_{10}: b$			
$x_{11}: h_{cr}$			
$x_{12}: D_{co}$			

Tabla I.2. Tabla de equivalencias de variables dependientes físicas a variables matemáticas.

Variables Dependientes		
$z_8: S_{gap}$	$z_{40}: h_{or}$	$z_{72}: l_{er}$
$z_9: k_e$	$z_{41}: d_1$	$z_{73}: b_s$
$z_{10}: f$	$z_{42}: h_r$	$z_{74}: R_{be(80)}$
$z_{11}: \lambda$	$z_{43}: A_b$	$z_{75}: R_r^{S=1}$
$z_{12}: L$	$z_{44}: J_b$	$z_{76}: x_{sl}$
$z_{13}: \tau$	$z_{45}: I_b$	$z_{77}: C_s$
$z_{14}: \tau_s$	$z_{46}: A_{er}$	$z_{78}: x_{lr}$
$z_{15}: N_s$	$z_{47}: x_a$	$z_{79}: x_{be}$
$z_{16}: g$	$z_{48}: I_{er}$	$z_{80}: x_{sl(sat)}^{S=1}$
$z_{17}: k_{q1}$	$z_{49}: J_{er}$	$z_{81}: x_{lr(sat)}^{S=1}$
$z_{18}: k_{y1}$	$z_{50}: H_{tr}$	$z_{82}: R_r^{S=S_n}$
$z_{19}: \phi$	$z_{51}: D_{ShaftMax}$	$z_{83}: x_{rl}^{S=S_n}$
$z_{20}: m$	$z_{52}: D_{ShaftMin}$	$z_{84}: x_m$
$z_{21}: V_l$	$z_{53}: T_{en}$	$z_{85}: x_{rl(skew)}^{S=1}$
$z_{22}: B_g$	$z_{54}: \gamma_1$	$z_{86}: P_{co}$
$z_{23}: I_{n1}$	$z_{55}: \gamma_2$	$z_{87}: P_{Al}$
$z_{24}: A_{co}$	$z_{56}: k_{c1}$	$z_{88}: P_{Vent}$
$z_{25}: J_{co}$	$z_{57}: k_{c2}$	$z_{89}: P_{Stray}$
$z_{26}: A_{su}$	$z_{58}: F_{mmcs}$	$z_{90}: P_{t1}$
$z_{27}: B_{ts}$	$z_{59}: H_{cs}$	$z_{91}: G_{t1}$
$z_{28}: b_{s1}$	$z_{60}: B_{cr}$	$z_{92}: P_{y1}$
$z_{29}: b_{s2}$	$z_{61}: D_{ShaftN}$	$z_{93}: G_{y1}$
$z_{30}: h_s$	$z_{62}: h_{cr}$	$z_{94}: P_{siron}$
$z_{31}: F_{mmg}$	$z_{63}: F_{mmcr}$	$z_{95}: B_{pr}$
$z_{32}: F_{mmts}$	$z_{64}: F_{mmT}$	$z_{96}: B_{ps}$
$z_{33}: F_{mmtr}$	$z_{65}: I_\mu$	$z_{97}: S_n$
$z_{34}: H_{ts}$	$z_{66}: l_{end}$	$z_{98}: W_{fe}$
$z_{35}: h_{cs}$	$z_{67}: l_c$	$z_{99}: W_s$
$z_{36}: B_{cs}$	$z_{68}: y$	$z_{100}: G_{tr}$
$z_{37}: \tau_r$	$z_{69}: R_s$	$z_{101}: C_p$
$z_{38}: B_{tr}$	$z_{70}: S$	$z_{102}: P_{total}$
$z_{39}: b_{or}$	$z_{71}: D_{er}$	$z_{103}: D_{re}$

Apéndice II

RESTRICCIONES Y FUNCIONES DE PENALIZACIÓN

II.1. Restricciones para las Variables de Decisión

- 1) $D_{is} > 0$.
- 2) $D_{out} > 0$.
- 3) $2 \times 10^{-3} \leq b_{os} < 8g$, donde g es la distancia del gap.
- 4) $0.5 \times 10^{-3} \leq h_{os} \leq 1 \times 10^{-3}$.
- 5) $1 \times 10^{-3} \leq h_w \leq 4 \times 10^{-3}$.
- 6) $b_{ts} \geq 3.5 \times 10^{-3}$.
- 7) $b_{tr} > 0$.
- 8) $d_2 > 0$.
- 9) $a > 0$.
- 10) $b > 0$.
- 11) $h_{cr} > 0$.
- 12) $0 < D_{co} < 1.3 \times 10^{-3}$.
- 13) $1 \leq P_1 \leq 4$.
- 14) $1 \leq q \leq 8$.

