



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE MAESTRÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA



**DESARROLLO DE UN NUEVO MOTOR DE INDUCCIÓN CON  
COMPONENTES RECICLABLES Y MATERIALES FERROMAGNÉTICOS  
MODERNOS QUE PROLONGUEN EL CICLO DE VIDA DE SUS PARTES  
FUNDAMENTALES**

**Autor:** Ing. Yolk Tomás Sequera Villegas

Bárbula, Noviembre 2023



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE MAESTRÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA



**DESARROLLO DE UN NUEVO MOTOR DE INDUCCIÓN CON  
COMPONENTES RECICLABLES Y MATERIALES FERROMAGNÉTICOS  
MODERNOS QUE PROLONGUEN EL CICLO DE VIDA DE SUS PARTES  
FUNDAMENTALES**

**Autor:**  
Ing. Yolk Tomás Sequera Villegas  
**Tutor Académico:**  
Ing. Jesús Rafael Pacheco P.

Bárbula, Noviembre 2023



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE MAESTRÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA



**DESARROLLO DE UN NUEVO MOTOR DE INDUCCIÓN CON COMPONENTES  
RECICLABLES Y MATERIALES FERROMAGNÉTICOS MODERNOS PARA  
PROLONGAR EL CICLO DE VIDA DE LA MAQUINA**

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE  
LA ILUSTRE UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.

**Autor:**  
Ing. Yolk Tomás Sequera Villegas  
**Tutor Académico:**  
Ing. Jesús Rafael Pacheco P.

Bárbula, Noviembre 2023



**Acta de discusión y veredicto del Jurado en la  
Presentación de Trabajo de Grado  
en modalidad presencial**



Postgrado Ingeniería  
Universidad de Carabobo

TG-4

Valencia, 09 de Noviembre de 2023.

En atención a lo dispuesto en los artículos 148, 137 y 138 del Reglamento de Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo, Gaceta 619, quienes suscribimos como jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ingeniería y según oficio CPFI-003-2023, de fecha 27/06/2023, para revisar y evaluar el Trabajo de Grado Titulado:

**Desarrollo de un nuevo motor de inducción con componentes reciclables y materiales ferromagnéticos modernos que prolonguen el ciclo de vida de sus partes fundamentales**

Bajo la línea de investigación: **Ingeniería eléctrica aplicada**

Presentado por el Estudiante graduado **Yolk Tomás Sequera Villegas**, cédula de identidad **V- 13.357.872**, para optar al título de Magister en Ingeniería Eléctrica, ha decidido que el mismo está:

Apellidos y Nombres del Jurado	Cédula de identidad	Veredicto individual
MSC. ING. JESÚS RAFAEL PACHECO P., (PRESIDENTE)	V- 3.891.667	Aprobado
MSC. ING. EVA ELENA MONAGAS, (JURADO INTERNO)	V- 6.122.881	Aprobado
PHD. ING. CARLOS ALFONSO GOYO B., (JURADO EXTERNO)	V- 5.742.680	Aprobado
Veredicto final: Aprobado		

Las razones que motivan la decisión son:

**Respecto al análisis de la situación contexto o problema:** El análisis del problema es ajustado a la temática de máquinas eléctricas, específicamente el motor de inducción de baja potencia de amplio uso y el desarrollo de un nuevo diseño partiendo de materiales reciclados. El trabajo resalta adecuadamente su importancia y pertinencia social con base en las políticas integrales de desarrollo sostenible.

**Respecto a la fundamentación teórica:** Incluye los aspectos relevantes y suficientes respecto a la máquina eléctrica bajo diseño, sus partes y componentes, las tipologías, materiales y normas en consideración que sustentan el desarrollo del trabajo.

**Respecto al método desarrollado:** La metodología empleada permitió la ejecución de las actividades programadas en las tres fases conducentes al cabal logro de los objetivos planteados con sus correspondientes sub-fases para el alcance de resultados parciales que se concatenan. Esta metodología comprende desde la

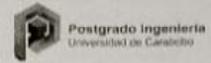
**Respecto a los análisis derivados:** Los análisis realizados fueron acordes a la naturaleza del problema y determinan los materiales candidatos a ser reciclables para la máquina establecida.

**Respecto al uso de fuentes bibliográficas:** Fueron abundantes, pertinentes y bien utilizadas.

**Respecto a la monografía:** Su redacción y presentación fueron excelentes.



**Acta de discusión y veredicto del Jurado en la  
Presentación de Trabajo de Grado  
en modalidad presencial**



TG-4

El Presidente del Jurado, previamente identificado anteriormente, después de oír los miembros del Jurado, toma la palabra y expone: Estando dentro del lapso concedido al estudiante, y ya subsanado en cada una de las observaciones hechas con antelación, se da por cumplido los extremos establecidos en el artículo 140 del Reglamento de los Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo. No habiendo más nada que tratar, se da por terminado el acto a las 12:00 pm. Se leyó y conformes firman.

Firma  
**Presidente del Jurado**  
**MSc. Ing. Jesús Rafael Pacheco P.**

Firma  
**Miembro del Jurado**  
**MSc. Ing. Eva E. Monagas**



Firma  
**Miembro del Jurado**  
**PhD. Ing. Carlos Alfonso Goyo B.**



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
RESUMEN.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>3</b>
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Objetivos de la Investigación.....	5
1.2.1 Objetivo General.....	5
1.2.2 Objetivos Específicos.....	5
1.3 Justificación de la Investigación.....	6
1.4 Delimitaciones.....	7
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>9</b>
2.1 Antecedentes de la Investigación.....	9
2.2 Bases Teóricas.....	10
2.2.1 El Reciclaje.....	11
2.2.1.1 Clases de Reciclaje.....	12
2.2.2 La Máquina Eléctrica Reciclable.....	13
2.2.2.1 Principios de Diseño para el Reciclaje de Motores Eléctricos.....	14
2.2.3 Diagnóstico de las Partes de un Motor Eléctrico Susceptible a Ser Reciclados.....	15
2.2.4 Motores Eléctricos de Baja Potencia Utilizados en Electrodomésticos, Bombas de Agua y la Pequeña Industria.....	17
2.2.4.1 Motores Monofásicos de Inducción de Fase Partida.....	18
2.2.4.1.1 Partes de un Motor Monofásico de Fase Partida.....	19
2.2.4.2 Motores Universales.....	20
2.2.4.2.1 Partes de un Motor Universal.....	21
2.2.4.3 Motores Monofásicos de Jaula de Ardilla.....	22
2.2.4.3.1 Partes de un Motor Monofásico de Jaula de Ardilla.....	23
2.2.5 Normas para el Reciclaje de Máquinas Eléctricas.....	23
2.2.6 Máquinas de Rotor de Polos de Mandíbula.....	24
2.2.7 Materiales Ferromagnéticos.....	25
2.2.7.1 Dominios Magnéticos.....	26



2.2.7.2 Clasificación de los Materiales Ferromagnéticos.....	27
2.2.7.2.1 Diamagnetismo.....	27
2.2.7.2.2 Paramagnetismo.....	28
2.2.7.3 Propiedades y Características de los Materiales Ferromagnéticos.....	29
2.2.7.3.1 Propiedades de los Materiales Ferromagnéticos.....	29
2.2.7.3.2 Características de los Materiales Ferromagnéticos.....	30
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>31</b>
3.1 Tipo de Investigación.....	31
3.2 Diseño de las Fases Metodológicas.....	32
3.3 Unidad de Estudio y Análisis.....	34
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de información, análisis e interpretación de datos.....	34
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>35</b>
4.1 Motores Eléctricos Convencionales.....	35
4.1.1 Identificación de las Partes de un Motor Eléctrico Convencional.....	35
4.2 Fallas en Motores Eléctricos.....	38
4.2.1 Fallas Eléctricas.....	39
4.2.2 Fallas Mecánicas.....	39
4.3 Diagnostico del Estado de un Motor Eléctrico Convencional.....	40
4.3.1 Inspección Visual.....	41
4.3.2 Prueba de Ultrasonido.....	41
4.3.3 prueba de Flujo Nominal.....	42
4.3.4 Medición de la Resistencia de Aislamiento.....	42
4.4 Partes y Componentes Sustituibles de un Motor Eléctrico Convencional.....	43
4.4.1 Núcleos Ferromagnéticos.....	44
4.4.2 Reciclaje de la Carcasa.....	45
4.4.3 Reciclaje del Rotor.....	46
4.4.4 Reciclaje del Estator.....	47
4.4.5 Reciclaje del Devanado.....	48
4.5 Dificultades Para Reciclar las Partes de un Motor Eléctrico Convencional.....	50
4.5.1 Dimensiones del Núcleo y del Rotor de un Motor Eléctrico.....	50
4.5.2 Dimensiones de un Rotor de Jaula de Ardilla.....	52
4.6 Materiales Ferromagnéticos Modernos.....	55
4.6.1 Análisis de las Propiedades de Materiales Ferromagnéticos Modernos para el Diseño de Maquinas Eléctricas.....	55
4.6.1.1 Diseño de Maquinas Eléctricas con Aleaciones Magnéticas Blandas.....	56
4.6.1.1.1 Acero de Grano Orientado.....	56
4.6.1.1.2 Acero de Grano No Orientado.....	56
4.6.1.2 Diseño de Maquinas Eléctricas con Compuestos Magnéticos Blandos (SMC).....	57
4.6.1.3 Diseño de Maquinas Eléctricas con Materiales Magnéticos Amorfos.....	59
4.6.2 Estudio del Envejecimiento Térmico de Materiales Ferromagnéticos.....	61
4.6.2.1 Investigaciones de la NASA.....	62
4.6.2.1 Efectos de las Impurezas sobre el Envejecimiento de Materiales Magnéticos Blandos Sinterizados.....	67
4.6.2.3 Envejecimiento en Materiales Ferromagnéticos Amorfos.....	69



---

---

<b>4.7 Motor de Rotor de Mandíbula</b> .....	<b>70</b>
<b>4.7.1 Efectos Generales del Tamaño</b> .....	<b>71</b>
<b>4.7.2 Efectos del Dimensionamiento del Motor de Rotor de Polos de Mandíbula con Rotor Interno</b> .....	<b>73</b>
<b>4.7.3 Efectos del Dimensionamiento del Motor de Rotor de Polos de Mandíbula con Rotor Externo</b> .....	<b>76</b>
<b>4.8 Atributos Técnicos para el diseño de un Motor Eléctrico Construido con Materiales Ferromagnéticos Modernos</b> .....	<b>80</b>
<b>4.8.1 Efectos de la Aplicación de Materiales Ferromagnéticos en un Motor de Inducción</b> .....	<b>80</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>85</b>
<b>5.1 Conclusiones</b> .....	<b>85</b>
<b>5.2 Recomendaciones</b> .....	<b>87</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>88</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>94</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

2.1 Cadena del proceso de desagregado de la vida de un producto.....	13
2.2 Cadena del proceso de desagregado de la vida de una maquina eléctrica rotativa.....	16
2.3 Partes de un motor monofásico de inducción de fase partida.....	20
2.4 Partes de un motor universal.....	21
2.5 Partes de un motor monofásico de jaula de ardilla.....	23
2.6 Partes de una maquina convencional de polos de mandíbula.....	25
2.7 Dominios en un material ferromagnético bruto.....	26
2.8 Efecto de la presencia de un campo magnético sobre los espines de los electrones de un material diamagnético.....	27
2.6 Efecto de la presencia de un campo magnético sobre los espines de los electrones de un material paramagnético.....	29
4.1 Carcasa, rotor y estator de un motor eléctrico.....	36
4.2 Diferentes tipos de chapas magnéticas.....	37
4.3 Partes de un motor eléctrico convencional.....	38
4.4 Detectores de ultrasonido.....	42
4.5.a Diámetros internos y externos del núcleo del estator.....	51
4.5 b Diámetro del núcleo solido del rotor.....	51
4.6.a Diámetros del núcleo del rotor jaula de ardilla.....	52
4.6.b Diámetros del núcleo del rotor bobinado.....	52
4.7 Espacios estándar de aire sugeridos en motores de inducción (mm).....	53
4.8 Diámetros estándar sugeridos en rotores de jaula de ardilla (mm).....	54
4.9 Longitudes efectivas sugeridas en rotores de jaula de ardilla (mm).....	54
4.10 Piezas necesarias para las soluciones laminada y SMC.....	59
4.11 Comparación del estrés basado en la extrapolación del parámetro <i>Larson Miller</i> en los materiales desarrollados con respecto a los comerciales.....	64
4.12 Comparación de la inducción magnética vs. temperatura en los materiales desarrollados con respecto a los existentes comercialmente.....	65
4.13 Valores de permeabilidad y coercitividad para FF-0000 y FY-4500, sinterizados en 90% $N_2$ / 10% $H_2$ .....	68
4.14 Curvas $M$ vs. $H$ a (a) 10 °K y (b) 300 °K de microhilos de $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ templados con un campo magnético de hasta 600 Oe.....	69
4.15 Motor sincrónico de rotor de mandíbula.....	73
4.16 Motor de polos de mandíbula con tres estructuras de estator diferentes.....	75
4.17 El motor de polo de mandíbula con rotor interior y exterior.....	77
4.18 Torque por fase y factor de potencia a medida que varía el ángulo del diente.....	78
4.19 Curvas B-H de los doce materiales adicionales disponibles comercialmente.....	81
4.20 Tabla de resultados de la influencia de los 22 materiales magnéticos blandos examinados en las principales características electromecánicas de un motor de inducción.....	82
4.21 Tabla de Rendimiento de materiales candidatos en cuanto a eficiencia, factor de potencia, corriente de fase, peso total y costo comercial.....	83



---

---

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>4.1 Clasificación de las causas de las fallas en el estator y el rotor de un motor eléctrico .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2 Piezas reemplazables de un motor eléctrico convencional .....</b>	<b>49</b>
<b>4.3 Materiales ferromagnéticos modernos que pueden ser utilizados para la producción de piezas para motores de inducción.....</b>	<b>60</b>
<b>4.4 Características resultantes de la aplicación de altas temperaturas a materiales magnéticos propuestos para la fabricación de máquinas eléctricas aeroespaciales y su comparación con los utilizados comercialmente .....</b>	<b>66</b>
<b>4.5 Comparación entre dos tipos de motores de mandíbula de rotor interno con diferentes diámetros externos.....</b>	<b>78</b>
<b>4.6 Comparación entre dos motores de mandíbula con tipos de rotores diferentes e igual diámetros externos.....</b>	<b>79</b>



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE MAESTRÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA



**Desarrollo de un Nuevo Motor de Inducción con Componentes Reciclables y  
Materiales Ferromagnéticos Modernos para Prolongar el Ciclo de Vida de la  
Máquina**

**Autor:** Yolc Tomás Sequera V.

**Tutor:** Jesús Rafael Pacheco P.

**Fecha:** Noviembre 2023

**Resumen**

El desecho de materiales eléctricos y electrónicos, tales como las partes, componentes y accesorios de los motores de inducción de uso masivo, han generado grandes problemas de contaminación en el planeta; el reciclaje de estas piezas ayudaría a disminuir este problema, pero para ello deben hacerse los estudios técnicos respectivos, que permitan conocer las dificultades para la realización de este proceso, esto debido a que las partes deben cumplir con su función de manera eficiente al ser reutilizadas en otra máquina. Un buen diagnóstico facilita esta tarea y permite conocer en qué fase del ciclo de vida de una máquina de inducción puede ser insertada, donde se debe tomar en cuenta el envejecimiento del material ferromagnético que la compone. De igual forma, se deben considerar cuales son las características que se deben mejorar para lograr tener una máquina susceptible a ser reciclada, ya que la máquina convencional se seguirá construyendo y se debe convivir con ella, pero es necesario hacer los cambios que permitan facilitar el proceso de reciclaje de sus partes; para ello se deben estudiar que materiales ferromagnéticos modernos no utilizados actualmente en la fabricación de motores de inducción, permitan la disminución del número de piezas que la conforman, y si el envejecimiento de estos materiales es afectado por el uso de la máquina en el tiempo.

**Palabras clave:** Reciclaje, máquina susceptible a ser reciclada, envejecimiento de material ferromagnético



## INTRODUCCIÓN

Aunque el reciclaje ya se conoce desde hace siglos, el impacto y su importancia han aumentado desde tiempos de industrialización y globalización. En 2019, la Organización de las Naciones Unidas, el Foro Económico Mundial y el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible, sostuvieron un encuentro y presentaron un informe donde solicitan la colaboración sistemática con grandes marcas, pequeñas y medianas empresas (PYME), instituciones académicas, sindicatos, sociedad civil y asociaciones en un proceso deliberativo para reorientar el sistema y reducir el desperdicio de recursos cada año con un valor mayor que el producto interno bruto (PIB) de la mayoría de los países [1]. El informe también apunta al uso de nuevas tecnologías para crear modelos de negocios de servicio, un mejor seguimiento de productos y programas de devolución de fabricantes o minoristas.

Las maquinas eléctricas son parte de la problemática del desperdicio de materiales, debido a que los motores eléctricos de inducción son muy usados en la pequeña industria y en la fabricación de equipos electrodomésticos y bombas de agua. Existen millones de estos equipos que son utilizados en todo el mundo diariamente, esto los convierte en equipo de uso masivo, y a su vez en un problema cuando su motor termina su ciclo de vida útil, ya que estas máquinas terminan siendo desechadas, y sus partes y materiales no son aprovechadas para la fabricación de otros equipos.

Los motores de rotor de mandíbula son fáciles de montar y desmontar, y ofrecen más flexibilidad para reciclar que los motores eléctricos convencionales. Éste tipo de rotor se podría reciclar como una parte o pieza que compone una máquina eléctrica, y pueda ser insertada en una de las fases del ciclo de vida útil de un motor [2]. Si se pudiera utilizar este tipo de rotor en la fabricación de motores de uso masivo, sería un avance extraordinario desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, ya que el proceso de reutilizar las



piezas sería más fácil. Igualmente, existen nuevos estudios sobre el envejecimiento de materiales ferromagnéticos que son utilizados en la fabricación de motores eléctricos, dando como resultado, nuevos descubrimientos en las características de su comportamiento que podrían ser aprovechados en la producción de máquinas eléctricas rotativas.

Por los planteamientos hechos anteriormente, surge la necesidad de hacer una investigación que permita estudiar la posibilidad de desarrollar un motor de inducción con componentes reciclables y materiales ferromagnéticos modernos, que pudieran innovar la construcción de máquinas rotativas y en general, equipos electrodomésticos.

El trabajo consta de cuatro capítulos. En el Capítulo I se presenta el planteamiento del problema, se definen los objetivos del proyecto y la justificación del mismo. En el Capítulo II se presentan los antecedentes que guardan relación con este trabajo y los fundamentos que permiten comprender el funcionamiento de las técnicas empleadas en el proyecto. En el Capítulo III se exponen el marco metodológico empleado y las diferentes fases en que consistió la investigación. En el Capítulo IV se muestran los resultados de la investigación realizada. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.



# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del Problema

El calentamiento global y la contaminación son un alto riesgo para la supervivencia de todos los seres vivos en el planeta tierra. Uno de los factores que colabora para empeoramiento de estos dos factores es la llamada “chatarra electrónica”. Según cifras del informe conjunto de la Organización de Naciones Unidas, el Foro Económico Mundial y el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible de enero de 2019, se indica que cada año son desechados aproximadamente más de 50 millones de toneladas de material eléctrico y electrónico [3], y debido a que no son biodegradables, el nivel de contaminación se ha vuelto irreversible. Por otro lado, en cuanto al consumo eléctrico, se estima que los sistemas con motores eléctricos representan entre el 43% y 46% de todo el consumo mundial de electricidad, dando lugar a aproximadamente 6.040 megatoneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> [1].

La alta demanda y el bajo costo de las máquinas rotativas de inducción, las hace productos de uso masivo, tal es el caso de los motores de lavadoras electrodomésticas, y lo que era una opción en décadas anteriores, en la actualidad, el tener uno de éstos equipos en el hogar se ha hecho casi imprescindible en países desarrollados y en vías de desarrollo. En todo el mundo, se utilizan más de 840 millones de lavadoras domésticas, con un consumo anual superior a 92 TWh de electricidad y 19 mil millones de m<sup>3</sup> de agua, además de generar emisiones de más de 62 megatoneladas de CO<sub>2</sub> [4], por esta razón, entes legislativos a nivel mundial, han iniciado marcos regulatorios que abarquen el reciclaje de productos que impactan negativamente el medioambiente, tal es el caso de la ley de reciclaje de electrodomésticos en Japón, la cual exige tasas de reciclaje de entre el 50 y el



60 por ciento en peso, que podrían abordarse mediante la reutilización y el reciclaje del producto y sus componentes [5]. Este proceso de reciclaje de productos al final de su vida útil abarca todos los pasos, desde la recolección, clasificación y redistribución, hasta la recuperación real del material secundario como también la reutilización de componentes [6].

Conociendo esta realidad, se puede advertir que desechar sin control es una de las causas por las que se origina la necesidad de reciclar, reusar o reutilizar las partes de una máquina eléctrica rotativa. Reciclar es el proceso mediante el cual los productos de desecho son nuevamente utilizados y tiene por objeto la recuperación, de forma directa o indirecta, de los materiales y componentes que contienen los residuos y su objetivo es convertir los desechos en nuevos productos o en materia prima para su posterior utilización. Por esta razón, empresas de fabricación de autos y repuestos en los Estados Unidos, que han sido certificadas por la norma ISO 14001, la cual establece que una organización puede identificar, controlar y tener influencia en aspectos técnicos - ambientales, tal es el caso del reciclaje, experimentan un mejor desempeño en cuanto a este tema [7].