15) $w_1 > 0$.

16) $a_1 > 0$.

17) $n_{cd} > 2n$, donde “ n ” $\in \mathbb{N}$.

$$n_{cd} - 1,1 \frac{a_1 w_1}{P_1 q} \leq 0. \quad (\text{II.1})$$

18) N_r depende del número de par de polos $2P_1$ y el número de ranuras del estator N_s como lo muestra el siguiente cuadro:

Tabla II.1. Relación del número de ranuras del rotor N_r , estator N_s y par de polos $2P_1$.

$2P_1$	N_s	N_r
2	24	18, 20, 22, 28, 30, 33, 34
	36	25, 27, 28, 29, 30, 43
	48	30, 37, 39, 40, 41
4	24	16, 18, 20, 30, 33, 34, 35, 36
	36	28, 30, 32, 34, 45, 48
	48	36, 40, 44, 57, 59
	72	42, 48, 54, 56, 60, 61, 62, 68, 76
6	36	20, 22, 28, 44, 47, 49
	54	34, 36, 38, 40, 44, 46
	72	44, 46, 50, 60, 61, 62, 82, 83
8	48	26, 30, 34, 35, 36, 38, 58
	72	42, 46, 48, 50, 52, 56, 60
12	72	69, 75, 80
	90	86, 87, 93, 94

Las funciones de penalización son las siguientes:

1) Para D_{is} :

$$p_1 = k_1 \max(-D_{is}; 0) \quad (\text{II.2})$$

2) Para D_{out} :

$$p_2 = k_2 \text{máx}(-D_{out}; 0) \quad (\text{II.3})$$

3) Para b_{os} :

$$p_3 = k_3(\text{máx}(-b_{os} + 2 \times 10^{-3}; 0) + \text{máx}(b_{os} - 8g; 0)) \quad (\text{II.4})$$

4) Para h_{os} :

$$p_4 = k_4(\text{máx}(-h_{os} + 0,5 \times 10^{-3}; 0) + \text{máx}(h_{os} - 1 \times 10^{-3}; 0)) \quad (\text{II.5})$$

5) Para h_w :

$$p_5 = k_5(\text{máx}(-h_w + 1 \times 10^{-3}; 0) + \text{máx}(h_w - 4 \times 10^{-3}; 0)) \quad (\text{II.6})$$

6) Para b_{ts} :

$$p_6 = k_6 \text{máx}(-b_{ts} + 3,5 \times 10^{-3}; 0) \quad (\text{II.7})$$

7) Para b_{tr} :

$$p_7 = k_7 \text{máx}(-b_{tr}; 0) \quad (\text{II.8})$$

8) Para d_2 :

$$p_8 = k_8 \text{máx}(-d_2; 0) \quad (\text{II.9})$$

9) Para a :

$$p_9 = k_9 \text{máx}(-a; 0) \quad (\text{II.10})$$

10) Para b :

$$p_{10} = k_{10} \text{máx}(-b; 0) \quad (\text{II.11})$$

11) Para h_{cr} :

$$p_{11} = k_{11} \max(-h_{cr}; 0) \quad (\text{II.12})$$

12) Para D_{co} :

$$p_{12} = k_{12}(\max(-D_{co}; 0) + \max(D_{co} + 1, 3 \times 10^{-3}; 0)) \quad (\text{II.13})$$

13) Para P_1 :

$$p_{13} = k_{13}(\max(-P_1 + 1; 0) + \max(P_1 - 4; 0)) \quad (\text{II.14})$$

14) Para q :

$$p_{14} = k_{14}(\max(-q + 1; 0) + \max(q - 8; 0)) \quad (\text{II.15})$$

Este factor depende del número de par de polos de la máquina como se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla II.2. Relación valores números de ranuras por polo y numero de polos.

$2P_1$	q
2	4, 6, 8
4	2, 3, 4, 6
6	2, 3, 4
8	2, 3

Su función de penalización es:

a) Para $2P_1 = 2$:

$$p_{15} = k_{15}(\max(|q - 4|; 0) \max(|q - 6|; 0) \max(|q - 8|; 0)) \quad (\text{II.16})$$

b) Para $2P_1 = 4$:

$$p_{15} = k_{15}(\max(|q - 2|; 0) \max(|q - 3|; 0) \max(|q - 4|; 0) \max(|q - 6|; 0)) \quad (\text{II.17})$$

c) Para $2P_1 = 6$:

$$p_{15} = k_{15}(\text{máx}(|q - 2|; 0) \text{máx}(|q - 3|; 0) \text{máx}(|q - 4|; 0)) \quad (\text{II.18})$$

d) Para $2P_1 = 8$;

$$p_{15} = k_{15}(\text{máx}(|q - 2|; 0) \text{máx}(|q - 3|; 0)) \quad (\text{II.19})$$

15) Para w_1 :

$$p_{16} = k_{16} \text{máx}(-w_1; 0) \quad (\text{II.20})$$

16) Para a_1 :

$$p_{17} = k_{17} \text{máx}(-a_1; 0) \quad (\text{II.21})$$

17) Para n_{cd} :

$$p_{18} = k_{18} \text{máx}(n_{cd} - \frac{a_1 w_1}{P_1 q}; 0) \quad (\text{II.22})$$

$$p_{19} = k_{19} \text{máx}(-n_{cd}; 0) \quad (\text{II.23})$$

$$p_{20} = k_{20}(n_{cd} \% 2) \quad (\text{II.24})$$

Donde el operador $\%$ devuelve el resto de la división entre n_{cd} y 2.

18) Para N_r :

a) Para $2P_1 = 2$:

I) Para $N_s = 24$:

$$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-N_r + 18; 0) + \text{máx}(N_r - 34; 0)) \quad (\text{II.25})$$

$$\begin{aligned}
p_{22} = & k_{22}(\text{máx}(|N_r - 18|; 0) \text{máx}(|N_r - 20|; 0) \\
& \text{máx}(|N_r - 22|; 0) \text{máx}(|N_r - 28|; 0) \text{máx}(|N_r - 30|; 0) \\
& \text{máx}(|N_r - 33|; 0) \text{máx}(|N_r - 34|; 0))
\end{aligned} \tag{II.26}$$

II) Para $N_s = 36$:

$$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-N_r + 25; 0) + \text{máx}(N_r - 43; 0)) \tag{II.27}$$

$$\begin{aligned}
p_{22} = & k_{22}(\text{máx}(|N_r - 25|; 0) \text{máx}(|N_r - 27|; 0) \\
& \text{máx}(|N_r - 28|; 0) \text{máx}(|N_r - 29|; 0) \text{máx}(|N_r - 30|; 0) \\
& \text{máx}(|N_r - 43|; 0))
\end{aligned} \tag{II.28}$$

III) Para $N_s = 48$:

$$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-N_r + 30; 0) + \text{máx}(N_r - 41; 0)) \tag{II.29}$$

$$\begin{aligned}
p_{22} = & k_{22}(\text{máx}(|N_r - 30|; 0) \text{máx}(|N_r - 37|; 0) \\
& \text{máx}(|N_r - 39|; 0) \text{máx}(|N_r - 40|; 0) \text{máx}(|N_r - 41|; 0))
\end{aligned} \tag{II.30}$$

b) Para $2P_1 = 4$:

I) Para $N_s = 24$:

$$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-N_r + 16; 0) + \text{máx}(y_6 - 36; 0)) \tag{II.31}$$

$$\begin{aligned}
p_{22} &= k_{22}(\text{máx}(|N_r - 16|; 0) \text{máx}(|N_r - 18|; 0) \\
&\text{máx}(|N_r - 20|; 0) \text{máx}(|N_r - 30|; 0) \text{máx}(|N_r - 33|; 0) \\
&\text{máx}(|N_r - 34|; 0) \text{máx}(|N_r - 35|; 0) \text{máx}(|N_r - 36|; 0))
\end{aligned} \tag{II.32}$$

II) Para $N_s = 36$:

$$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-N_r + 28; 0) + \text{máx}(N_r - 48; 0)) \tag{II.33}$$

$$\begin{aligned}
p_{22} &= k_{22}(\text{máx}(|N_r - 28|; 0) \text{máx}(|N_r - 30|; 0) \\
&\text{máx}(|N_r - 32|; 0) \text{máx}(|N_r - 34|; 0) \text{máx}(|N_r - 45|; 0) \\
&\text{máx}(|N_r - 48|; 0))
\end{aligned} \tag{II.34}$$