Los principios de diseño y el concepto de motores de inducción reciclables son necesarios para conocer cuales piezas del motor o de la máquina pueden ser reutilizadas, para ello hay que recordar tres cosas importantes, la primera es que se debe coexistir con lo ya diseñado y que paradigmáticamente se seguirá construyendo y se pueden ir adaptando a los nuevos diseños en el tiempo, lo segundo, los nuevos diseños propiamente dichos y tercero, los problemas tecnológicos que surgen en los componentes de la máquina: aislamiento del estator, aislamiento del rotor, núcleo del estator, núcleo del rotor, circuito magnético de diseño, devanado del estator, devanado del rotor, rodamientos, eje y bastidor [8]. Otro aspecto que se debe tomar en cuenta para el diseño de una máquina de inducción es el material con que se fabrica, actualmente solo se tiene al hierro como material ferromagnético, sin tomar en cuenta la influencia de materiales alternativos comercialmente



disponibles en el mercado, tomando en cuenta el ciclo de su vida útil de un motor asíncrono.

Esta investigación se realiza para responder cuales son las características de los motores de inducción susceptibles a ser reciclados según sus propiedades electromagnéticas, para poder evaluar cuál es el diseño que permitiría un intercambio de componentes que facilitaría la reutilización de los mismos y estudiar cuáles son las especificaciones técnicas con base a los atributos determinados para un posterior análisis de mercado de un nuevo producto, donde se aproveche el ciclo de vida de cada una de las piezas de la máquina eléctrica en estudio.

## **1.2 Objetivos de la Investigación**

### **1.2.1 Objetivo General**

- Desarrollar un nuevo motor de inducción con componentes reciclables y materiales ferromagnéticos modernos que prolongue el ciclo de vida de sus partes, tomando en cuenta las dificultades que representa construirlas de la forma convencional.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Preparar la metodología para reciclar maquinas convencionales donde se corrijan las dificultades que representan construirlas de la forma como se realizan en la actualidad y se analicen los avances tecnológicos en esta materia.
- Analizar las propiedades de diversos materiales ferromagnéticos modernos desde su nivel más pobre para su evaluación en el diseño de un motor eléctrico donde sus componentes puedan ser intercambiados o reciclados y puedan ser insertados en el ciclo de vida de una maquina rotativa.



- Desarrollar especificaciones técnicas con base a los atributos del producto para el posterior análisis de mercado.

### 1.3 Justificación de la Investigación

Según estimaciones de las Naciones Unidas, para el año 2030, si no se toman medidas políticas integrales y efectivas de eficiencia energética, se espera que el consumo de energía de los motores eléctricos aumente a 13.360 TWh por año y las emisiones de CO<sub>2</sub> a 8.570 Mt por año, es decir, se va a incrementar el uso de estas máquinas eléctricas y, en consecuencia, los desechos de sus componentes también, complicando aún más el grave problema de contaminación ambiental en el planeta [3]. Con el reciclaje y reutilización de materiales y partes de las máquinas se promueve la reducción de residuos, el uso eficaz de los recursos reciclados, y la protección del medio ambiente.

Actualmente, los motores de inducción cuya potencia oscila entre  $\frac{1}{4}$  y  $7\frac{1}{2}$  Hp, son muy usados en equipos de uso doméstico y la pequeña industria, ya sea en una lavadora o una bomba de agua. Si se toma en cuenta la inmensa cantidad de máquinas de uso doméstico y bombas que son usadas en el mundo, podría inferirse el enorme impacto que el reciclaje de estos motores tendría en la solución del problema de contaminación ambiental y en la disminución de los costos en la construcción de estos tipos de máquinas eléctricas, redundando esto en beneficios sociales y económicos para la humanidad.

De igual manera, el proceso de reciclaje ha comenzado a ser objeto de regulación y está siendo impuesto con carácter obligatorio en algunos países tales como: Japón, India, China, Corea del Sur, Estados Unidos, Canadá y algunos de la Unión Europea [5,9]. La disminución de los costos iniciales, operacionales y de mantenimiento, es una de las principales justificaciones para establecer máquinas reciclables cuyos fundamentos son: la normalización de diseños, de procedimientos de construcción y especificaciones. Con este trabajo se requiere por un lado educar y/o concientizar a consumidores y por el otro, fomentar e incentivar a los fabricantes al intercambio de componentes de motores



eléctricos, pero para ello se hace necesario que exista una armonía entre cada una de las marcas y modelos de los diferentes motores de inducción. Por ende, para el reciclaje de estas máquinas eléctricas asincrónicas, es necesario diseñar propuestas que abarquen cada uno de los principios antes mencionados con la finalidad de colaborar en el desarrollo de los diferentes estudios que se desarrollan en esta área. Para para aportar a éste tema, esta investigación está enmarcada en la línea de investigación “Ingeniería Eléctrica Aplicada” en el área prioritaria de “Tecnología” que se desarrolla en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Potencia de la Universidad de Carabobo.

#### **1.4 Delimitaciones**

##### Espacio:

La investigación se desarrollará en el Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica del Departamento de Conversión y Transporte de Energía, adscrito a la Coordinación de Tecnología e Ingeniería Eléctrica de la Universidad Simón Bolívar ubicado en Sartenejas, edo. Miranda. La misma responde a necesidades técnico científicas que aportan a la Dirección de Investigación de la Facultad de Ingeniería para la organización de la ciencia.

##### Tiempo:

El trabajo en todas sus fases inicia en septiembre 2020 y culmina en septiembre 2022. El análisis de las tendencias nacionales e internacionales se realiza sobre las publicaciones realizadas desde el año 2010, sin dejar de tomar en cuenta investigaciones y estudios de mayor tiempo que resulten importantes destacar para el cumplimiento de los objetivos.

##### Contenido:

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar un nuevo motor de inducción que sea producto del reciclado de componentes y partes de motores de máquinas rotativas asincrónicas monofásicas cuya potencia oscile entre  $\frac{1}{4}$  Hp y  $7\frac{1}{2}$  Hp. Para llegar a éste objetivo se consideran los avances científicos-tecnológicos que se deben



tomar en cuenta actualmente para realizar un estudio del ciclo de vida útil de los componentes de la máquina y las dificultades que representa construirlas de la forma convencional. También se realizará un estudio de materiales modernos cuyas características ferromagnéticas permitan su utilización en la fabricación en máquinas rotativas, para ello se analizarán diferentes estudios con respecto al envejecimiento de estos materiales y la pérdida de sus propiedades magnéticas. Con este análisis se pretende proponer ideas para la construcción de una maquina rotativa reciclable con componentes reciclables y estudiar el impacto tanto en la industria como en los fabricantes de estos motores de inducción, ya que una propuesta de esta naturaleza puede ser considerada una amenaza a la producción, procesos y economías de estas empresas.



## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

Este capítulo pretende hacer referencia a diferentes publicaciones vinculadas a la investigación que se realiza, cuyos aportes se consideran significativos y que sirven como antecedentes para su desarrollo, de igual forma, se recopilan definiciones de diferentes autores sobre los conceptos fundamentales que se deben tomar en cuenta como bases teóricas para la realización de esta tesis.

#### 2.1 Antecedentes de la Investigación

**Márquez C.** [10] realizó una investigación acerca del reciclaje de máquinas eléctricas asincrónicas de 3Hp-100Hp en el que se consideraron las tendencias de la industria en su fabricación, los métodos de reciclaje de materiales, componentes y productos utilizados en la manufactura de estas máquinas tomando como base el ciclo de vida de estos motores y el enfoque en el rediseño de las máquinas apegados a parámetros eléctricos y normas afines con los principios fundamentales que definen una máquina reciclable.

La investigación a realizar pretende generar ideas para el desarrollo de un nuevo motor de inducción con componentes reciclables y materiales ferromagnéticos modernos, evaluando la facilidad en el intercambio y reutilización de los elementos que lo conforman.

Igualmente, **Link R.** [11] presento un trabajo cuyo objetivo fue realizar un estudio para poder cuantificar las potencialidades de reciclaje de motores pequeños y eléctricos que se originan en motocicletas, bicicletas eléctricas y maquinaria industrial que se encuentran en desuso en Alemania y la Unión Europea, donde se concluyó que el desmontaje de estos motores en combinación con un proceso de reciclaje específico posterior a su uso,



mejoraría los procesos de reciclaje de elementos de tierras raras de motores eléctricos pequeños.

Esta investigación, generara ideas que permitan concebir la fabricación de motores eléctricos de inducción con componentes que puedan ser intercambiables de una maquina eléctrica a otra, muy diferente al objetivo planteado en la investigación antes mencionada.

Por último, **Karnavas Y. y Chasiotis I.** [12], desarrollaron una investigación de diferentes materiales magnéticos blandos, desde el punto de vista de los fabricantes, ya que plantean que a la hora de diseñar un motor trifásico o monofásico jaula de ardilla, no solo se deben tomar en cuenta los aspectos geométricos constructivos de la máquina y al hierro como material ferromagnético solamente. Los resultados de este proyecto de investigación tuvieron como eje principal la eficiencia energética del motor, factor de potencia, par de salida, pérdidas, peso y costo, estudiando los efectos de varios materiales magnéticos blandos.

La diferencia entre el trabajo que aquí se presenta y el realizado por **Karnavas Y. y Chasiotis I.**, estriba en el hecho de que en éste se quiere determinar qué tipo de materiales ferromagnéticos modernos son susceptibles en ser utilizados en la fabricación de motores pequeños de inducción.

## 2.2 Bases Teóricas

Para el abordaje teórico y conceptual se introduce el término reciclaje, específicamente orientado al reciclaje de máquinas y sus tipos dado que es el objeto de estudio de esta investigación. También se aborda la máquina eléctrica reciclable ya que el término reciclaje no aplica a todo tipo de máquinas, debido a que se deben tomar en cuenta los aspectos constructivos tales como: velocidad, voltaje nominal, dimensiones, formas, material utilizado, partes, aislamiento, núcleos, devanados, entre otros, que permitirán



conocer que maquina es susceptible a ser reciclada, que en el caso este trabajo se centrara específicamente en motores de baja potencia eléctrica utilizados en la pequeña industria y en la elaboración de equipos electrodomésticos.

Otro aspecto a tomar en cuenta en este capítulo es el de la máquina de rotor de polos de mandíbula (claw-pole rotor), debido a que por sus características constructivas que la hacen fácil de ensamblar y desensamblar, puede aportar al desarrollo de los objetivos de esta investigación. De igual forma se tratan las características básicas de los materiales ferromagnéticos como punto de partida para el estudio de las más recientes investigaciones en cuanto al descubrimiento de nuevas características en este tipo de material, las cuales se abordarán para la realización de uno de los objetivos de esta investigación.

### **2.2.1 El Reciclaje**

Es definido convencionalmente como “aquel proceso donde un material o componente, no necesariamente en su forma original es reusado en uno nuevo” [13], el reciclaje es planteado como la forma de solucionar el problema de acumulación de residuos, el ahorro de energía eléctrica y eficiencia energética, sumado a la extinción de los recursos naturales; posibilitando resolver parte de una de las grandes dificultades ambientales “La contaminación”.

En términos generales existen un sin número de razones por las cuales este proceso mantiene gran valor, entre ellas:

- Permite ahorrar recursos.
- Logra ahorrar energía.
- Disminuye la contaminación.
- Reduce el espacio que pueden ocupar los desperdicios al ser tratados como basura.



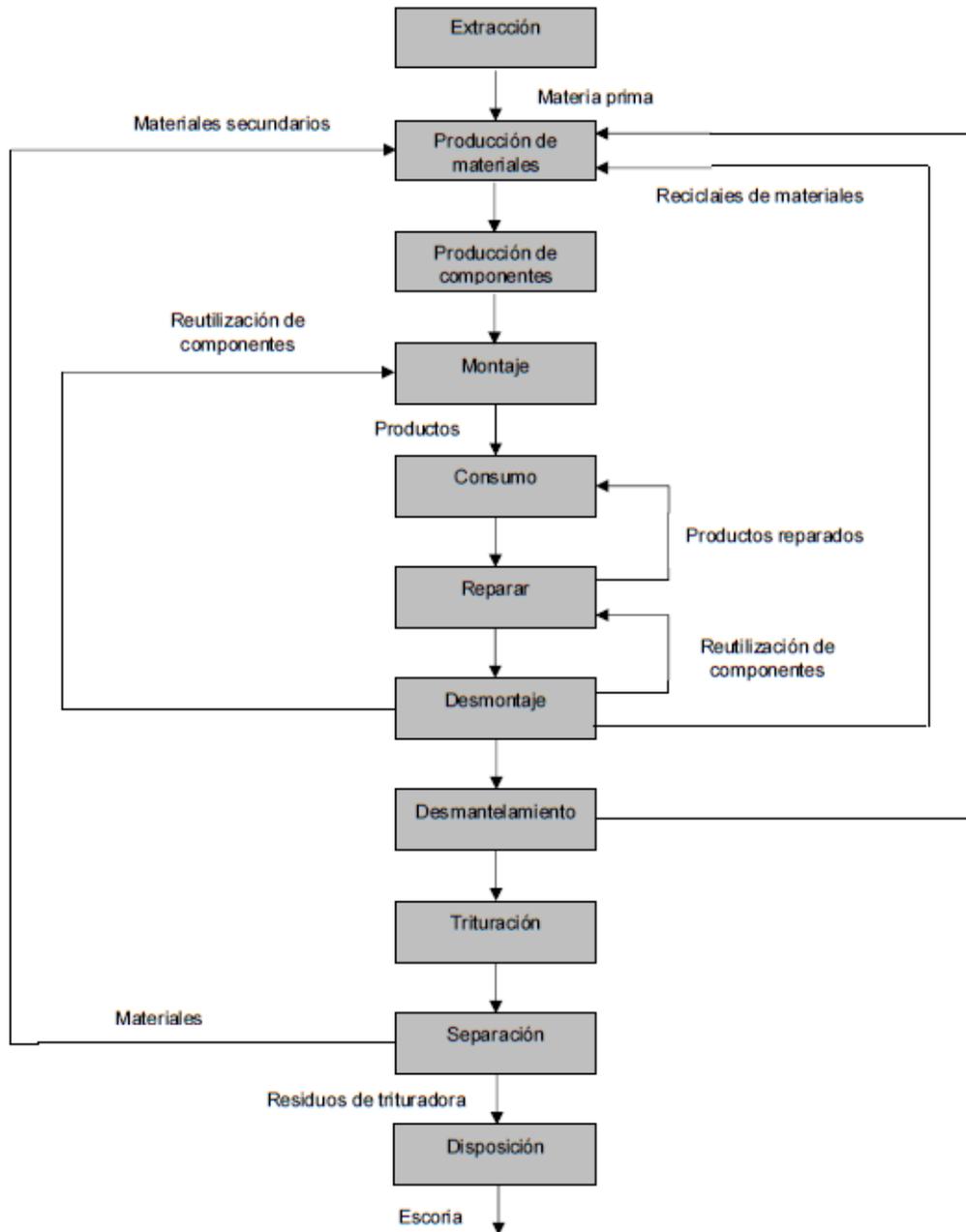
- Aumenta la vida de los materiales a pesar de sus diferentes usos.

### 2.2.1.1 Clases de Reciclaje [13]

La clasificación presentada está relacionada directamente al proceso que tiene el material o componente para ser reciclado.

- a) Primera clase o convencional (reutilización de materiales o componentes): “esta clasificación se caracteriza con un ejemplo simple como lo es el reciclado de una botella retornable que hace varios viajes desde la embotelladora al consumidor y viceversa, donde es limpiada y devuelta al llenado”.
- b) Segunda clase es reciclado directo: “un ejemplo de la segunda clase está utilizando de nuevo la botella retornable como el primer ejemplo, una vez que la botella no es apta para su reutilización, se limpia y se descompone en vidrio de desecho en las fábricas de vidrio y se utiliza para hacer más botellas”.
- c) Tercera clase es el reciclaje indirecto: “la tercera clase no hace pretensión de recuperación de los materiales o componentes para su uso inicial. Continuando con el ejemplo de la botella de vidrio, es muy probable que con el tiempo se terminan en los residuos domésticos donde puede ser extraído por cribado y separación en conjunción con otras botellas. Estas botellas probablemente serán de diferentes colores y diferentes grados de calidad, no serán adecuadas para su uso que tenían originalmente, pero pueden ser usados en otros procesos (como en la fabricación de lijas), ahorrando energía y materiales”.

En la Figura 2.1 se representan las etapas de desagregado en el proceso de vida de un producto [2], donde se observa la relación que existe con las clases de reciclaje estudiados anteriormente, es decir, dependiendo del estado del material o componente, éste puede ser insertado en cualquier etapa del proceso de desagregado.



**Figura 2.1** Cadena del proceso de desagregado de la vida de un producto  
Fuente: R. Hernández y J. Pacheco (2016)



## 2.2.2 La Máquina Eléctrica Reciclable [14]

Una máquina reciclable es aquella que es sencilla, fácil de armar y desarmar, de pérdidas muy bajas, usa pocos materiales que además no deberían envejecer significativamente con el funcionamiento. Esto implica que sus características eléctricas y magnéticas deberían mejorar o mantenerse con el tiempo o en cuyo caso deteriorarse lo menos posible.

La máquina reciclable debe permitir la utilización total o parcial de sus partes, en otra máquina de igual o diferente tamaño. Deberá tener alta fiabilidad y disponibilidad, con costos iniciales y de operación más bajos y podría usarse en un mundo de fabricantes y usuarios bajo el apego a normas y mecanismos que valoren y promuevan el reciclaje desde un punto de vista medioambiental y económico.

### 2.2.2.1 Principios de Diseño para el Reciclaje de Motores Eléctricos. [14]

Los principios de diseño para reciclar motores de inducción se podrían mencionar de la siguiente manera:

- Simplificación de las partes.
- El diseño debe permitir de una manera muy simple su ensamblaje y desensamblaje.
- Debe reducirse la diversidad de materiales a ser usados.
- Se debe maximizar el uso de materiales reciclables.
- Los materiales aislantes no deben envejecer significativamente con el tiempo, deben ser resistentes y permitir procesos reversibles o que sus características puedan mejorar con el tiempo.
- Los materiales ferromagnéticos (chapas y conductores etc.) no deben envejecer o sus características deben mantenerse o mejorar con tiempo.



- Las relaciones entre fabricantes y usuarios deberán gobernarse por:
  - Normas que incluyan formas y dimensiones.
  - Mecanismos que permitan a nuevas máquinas ser reconstruidas usando partes recicladas, reconstruir o volver a utilizar sus partes en otras máquinas.

La adopción de técnicas de reciclaje aliadas con buenas prácticas de diseño puede hacer mucho para conservar las materias primas y la energía si se permite que los materiales y componentes se recuperen de los productos una vez finalizada su vida útil, logrando minimizar los desechos. La disminución de residuos seguida del reciclaje ofrece un ahorro considerable de dinero sin grandes sacrificios por parte del consumidor. La Figura 2.2 representan el proceso de vida de una máquina eléctrica. El reciclaje puede tener lugar al final de la vida útil de una máquina eléctrica o en cualquier etapa del proceso de vida de una máquina eléctrica [2].