III) Para $N_s = 48$:

$$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-N_r + 36; 0) + \text{máx}(N_r - 59; 0)) \tag{II.35}$$

$$\begin{aligned}
p_{22} &= k_{22}(\text{máx}(|N_r - 36|; 0) \text{máx}(|N_r - 40|; 0) \\
&\text{máx}(|N_r - 44|; 0) \text{máx}(|N_r - 57|; 0) \text{máx}(|N_r - 59|; 0))
\end{aligned} \tag{II.36}$$

IV) Para $N_s = 72$:

$$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-N_r + 42; 0) + \text{máx}(N_r - 76; 0)) \tag{II.37}$$

$$\begin{aligned}
p_{22} = & k_{22}(\text{máx}(|N_r - 42|; 0) \text{máx}(|N_r - 48|; 0) \\
& \text{máx}(|N_r - 54|; 0) \text{máx}(|N_r - 56|; 0) \text{máx}(|N_r - 60|; 0) \\
& \text{máx}(|N_r - 61|; 0) \text{máx}(|N_r - 62|; 0) \text{máx}(|N_r - 68|; 0) \\
& \text{máx}(|N_r - 76|; 0))
\end{aligned} \tag{II.38}$$

c) Para $2P_1 = 8$:

I) Para $N_s = 72$:

$$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-N_r + 69; 0) + \text{máx}(N_r - 80; 0)) \tag{II.39}$$

$$p_{22} = k_{22}(\text{máx}(|N_r - 69|; 0) \text{máx}(|N_r - 75|; 0) \text{máx}(|N_r - 80|; 0)) \tag{II.40}$$

II) Para $N_s = 90$:

$$p_{21} = k_{21}(\text{máx}(-N_r + 86; 0) + \text{máx}(N_r - 94; 0)) \tag{II.41}$$

$$\begin{aligned}
p_{22} = & k_{22}(\text{máx}(|N_r - 86|; 0) \text{máx}(|N_r - 87|; 0) \\
& \text{máx}(|N_r - 93|; 0) \text{máx}(|N_r - 94|; 0))
\end{aligned} \tag{II.42}$$

Función de penalización para λ :

a) Para $2P_1 = 2$:

$$p_{23} = k_{23}(\text{máx}(-\lambda + 0,6; 0) + \text{máx}(\lambda - 1; 0)) \tag{II.43}$$

b) Para $2P_1 = 4$:

$$p_{23} = k_{23}(\text{máx}(-\lambda + 1, 2; 0) + \text{máx}(\lambda - 1, 8; 0)) \quad (\text{II.44})$$

c) Para $2P_1 = 6$:

$$p_{23} = k_{23}(\text{máx}(-\lambda + 1, 6; 0) + \text{máx}(\lambda - 2, 2; 0)) \quad (\text{II.45})$$

d) Para $2P_1 = 8$;

$$p_{23} = k_{23}(\text{máx}(-\lambda + 2; 0) + \text{máx}(\lambda - 3; 0)) \quad (\text{II.46})$$

Función de penalización k_D :

a) Para $2P_1 = 2$:

$$p_{24} = k_{24}(\text{máx}(-k_D + 0, 43; 0) + \text{máx}(k_D - 0, 63; 0)) \quad (\text{II.47})$$

b) Para $2P_1 = 4$:

$$p_{24} = k_{24}(\text{máx}(-k_D + 0, 57; 0) + \text{máx}(k_D - 0, 72; 0)) \quad (\text{II.48})$$

c) Para $2P_1 = 6$:

$$p_{24} = k_{24}(\text{máx}(-k_D + 0, 62; 0) + \text{máx}(k_D - 0, 75; 0)) \quad (\text{II.49})$$

d) Para $2P_1 = 8$;

$$p_{24} = k_{24}(\text{máx}(-k_D + 0, 66; 0) + \text{máx}(k_D - 0, 79; 0)) \quad (\text{II.50})$$

Función de penalización para B_g :

a) Para $2P_1 = 2$:

$$p_{25} = k_{25}(\max(-B_g + 0,5; 0) + \max(B_g - 0,75; 0)) \quad (\text{II.51})$$

b) Para $2P_1 = 4$:

$$p_{25} = k_{25}(\max(-B_g + 0,65; 0) + \max(B_g - 0,78; 0)) \quad (\text{II.52})$$

c) Para $2P_1 = 6$:

$$p_{25} = k_{25}(\max(-B_g + 0,7; 0) + \max(B_g - 0,82; 0)) \quad (\text{II.53})$$

d) Para $2P_1 = 8$:

$$p_{25} = k_{25}(\max(-B_g + 0,75; 0) + \max(B_g - 0,85; 0)) \quad (\text{II.54})$$