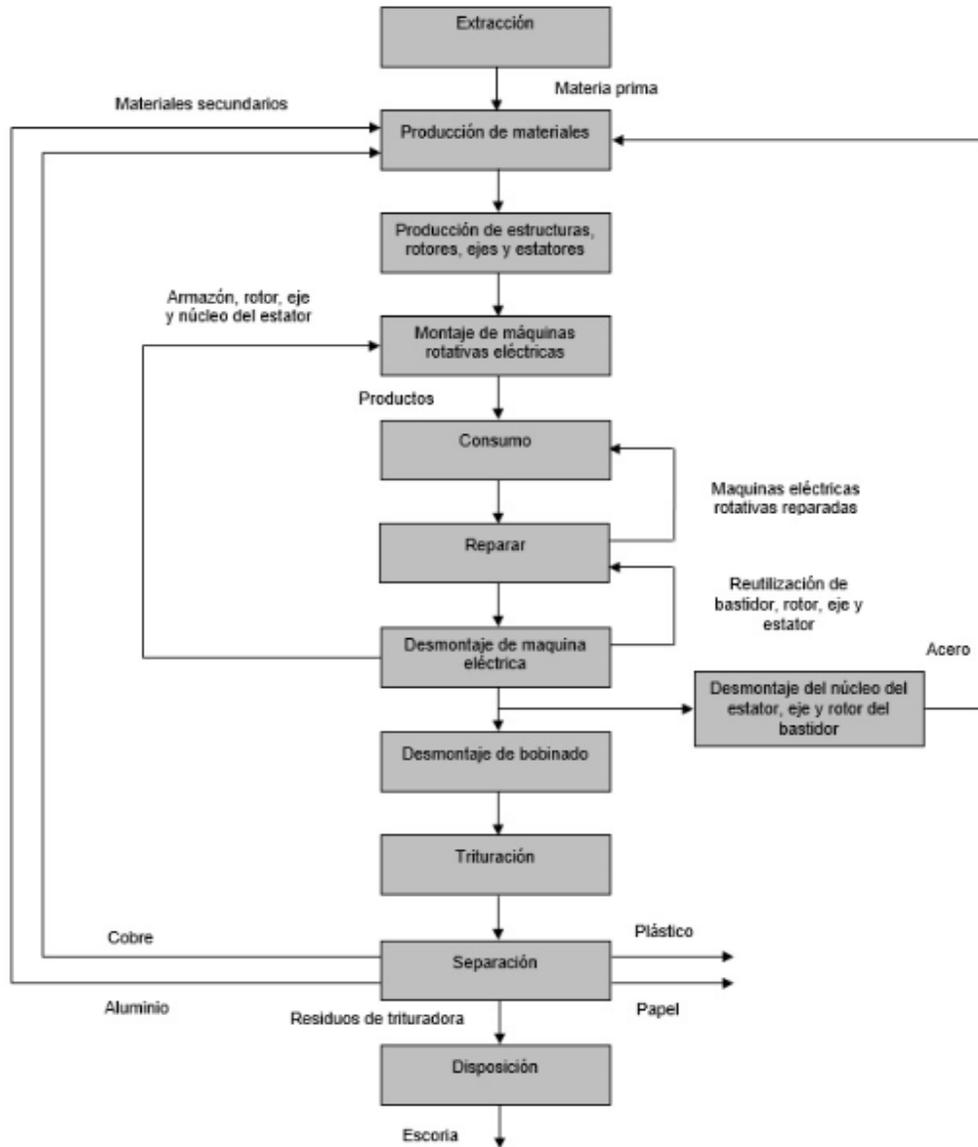
### **2.2.3 Diagnóstico de las Partes de un Motor Eléctrico Susceptible a Ser Reciclado**

Cuando un motor ingresa a un taller para su reparación, debe ser examinado con cuidado en busca de la posible causa de la falla. No es fácil localizar con precisión tal causa, pues muchas veces su origen se oculta bajo devanados quemados u otras averías engañosas. Las causas de que un motor eléctrico falle pueden ser debidas a condiciones ambientales adversas, selección o aplicación incorrecta del motor, instalación inadecuada, desperfectos mecánicos y fallas eléctricas. Dependiendo del tipo de falla, las partes o componentes pueden ser afectados de manera distinta, algunas serán severamente afectadas, otras sufrirían deterioros leves y otras ninguno. Por lo anteriormente expuesto, se puede decir que, según el daño, la vida útil de las partes de un motor son afectadas de manera diferente, y sus componentes pueden ser insertadas de maneras distintas en el proceso de desagregado de la vida de una maquina eléctrica rotativa, tal como se observa en la figura 2.2.



Para conocer la clasificación que tiene el material o componente para ser reciclado es necesario un diagnóstico que permita concluir de manera eficiente en qué etapa del proceso debe ser insertada cada pieza de la maquina rotativa. De esta manera se puede decir que un método para la prueba de falla debe cumplir con los siguientes requisitos [14]:

- Confiabilidad en la detección de falla: incluyendo sensibilidad ante pequeñas fallas o fallas en zonas profundas en el núcleo, y además la capacidad de poder eliminar falsas hipótesis de fallas.
- Rápida inspección: facilidad y preparación de la prueba, permitiendo una fácil interpretación de ella.
- Manejo y ejecución segura de la prueba



**Figura 2.2** Cadena del proceso de desagregado de la vida de una máquina eléctrica rotativa

Fuente: R. Hernández y J. Pacheco (2016)

#### 2.2.4 Motores Eléctricos de Baja Potencia Utilizados en Electrodomésticos, Bombas de Agua y la Pequeña Industria.

Al elegir un motor eléctrico para una operación específica, uno debe ocuparse particularmente de algunos aspectos del motor y la operación en sí. En cuanto a la elección de motores de baja potencia eléctrica para su operación, se pueden destacar cuatro criterios.



Estos criterios son características técnicas, confiabilidad, costo y conveniencia de la aplicación.

Lo que los diseñadores esperan de un motor para que pueda ser utilizado en equipos electrodomésticos, bombas de agua o su uso en la pequeña industria, en términos de características técnicas puede enumerarse como primer criterio; una alta relación potencia-volumen y relación par-volumen, un amplio rango de velocidades, para poder operar en dos direcciones, control de aceleración y sensibilidad. Se espera una alta relación potencia-volumen y volumen-par debido al hecho de que los equipos electrodomésticos tienen un espacio limitado para un motor. Es posible relacionar el volumen del rotor, la velocidad síncrona y la potencia. Por lo tanto, los diámetros internos del rotor y el estator se pueden estandarizar [14]. También un tamaño más pequeño significa bobinados más pequeños y laminaciones de motor más pequeñas, lo que trae una reducción de costos considerable. Por otro lado, el amplio rango de velocidad, que es parte de la estrategia de marketing, debido a que el equipo puede ser utilizado en un número mayor de aplicaciones.

El segundo criterio, la fiabilidad en sí misma, es un área de investigación principal. Se espera que todos los motores utilizados en productos para usuarios finales sean fiables, es decir, que el motor y la electrónica de control del motor sean fiables para tener una vida útil más larga y reducir las fallas y el mal funcionamiento del producto.

El tercer criterio es el costo, siendo el criterio más importante de todos desde el punto de vista del fabricante. Los fabricantes siempre aprecian los costos más bajos, pero siempre esperan mejores características técnicas. Por tanto, este criterio no puede examinarse sin preocuparse por las características técnicas del motor. Se espera que el motor que se va a utilizar, proporcione todas las condiciones necesarias para una operación óptima y aún sea rentable.



El último criterio para elegir un motor es la conveniencia de la aplicación. Este criterio se puede explicar cómo el nivel de comodidad para el usuario final, que se puede categorizar como el nivel de vibración del motor y el tamaño. El nivel de calentamiento del motor puede ser importante a velocidades más altas debido al hecho de que los parámetros del motor cambiarán a medida que aumenta la temperatura. El nivel de vibración del motor es un criterio crítico en términos de diseño.

Los principales tipos de motores que se utilizan en este campo se pueden enumerar a continuación:

- Motores monofásicos de inducción de fase partida
- Motores universales
- Motores monofásicos de jaula de ardilla

El estudio detallado de los tipos de motores se dará a continuación. En esta parte se proporcionarán los principios de funcionamiento de cada uno de estos motores, cuales son las partes que los componen y sus ventajas y desventajas.

#### **2.2.4.1 Motores Monofásicos de Inducción de Fase Partida**

La necesidad del motor de inducción monofásico de fase partida se explica de la siguiente forma: existen muchas instalaciones, tanto industriales como residenciales a las que la compañía eléctrica solo suministra un servicio de CA monofásico. Además, en todo lugar casi siempre hay necesidad de motores pequeños que trabajen con suministro monofásico para impulsar diversos artefactos electrodomésticos tales como máquinas de coser, aspiradoras, acondicionadores de aire, lavadoras, entre otros..

Los motores monofásicos se utilizan extensamente en el rango de potencias fraccionaria desde 1.5 kW hasta 2 kW, deben su nombre a que para su funcionamiento sólo



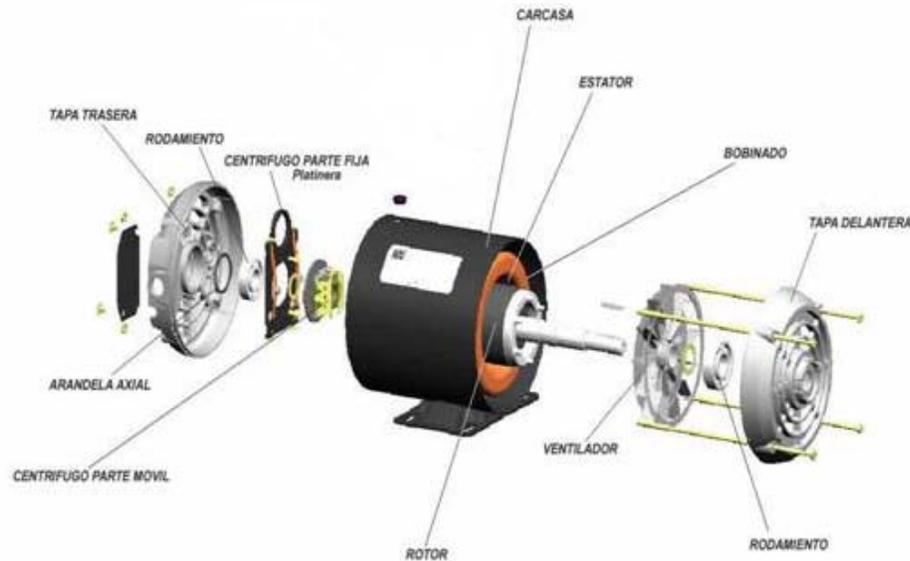
requieren disponer de una alimentación monofásica. Su modelación se establece aprovechando el circuito equivalente obtenido para los motores de inducción trifásicos.

#### **2.2.4.1.1 Partes de un Motor Monofásico de Fase Partida**

El motor de fase partida lo constituyen, esencialmente, cinco partes principales que son:

- Una parte estacionaria llamada estator.
- Una parte giratoria llamada rotor.
- Un interruptor centrífugo situado en el interior del motor.
- Dos escudos de los extremos que alojan a los cojinetes que sostienen el eje del rotor.
- Un bastidor de hierro colado en el que el núcleo del estator está encajado a presión. [16]

El estator de un motor de fase partida consiste en dos devanados sujetos en su lugar por unas ranuras rebajadas en un núcleo de acero laminado. Los dos devanados consisten en bobinas aisladas dispuestas y conectadas para que formen dos devanados separados el uno del otro a 90 grados eléctricos. Uno de estos devanados es el principal o de funcionamiento y el otro es el de arranque. El devanado principal es de alambre aislado de cobre relativamente grueso y está colocado en el fondo de las ranuras del estator. El de arranque es de alambre de calibre relativamente pequeño está situado en lo alto de las ranuras, encima de las bobinas del devanado principal. [16]



**Figura 2.3** Partes de un motor monofásico de inducción de fase partida  
Fuente: Revista Motores WEG

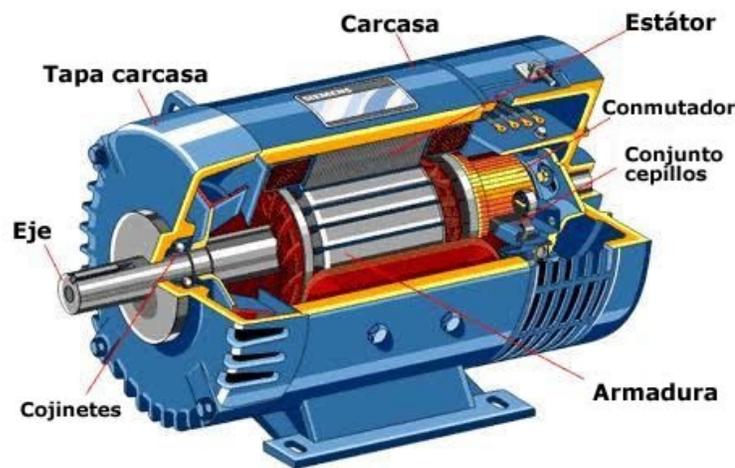
Su principal inconveniente es que carecen de torque de partida, es decir, no crean su propio campo magnético, así que deben ser activadas a través de un interruptor u otro dispositivo para hacer que su rotor se mueva. Sólo después de que el rotor se pone en movimiento se crea un campo magnético creado, haciéndolo funcionar.

Los motores monofásicos de inducción de fase partida son menos costosos de fabricar que otros motores y son muy eficientes. La mecánica es relativamente simple, pero esto no significa que nada puede salir mal. A veces no se pueden arrancar, se recalientan o andan lento.

#### 2.2.4.2 Motores Universales

El motor universal se puede definir simplemente como una máquina de corriente alterna cuyos devanados de campo y de inducido están conectados en serie. En su caso más simple, también es posible describir los motores universales como motores, que pueden alimentarse con voltajes de AC y DC, por lo que se denominan universales. Aunque también pueden ser alimentados con corriente alterna, en su mayoría se clasifican en

secciones de motor de corriente continua debido al hecho de que su estructura es similar a la de los motores de corriente continua. Dado que el voltaje de la línea doméstica es AC monofásico, los motores universales se utilizan ampliamente en aplicaciones domésticas. Por ejemplo, los pequeños motores universales se utilizan en aplicaciones donde la carga es un problema crítico, como aspiradoras, electrodomésticos de cocina y herramientas portátiles, y generalmente funcionan a altas velocidades que van desde 1500 rpm a 15000 rpm [17].



**Figura 2.4** Partes de un motor de universal  
Fuente: N. Pérez (2018)

#### 2.2.4.2.1 Partes de un Motor Universal

El motor universal está compuesto esencialmente por las siguientes partes:

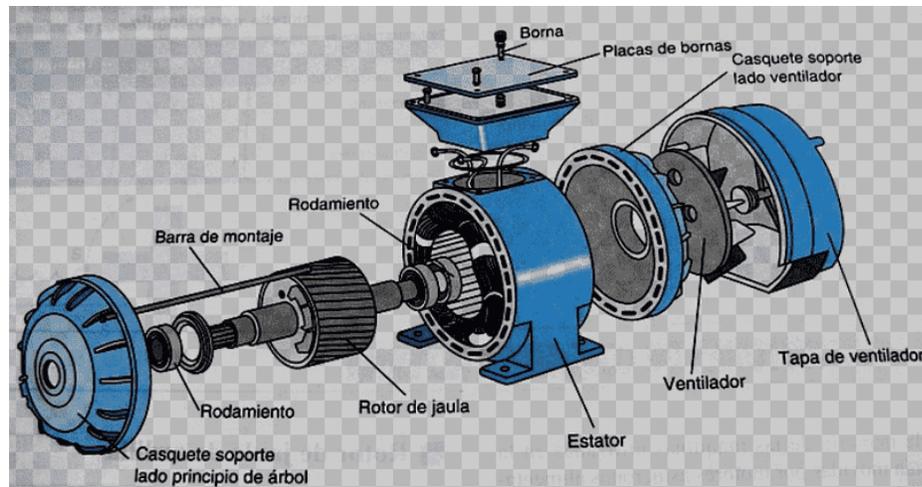
- La carcasa suele ser por lo regular de acero laminado, de aluminio o de fundición con dimensiones adecuadas para mantener firmes las chapas del estator. Los polos suelen estar afianzados a la carcasa con pernos pasantes. Con frecuencia se construye la carcasa de una pieza, con los soportes o pies del motor.



- El estator o inductor, que se representa junto con otras partes componentes, consiste en un paquete de chapas de forma adecuada, fuertemente prensadas y fijadas mediante remaches o pernos.
- El inducido es similar al de un motor de corriente continua pequeño. Consiste en un paquete de chapas que forma un núcleo compacto con ranuras normales u oblicuas y un colector al cual van conectados los terminales del arrollamiento inducido. Tanto el núcleo de chapas como el colector, van sólidamente asentados sobre el eje.
- Los escudos, como en todos los motores, van montados en los lados frontales de la carcasa y asegurados con tornillos. En los escudos van alojados los cojinetes, que pueden ser de resbalamiento o de bolas, en los que descansan los extremos del eje. En muchos motores universales pueden desmontarse sólo un escudo, pues el otro está fundido con la carcasa. Los portaescobillas van por lo regular sujetos al escudo frontal mediante pernos.

#### **2.2.4.3 Motores Monofásicos de Jaula de Ardilla**

Las máquinas de inducción jaula de ardilla son los tipos de motores más comunes utilizados tanto en la industria como en aplicaciones especializadas en una amplia gama de potencias nominales. Una de las razones de la popularidad de los motores de inducción tipo jaula es que son baratos y resistentes [18]. Sin embargo, su eficiencia es algo inferior debido a las altas pérdidas de cobre. Dado que tienen una tecnología establecida, todavía están en uso hasta el día de hoy, aunque traen muchos problemas a algunos sistemas en particular. Además, si no se controlan adecuadamente, no pueden proporcionar una operación óptima completa en términos de velocidad.



**Figura 2.5** Partes de un motor de inducción jaula de ardilla  
Fuente: E. Boc-Ho

#### 2.2.4.3.1 Partes de un Motor Monofásico Jaula de Ardilla

El motor de inducción monofásico es similar al trifásico con algunas diferencias. Posee un estator en el que se alojan dos bobinas. La bobina principal y la bobina auxiliar. La bobina principal y la auxiliar están desfasadas  $90^\circ$  en el espacio. Esta es una primera diferencia con respecto al motor trifásico de inducción que tiene 3 bobinados, uno para cada fase.

Por otro lado, el motor de inducción monofásico, posee un rotor jaula de ardilla idéntico al del motor de inducción trifásico. El último elemento importante, que difiere del motor trifásico, es el capacitor.

#### 2.2.5 Normas para el Reciclaje de Máquinas Eléctricas. [2]

Para reciclar, se necesitan dimensiones comunes para los componentes eléctricos de la máquina. Las normas se han desarrollado principalmente para las relaciones externas de una máquina eléctrica con su entorno. Hay pocos estándares disponibles para componentes de máquinas eléctricas. Esta situación es consecuencia de la poca consideración que se le



da al reciclaje y a un proceso de realización de normas dominado por fabricantes, industrias, investigadores y empresas de servicios públicos. El consumidor y otras partes de la sociedad poco participan en la realización de estos estándares. En otras palabras, hay que normalizar muchos aspectos como las dimensiones de las piezas y diseñar las máquinas con pocos componentes.

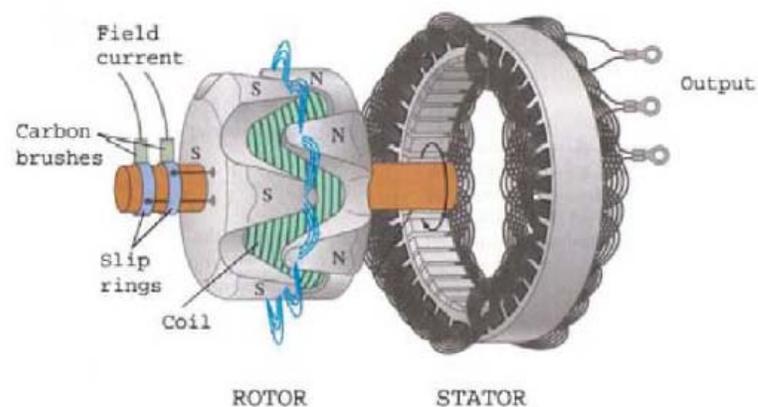
Los siguientes componentes necesitan dimensiones estándar:

- Núcleos de transformador (la estandarización de laminados de núcleo no obstaculizaría la creatividad y el diseño) y los tanques de transformadores
- Estatores, rotores, entrehierros en función del tipo de máquina eléctrica, frame, potencia nominal, polos, etc.
- Rotores de jaula de ardilla y rotores de mandíbula (claw rotors)
- Sistema de ventilación
- Además, se requieren normas para remanufacturar máquinas eléctricas y sus componentes

### **2.2.6 Máquinas de Rotor de Polos de Mandíbula**

Este tipo de máquinas es utilizado mayormente como alternador para vehículos híbridos y consta de un estator y un rotor tipo mandíbula. Los polos del rotor son como unos dientes que están uniformemente distribuidos alrededor de la periferia y se encuentran entrelazados axialmente en direcciones alternas a una distancia entre sí y poseen un núcleo y un devanado de excitación. Los imanes permanentes están dispuestos entre los dientes con forma de garra y se mantienen en un anillo de retención con una configuración en zig zag. Para montar el anillo de retención de la manera más sencilla posible entre los dientes, se proporciona una hendidura longitudinal en cada lado longitudinal del diente. El anillo de retención encaja en dicha hendidura por un lado longitudinal respectivo o su sección axial. [19].

Una máquina convencional de polos de mandíbula consta de un estator trifásico o multifásico con bobinados y dos polos forjados como rotor que posee una bobina de campo en forma de anillo y es alimentado con corriente continua mediante anillos colectores y escobillas de carbón tal como se muestra en la figura 2.6. En una máquina de polos de mandíbula basada en imanes permanentes, estos imanes se colocan entre los dientes, es decir, entre los dos polos, para proporcionar un flujo magnético mayor y reducir la fuga de flujo entre los polos consiguientes.



**Figura 2.6** Partes de una máquina convencional de polos de mandíbula

Fuente: P. Upadhayay, A. Kedous-Lebouc, L. Garbuio, J.C. Mipo, J.M. Dubus (2020)

Estudios han demostrado que al utilizar materiales magnéticos blandos de Hierro-Cobalto (FeCo) en el alternador de polos de mandíbula, puede haber una ganancia considerable en el rendimiento de salida de la máquina. Pero debido al alto precio del material FeCo, es conveniente utilizar este material solo en la fabricación del núcleo del rotor, donde también se obtiene un incremento de la potencia de salida con un menor aumento en el costo de la máquina. [20].

### 2.2.7 Materiales Ferromagnéticos

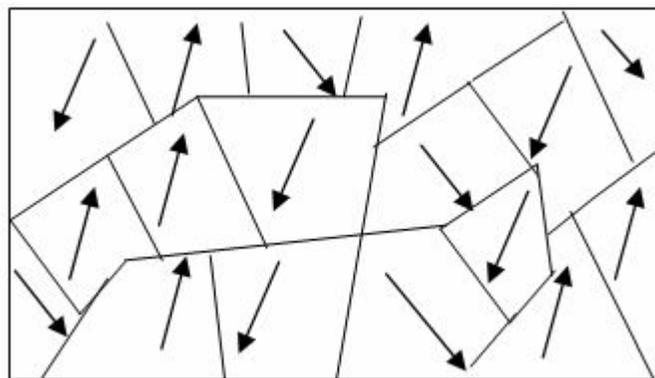
Las tendencias actuales en cuanto al diseño de las máquinas eléctricas, es la optimización de la eficiencia del convertidor, especialmente en cuanto a las propiedades de

los materiales y sistemas que se incorporan en la fabricación. Los materiales ferromagnéticos son compuestos de hierro y sus aleaciones con cobalto, tungsteno, níquel, aluminio y otros metales, son los materiales magnéticos más comunes y se utilizan para el diseño y constitución de núcleos de los transformadores y maquinas eléctricas. En un transformador se usan para maximizar el acoplamiento entre los devanados, así como para disminuir la corriente de excitación necesaria para la operación del transformador. En las maquinas eléctricas se usan los materiales ferromagnéticos para dar forma a los campos, de modo que se logren hacer máximas las características de producción de par.