Función de penalización para J_{cos} :

a) Para $2P_1 = 2$ y 4 :

$$p_{26} = k_{26}(\max(-J_{cos} + 4; 0) + \max(J_{cos} - 7; 0)) \quad (\text{II.55})$$

b) Para $2P_1 = 6$ y 8 :

$$p_{26} = k_{26}(\max(-J_{cos} + 5; 0) + \max(J_{cos} - 8; 0)) \quad (\text{II.56})$$

Función de penalización para B_{ts} :

$$p_{27} = k_{27}(\text{máx}(-B_{ts} + 1,5; 0) + \text{máx}(B_{ts} - 1,6; 0)) \quad (\text{II.57})$$

Función de penalización para b_{s1} :

$$p_{28} = k_{28} \text{máx}(-b_{s1}; 0) \quad (\text{II.58})$$

Función de penalización para b_{s2} :

$$p_{29} = k_{29} \text{máx}(-((4A_{su} \tan(\frac{\pi}{N_s})1 \times 10^{-6}) + (b_{s1}^2)); 0) \quad (\text{II.59})$$

Restricción para la FMM de las ranuras del estator:

$$Fmm_{ts} > 0 \quad (\text{II.60})$$

Sus funciones de penalización es:

$$p_{30} = k_{30} \text{máx}(-Fmm_{ts}; 0) \quad (\text{II.61})$$

Restricción para h_{cs} :

$$h_{cs} > 0 \quad (\text{II.62})$$

Función Restricción:

$$p_{31} = k_{31} \max(-h_{cs}; 0) \quad (\text{II.63})$$

Función de penalización para B_{cs} :

$$p_{32} = k_{32}(\max(-B_{cs} + 1, 4; 0) + \max(B_{cs} - 1, 7; 0)) \quad (\text{II.64})$$

Función de penalización para B_{tr} :

$$p_{33} = k_{33}(\max(-B_{tr} + 1, 5; 0) + \max(B_{tr} - 1, 8; 0)) \quad (\text{II.65})$$

Restricción para la distancia h_r :

$$h_r > 0 \quad (\text{II.66})$$

Su función de penalización es:

$$p_{34} = k_{34} \max(-h_r; 0) \quad (\text{II.67})$$

La restricción de la barra efectiva del rotor es:

$$A_b > 0 \quad (\text{II.68})$$

Su función de penalización es:

$$p_{35} = k_{35}(\text{máx}(-A_b; 0)) \quad (\text{II.69})$$

Su función de penalización dependiendo del valor de α_7 :

a) Barras de aluminio ($\alpha_7 = 0$):

$$p_{36} = k_{36}(\text{máx}(-J_b + 2, 2; 0) + \text{máx}(J_b - 4, 5; 0)) \quad (\text{II.70})$$

b) Rotor de barra profunda ($\alpha_7 = 1$):

$$p_{36} = k_{36}(\text{máx}(-J_b + 5, 5; 0) + \text{máx}(J_b - 7, 5; 0)) \quad (\text{II.71})$$

c) Cargas de alta inercia y alta velocidad nominal ($\alpha_7 = 2$):

$$p_{36} = k_{36}(\text{máx}(-J_b + 6, 5; 0) + \text{máx}(J_b - 7; 0)) \quad (\text{II.72})$$

Su función de penalización para el ancho de la salida del extremo del anillo del rotor es:

$$p_{37} = k_{37}(\text{máx}(-b + (1, 1x_a); 0) + \text{máx}(b - (1, 2x_a); 0)) \quad (\text{II.73})$$

Restricción para el área del extremo del anillo es:

$$A_{er} > 0 \quad (\text{II.74})$$

Su función de penalización es:

$$p_{38} = k_{38}(\text{máx}(-A_{er}; 0)) \quad (\text{II.75})$$

La función de penalización de la densidad de corriente del extremo del anillo es:

$$p_{39} = k_{39}(\text{máx}(-J_{er} + (0, 7J_b); 0) + \text{máx}(J_{er} - (0, 8J_b); 0)) \quad (\text{II.76})$$

La restricción de la validación de las magnitudes de las FMM del estator y rotor viene dada por:

$$|Fmm_{ts} - Fmm_{tr}| - (0, 2 \text{máx}(Fmm_{ts}, Fmm_{tr})) \quad (\text{II.77})$$

Su función de penalización es:

$$p_{40} = k_{40}(\text{máx}(|Fmm_{ts} - Fmm_{tr}| - (0, 2 \text{máx}(Fmm_{ts}, Fmm_{tr}))); 0)) \quad (\text{II.78})$$

La función de penalización para la B_{cr} :

$$p_{41} = k_{41}(\text{máx}(-B_{cr} + 1, 4; 0) + \text{máx}(B_{cr} - 1, 7; 0)) \quad (\text{II.79})$$

El diámetro esta sujeto a:

$$D_{ShaftMin} - D_{ShaftMax} < 0 \quad (\text{II.80})$$

La función de penalización de la diferencia de magnitudes mínima y máxima del diámetro del eje del rotor es:

$$p_{42} = k_{42} \max(D_{ShaftMin} - D_{ShaftMax}; 0) \quad (\text{II.81})$$

Donde k_i $i = 1...42$ son los pesos de la función de penalización y tendrán un valor de 1×10^3 .

Apéndice III

PROPIEDADES MAGNÉTICA DEL NÚCLEO

Tabla III.1. Propiedades magnéticas del material ferromagnético, densidad de flujo (B) y la intensidad (H) del campo magnético.

B[T]	H[A/m]	B[T]	H[A/m]
0,05	22,8	1,05	237
0,1	35	1,1	273
0,15	45	1,15	310
0,2	49	1,2	356
0,25	57	1,25	417
0,3	65	1,3	482
0,35	70	1,35	585
0,4	76	1,4	760
0,45	83	1,45	1050
0,5	90	1,5	1340
0,55	98	1,55	1760
0,6	106	1,6	2460
0,65	115	1,65	3460
0,7	124	1,7	4800
0,75	135	1,75	6160
0,8	148	1,8	8270
0,85	162	1,85	11170
0,9	177	1,9	15220
0,95	198	1,95	22000
1	220	2	34000

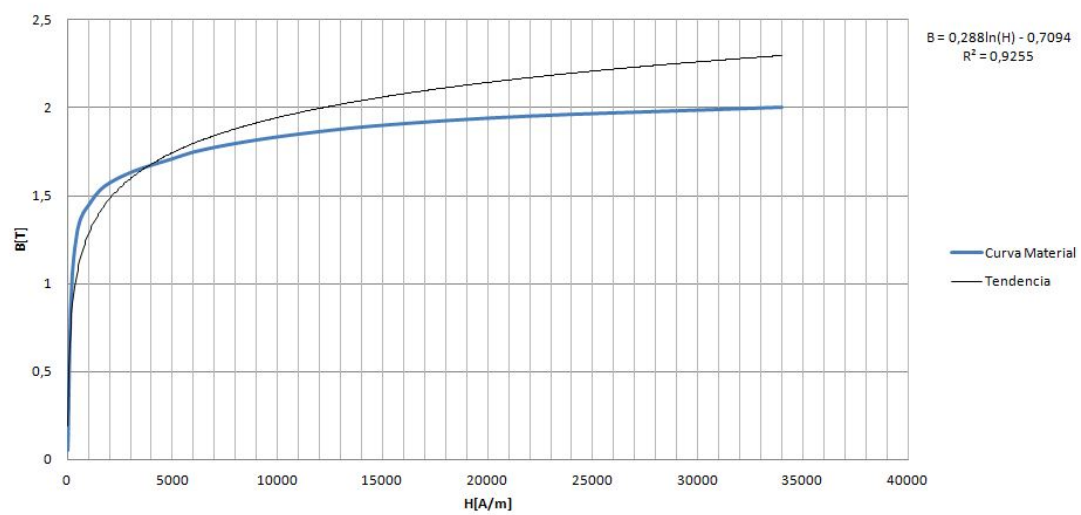


Figura III.1. Gráfica B vs H, de los datos de la tabla III.1.

Apéndice IV

EJEMPLO NÚMÉRICO DEL ASEM

En este apartado se presentará un ejemplo numérico del ASEM de dos variables enteras y dos variables reales, como se presenta a continuación.

Los parámetros sintonización del ASEM son los siguientes:

Tabla IV.1. Parámetros de sintonización del ASEM.

Parámetro	Valores
ε	0,1
φ	0,3
α_r	1
β_r	2
γ_r	0,5
δ_r	0,5
Δ_e	1
α_e	2
β_e	2
γ_e	1
δ_e	0,4
$\kappa_x^{[1]}$	1
ρ	0,8
Δ_r	1

La función objetivo es:

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = x_1^2 + x_2^2 + y_1^2 + y_2^2, \quad (\text{IV.1})$$

donde $\mathbf{x}$ es el vector real y $\mathbf{y}$ el vector entero.