### 2.2.7.1 Dominios Magnéticos

El ordenamiento microscópico de los espines de los electrones característico de los materiales ferromagnéticos, conduce a la formación de regiones de alineamiento magnético llamadas dominios.

La principal implicación de los dominios es que, con él, ya hay un alto grado de magnetización en los materiales ferromagnéticos dentro de los dominios individuales, pero en ausencia de campos magnéticos externos, esos dominios están orientados de forma aleatoria. Un modesto campo magnético aplicado, puede originar un mayor grado de alineamiento de los momentos magnéticos con el campo externo, dando una gran multiplicación del campo aplicado.



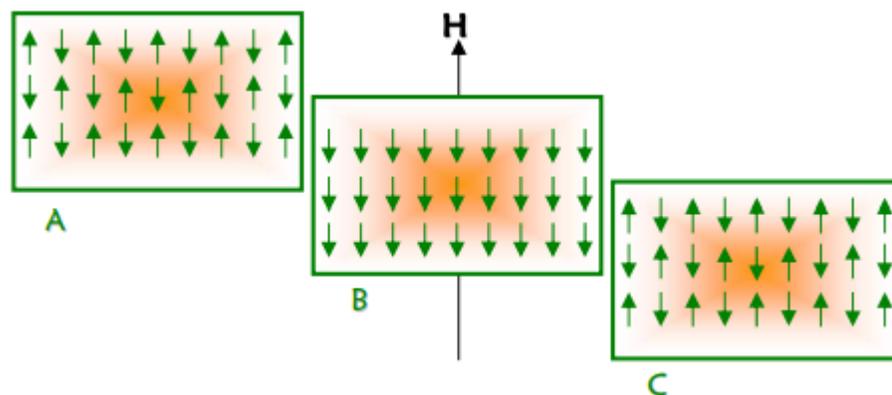
**Figura 2.7** Dominios en un material ferromagnético bruto

Fuente: S. Martínez (2006)

## 2.2.7.2 Clasificación de Materiales Ferromagnéticos

### 2.2.7.2.1 Diamagnetismo

Los electrones presentes en los materiales diamagnéticos están completamente apareados, por lo tanto, no poseen momentos magnéticos netos, cuando sus electrones son sometidos a la presencia de un campo magnético su magnetización se opone a la dirección del campo aplicado y cuando se retira vuelven a su estado inicial, (ver Figura 2.8). Algunos ejemplos de materiales diamagnéticos son: el cobre, la plata, el berilio, la mayoría de las moléculas orgánicas y muchos polímeros<sup>26</sup>. Las aplicaciones (en este campo) de este tipo de materiales se limitan a las de los superconductores, que son una clase muy especial de materiales diamagnéticos (“perfectos”). Aunque la susceptibilidad magnética de los superconductores se debe a corrientes macroscópicas que circulan en el material en dirección opuesta al campo aplicado y no al movimiento de los electrones en los orbitales. [21]



**Figura 2.8** Efecto de la presencia de un campo magnético sobre los espines de los electrones de un material diamagnético. A) Antes, B) durante y C) después de aplicar un campo magnético.

Fuente: S. Martínez (2006)



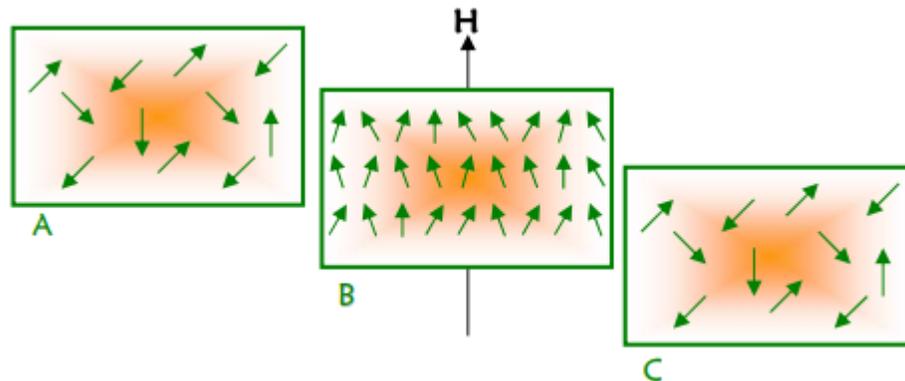
El diamagnetismo es un efecto universal porque se basa en la interacción entre el campo aplicado y los electrones móviles del material. El diamagnetismo queda habitualmente enmascarado por el paramagnetismo, salvo en elementos formados por átomos o iones que se disponen en “capas” electrónicas cerradas, ya que en estos casos la contribución paramagnética se anula. Las características esenciales del diamagnetismo son [22]:

- Los materiales diamagnéticos se magnetizan débilmente en el sentido opuesto al del campo magnético aplicado. Resulta así que aparece una fuerza de repulsión sobre el cuerpo respecto del campo aplicado.
- La susceptibilidad magnética ( $\chi_m$ ) es negativa y pequeña y la permeabilidad relativa ( $\mu_r$ ) es entonces ligeramente menor que 1.
- La intensidad de la respuesta es muy pequeña. Se puede modelar en forma sencilla el comportamiento diamagnético mediante la aplicación de la ley de Lenz al movimiento orbital de los electrones. El diamagnetismo fue descubierto por Faraday en 1846.

#### 2.2.7.2.2 Paramagnetismo

Los materiales clasificados como paramagnéticos contienen átomos con momentos magnéticos netos, es decir, con electrones desapareados. En este caso, antes de aplicar el campo, los momentos se encuentran orientados al azar y se cancelan unos a otros, por lo que la magnetización del material es cero. Cuando se aplica un campo magnético externo, los espines de los electrones tienden a orientarse en la misma dirección del campo aplicado, pero el movimiento térmico de los átomos se opone a esta tendencia, impidiendo la alineación perfecta. Una vez que se retira el campo los espines de los electrones vuelven a su estado inicial (ver Figura 2.9). Algunos materiales que presentan este tipo de comportamiento son el oxígeno líquido y gaseoso, el sodio atómico en estado gaseoso, el hidrógeno atómico<sup>26</sup>, metales como el platino y el aluminio, algunas sales como cloruros, sulfatos y carbonatos de manganeso, cromo, fierro y cobre<sup>23</sup>. Este tipo de materiales ha sido utilizado de dos maneras: por una parte, en estudios científicos que permiten entender las propiedades electrónicas de los materiales con momentos magnéticos netos, es decir, en

ausencia de efectos cooperativos fuertes, y por otra parte, en dos aplicaciones tecnológicas, una de ellas es la evaluación de campos magnéticos por medio de resonancia de espín electrónico (ESR) y la otra es el uso de sales paramagnéticas para alcanzar ultra bajas temperaturas (del orden de milikelvin) [21].



**Figura 2.9** Efecto de la presencia de un campo magnético sobre los espines de los electrones de un material paramagnético. A) Antes, B) durante y C) después de aplicar un campo magnético.

Fuente: S. Martínez (2006)

Las características esenciales del paramagnetismo son [22]:

- Los materiales paramagnéticos se magnetizan débilmente en el mismo sentido que el campo magnético aplicado. Resulta así que aparece una fuerza de atracción sobre el cuerpo respecto del campo aplicado.

### 2.2.7.3 Propiedades y Características de Materiales Ferromagnéticos [22]

#### 2.2.7.3.1 Propiedades de los Materiales Ferromagnéticos

- Aparece una gran inducción magnética al aplicarle un campo magnético.
- Permiten concentrar con facilidad líneas de campo magnético, acumulando densidad de flujo magnético elevado.



- Se utilizan estos materiales para delimitar y dirigir a los campos magnéticos en trayectorias bien definidas.
- Permite que las maquinas eléctricas tengan volúmenes razonables y costos menos excesivos.

#### **2.2.7.3.2 Características de los Materiales Ferromagnéticos.**

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan por uno o varios de los siguientes atributos:

- Pueden imanarse mucho más fácilmente que los demás materiales. Esta característica viene indicada por una gran permeabilidad relativa.
- Tienen una inducción magnética intrínseca máxima muy elevada.
- Se iman con una facilidad muy diferente según sea el valor del campo magnético. Este atributo lleva una relación no lineal entre los módulos de inducción magnética (B) y campo magnético (H).
- Un aumento del campo magnético les origina una variación de flujo diferente de la variación que originaría una disminución igual de campo magnético. Este atributo indica que las relaciones que expresan la inducción magnética y la permeabilidad ( $\mu$ ) como funciones del campo magnético, no son lineales ni uniformes.
- Conservan la imanación cuando se suprime el campo.
- Tienden a oponerse a la inversión del sentido de la imanación una vez imanado



## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se describe el marco metodológico donde se define el tipo de investigación, el diseño de las fases metodológicas a ser desarrolladas en el trabajo, así como también la unidad de estudio y las técnicas e instrumentos de recolección de información, análisis e interpretación de datos que se utilizarán para llevar a cabo la tesis.

#### 3.1 Tipo de Investigación

De acuerdo al problema planteado y a los objetivos a alcanzar en este proyecto que pretende desarrollar un nuevo motor de inducción con componentes reciclables y materiales ferromagnéticos modernos que prolongue el ciclo de vida de la máquina eléctrica, donde se deben tomar en cuenta la coexistencia de los motores ya diseñados y la del desarrollo de nuevos diseños de máquinas rotativas; la investigación se considera de tipo descriptiva, orientada a analizar el comportamiento de la variable en el contexto en estudio. El manual de trabajos de grado de especialización, maestría y tesis doctorales de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador [23], define la investigación documental como “el estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo, principalmente, en trabajos previos, información y datos divulgados por medios impresos, audiovisuales o electrónicos”. Al mismo tiempo, el manual clasifica entre los tipos de investigación documental, la del “estudio de desarrollo teórico: presentación de nuevas teorías, conceptualizaciones o modelos interpretativos originales del autor, a partir del análisis crítico de la información empírica y teorías existentes”. Según Fidas G. Arias [24], la investigación documental es definida como “un proceso basado en



la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos". El tipo de investigación que se va a utilizar en la elaboración de éste proyecto de grado es de tipo documental porque la misma permitirá la elaboración de un marco conceptual acerca de las características que debe tener un motor eléctrico susceptible a ser reciclado, donde sus componentes puedan ser insertados en el ciclo de vida de una maquina rotativa, tomando en cuenta los diseños existentes de las maquinas convencionales actuales.

### 3.2 Diseño de las Fases Metodológicas

Para el alcance de los objetivos de la investigación, el diseño metodológico comprende tres fases que permitirán la recogida de datos, su procesamiento, análisis e interpretación con el propósito de dar respuesta a los problemas planteados en el proyecto. Las fases se explican a continuación:

- **Fase 1:** Preparar la metodología para reciclar maquinas convencionales donde se corrijan las dificultades que representan construirlas de la forma como se realizan en la actualidad.

**Fase 1.1:** Identificación de las partes y componentes de un motor eléctrico convencional para aplicarles los conceptos de reciclaje. **Resultado esperado:** Grafico de un motor eléctrico convencional donde se identifiquen sus partes.

**Fase 1.2:** Aplicación de conceptos de reciclaje a las partes y componentes de un motor convencional para la determinación de cuáles pueden ser sustituibles, haciendo un análisis de las propiedades, tomando en consideración el diagnóstico



temprano del estado de las piezas. **Resultado esperado:** Tabla de piezas sustituibles.

**Fase 1.3:** Estudiar las dificultades que se presentan para poder reciclar las partes de un motor eléctrico convencional debido a la forma en que se diseñan y se construyen actualmente, para analizar las acciones que se deben realizar para poder adaptarles a una maquina más amigable al proceso de reciclaje. **Resultado esperado:** Tabla donde se presenten las dificultades y las acciones para poder adaptar una maquina a un proceso de reciclaje.

- **Fase 2:** Analizar las propiedades de diversos materiales ferromagnético modernos para su evaluación en el diseño de un motor eléctrico donde sus componentes puedan ser intercambiados y reutilizados.

**Fase 2.1:** Identificación de materiales ferromagnéticos modernos que de acuerdo a sus características electromagnéticas puedan ser utilizados para la producción de piezas para motores de inducción. **Resultado esperado:** Tabla de propiedades descubiertas recientemente y su comparación con los materiales que se utilizan actualmente.

**Fase 2.2:** Analizar el envejecimiento de materiales ferromagnéticos, según su comportamiento a pruebas de estrés térmico. **Resultado esperado:** Graficas y tabla de especificaciones.

**Fase 2.3:** Análisis del motor de rotor de polos de mandíbula para su aplicación como motor eléctrico de equipos electrodomésticos y en la pequeña industria, estudiando la posibilidad de que sea un producto reemplazable. **Resultado esperado:** Tabla de especificaciones con características eléctricas, magnéticas y mecánicas.



- **Fase 3:** Desarrollo de especificaciones técnicas con base en los atributos del producto para el posterior análisis de mercado. **Resultado esperado:** Tabla de especificaciones.

### 3.3 Unidad de Estudio y Análisis

La unidad de estudio de esta investigación es la maquina asincrónica, monofásica cuya potencia se ubique en un rango de potencia entre  $\frac{1}{4}$  y  $7\frac{1}{2}$  Hp, utilizada comúnmente para la fabricación de electrodomésticos, bombas de agua y motores utilizados en la pequeña industria.

### 3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de información, análisis e interpretación de datos

La técnica que se utilizará para la recolección de información será mediante la observación a través del registro de datos, y con estos valores, estudiar los aspectos más significativos del objeto de estudio para comprender la realidad de los fenómenos que se desarrollan en la máquina.

Para el análisis e interpretación de datos se manejará la técnica de comparación cuantitativa entre dos o más alternativas para cada uno de las fases a desarrollar en la investigación, y poder así cumplir con los objetivos propuestos.



## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y PRESENTACION DE RESULTADOS

#### 4.1 Motores Eléctricas Convencionales

Los motores eléctricos convierten la electricidad en energía mecánica apta para mover los accionamientos de una variedad de equipos; son utilizados en tornos, ventiladores, extractores, bandas transportadoras, bombas de agua, compresores y en múltiples aplicaciones en las empresas.

El funcionamiento de un motor eléctrico convencional se logra circulando corriente eléctrica en el embobinado de cobre de la parte fija (estator), lo cual genera un campo magnético. Al interactuar con el campo magnético de la parte móvil (rotor), se produce el movimiento de giro. Este movimiento es transmitido al exterior por medio de un eje para accionar equipos mecánicos.

##### 4.1.1 Identificación de las Partes de un Motor Eléctrico Convencional

Un motor eléctrico está compuesto básicamente de la siguiente forma: [25]

El estator es la parte fija del motor y tiene forma de cilindro hueco. El rotor se coloca en el interior del estator y es la parte móvil. Entre el estator y el rotor existe una holgura denominada entrehierro, la cual impide que ambas partes rocen entre sí. En el entrehierro tienen lugar los fenómenos electromagnéticos que permiten la conversión de energía eléctrica en mecánica y viceversa.



**Figura 4.1** Carcasa, estator y rotor de un motor eléctrico  
Fuente: Revista ABB (1990)

En el rotor de un motor de poca potencia es cilíndrico y en él se encuentra un núcleo magnético, sobre el que se coloca el devanado, bobinado o arrollamiento del rotor. El núcleo magnético tiene un hueco central donde se sitúa el eje de la máquina, el cual se fija rígidamente al mismo mediante una chaveta.

Si es preciso se coloca un colector en el eje, que permite conectar eléctricamente el devanado del rotor con un circuito exterior. En máquinas de corriente alterna se utilizan colectores de anillos, y consisten en dos o tres anillos de bronce colocados sobre el eje del rotor y aislados de este y entre sí. Además, en el rotor también se suelen colocar dispositivos de refrigeración, tales como: ventiladores, aletas, canales de ventilación, etc.

La parte exterior de un estator está rodeada por una culata o carcasa que actúa como envolvente de la máquina y la protege del medio exterior. La carcasa normalmente está fabricada con hierro fundido y tiene forma cilíndrica u octogonal. En ocasiones tiene aletas de refrigeración longitudinales o, más raramente, radiales que facilitan la evacuación de calor.

La carcasa es el componente estructural de las máquinas y está fabricada en hierro fundido o chapa de acero soldado y aloja, soporta y protege la parte activa de la máquina,



proporcionándole bajos niveles de vibración y rigidez. En la carcasa se coloca la caja de bornes donde se realizan las conexiones eléctricas de la maquina con el exterior.

También se coloca sobre la carcasa la denominada placa de características, que es una placa impresa donde se indican los datos más importantes del motor.

La culata dispone de los dispositivos de fijación de la maquina: patas, bridas, etc. A sus lados se colocan las tapas que cierran el motor y que poseen un hueco en su centro donde se alojan los cojinetes o rodamientos sobre los que descansa el eje del rotor y que minimizan el rozamiento entre este y las tapas de la carcasa.

Los núcleos magnéticos del estator y del rotor se construyen de material ferromagnético. En el caso de que estén sometidos a la acción de un flujo magnético variable con el tiempo, los núcleos magnéticos se realizan apilando chapas de acero al silicio de 0,5 mm de espesor (Fig. 4.2), reduciendo así las perdidas en el hierro por histéresis y por corrientes de Foucault.



**Figura 4.2** Diferentes tipos de chapas magnéticas  
Fuente: Miguel Ángel Rodríguez Pozueta

Estas chapas tienen forma de corona circular y están aisladas entre sí mediante un barniz o un tratamiento químico. Pueden poseer un conjunto de orificios que permitan la

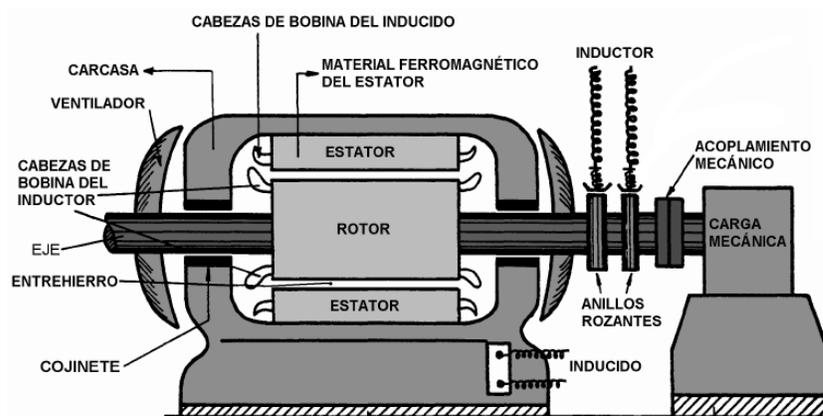


circulación de aire u otro fluido refrigerante a través del núcleo magnético. Las chapas del rotor tienen un agujero central con un chavetero donde se coloca el eje de la máquina.

La parte del núcleo magnético enfrentada al entrehierro posee una serie de ranuras donde se alojan los devanados.

Por otro lado, los rodamientos son el soporte del conjunto eje-rotor, que son el componente giratorio de la máquina y descansa en los extremos de la carcasa. Están compuestos de dos aros o anillos de pista, elementos rotantes dispuestos entre los aros y una armadura que separa los elementos rodantes y los mantiene en su sitio durante el giro.

En cuanto al sistema de refrigeración, el diseño más básico, es el uso de simples ventiladores dispuestos sobre el propio eje del motor, que posteriormente fue completado con el empleo de carcasas con aletas. Sin embargo, para grandes potencias, se emplean sistemas de ventilación de ciclo cerrado, con intercambiadores de calor refrigerados por agua.



**Figura 4.3** Partes de un motor eléctrico convencional  
Fuente: José Antonio de Gurrutxaga Ruiz



## 4.2 Fallas en Motores Eléctricos

En esta parte es importante citar que las principales fallas de las máquinas eléctricas se pueden clasificar en [26]:

### 4.2.1 Fallas Eléctricas

- Fallas en devanados debidos a una o más espiras en circuito abierto o cortocircuitadas.
- Conexión anormal de las espiras del estator.
- Falla de aislamiento

### 4.2.2 Fallas Mecánicas

- Fallas en devanados debidos a una o más espiras en circuito abierto o cortocircuitadas.
- Barras rotas o anillo rotórico roto.
- Excentricidades dinámicas y/o estáticas.
- Eje curvado (similar a excentricidad dinámica).
- Fallas en cojinetes y engranajes.

Varias investigaciones sobre fallas en motores, coinciden como resultado de la experiencia de fabricantes, centros de reparación y estudios académicos, que aproximadamente el porcentaje de distribución de fallas en motores eléctricos es: 45 % en los rodamientos, 35% en el estator, 10% en el rotor y el 10% restante en otras categorías. [27]

Las fallas de internas son causadas por errores de fabricación y el deterioro de los materiales que constituyen la máquina, mientras que las fallas externas ocurren como resultado de interacciones con el medio ambiente, la fuente de alimentación y la carga.