Tanto las variables reales como enteras son igualadas a 10 como primer punto de arranque (punto factible para el estudio). Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Construcción del Simplex Entero Mixto

Se construye un simplex con vertices $\nu = n + 1$, donde $n = 2$ y representa el tamaño máximo del vector real y entero.

El simplex queda de la siguiente manera:

$$S^{[0]} = \begin{pmatrix} 10 & 11 & 10 \\ 10 & 10 & 11 \\ 10 & 11 & 10 \\ 10 & 10 & 11 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.2})$$

2. Mejoramiento del Simplex Entero Mixto.

Como la variable lógica m toma el valor de 1, se ejecutará el paso del Mejoramiento del Simplex Entero Mixto.

El nuevo simplex queda de la siguiente manera:

$$S^{[0]} = \begin{pmatrix} 10 & 9 & 10 \\ 10 & 10 & 9 \\ 10 & 9 & 10 \\ 10 & 10 & 9 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.3})$$

3. Evaluación.

Se procede evaluar el simplex $S^{[0]}$ de la etapa $q = 0$, el resultado es el siguiente:

$$f = \begin{pmatrix} 400 & 362 & 362 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.4})$$

4. Ordenamiento.

Ahora el ASEM determinará cual es el mejor de los puntos mediante el procedimiento de ordenamiento. El simplex queda de la siguiente manera:

$$S^{[0]} = \begin{pmatrix} 10 & 9 & 10 \\ 9 & 10 & 10 \\ 10 & 9 & 10 \\ 9 & 10 & 10 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.5})$$

5. Reflexión.

Se ejecuta y se evalúa la operación de reflexión y esta queda:

$$\mathbf{v}_r = \begin{pmatrix} 9 \\ 9 \\ 8 \\ 8 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.6})$$

El punto evaluado en la función es:

$$f(\mathbf{v}_r) = 290 \quad (\text{IV.7})$$

Dado que $f(\mathbf{v}_r) < f(\mathbf{v}_1)$, entonces:

6. Expansión.

El punto expandido $\mathbf{v}_e$ nos queda:

$$\mathbf{v}_e = \begin{pmatrix} 8 \\ 8 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.8})$$

El punto evaluado en la función es:

$$f(\mathbf{v}_e) = 200 \quad (\text{IV.9})$$

Dado que $f(\mathbf{v}_e) < f(\mathbf{v}_r)$, se asigna el punto $\mathbf{v}_e$ a $\mathbf{v}_\nu$, es decir, se elimina el peor punto del simplex de la siguiente manera:

$$S^{[0]} = \begin{pmatrix} 10 & 9 & 8 \\ 9 & 10 & 8 \\ 10 & 9 & 6 \\ 9 & 10 & 6 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.10})$$

7. Calidad.

Se termina el diámetro del simplex real ℓ_x .

$$\ell_x = 2,236068 \quad (\text{IV.11})$$

Dado que $\ell_x \geq \kappa_x^{[s]}$ y $\kappa_x^{[s]} = 1$, se asigna $q = q + 1 = 1$. Retornamos al paso de evaluación.

8. Evaluación.

Se evalúa el simplex $S^{[1]}$.

$$f = \begin{pmatrix} 362 & 362 & 200 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.12})$$

9. Ordenamiento.

El simplex ordenado es:

$$S^{[1]} = \begin{pmatrix} 8 & 9 & 10 \\ 8 & 10 & 9 \\ 6 & 9 & 10 \\ 6 & 10 & 9 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.13})$$

10. Reflexión.

$$\mathbf{v}_r = \begin{pmatrix} 7 \\ 9 \\ 4 \\ 3 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.14})$$

El punto evaluado en la función es:

$$f(\mathbf{v}_r) = 155 \quad (\text{IV.15})$$

Dado que $f(\mathbf{v}_r) < f(\mathbf{v}_1)$, entonces:

11. Expansión.

El punto expandido $\mathbf{v}_e$ nos queda:

$$\mathbf{v}_e = \begin{pmatrix} 4 \\ 9 \\ -2 \\ -3 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.16})$$

El punto evaluado en la función es:

$$f(\mathbf{v}_e) = 110 \quad (\text{IV.17})$$

Dado que $f(\mathbf{v}_e) < f(\mathbf{v}_r)$, se asigna el punto $\mathbf{v}_e$ a $\mathbf{v}_\nu$, es decir, se elimina el peor punto del simplex de la siguiente manera:

$$S^{[1]} = \begin{pmatrix} 8 & 9 & 4 \\ 8 & 10 & 9 \\ 6 & 9 & -2 \\ 6 & 10 & -3 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.18})$$

12. Calidad.

Se termina el diámetro del simplex real ℓ_x .

$$\ell_x = 5,09902 \quad (\text{IV.19})$$

Dado que $\ell_x \geq \kappa_x^{[s]}$ y $\kappa_x^{[s]} = 1$, se asigna $q = q + 1 = 2$. Retornamos al paso de evaluación.