Estudios [27] coinciden en clasificar las fallas del rotor y del estator como una combinación de varias fuerzas que actúan sobre cada uno de estos componentes. En la tabla 4.1 se presenta una clasificación de estos factores.

**Tabla 4.1** Clasificación de las causas de las fallas en el estator y el rotor de un motor eléctrico

Parte del motor	Posibles Causas de una Falla
<b>Estator</b>	Estrés térmico (Envejecimiento, sobrecarga, ciclos de trabajo)
	Estrés eléctrico (Aislamiento, efecto corona, transitorio)
	Estrés mecánico (desplazamiento de la bobina, frotamientos mecánicos)
	Estrés ambiental (Contaminación, humedad, abrasión, cuerpos extraños)
<b>Rotor</b>	Estrés térmico
	Estrés electromagnético
	Estrés residual
	Estrés dinámico
	Estrés mecánico
	Estrés ambiental

Fuente: Y. Sequera (2021)

### 4.3 Diagnostico del Estado de en un Motor Eléctrico Convencional

Cuando un motor ingresa a un taller especializado para su reparación, debe ser examinado con cuidado en busca de la posible causa de la falla. No es fácil localizar con precisión tal causa, pues muchas veces su origen se oculta bajo devanados quemados u otras averías engañosas. Por ejemplo, los devanados pueden estar muy quemados, pero un examen detenido puede descubrir un cojinete dañado que ocasionó el rozamiento del motor



contra el devanado del estator. En este estudio, se explicarán los diferentes métodos que se utilizan para el diagnóstico del estado de un motor fallado, tomando en consideración que para nuestra investigación este tipo diagnóstico tiene que hacerse de manera rápida, confiable y efectiva para que se pueda tomar la decisión de qué tipo de reciclaje se le debe aplicar a cada una de las piezas y componentes del motor, esto debido a que, dependiendo del daño que tenga la pieza, se puede conocer en qué fase del ciclo de vida del motor puede ser insertado. Los métodos más comunes son los siguientes:

#### **4.3.1 Inspección Visual**

Inicialmente, la prueba que se realiza para verificar el estado del motor es la de la de la inspección visual, donde mayormente se observa cercana y detalladamente a lo largo y ancho de cada una de las piezas de la máquina, haciendo énfasis en cualquier daño en el estado del aislamiento del motor. En esta fase se puede evidenciar: calentamientos, perforaciones, raspones o golpes en la superficie de cada uno de los componentes que conforman el motor.

#### **4.3.2 Prueba de Ultrasonido**

La detección de ultrasonido es una técnica empleada en el mantenimiento industrial basada en el estudio de las ondas sonoras de alta frecuencia que se utiliza para detectar problemas en equipos industriales de una forma rápida, exacta y segura. Esta herramienta está fundamentada en el hecho de que las fuerzas de rozamiento, las descargas eléctricas y las pérdidas de presión o vacío en las plantas, generan ondas sonoras de alta frecuencia, corta longitud y rápida pérdida de energía lo cual permite localizar con exactitud los problemas en los equipos. [28]

Para detectar el ultrasonido, se utiliza un instrumento llamado detector de ultrasonidos el cual está diseñado para capturar ondas ultrasónicas y convertirlas en señales con



frecuencias dentro del rango de audición humana. Este dispositivo cuenta con la tecnología necesaria para que una vez convertidas las ondas de ultrasonido puedan escucharse a través de audífonos o visualizarse en un display por medio de un aumento de su intensidad como puede apreciarse en la figura 4.4. [28]



**Figura 4.4.** Detectores de ultrasonido  
Fuente: W. Olarte y M. Botero M. (2011)

#### 4.3.3 Prueba de Flujo Nominal

Esta prueba se basa en aplicar una tensión entre el 80% y 100% de la nominal, se utiliza para detectar puntos calientes en el núcleo del estator, para ello requiere el uso de una cámara de termografía u otro equipo semejante donde se pueda apreciar el comportamiento del estator ante el ensayo de tal forma que se pueda establecer zonas de la superficie donde se produzcan mayor calentamiento.

#### 4.3.4 Medición de la Resistencia de Aislamiento

La medición de la resistencia se basa en la ley de Ohm. Al aplicar una tensión continua y a continuación medir la corriente en circulación, es posible determinar fácilmente el valor de la resistencia. Por principio, la resistencia del aislamiento presenta un valor muy elevado, pero no infinito, por lo tanto, mediante la medición de la débil corriente en circulación el megaóhmetro indica el valor de la resistencia del aislamiento con un resultado en  $k\Omega$ ,  $M\Omega$ ,  $G\Omega$ , incluso en  $T\Omega$  en algunos modelos. Esta resistencia muestra la



calidad del aislamiento entre dos elementos conductores y proporciona una buena indicación sobre los riesgos de circulación de corrientes de fuga.

Existe un cierto número de factores que afectan el valor de la resistencia del aislamiento, así pues, el valor de la corriente que circula cuando se aplica una tensión constante al circuito durante la prueba puede variar. Estos factores, por ejemplo, la temperatura o la humedad, pueden modificar considerablemente la medición.

#### **4.4 Partes y Componentes Sustituibles de Un Motor Eléctrico Convencional**

La premisa principal para que una máquina eléctrica sea diseñada para fines de reciclaje es que esta máquina sea fácil de montar y fácil de desmontar, de igual manera, un componente de una máquina eléctrica diseñado para fines de reciclaje debe ser un componente fácil de montar y fácil de desmontar también [14, 29]. En la actualidad, solo algunas de las partes de los motores convencionales cumplen con esta premisa, ya que, debido a la gran cantidad de partes y componentes, el proceso de montar y desmontar se hace engorroso, y dificulta el diagnóstico rápido del estado de sus piezas.

Otra característica que debe tener este tipo de máquina es que debe utilizar componentes fabricados con materiales cuyas propiedades eléctricas, magnéticas y mecánicas se mantengan o mejoren con el envejecimiento, para que los componentes de una máquina se puedan utilizar económicamente en otra.

Los componentes principales involucrados dentro del proceso de producción de la máquina eléctrica rotativa reciclable son: la carcasa, el estator, el rotor y el devanado. Estas cuatro partes tienen procesos de fabricación y comportamientos distintos a lo largo de su vida útil, por esta razón, es importante hacer un análisis de sus propiedades en cuanto al envejecimiento del núcleo ferromagnético y de las dimensiones que debe tener una máquina, para así poder determinar cuáles de estas partes son susceptibles a ser sustituibles.

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta, es el estado en que se encuentran cada uno de estos componentes luego de terminar su ciclo de vida, ya que, si fue afectada por una



falla grave, existen posibilidades que alguno de sus componentes no se pueda ser calificado como reusable, por esta razón es importante la fase de diagnóstico del estado del motor, ya que con este diagnóstico se puede conocer el tipo de reciclaje que se le va a aplicar a una pieza o componente, y en cuál de las etapas del ciclo de vida de una maquina eléctrica rotativa (figura 2.2) puede ser insertada.

A continuación, se presenta un análisis de cada una de las piezas de un motor eléctrico susceptible a ser reusadas, donde se presentan las características que deben poseer para ser insertadas en el proceso de reciclaje de una maquina eléctrica rotativa.

#### **4.4.1 Núcleos Ferromagnéticos**

Los núcleos ferromagnéticos son generalmente los componentes más grandes y pesados de una máquina eléctrica. Los núcleos magnéticos blandos para máquinas eléctricas requieren materiales magnéticos conocidos como lo es el acero al silicio o acero eléctrico. El acero es el metal más reciclado, pero cuando el acero al silicio se recicla directamente, las propiedades ferromagnéticas no se recuperan. El silicio actúa como contaminante y solo se pueden agregar pequeñas cantidades de acero al silicio en cada lote de fusión. Se necesita un procesamiento adicional para lograr recuperar sus propiedades magnéticas.

Las opciones de reciclaje de los núcleos ferromagnéticos deben evaluarse según los procesos de envejecimiento. Este envejecimiento está asociado con aumentos en la pérdida de núcleo y la corriente de magnetización. Un valor positivo del coeficiente de envejecimiento indica un aumento de las pérdidas o una disminución de la permeabilidad. Sin embargo, el revestimiento aislante entre láminas puede envejecer. [30]

Con los procesos y las técnicas adecuados, los núcleos ferromagnéticos de silicio y acero de grandes maquinas eléctricas, después del final de la vida útil pueden reutilizarse en



nuevos núcleos, si estos nuevos núcleos cumplen con las especificaciones. Además, si estos nuevos núcleos tienen las mismas garantías que los fabricados con acero al silicio virgen, el fabricante de la máquina eléctrica tendrá todas sus necesidades satisfechas. [30]

Desde la introducción de los transformadores de núcleo amorfo para la distribución de energía eléctrica en 1991, estos equipos se encuentran en desuso. En respuesta, la industria recicla los núcleos amorfos de los transformadores en ferro-boro, y ha estado operando este proceso desde 2009. La posibilidad de reciclar el ferro-boro directamente como una aleación amorfa podría hacer un circuito cerrado sostenible. [30]

Un núcleo de hierro en polvo compacto utiliza polvo de hierro, que primero se recubre con un silicato y luego se recubre con una resina. El polvo tratado se comprime y luego se calienta para que vuelva a adquirir su ductilidad. Esto da como resultado un componente central caracterizado por pérdidas generales de núcleo tan bajas como en los núcleos laminados convencionales. Al final de la vida útil de una máquina eléctrica que utiliza núcleos de hierro en polvo, el polvo de hierro podría recuperarse y reutilizarse como un material ya procesado.

#### **4.4.2 Reciclaje de la Carcasa**

Para reciclar la carcasa es necesario realizar ciertas evaluaciones previas que permitan definir su estado, conocer si es posible reciclarlas y utilizarlas dentro del flujograma del ciclo de vida de una máquina eléctrica rotativa, tal como se muestra en la figura 2.2

Las carcasas están diseñadas según el uso que tengan los equipos partiendo desde aquellas totalmente cerradas que evita el intercambio de aire entre interior y exterior de ella o no hermética totalmente al aire, así como otras especificadas según las normas NEMA. Los tipos de carcasa de un motor eléctrico tienen las siguientes características:



- Carcasa a prueba de agua (totalmente cerrada, impide el paso de agua a chorro y con medios para drenar agua al interior).
- Carcasa protegida temporal (carcasa abierta cuyos conductos de ventilación están diseñados para reducir el menor paso de lluvia, partículas en el aire y el acceso de todos estos factores a la parte eléctrica).
- Carcasa protegida aquella cuya envolvente es abierta y se tiene el acceso por medio de aberturas directamente a las partes giratorias.
- Carcasa abierta que permite el flujo de aire para ventilación y enfriamiento de los devanados de la máquina.

Todas estas definidas como se expone según su uso y en especial según el ambiente donde se amerite utilizar el equipo, por lo que las fallas que se presentan están relacionadas directamente a estos dos factores.

Por lo tanto, es necesario recurrir a una inspección inicial de la carcasa para posteriormente realizar un análisis con ultrasonido, que se realizan actualmente para detectar discontinuidades superficiales, e internas de equipos.

#### **4.4.3 Reciclaje del Rotor**

Para reutilizar y reciclar componentes tales como rotores de una máquina eléctrica se deben seleccionar rigurosamente y someter a diagnósticos, con el objeto de evaluar su calificación como reusable o reciclable en su valor más pobre. Las metodologías para las pruebas de aceptación aquí descritas están típicamente enmarcadas como las requeridas para el diagnóstico de los componentes a ser evaluados.

Los procedimientos aplicados para el reciclaje de rotores incluyen protocolos que permiten el despistaje en la detección de fallas de origen mecánico y eléctrico (ejemplo: barras rotas en rotores de jaula de ardilla) así se tiene un análisis teórico y métodos experimentales de diagnóstico a objeto de reutilizar sus componentes.



Las metodologías y pruebas para la aceptación eléctricas y mecánicas del rotor utilizado en motores, incluyen:

- Inspección visual: Se inicia con la preparación del rotor mecánicamente después de ser separado del estator y se buscan diferentes síntomas de avería visual en el equipo como: grietas, huecos o porosidad, quemaduras, laminados descoloridos o alta concentración de contrapesos
- Prueba de ultrasonido
- Óhmetro de baja resistencia, esta medición indicará cuanta degradación existe, o se está creando dentro del componente a medir. Los cambios en el valor de un elemento de baja resistencia son una de las mejores y más rápidas indicaciones de que está ocurriendo una degradación entre dos puntos de contacto.

#### 4.4.4 Reciclaje del Estator

El núcleo del estator está formado por laminaciones, aisladas entre sí para facilitar el flujo magnético en el sentido radial. Las láminas se traslapan para formar un cilindro donde tienen troqueladas las ranuras y los elementos de sujeción. Si bien la periferia del núcleo puede estar en corto circuito, no así la zona adyacente a las ranuras. Los extremos del núcleo se sujetan mecánicamente por lo que se conoce coloquialmente como “dedos de sujeción”. “Se debe evitar que haya puntos adicionales de conexión o contacto entre láminas, para evitar la inducción de corrientes parásitas que podrían generar concentraciones puntuales de calor adicional, contribuyendo al deterioro de la aislación del bobinado estático” [31]

Algunas de las normas tomadas como base para el análisis de las condiciones del núcleo ferromagnético en estatores con los propósitos de ser reciclable han sido tomadas a partir de las siguientes normas:



- **IEEE 56-1997** Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10000kVA and Larger).
- **IEEE114-2001** Standard Test Procedure for Single-Phase Induction Motors.
- **IEEE115-1995** (R2002) Guide: Test Procedures for Synchronous Machines.
- **IEEE 432-1992** Guide for Insulation Maintenance for Rotating Electric Machinery, 5HP to less than 10000HP
- **IEEE 1068-2009** Standard for the Repair and Rewinding of AC Electric Motors in the Petroleum, Chemical and Process Industries

Las pruebas de aceptación aquí descritas son al menos las mínimas a ser usadas para reciclar el estator de máquinas eléctricas rotativas basadas con el principio de seleccionar rigurosamente este componente y someterlo a diagnóstico y calificación como reusable o reciclable. Para el estator las pruebas son las siguientes:

- Inspección visual: se realiza de forma rápida, fácil y sencilla, permite establecer condiciones de estrés ambiental, eléctrico, térmico, mecánico a las cuales ha sido sometido el estator, por lo tanto permite verificar evidencias visuales de: raspones o golpes en la superficie del núcleo, perforaciones o quemaduras en la superficie del núcleo, calentamiento y perforaciones adyacentes en los dientes del núcleo, separadores de conductos de ventilación sueltos o rotos, calentamiento de los terminales de las placas del núcleo.
- Prueba a flujo nominal

#### **4.4.5 Reciclaje del Devanado**

Los conductores de cobre que conforman el devanado permiten la circulación de corriente de excitación en las bobinas del estator y la inducción magnética del campo rotante en el núcleo estatórico. Estos conductores, deberán estar envueltos con alguna capa o material aislante que evite cortocircuitos o contacto eléctrico entre las partes metálicas de la máquina, tales como la carcasa, evitar que los conductores estén en contacto entre ellos



y/o a tierra, y además de evitar que el campo magnético tome caminos indeseados de fuga, permitiendo la debida operación de la máquina, para de esta manera poder preservar la vida útil del arrollado, y por consecuencia la vida útil del motor.

Los motores de inducción poseen en su interior un devanado de alambre de cobre que a su vez está constituido por dos bobinas independientes. El funcionamiento óptimo del motor depende entre otras cosas, del estado en que se encuentren dichas bobinas de modo que, ante el mínimo desperfecto en ellas, el motor evidenciará baja en su rendimiento y posiblemente un incremento de temperatura que se traduce también en un consumo superior al normal. Para averiguar el estado de las bobinas de un motor de este tipo, entre otras cosas es necesario comprobarlas mediante la medición de su resistencia y la inspección visual para ver si los conductores presentan algún daño.

Luego de hacer este análisis, se muestra una tabla donde se plasman las consideraciones que se deben tomar en cuenta para que una pieza sea considerada sustituible en una maquina susceptible a ser reciclada.

**Tabla 4.2** Piezas reemplazables de un motor eléctrico convencional.

Pieza del Motor	Consideraciones a tomar en cuenta para que la pieza pueda ser sustituible	
	Aspectos que deben evaluarse	Pruebas que deben realizarse
<b>Carcasa</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Estado físico</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Inspección visual</li><li>• Ultrasonido</li></ul>
<b>Estator</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Estado físico</li><li>• Envejecimiento del material</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Inspección visual</li><li>• Prueba de flujo nominal</li></ul>
<b>Rotor</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Estado físico</li><li>• Envejecimiento del material</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Inspección visual</li><li>• Ultrasonido</li><li>• Medición de resistividad</li></ul>
<b>Devanado</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Estado físico de los conductores, aislante eléctrico y los orificios</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Inspección visual</li><li>• Medición de resistividad</li></ul>

Fuente: Y Sequera (2021)



## 4.5 Dificultades Para Reciclar las Partes de un Motor Eléctrico Convencional

Luego de haber descritos los elementos susceptibles al reciclado de un motor eléctrico convencional, estudiar sus posibles fallas y establecer los métodos para un diagnóstico de cada una de sus piezas cuando este presenta alguna anomalía, se propone enumerar cuales son las dificultades para poder reciclar las partes de dicha máquina, desde el punto de vista de las dimensiones en la construcción de un motor, ya que es un tema fundamental en el proceso del reciclaje.

Antes de seguir con el análisis, es importante conocer que las normas internacionales tales como la norma IEC 60072 [32], es una aproximación a las dimensiones para distintos tamaños dependiendo de la potencia; la norma IEC 60034 [33], es la norma fundamental para las pruebas relevantes a cada una de las partes que conforman las máquinas y la norma NEMA MG. 1-1998 [34], es la que permite relacionar de forma más directa y dependiendo de la aplicación, las dimensiones de las máquinas eléctricas.

### 4.5.1 Dimensiones del Núcleo y del Rotor de un Motor Eléctrico

El paso inicial en el diseño de un motor de inducción requiere una especificación de rendimiento. Los datos principales que necesita el ingeniero de diseño son la potencia, el factor de potencia, el voltaje de línea, corriente de arranque, frecuencia, número de fases, aumento de la temperatura de los devanados y núcleos, velocidad nominal e inercia. [14]

El diseño puede comenzar con un estudio dimensional amplio, como, por ejemplo, un análisis del coeficiente de salida, definido como:

$$\xi_1 = \frac{P}{D_g^2 L_c N} \quad (1)$$

donde:

$P$ : Potencia nominal



$D_g$ : Diámetro del entrehierro

$L_c$ : Longitud bruta del núcleo del estator

$N$ : velocidad sincrónica

$\xi_1$  es aproximadamente constante dentro de ciertos rangos. Por lo tanto, es posible relacionar el volumen del rotor, la velocidad sincrónica y la potencia. Por lo tanto, los diámetros internos del rotor y el estator se pueden estandarizar. El diámetro exterior del estator sigue una relación similar.

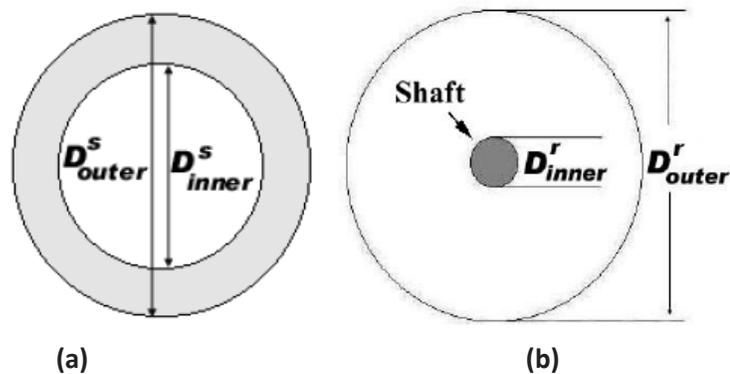
$$\xi_2 = \frac{P}{D_0^3 L_c N} \quad (2)$$

donde:

$D_0$ : Diámetro exterior del estator

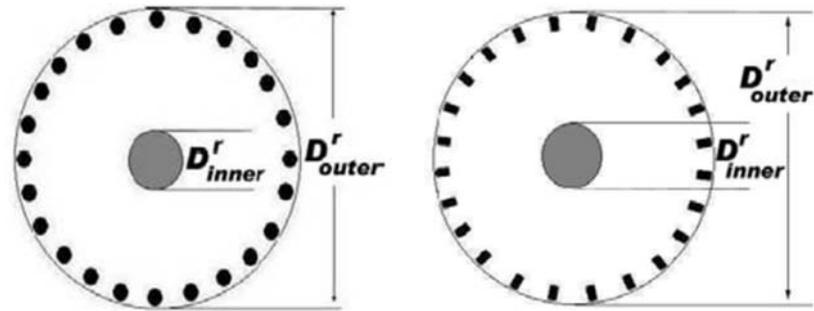
$\xi_2$  es aproximadamente constante dentro de ciertos rangos también.

Por consiguiente, el diámetro externo del núcleo del estator está estrechamente relacionado con el diámetro interno del núcleo del estator y el diámetro externo del núcleo del rotor. Para lograr la potencia necesaria se puede variar la longitud. Las dimensiones de las ranuras también deben estar estandarizadas si las placas ferromagnéticas se van a reutilizar. Las figuras 4.5 y 4.6 muestran los diámetros del núcleo ferromagnético interno y externo considerados.



**Figura 4.5** (a) Diámetros interno y externo del núcleo del estator. (b) diámetros del núcleo sólido del rotor

Fuente: R. Hernández, J. Salinas y J. Pacheco (2000)



**Figura 4.6** (a) Diámetros del núcleo del rotor de jaula de ardilla. (b) . Diámetros del núcleo del rotor bobinado

Fuente: R. Hernández, J. Salinas y J. Pacheco (2000)

#### 4.5.1 Dimensiones de un Rotor Jaula de Ardilla

El rotor de la jaula de ardilla es un componente de un motor de inducción donde el bobinado y el núcleo no se pueden desmontar fácilmente. La reutilización del rotor de jaula de ardilla ensamblado es una manera práctica de manejar el reciclaje de este componente.

Idealmente, los rotores de jaula de ardilla deberían intercambiarse con máquinas de la misma capacidad y diferentes fabricantes. Para lograr este objetivo, los núcleos del estator y el rotor deben tener dimensiones estándar, es decir, longitud de las partes activas, diámetros y espacios de aire. Las dimensiones de las jaulas de ardilla y el sistema de enfriamiento del rotor también deben cumplir con las normas. [2]

Las normas IEC y NEMA son indicativos de los esfuerzos que se realizan diariamente para establecer normativas a nivel internacional y así establecer que los fabricantes tengan el mismo lenguaje.

En la Figura 4.7, se presenta los entrehierros estándar sugeridas para motores de inducción en función de la potencia mecánica y la velocidad síncrona para motores de inducción de tamaño mediano, construcción totalmente cerrada, aislamiento de clase B



(diseño B) y 60 hertzios. Estos entrehierros se determinaron utilizando ecuaciones empíricas y ajustes de la experiencia [2].

Power/Hp	Synchronous speed (rpm)			
	3600	1800	1200	900
1	0.4	0.3	0.3	0.3
1.5	0.4	0.3	0.3	0.3
2	0.4	0.3	0.3	0.3
3	0.4	0.3	0.3	0.3
5	0.5	0.4	0.4	0.4
7	0.5	0.4	0.4	0.4
10	0.6	0.4	0.4	0.4
15	0.6	0.4	0.4	0.4
20	0.7	0.5	0.5	0.5
25	0.7	0.5	0.5	0.5
30	0.7	0.5	0.5	0.5
40	0.8	0.6	0.6	0.6
50	0.9	0.6	0.6	0.6
60	0.9	0.6	0.6	0.6
75	1.0	0.7	0.7	0.7
100	1.1	0.7	0.7	0.7
125	1.2	0.8	0.8	0.8
150	1.2	0.8	0.8	0.8

**Figura 4.7** Espacios estándar de aire sugeridos en motores de inducción (mm) (motores de inducción totalmente cerrados)  
Fuente: R. Hernández y J. Pacheco (2016)

Las dimensiones estándar de montaje externo y los tipos de producción más comunes de los motores de inducción de tamaño mediano se definen en las normas IEC y NEMA para garantizar la intercambiabilidad de las máquinas [35, 36, 37]. Estudios proponen [3] agregar a estas dimensiones estándar, tres dimensiones internas: el espacio de aire, el diámetro del rotor y la longitud activa del estator ferromagnético para motores de inducción específicos y de producción más comunes. El espacio de aire podría medirse en milímetros y definirse hasta una décima de milímetro. Por ejemplo, un espacio de aire de 0,9 mm puede denominarse espacio de aire del medidor 9. Además, un espacio de aire de 1,6 mm podría denominarse espacio de aire del medidor 16. El diámetro del rotor también podría medirse en milímetros y definirse hasta un milímetro. Por ejemplo, un diámetro de rotor de 254 mm se designará como calibre de diámetro de rotor 254. La longitud activa del estator ferromagnético también podría medirse en milímetros y definirse hasta un milímetro



utilizando los mismos calibres. En la figura 4.8, se presentan los diámetros estándar sugeridos por este estudio, para los rotores de jaula de ardilla y en la figura 4.9, longitudes activas ferromagnéticas de rotor estándar sugeridas para las mismas máquinas como se describe para la figura 4.7 [2].

Power/Hp	Synchronous speed (rpm)			
	3600	1800	1200	900
1	50	66	80	90
1.5	54	76	91	104
2	60	83	100	114
3	68	95	115	130
5	81	113	136	155
7	89	131	152	173
10	98	141	186	195
15	110	156	203	225
20	119	169	216	242
25	125	178	223	261
30	131	189	236	277
40	142	203	255	299
50	153	216	270	317
60	162	228	287	337
75	174	245	307	361
100	192	269	321	372
125	202	290	342	398
150	212	293	361	421

**Figura 4.8** Diámetros estándar sugeridos Rotores de jaula de ardilla (mm)  
(motores de inducción totalmente cerrados, sin canales de refrigeración)  
Fuente: R. Hernández y J. Pacheco (2016)

Power/Hp	Synchronous speed (rpm)			
	3600	1800	1200	900
1	79	65	60	56
1.5	84	74	68	64
2	93	82	75	70
3	106	94	86	81
5	125	111	102	96
7	138	129	114	107
10	152	139	140	121
15	171	154	153	139
20	185	166	162	150
25	195	175	167	162
30	205	186	177	172
40	222	200	192	185
50	238	212	203	197
60	253	225	215	209
75	272	241	231	224
100	299	265	241	230
125	315	285	256	247
150	330	288	271	261

**Figura 4.9** Longitudes efectivas sugeridas Rotores de jaula de ardilla (mm)  
(motores de inducción totalmente cerrados, sin canales de refrigeración)  
Fuente: R. Hernández y J. Pacheco (2016)



En el estudio se acota que los tamaños estándar (Figura 4.7,4.8 y 4.9) no se consideran los valores de voltaje, los requerimientos de par de arranque, las aplicaciones especiales, los valores específicos de KVA / HP o atmosféricos, pero considera que las máquinas eléctricas deben fabricarse con dimensiones estándar para desarrolladas y lograr reducciones de costos en su fabricación.

## **4.6 Materiales Ferromagnéticos Modernos**

### **4.6.1 Análisis de Propiedades de Materiales Ferromagnéticos Modernos para el Diseño Maquinas Eléctricas**

Las aplicaciones de las máquinas eléctricas modernas abarcan una amplia gama, desde pequeños generadores de alta velocidad hasta motores de vehículos eléctricos híbridos. El rendimiento mejorado y la minimización del peso son dos de los criterios entre otros parámetros que llevan los diseños de máquinas eléctricas a un nivel mayor de utilización. El material magnético en una máquina eléctrica es uno de los elementos principales dentro del proceso de conversión de energía que tiene una influencia significativa en el diseño. El peso de los materiales magnéticos y las propiedades magnéticas influyen significativamente en la eficiencia y densidad de potencia de la máquina. Hasta la fecha se han investigado diferentes clases de materiales magnéticos y son principalmente materiales magnéticos blandos. Se trata de un grupo de materiales con propiedades ferromagnéticas con coercitividad  $H_c$  inferior a 1000 A/m. Los materiales magnéticos blandos se pueden clasificar como:

1. Aleaciones magnéticas blandas
2. Compuestos magnéticos blandos
3. Metal amorfo

Entre los objetivos de este trabajo esta revisar la aplicación de estos materiales en diseños recientes de máquinas eléctricas, el uso de nuevas formas de materiales y el de estructuras de núcleo novedosas que pueden mejorar la capacidad de fabricación y una



mayor eficiencia para poder evaluar si sus componentes pueden ser reciclados. Las tres categorías de materiales diferentes anteriores se muestran a continuación:

#### **4.6.1.1 Diseño de Maquinas Eléctricas con Aleaciones Magnéticas Blandas**

Las aleaciones magnéticas blandas, en particular las aleaciones de hierro (Fe) y silicio (Si), se han utilizado tradicionalmente para la fabricación de máquinas eléctricas. Las aleaciones magnéticas blandas de Si-Fe se pueden dividir en acero de grano orientado (GO) y acero de grano no orientado (no GO).

##### **4.6.1.1.1 Acero de Grano Orientado**

El acero de grano orientado tiene propiedades magnéticas uniformes en la dirección de laminación y no se usa comúnmente para el diseño de máquinas eléctricas. Sin embargo, investigaciones recientes demuestran el desarrollo de una máquina de reluctancia síncrona (SyncRel) con un rotor laminado axialmente con acero GO [38,39], de igual forma, otras publicaciones informan sobre el estudio de una máquina que utiliza acero de grano doble orientado. [40,41]. La máquina de flujo axial desarrollada con acero GO tiene pérdidas en el estator siete veces menores y tienen mayores pérdidas en el núcleo. Las propiedades anisotrópicas del acero GO no se han utilizado hasta la fecha en el diseño de máquinas, por esta razón, esta aleación es descartada para ser considerado como material para ser utilizado en un prototipo de una maquina reciclable por su alto costo y su poco avance en los estudios en esta materia.

##### **4.6.1.1.2. Acero de Grano No Orientado**

El acero de grano no orientado tiene propiedades magnéticas uniformes en todas las direcciones y ha sido el material principal para diseños de máquinas eléctricas. Las aleaciones de Si-Fe típicamente con 1% a 3,5% de Si se utilizan para máquinas eléctricas que operan en campos magnéticos giratorios con frecuencias de 50 Hz a 400 Hz. Sin embargo, con la necesidad de una densidad de potencia mejorada, la máquina puede diseñarse con un peso de núcleo más bajo si se aumentan las densidades de flujo del núcleo.



Como resultado, se utilizan aleaciones magnéticas blandas como los materiales Co-Fe y Ni-Fe [42,43]. Además, las máquinas de alta velocidad requieren la operación del núcleo a flujos de alta frecuencia y esto requiere material de baja pérdida. El acero con alto contenido de Si, por ejemplo, Si-Fe con 6,5% de Si, se ha utilizado en tales aplicaciones [45] y se ha comparado con diseños de Co-Fe. Sin embargo, se encuentra que Ni-Fe ofrece menores pérdidas en el núcleo. Las pruebas experimentales realizadas en [42] muestran que las pérdidas del núcleo de Ni-Fe son del 10% de las del material de Si -Fe a 50 Hz y 200 Hz y esto lo hace un fuerte candidato para su aplicación en el diseño de máquinas de alta velocidad, el cual no es nuestro caso, debido a que en este trabajo se plantean motores de frecuencia para de uso residencial y en la pequeña industrial, de igual manera, el diseño de máquinas eléctricas que utilizan estos materiales no han sido ampliamente investigados debido principalmente a sus propiedades mecánicas.

Es importante destacar que el uso de combinaciones de diferentes materiales magnéticos en un diseño de núcleo, por ejemplo, con laminaciones de diferentes propiedades magnéticas, permitirá compensar las pérdidas del núcleo. Esto permitirá, por lo tanto, una dimensión adicional para la optimización de máquinas eléctricas y se prevé como un área de investigación de desarrollo futuro. [45]

#### **4.6.1.2 Diseño de Maquinas Eléctricas con Compuestos Magnéticos Blandos (SMC)**

La fabricación de núcleos de máquinas eléctricas con materiales compuestos magnéticos blandos (SMC) ha sido investigada hasta la fecha por diferentes investigadores. Los SMC son partículas de hierro formadas como núcleo con diferentes tecnologías de fabricación. Las técnicas de fabricación del núcleo de SMC incluyen prensar las partículas de hierro, también denominado sinterización (proceso de fabricación de piezas sólidas moldeadas que consiste en compactar a alta presión varios polvos metálicos y/o cerámicos mezclados homogéneamente) o unir partículas de hierro con resina o polímero. El principal beneficio de los SMC para el diseño de máquinas eléctricas es que con este material se pueden construir núcleos con formas complejas. Además, el peso del núcleo será menor y el proceso de fabricación será menos complicado. Sin embargo, se ha descubierto que los



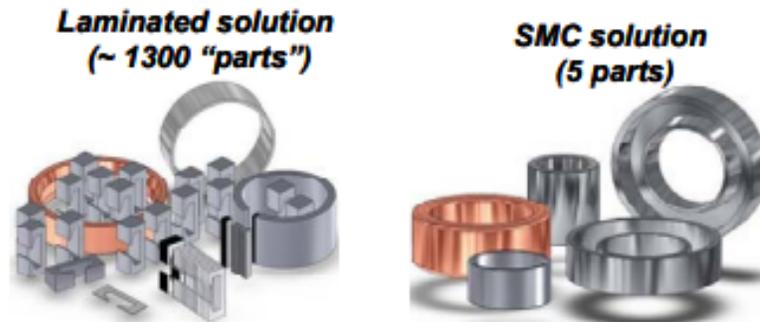
inconvenientes del material, como los bajos valores de permeabilidad y la baja saturación por inducción, reducen el rendimiento de una máquina en comparación con una máquina fabricada a partir de Si-Fe laminado [46].

Estudios demuestran que un motor DC fabricado con material SMC ‘*Somaloy*’ presenta una mayor densidad y menores pérdidas debido a una mayor presión de compresión SMC. También se ha descubierto que el motor DC con núcleo SMC logra un 15,2% más de eficiencia que el motor DC de acero laminado [47]. De igual forma, se han desarrollado máquinas con núcleos SMC como la de rotor de mandíbula y la de flujo transversal que tienen como ventaja principal la capacidad de reducir las pérdidas por corrientes parásitas con material SMC. Investigadores desarrollaron un motor de imán permanente (PM) combinado axial-radial con materiales SMC donde la ruta de flujo tridimensional se forma mediante el uso de un núcleo SMC y sus propiedades isotrópicas [48]. El motor estudiado tiene una gran área de PM y alcanza una densidad de par de 1,2 Nm / kg, comparable con los motores de inducción (IM) comerciales. Sin embargo, se encuentra que la carga eléctrica en el mismo punto de operación es solo 1/3 de la de un IM, lo que indica pérdidas más bajas y una mayor eficiencia potencial con máquinas basadas en SMC.

Según estas investigaciones, el material SMC parece ser mejor para aplicaciones de alta frecuencia y baja densidad de flujo. Por lo tanto, los SMC pueden considerarse una tecnología más adecuada para máquinas de alta velocidad. Sin embargo, la resistencia mecánica, capacidad de resistencia a las vibraciones, la degradación mecánica, la vida útil y la degradación potencial de las propiedades electromagnéticas de los SMC en las máquinas eléctricas no se han abordado en detalle y siguen siendo un área de investigación en la actualidad.

La ventaja más llamativa del uso de SMC en máquinas lineales es desde el punto de vista de su fabricación. En la figura 4.10 se muestra claramente que se puede reducir el número de piezas y simplificar el montaje y desmontaje cambiando de laminado a SMC, haciendo más fácil el reciclaje de sus partes. Además, modificando realmente el diseño para

SMC, el rendimiento no solo podría igualarse sino también mejorarse [49]. Todas estas ventajas harían a este material un candidato ideal para la fabricación de un motor eléctrico con piezas reciclables según nuestro estudio, pero faltaría profundizar más en las investigaciones en cuanto a la aplicación en máquinas AC y la velocidad.



**Figura 4.10.** Piezas necesarias para las soluciones laminada y SMC  
Fuente: O. Andersson y P. Hofecker (2009)

#### 4.6.1.3 Diseño de Maquinas Eléctricas con Materiales Magnéticos Amorfos

Los materiales magnéticos amorfos (AMM) se han utilizado ampliamente para el diseño de transformadores de potencia y se ha demostrado que logran altas eficiencias [50]. Uno de los principales problemas con este tipo de material es su dureza, ya que resulta complicado trabajar con este tipo de material y es un problema la fabricación de máquinas rotativas basadas en AMM si se compara con el de la construcción de transformadores, principalmente debido a características en el núcleo como ranuras que requieren un corte de precisión. Se ha descubierto que las nuevas estructuras de máquinas eléctricas y las técnicas de fabricación desarrolladas recientemente disminuyen estos problemas [51]. Los resultados presentados por investigaciones, demuestran la ventaja de segmentar las partes magnéticamente influyentes de una máquina eléctrica y fabricar estos componentes con materiales especializados, logrando así un mayor rendimiento. Se prevé que investigaciones futuras en el uso de materiales magnéticos para máquinas eléctricas pueda tener beneficios al adoptar técnicas de fabricación que utilicen diferentes propiedades del material para diferentes piezas de la máquina. Sin embargo, el enfoque de segmentación da como



resultado pérdidas adicionales y un rendimiento inferior al esperado debido al cambio de propiedades magnéticas debido al sellado y encubrimiento del acero eléctrico, y al deterioro potencial de los materiales magnéticos [52].

En general, la densidad de flujo de saturación de los AMM es baja en comparación con los materiales de Si-Fe y SMC. Como resultado, se espera que la densidad de potencia de las máquinas eléctricas diseñadas con AMM logre una densidad de potencia baja. Sin embargo, las pérdidas de núcleo comparativamente bajas en los AMM son considerablemente más bajas que las de los materiales SMC y Si-Fe. Por lo tanto, se considera que los AMM son más adecuados para máquinas eléctricas de alta velocidad y máquinas que operan a altas frecuencias, como en aviones y barcos.

**Tabla 4.3 Materiales ferromagnéticos modernos que puedan ser utilizados para la producción de piezas para motores de inducción**

<b>Material</b>		<b>Características descubiertas por estudios realizados recientemente</b>
<b>Compuestos Magnéticos Blandos (SMC)</b>		<ul style="list-style-type: none"><li>• Se han desarrollado máquinas con núcleos SMC como la de rotor de mandíbula y la de flujo transversal que tienen como ventaja principal la capacidad de reducir las pérdidas por corrientes parásitas</li><li>• Se mejora la fabricación ya que se puede reducir el número de piezas, simplificando el montaje y desmontaje, haciendo más fácil el reciclaje de sus partes</li><li>• El material SMC parece ser mejor para aplicaciones de alta frecuencia y baja densidad de flujo. Por lo tanto, los SMC pueden considerarse una tecnología más adecuada para máquinas de alta velocidad</li><li>• La resistencia mecánica, la capacidad de resistencia a las vibraciones, la degradación mecánica, la vida útil y la degradación potencial de las propiedades electromagnéticas de los SMC en las máquinas eléctricas no se han abordado en detalle y siguen siendo un área de investigación en la actualidad</li></ul>
<b>Aleaciones</b>	<b>Acero de</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de una máquina de reluctancia síncrona (SyncRel) con un</li></ul>



<b>Magnéticas</b> <b>Blandas</b>	<b>Grano Orientado</b>	rotor laminado axialmente con acero GO <ul style="list-style-type: none"><li>• Uso en una máquina que utiliza acero de grano doble orientado</li><li>• Diseños de máquinas de reluctancia y nuevas técnicas para adaptarse al debilitamiento del campo en máquinas de alta velocidad tendrán una aplicación potencial para el acero GO</li></ul>
	<b>Acero de Grano No Orientado</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se comienzan a utilizar junto a nuevas aleaciones magnéticas blandas como los materiales Co-Fe y Ni-Fe</li><li>• Pruebas experimentales demuestran que la reducción de las pérdidas en el núcleo utilizando un acero con alto contenido de Si, lo hace un fuerte candidato para su aplicación en el diseño de máquinas de alta velocidad</li><li>• El diseño de máquinas eléctricas que utilizan estos materiales no ha sido ampliamente investigado debido principalmente a sus propiedades mecánicas</li></ul>
<b>Metal Amorfo</b>		<ul style="list-style-type: none"><li>• Se ha descubierto que las nuevas estructuras de máquinas eléctricas y las técnicas de fabricación desarrolladas recientemente disminuyen los problemas de dureza</li><li>• Se han adoptado técnicas de fabricación que utilicen diferentes materiales para distintas piezas de la máquina</li><li>• Se ha demostrado la ventaja de segmentar las partes magnéticamente influyentes de una máquina eléctrica, sin embargo, este enfoque da como resultado pérdidas adicionales y un rendimiento inferior al esperado debido al cambio de propiedades magnéticas</li></ul>

Fuente: Y. Sequera (2021)

#### 4.6.2. Estudio del Envejecimiento Térmico de Materiales Ferromagnéticos

Todos los materiales ferromagnéticos muestran deterioro de las propiedades relacionadas con magnetismo, tales como la magnetización y magnetostricción al aumentar la temperatura, como resultado de la pérdida gradual del orden magnético cuando se acercan a la temperatura de Curie ( $T_c$ ), que es la temperatura en cual un cuerpo ferromagnético pierde su magnetismo, comportándose como un material puramente



paramagnético. Este aumento de temperatura produce pérdidas en el núcleo durante la vida útil de los materiales magnéticos y se conoce como "envejecimiento".

A pesar de lo dicho anteriormente, es tecnológicamente posible encontrar materiales magnéticos que pueden resistir tal deterioro del magnetismo cuando operan a temperaturas elevadas y mantienen un magnetismo estable hasta su  $T_c$ , pero esto parece ir en contra de las ideas convencionales sobre el ferromagnetismo. Este tipo de materiales son muy deseables en aplicaciones de aeronaves, sistemas espaciales y de defensa. En lo que concierne a nuestra investigación, es necesario conocer el estado de envejecimiento en que se encuentra el material ferromagnético con que se fabrica un motor eléctrico luego de cierto tiempo de uso para de esta manera poder evaluar si sus componentes puedan ser intercambiados y reutilizados.