De esta manera el ASEM encuentra un mínimo y el resultado es el siguiente (vector $\mathbf{v}_{sol}$):

$$\mathbf{v}_{sol} = \begin{pmatrix} 0,0003324 \\ -0,0002874 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{IV.20})$$

La función evaluada en el punto es:

$$f(\mathbf{v}_{sol}) = 1,93136 \times 10^{-7} \quad (\text{IV.21})$$

REFERENCIAS

- A. Krishnamoorthy and Dharmalingam.K. (2009). Application of genetic algorithms in the design optimization of three phase induction motor. *Research Scholar, Sathyabama University*.
- Aller, J. M. (2007). *MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS: Introducción a la Teoría General*. Valle de Sartenejas, Baruta, Edo. Miranda: EDITORIAL EQUINOCCIO.
- Baldor. (2010). Baldor - kings mountain, north carolina plant. Descargado de <http://youtu.be/h0GEuGzeWIU>
- Boldea, I., y Nasar, S. A. (2010). *The induction machine design handbook, second edition*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Brandts, J., Korotov, S., Křížek, M., y Šolc, J. (2009). On nonobtuse simplicial partitions. *SIAM Review*, 51(2), 317-335. Descargado de <http://link.aip.org/link/?SIR/51/317/1> doi: 10.1137/060669073
- Brea, E. (2013). Una extensión del método de Nelder Mead a problemas de optimización no lineales enteros mixtos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 29(3).
- C. Thanga Raj, S. P. Srivastava, Pramod Agarwal. (2008). Induction motor design with limited harmonic currents using particle swarm optimization. *World Academy of Science, Engineering and Technology*..
- Carter, F. W. (1901). *Airgap induction*. El. World and Engineering.
- F. H. Walters, J. S. L. M., L. R. Parker. (1991). *Sequential simplex optimization* [tech. report]. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Filip, P., y Ondrusek, C. (2000). Innovation in design and optimization of electric machines. *Dept. of Power Electrical and Electronic Engineering, FEEC*,

BUT.

- Hooke, R., y Jeeves, T. A. (1961). Direct search solution of numerical and statistical problems. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 212 - 229.
- Jordi Vidal Bort. (2002). Estudio del modelo matemático del motor de inducción trifásico. simulación en régimen dinámico. *Universitat Rovira I Virgili.*.
- Li Han, Hui Li, Jingcan Li and Jianguo Zhu. (2004). Optimization for induction motor design by improved genetic algorithm. *Australasian Universities Power Engineering Conference*.
- L. Simón, J. M. (2010). Identificación y ajuste paramétrico de una máquina trifásica de inducción magnética usando algoritmos genéticos. *Información Tecnológica*, 21(3), 105-114.
- Nelder, J. A., y Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7, 308 - 313.
- Qi, H. (1999). A genetic algorithm with tabu list and sharing scheme for optimal design of electrical machines. *Shanghai Electric Tool Research Institute Shanghai, China*.
- Robert Michael Lewis, M. W. T., Virginia Torczona. (2000). Direct search methods: then and now. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 192, 191 - 207.
- Sobhi-Najafabadi, B., y Göl, . (2005). An sqp-based optimisation algorithm for the derivative design of a generator. *Centre for Advanced Manufacturing Research University of South Australia*.
- Torczon, V. (1990). *Multi-directional search: A direct search algorithm for parallel machines* [tech. report]. Department of Computational and Applied Mathematics, Rice University, Houston, TX.
- Trosset, M. W. (2000). *On the use of direct search methods for stochastic optimization* [tech. report]. Department of Computational and Applied Mathematics, Rice University, Houston, TX.

- Wright, M. (1996). *Direct search methods: One scorned, now respectable* [tech. report]. Computing Science Research Center, AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, NJ.
- W. Spendley, G. H., y Himsworth, F. (1962). Sequential application of simplex designs in optimization and evolutionary operation. *Technometrics*, 4, 441 - 461.