#### 4.6.2.1 Investigaciones de la NASA

A pesar de los pocos estudios de envejecimiento en los materiales ferromagnéticos, la agencia estadounidense encargada de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), desarrollo una investigación sobre materiales magnéticos para sistemas avanzados de energía eléctrica espacial [52,53], que incluye materiales magnéticos mejorados que puedan trabajar bajo un alto estrés térmico, y cuyos resultados se estudiaran para el logro de los objetivos propuestos en este proyecto de grado.

Las investigaciones de la NASA tuvieron como objetivo principal el estudio de materiales magnéticos en la aplicación de generadores o motores en sistemas de energía eléctrica espacial, haciendo hincapié en mejorar el rendimiento de materiales a altas temperaturas, preservando las propiedades magnéticas útiles. En el estudio se evaluó:

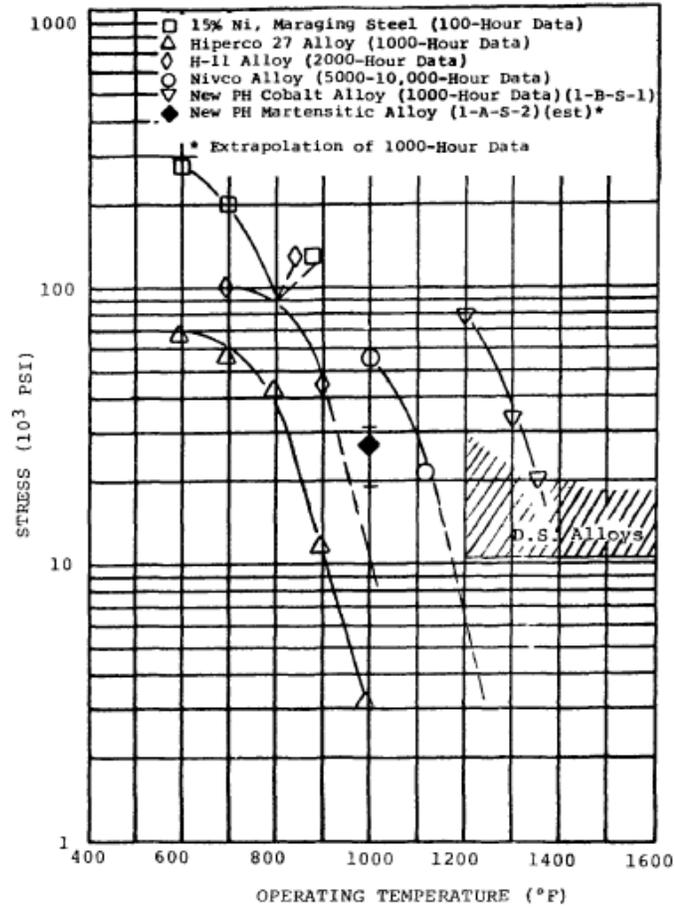
1. La composición de aleaciones que tienen alta resistencia en elevadas temperaturas de  $1100\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $593,33\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
2. La viabilidad de elevar temperaturas para aplicaciones magnéticas



3. La posibilidad de reforzar la dispersión en materiales magnéticas para lograr propiedades magnéticas y mecánicas útiles en el rango de temperatura  $1200$  a  $1600$  °F ( $648,88$  a  $871,11$  °C)
4. Realizar ensayos de aleación *Nivco* (72% Co, 23% Ni y otros materiales), ya que es el material que además de estar actualmente disponible, presenta la temperatura de aplicación más alta para trabajar bajo estrés magnético
5. realizar una evaluación de materiales eléctricos y componentes a altas temperaturas ( $1300$  °F o  $704,44$  °C) para estatores trifásicos, transformadores monofásico y solenoides

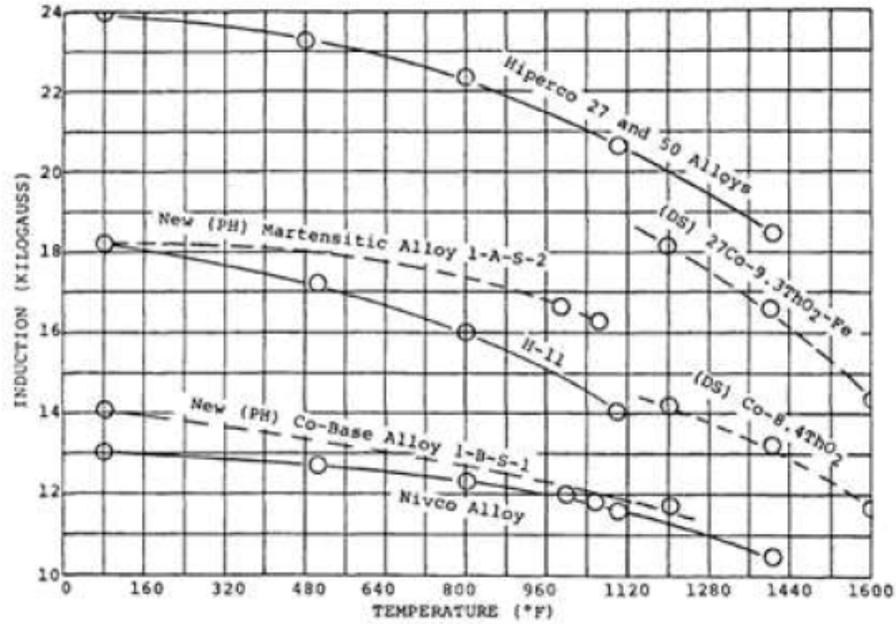
La investigación desarrollo cuatro aleaciones magnéticas, dos que funcionan en el rango de temperaturas de  $1000$  a  $1200$  °F ( $537,77$  a  $648,88$  °C), y son aplicables en dispositivos eléctricos rotatorios, una es la tipo *martensítico* (acero inoxidable aleado con cromo y otros elementos) y la otra a base de cobalto; ambas superaron las propiedades magnéticas y mecánicas respecto a las aleaciones disponibles comercialmente. Las otras dos aleaciones restantes, son las que se utilizan para reforzar la dispersión, y su aplicación se desarrolla en el rango de temperaturas desde  $1200$  a  $1600$  °F ( $648,88$  a  $871,11$  °C) en dispositivos eléctricos rotatorios, la primera es a base de cobalto y la otro con *Fe-27Co*, donde, éste último desarrolló valores de saturación un 25% más alto que el de base de cobalto a  $1200$  °F ( $648,88$  °C), mientras que logró un 50% por encima a temperaturas de  $1600$ °F ( $871,11$  °C) si se compara con la aleación *Nivco* [52].

Al comparar las propiedades de los materiales luego 10.000 horas bajo estrés térmico, de tres aleaciones experimentales (extrapolaciones de *Larson-Miller*) con dos aleaciones comerciales (*H-II* y *Nivco*), se observa que la aleación martensítica (*PH*) tiene capacidades de temperatura más alta que *H-II*, mientras que la de base de cobalto (*I-B-S-I*) mejora con respecto a la de *Nivco*. Estos resultados se pueden observar en la figura 4.11. Con los resultados obtenidos de las pruebas experimentales de los materiales propuestos y los existentes comercialmente, la investigación concluye, que estos materiales pueden ser sustituidos en la construcción de máquinas eléctricas utilizados en aeronaves espaciales.



**Figura 4.11.** Comparación del estrés basado en la extrapolación del parámetro *Larson Miller* en los materiales desarrollados con respecto a los comerciales  
Fuente: P. Kueser y J. Toth (1973)

Con respecto al estudio de la inducción magnética [53], los resultados de la investigación de la NASA muestran una mejora de esta propiedad en las aleaciones propuestas (la martensítica y a base de cobalto) sobre las comerciales (*H-II* y *Nivco*). Los resultados se pueden apreciar en la figura 4.12



**Figura 4.12.** Comparación de la inducción magnética vs. temperatura en los materiales desarrollados con respecto a los existentes comercialmente  
Fuente: P. Kueser y J. Toth (1973)

En cuanto al análisis de materiales eléctricos y componentes a altas temperaturas ( $1300\text{ }^{\circ}\text{F}$  o  $704,44\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) para estatores trifásicos, transformadores monofásico y solenoides, los resultados más valorados para nuestra investigación fue la del estator, para esta prueba se utilizó  $\text{Fe-27\% Co}$  laminado a  $0.008$  pulgadas de espesor y se realizó un ensayo de vacío térmico de 10.000 horas a  $1300\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $704,44\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), hallando una ligera adherencia entre laminaciones adyacentes en lugares aleatorios [53].

También se realizó un estudio intersticial (de grietas o rajadas) para las láminas donde se observó que el nivel de oxígeno en la laminación envejecida aumenta considerablemente [53]. El contenido de nitrógeno también aumenta, pero en menor grado y a su vez, el contenido de carbono de la laminación envejecida era la mitad de la que contenía el material previo a la prueba.



**Tabla 4.4. Características resultantes de la aplicación de altas temperaturas a materiales magnéticos propuestos para la fabricación de máquinas eléctricas aeroespaciales y su comparación con los utilizados comercialmente**

Rango de temperatura	Material Comercial	Material Propuesto	Observaciones
<i>800-1000°F</i> (426,66-537,77 °C)	<i>H-II</i> (Fe-5Cr-1Mo-1V)	<i>I-A-S-2</i> (Fe-12Ni-30Co-1W-3Ta-0.4Al-0.4Ti)	Aleación endurecida por precipitación con capacidad de sobrecarga eléctrica mejorada, mayor resistencia a la fluencia, mejor estabilidad
<i>1000-1200°F</i> (537,77-648,88°C)	<i>Nivco Alloy</i> (Co-23Ni-1.7Ti-0.4Al-0.2Zr)	<i>I-B-S-1</i> (Co-5Fe-15Ni-1.25Al-5Ta-0.2Zr)	Aleación endurecida por precipitación con mejor resistencia a la fluencia, mejor estabilidad
<i>1200-1350°F</i> (648,88-732,22°C)	No Hay	<i>DS</i> 27Co-9.3ThO <sub>2</sub> -Fe	Aleación reforzada por dispersión que proporciona un material estable de alta temperatura que no está disponible ahora
<i>1350-1600 °F</i> (732,22-871,11°C)	No Hay	<i>DS 8.4ThO<sub>2</sub>-Co</i>	Aleación reforzada por dispersión que proporciona un material estable de alta temperatura que no está disponible ahora

Fuente: Y. Sequera (2021)

Del estudio de la investigación de la NASA, se puede concluir que existen materiales magnéticos cuyas propiedades no son afectadas al estar expuestas a un continuo estrés térmico, y en algunos casos hasta sus propiedades mejoran. Esta es una característica que se es muy valorada para la fabricación de motores eléctrico susceptible a ser reciclados, ya que si sus propiedades magnéticas se mantienen, sus piezas pueden ser reutilizables en otra máquina, pero los materiales que se estudiaron son inviables en nuestro caso, debido a que la aplicación que se les dan a estos materiales son diferentes a la de un motor pequeño para equipos electrodomésticos y en otros casos, el costo para la fabricación de un motor eléctrico de baja potencia sería muy alto y poco factible económicamente.



#### 4.6.2.2 Efecto de las Impurezas sobre el Envejecimiento de Materiales Magnéticos Blandos Sinterizados

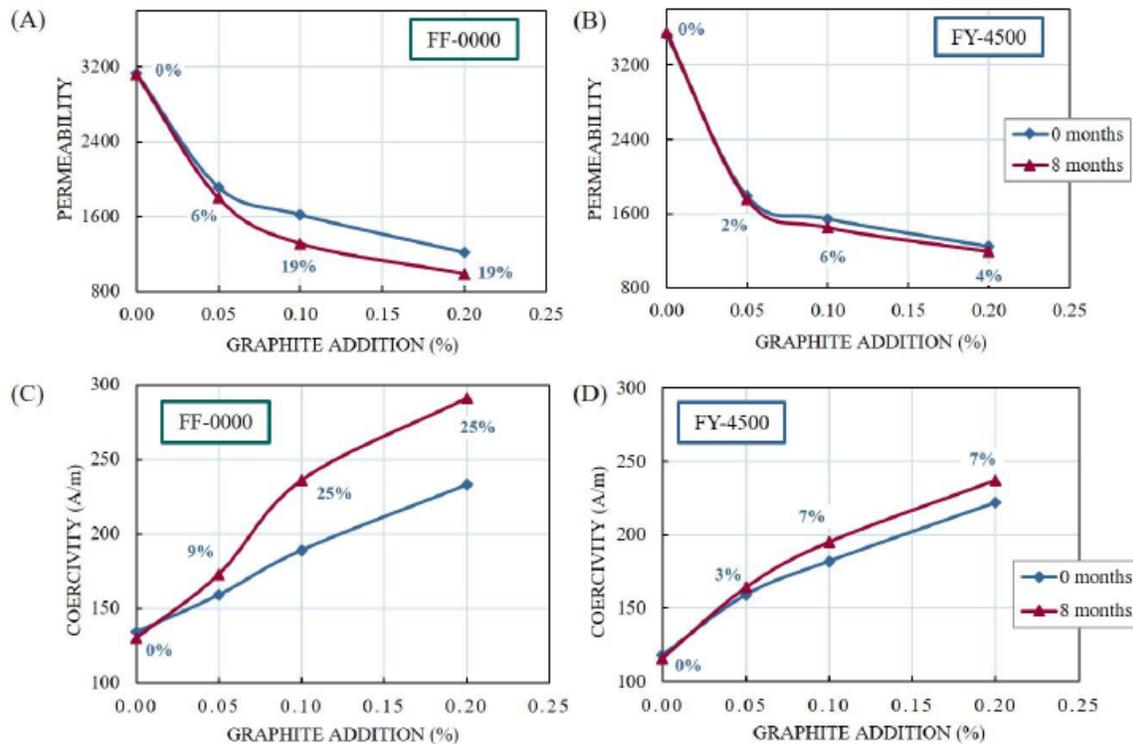
El envejecimiento magnético es un problema para los materiales magnéticos blandos sinterizados, debido a que la permeabilidad magnética y la coercitividad empeoran con el tiempo o cuando se exponen a temperaturas de funcionamiento elevadas. Impurezas como el carbono, el nitrógeno y el oxígeno, incluso en cantidades pequeñas, provocan grandes disminuciones en el rendimiento magnético. Una investigación realizada con respecto a este tema [55], presenta los efectos de dichas impurezas sobre la permeabilidad y la coercitividad con respecto al tiempo y la temperatura para ilustrar la importancia del control del proceso y evitar la contaminación. Los materiales *FF-0000* y *FY 4500* con varios niveles de impurezas de carbono y nitrógeno se estudian para determinar el efecto de envejecimiento magnético absoluto.

Los materiales magnéticos blandos, como *MPIF Standard FF-0000* (hierro puro) y *FY-4500* (hierro con 0.45% de fósforo), se utilizan en una variedad de aplicaciones que incluyen actuadores lineales, solenoides y núcleos de transformadores. Estas aplicaciones requieren una alta permeabilidad magnética ( $\mu$ ), alta densidad de flujo magnético ( $B$ ) y baja fuerza coercitiva ( $H_c$ ). Para lograr estas propiedades magnéticas, los niveles de impurezas deben permanecer bajos, debe evitarse la contaminación de otros polvos o aditivos base y deben optimizarse las condiciones de sinterización. Las impurezas no magnéticas reducirán el rendimiento magnético en general, sin embargo, las impurezas intersticiales ( $C$ ,  $O$ ,  $N$ ) también reducirán las propiedades magnéticas sensibles a la estructura con el tiempo. Evitar la contaminación con grafito durante todas las etapas de producción es clave para reducir las impurezas de carbono. Dado que el grafito es un material muy utilizado en la industria de las partículas, existen varias áreas en las que podría producirse contaminación, como la atomización, la mezcla, la compactación y la sinterización. Cualquier contaminación cruzada con mezclas de grafito anteriores de cualquier paso del proceso, como mezcladoras, cintas transportadoras o bandejas de sinterización, puede provocar una absorción de carbono no deseada en los materiales de partículas. El exceso de contenido de carbono también puede deberse a una deslubricación y sinterización inadecuadas en una



atmósfera endotérmica que introduce  $\sim 20\%$  de  $CO$  en el horno. El contenido de carbono debe mantenerse por debajo del  $0,01\%$ , e idealmente por debajo del  $0,005\%$ , si es posible, para obtener el mejor rendimiento magnético. También deben evitarse el oxígeno y el nitrógeno, pero lo más probable es que las condiciones de sinterización afecten la cantidad de oxígeno y nitrógeno inestable en un material sinterizado. Estas impurezas intersticiales no solo reducirán el rendimiento magnético del material después de ser sinterizado, sino que a medida que los materiales envejecen, pueden dañar sustancialmente el rendimiento magnético [54].

En la gráfica 4.13 se muestran los resultados de esta investigación con respecto a valores de permeabilidad y coercitividad para  $FF-0000$  y  $FY-4500$ , sinterizados en  $90\% N_2 / 10\% H_2$  para adiciones crecientes de grafito, envejecido a temperatura ambiente durante 8 meses. Los valores porcentuales que se muestran en cada gráfico indican el cambio porcentual en la coercitividad o permeabilidad de 0 meses a 8 meses



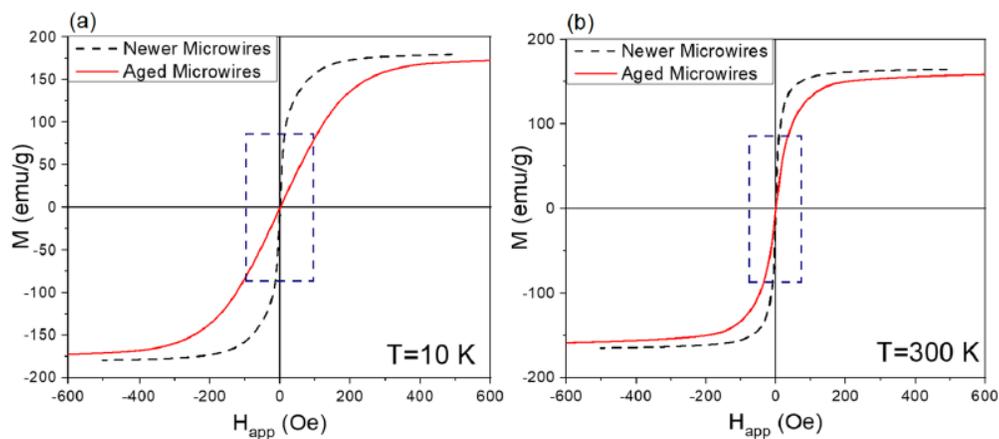
**Figura 4.13.** Valores de permeabilidad y coercitividad para  $FF-0000$  y  $FY-4500$ , sinterizados en  $90\% N_2 / 10\% H_2$ .

Fuente: K. Jo Sunday y K. McQuaig (2017)

#### 4.6.2.3 Envejecimiento en Materiales Ferromagnéticos Amorfos

A pesar de que este tipo de materiales no son utilizados para la construcción de máquinas eléctricas en la actualidad, son muchas las investigaciones que se desarrollan sobre este tipo de materiales y sus aleaciones. Una reciente investigación [55] ha descubierto que los microalambres ferromagnéticos amorfos fabricados por enfriamiento con agua muestran propiedades favorables para las máquinas eléctricas de alta frecuencia en comparación con las de las aleaciones magnéticas amorfas convencionales en forma de lámina o cinta. En ese estudio los microalambres de  $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$  amorfos templados con agua se sometieron a un intervalo de tiempos de envejecimiento de hasta cinco años en el aire a temperatura ambiente para comprender mejor los efectos del envejecimiento a largo plazo en cuanto a sus características magnéticas y estructurales (para efectos de este trabajo de grado, se tomará en cuenta el primer punto propuesto).

Los resultados de esta investigación en cuanto a sus características magnéticas, se muestran en las gráficas de magnetización  $M$  frente al campo magnético aplicado  $H$  de la figura 4.14, donde se comparan dos microhilos de diferentes tiempos de desgaste bajo valores de temperatura establecidos. Los microalambres más nuevos tienen una susceptibilidad inicial más alta, requiriendo un campo magnético más bajo para lograr la saturación que los microalambres viejos; esta diferencia se vuelve más significativa a baja temperatura.



**Figura 4.14.** Curvas  $M$  vs.  $H$  a (a) 10 °K y (b) 300 °K de microhilos de  $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$  templados con un campo magnético de hasta 600 Oe.



Fuente: X. Zhang, R. P. del Real, M. Vázquez y L. H. Lewis (2019)

#### 4.7 Motor de Rotor de Mandíbula

La principal ventaja de las máquinas de rotor de mandíbula radica en su capacidad para producir valores de torque mucho más altos que los que se pueden obtener con una máquina convencional. Sin embargo, la alta densidad de par tiene su precio; el flujo de fuga es a menudo alto, lo que resulta en un factor de potencia bajo. En una investigación de Lundmark y Hamdi [31], se demostró que un tipo especial de motores de polos de mandíbula podría dar una densidad de torque de 1,5 Nm / kg con un factor de potencia de 0,87 para una aplicación de servomotores. Tal valor de factor de potencia es lo suficientemente alto como para permitir el uso de un convertidor estándar, y el valor de densidad de par es comparable a un motor de CC sin escobillas del mismo tamaño. Sin embargo, el tamaño del motor en estudio planteó algunas restricciones en las partes centrales hechas de un compuesto magnético blando relativamente frágil (*Somaloy TM 500*). El reciclaje de las partes de este tipo de motor, debido a que es más fácil su montaje y desmontaje, es más sencillo, por esta razón, este aspecto del trabajo aborda la cuestión de si este tipo especial de motor de mandíbula con dientes tanto en el rotor como en el estator puede competir con los motores convencionales, en cuanto a densidad de par, factor de potencia, eficiencia y costo, permitiendo el tamaño y la construcción (como del rotor interno o externo) varíen.

La trayectoria del flujo en las máquinas de mandíbula es realmente de tres dimensiones debido a la construcción de dientes en el núcleo. Esto elimina la posibilidad de utilizar acero eléctrico laminado convencional para construir el núcleo. La configuración a la que se hace referencia aquí, emplea dientes tanto en el rotor como en el estator [31]. Esto excluye la posibilidad de usar acero sólido para construir los dientes, ya que la alta frecuencia en el estator daría pérdidas en el núcleo inaceptablemente altas (aunque la estructura de dientes de mandíbula sólida también se utiliza en algunos motores paso a paso.) Este diseño utiliza compuestos magnéticos blandos (SMC). Los SMC tienen una permeabilidad relativa isotrópica de aproximadamente 500 y una conductividad baja (lo suficientemente baja como para restringir las corrientes parásitas). Sin embargo, como el material SMC no se puede recalentar, las pérdidas por histéresis son bastante elevadas. Otra



desventaja del material SMC es que es frágil. Como el SMC introducirá mayores pérdidas en el núcleo, mayor retención y menor resistencia mecánica de las piezas del núcleo, los efectos de dimensionamiento del motor de rotor de polos de mandíbula no son totalmente similares a los de las máquinas convencionales.

#### 4.7.1 Efectos Generales del Tamaño

Generalmente, para una máquina de CA, la potencia aparente de salida,  $Q$ , se puede expresar mediante las cargas eléctricas y magnéticas específicas,  $B_{av}$  y  $ac$ , la velocidad,  $\eta_s$ , y las dimensiones principales de la máquina, diámetro  $D$  y longitud  $L$ , como:

$$Q = (1.11 \pi^2 B_{av} ac K_w * 10^{-3}) D^2 L n_s = C_o D^2 L n_s \text{ kVA} \quad (3)$$

$K_w$ , es el factor de bobinado y  $C_o$  es el coeficiente de salida. Las cargas magnéticas y eléctricas son las siguientes:

$$B_{av} = p\Phi / \pi DL \text{ T} \quad (4)$$

$$ac = IZ / \pi D \text{ Ampere Conductor/m} \quad (5)$$

Como el volumen del material activo en una máquina varía inversamente con su velocidad nominal, se debe seleccionar la velocidad práctica más alta. La velocidad máxima está limitada por tensiones mecánicas en el rotor y en las pérdidas de hierro que aumentan con la velocidad. Además, el número de polos y la frecuencia de la tensión de alimentación influirán en el posible rango de velocidad. También es un caso general que la eficiencia aumenta con el aumento de las dimensiones lineales. Tanto las cargas específicas como el coeficiente de salida son proporcionales al diámetro del entrehierro,  $D$ . Por lo tanto, en la mayoría de los casos; se obtienen ventajas significativas al diseñar para diámetros grandes y longitudes de núcleo pequeñas,  $L$

La ecuación de salida general, (Ecuación 3), también es válida para el motor de mandíbula. El factor de bobinado,  $K_w$ , es la unidad para la bobina de anillo simple. Como este tipo de máquina no necesita espacio para los devanados finales, puede tener una longitud efectiva más alta. Las mismas consideraciones que para los motores



convencionales son válidas con algunas excepciones: un límite en la parte posterior del núcleo del estator lo establecen los materiales frágiles (cuando se utilizan compuestos magnéticos blandos) y no por el riesgo de saturación. Además, deben observarse ciertas reglas de diseño especiales para el motor de polos de mandíbula [56]. Por ejemplo, la longitud del diente debe ser aproximadamente el 80% de la longitud total de la fase, la distancia entre los dientes (distancia circunferencial entre ellos) debe ser aproximadamente el 30% del paso de los polos y aproximadamente diez veces la del espacio de aire,  $g$ , en orden para minimizar la fuga entre los dientes sin perjudicar la salida de par. Además, cuando se usa la ecuación 3, debe entenderse que  $D$  y  $L$  no se pueden cambiar por separado. Por ejemplo, duplicar todas las dimensiones axiales daría un resultado negativo con campos de fuga elevados. Las reducciones de la longitud en aproximadamente la mitad tampoco son efectivas. Dado que  $D$  y  $L$  cambian con el mismo factor, la ecuación de la carga magnética es la misma que para la máquina convencional (Ecuación 4).

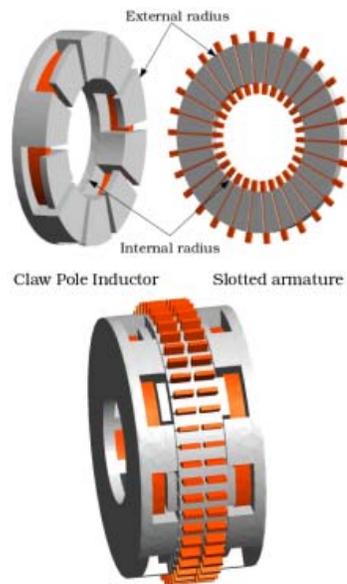
Incluso la carga eléctrica es la misma que para las máquinas convencionales (Ecuación 5). Sin embargo, existe una diferencia ya que el número de polos se puede aumentar sin afectar el área de la sección transversal de la bobina. Con los motores convencionales, los dientes y las secciones transversales de la ranura están en el mismo plano. Cuando aumenta el número de polos, los dientes y la sección transversal de la ranura disminuyen (para una profundidad de ranura constante). Sin embargo, en un motor de rotor de polos de mandíbula, solo la sección transversal de los dientes se ve afectada (disminuye) y la sección transversal de la bobina es la misma que para un número de polos más bajo. Por lo tanto, el número de polos se puede aumentar sin disminuir la fmm del inducido. La posible alta densidad de par para máquinas de flujo transversal se explica considerando la ecuación de la carga de corriente [31]:

$$A = I / 2\tau \text{ Ampere/m} \quad (6)$$

Donde  $I$  es la corriente del inducido y  $\tau$  es el paso de polo. Sin embargo, recordando que el número de polos y la frecuencia de la tensión de alimentación influirán en el posible

rango de velocidades, la ecuación de salida ya considera el cambio directo del número de polos en el factor  $n_s$ .

Todas las consideraciones explicadas anteriormente son necesarias para establecer el impacto de utilizar un rotor de polos de mandíbula en motores de baja potencia, para ello se realiza un estudio de los efectos en cuanto al dimensionamiento tanto del rotor interno y externo de este tipo de motor y de sus características eléctricas y mecánicas: estos aspectos se explicarán a continuación mediante ejemplos prácticos producto de investigaciones realizadas con anterioridad.



**Figura 4.15** Motor sincrónico de rotor de mandíbula  
Fuente: D. Giraud, B. Ristagno, D. Netter, J. Fontchastagner,  
N. Labbe y V. Lanfranchi (2020)

#### 4.7.2 Efectos del Dimensionamiento del Motor de Rotor de Polos de Mandíbula con Rotor Interno

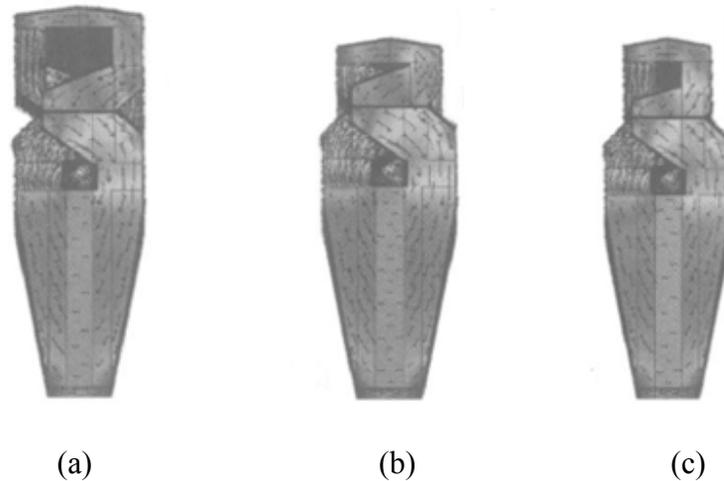
Supongamos que las dimensiones de las construcciones originales de un rotor de polo de mandíbula [31], con un diámetro exterior de 115 mm (a quien se llamara “CI”) se agrandan en un factor 10, es decir, las distancias radiales y las longitudes axiales son todas agrandadas. El motor diez veces más grande se llamará “CI0” y se muestra en la Fig. 5 (a). La velocidad nominal, el número de polos y también la densidad de torque se suponen



constantes. La fmm del estator debe aumentarse con un factor de 10, lo que implica que habrá que aumentar la corriente o el número de vueltas para obtener la misma carga eléctrica y, por lo tanto, la misma densidad de torque. Manteniendo constante el número de vueltas ( $N = 100$ ) y aumentando la corriente, de  $2 A$  a  $20 A$ , el área de la bobina aumenta con un factor de 100, la densidad de corriente será 10 veces menor para  $C10$  en comparación con  $C1$ . En cuanto a la potencia de salida, ésta aumenta con un factor de 1000, ya que las cargas magnéticas y eléctricas, así como la velocidad, son constantes, pero el volumen aumenta con un factor de 1000. Las pérdidas de hierro también aumentan con un factor de 1000, debido al aumento de volumen y densidad de flujo magnético constante. Las pérdidas de cobre solo aumentarán con un factor 10, debido al aumento de la corriente y la disminución de la densidad de corriente. Obviamente, esto significará una mejor eficiencia para motores más grandes, pero sucede lo contrario para motores pequeños.

Si no se toma en cuenta la mejor eficiencia y la construcción mecánicamente más robusta, se puede decir que el motor de rotor de polos de mandíbula presenta mejores condiciones cuando el tamaño es mayor que el de  $C1$  [31]. Sin embargo, por la baja densidad de corriente se puede decir que no es un buen diseño. El material se utiliza mejor si la densidad de corriente se mantiene igual que en  $C1$ , lo que permite que el área de la bobina sea más pequeña. Si la longitud del motor sigue aumentando el factor 10, entonces el área de la bobina del estator se puede disminuir disminuyendo la longitud del estator y la distancia radial.

Esto dará una construcción de estator bastante delgada pero no dará ningún problema mecánico, solo ventajas, ya que es el largo del diente el que se vuelve más corto (y no más delgado). Este diseño se muestra en la Fig. 4.16(b). Por supuesto, el área de bobina más pequeña significará un cambio notable en el volumen y peso del estator. Esto significará una mejor densidad de torque. Sin embargo, el volumen y el peso del rotor serán 1000 veces mayores que los del  $C1$ , lo que da una alta inercia. Además, el factor de potencia es menor debido a la mayor fuga de ranura. El resultado es  $1,8 \text{ Nm / kg}$  con un factor de potencia de 0,8.



**Figura 4.16** Motor de polos de mandíbula con tres estructuras de estator diferentes  
Fuente: S. Lundmark y E. Hamdi (2006)

Por tanto, se puede decir que a medida que el tamaño del motor aumenta linealmente; el área de la bobina y el núcleo del estator se hacen relativamente más pequeños, proporcionando el mismo rendimiento de torque, una mejor densidad de torque y un factor de potencia más bajo [31]. Si el motor diez veces más grande ( $CI0$ ) se optimiza con respecto a la densidad de torque a un nivel constante de factor de potencia 0.9, aumentando el área de la bobina tanto como sea necesario para minimizar la fuga, entonces aún es posible obtener una densidad de torque de  $1.8 \text{ Nm / Kg}$ , por lo tanto, un aumento del 20% en comparación con el motor  $CI$ , mejoraría las características eléctricas y mecánicas (este diseño se muestra en la Fig. 4.16(c). Por el contrario, disminuir el tamaño linealmente (en comparación con  $CI$ ), por lo tanto, no sería una buena idea, a menos que un núcleo relativamente grueso en la parte posterior del estator no suponga un problema. De hecho, se podría argumentar que las placas de sujeción podrían resultar redundantes debido a los gruesos respaldos del núcleo del estator. Si es así, todavía queda un ancho mínimo crítico de los dientes. Para obtener una comprensión completa del comportamiento mecánico del SMC expresado en fuerzas magnéticas, se debe resolver un modelo magnético mecánico acoplado. Como esto no se hace, solo hay algunas reglas generales que se pueden revertir que son dadas por los fabricantes.

Si asumimos que la parte posterior del núcleo se puede incluir en las placas de sujeción y, por lo tanto, no se incluye en los cálculos de peso, solamente la parte más



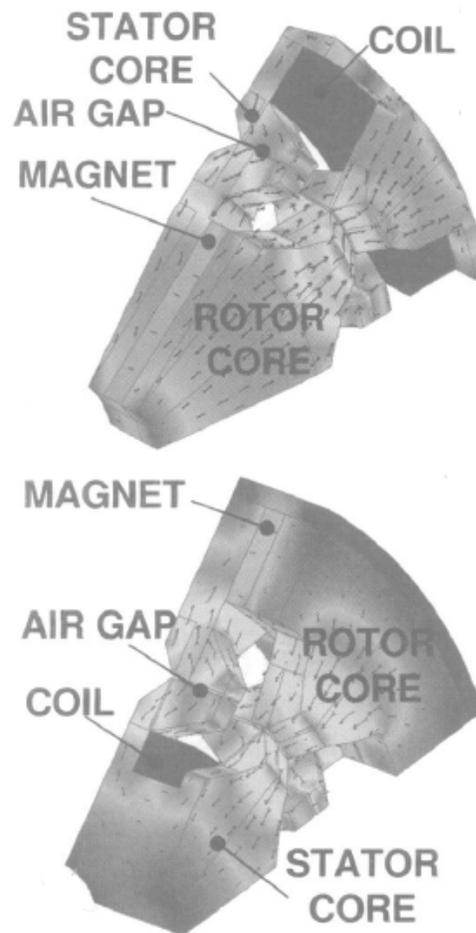
delgada que conducirá el flujo, y que el factor limitante es el ancho mínimo de las partes del núcleo (2 mm), entonces este motor más pequeño sería de diámetro exterior de unos 68 mm. Este motor se llama “*CO.65*” ya que las dimensiones se reducen linealmente alrededor de 0,65 veces las dimensiones de *CI*. También se realizan algunos otros cambios en el diseño, donde se agrega material del núcleo para agregar resistencia. El resultado de este pequeño motor es de 1,4 Nm / Kg con un factor de potencia 0,8, por lo que es ligeramente inferior a los motores de otros tamaños. La eficiencia también sería menor, debido a las pérdidas relativamente mayores.

#### **4.7.3 Efectos del Dimensionamiento del Motor de Rotor Polos de Mandíbula con Rotor Externo**

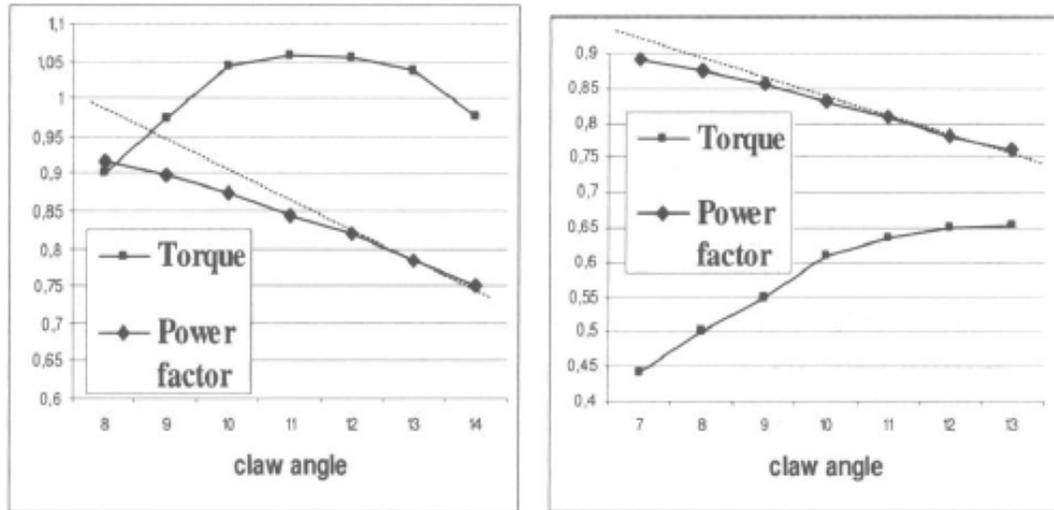
En este caso se utiliza la misma construcción que se describe en el punto anterior; solo que el estator es ahora un estator interno, lo que da una bobina de anillo más pequeña y, por lo tanto, un peso del motor menor. Si se construye un motor de rotor exterior (llamado *OCI*) con el mismo diámetro exterior que *CI*, el diámetro del entrehierro no sería el mismo. Esto se debe a que el rotor ocupa más espacio en la dirección radial que el estator. Esto se puede ver en la Fig. 4.17. Por lo tanto, *OCI* tendría un diámetro de entrehierro menor que *CI*. Esto conduciría a más fugas de diente a diente. Esto se debe a que la distancia circunferencial entre los dientes, en comparación con la longitud del entrehierro, disminuye. Se puede aplicar el mismo razonamiento para darse cuenta de que la fuga del estator en *OCI* aumentaría y la fuga del rotor disminuiría, en relación con *CI*. Para compensar estos efectos, de modo que la fuga en *OCI* sea similar a la fuga de *CI*, el ángulo del diente podría reducirse. En la figura 4.18(a), se ilustra el torque y el factor de potencia para diferentes ángulos de diente para un motor de rotor interno. Los ángulos varían del 44% al 78% del paso del polo (ángulo de diente de 8 a 14 grados). Se puede ver que el ángulo de diente más pequeño da poco torque debido a la saturación de los dientes y debido al gran espacio de aire entre los dientes, da más torque hasta donde la fuga de diente a diente se vuelve demasiado alta y el torque nuevamente empezar a disminuir. Existe un valor óptimo en el que el torque es máximo. El factor de potencia disminuye para ángulos de dientes más grandes debido al aumento de las fugas de diente a diente. Sin embargo, los



dientes demasiado pequeños (ángulos de diente pequeños) introducen saturación en los dientes, lo que explica el comportamiento no lineal de la curva del factor de potencia. Usando este conocimiento para la construcción del motor de polo de mandíbula con rotor exterior (*OCI*), el ángulo de diente debe ser menor que para *CI* para disminuir la fuga, pero no tan pequeño para que haga que el torque disminuya marcadamente. Sin el cambio del ángulo de diente, los resultados de *OCI* son una densidad de torque de 2,1 Nm / Kg y un factor de potencia de 0,83 (en un ángulo de 10 grados) [58].



**Figura 4.17.** El motor de polo de mandíbula con rotor interior y exterior, respectivamente  
Fuente: S. Lundmark y E. Hamdi (2006)



**Figura 4.18.** Torque por fase y factor de potencia a medida que varía el ángulo del diente  
 Fuente: S. Lundmark y E. Hamdi (2006)

**Tabla 4.5** Comparación entre dos tipos de motores de mandíbula de rotor interno con diferentes diámetros externos.

Características Eléctricas, Magnéticas y Mecánicas	Tipo de Motor de Mandíbula	
	Rotor interno	
	C1	C10
<b>Diámetro Externo</b>	115mm	Aumenta con un factor de 10 con respecto a C1
<b>Material</b>		Igual que C1
<b>Velocidad Nominal</b>		Igual que C1
<b>Numero de Polos</b>		Igual que C1
<b>Densidad de Torque</b>		Igual que C1
<b>Flujo Total</b>		Aumenta con un factor de 100 con respecto a C1
<b>Densidad de Flujo</b>		Igual que C1
<b>Fuerza Magnetomotriz</b>		Aumenta con un factor de 10 con respecto a C1
<b>Densidad de Corriente</b>		Disminuye con un factor de 10 con respecto a C1
<b>Área de la Bobina</b>		Aumenta con un factor de 10 con respecto a C1
<b>Potencia</b>		Aumenta con un factor de 1000 con respecto a C1
<b>Volumen</b>		Aumenta con un factor de 1000 con respecto a C1
<b>Perdida del Hierro</b>		Aumenta con un factor de 1000 con respecto a C1
<b>Perdidas del Cobre</b>		Aumenta con un factor de 10 con respecto a C1
<b>Eficiencia</b>		Mayor que C1
<b>Construcción Mecánica</b>		Más robusta

Fuente: Sequera Y. (2021)



**Tabla 4.6 Comparación entre dos motores de mandíbula con tipos de rotores diferentes e igual diámetros externos.**

Características Eléctricas, Magnéticas y Mecánicas	Tipo de Motor de Mandíbula	
	Rotor interno	Rotor Externo
	C1	OC1
<b>Diámetro Externo</b>	115mm	115 mm
<b>Diámetro Interno</b>		Disminuye con respecto a C1
<b>Material</b>		Igual que C1
<b>Densidad de Torque</b>		2,1 Nm/Kg
<b>Factor de Potencia</b>		0,83

Fuente: Sequera Y. (2021)

La máquina de polos de rotor de mandíbula, es un tipo de máquina de flujo transversal que tiene trayectorias de flujo 3D. Debido a la bobina, este tipo de maquina tiene una densidad de torque relativamente alta [57]. Sin embargo, es muy difícil fabricar motores de rotor de mandíbula con aceros eléctricos, ya que su estructura es muy compleja y consta de trayectos de flujo 3D. Mediante el uso de núcleos compuestos magnéticos blandos (SMC) de baja densidad de masa, la productividad de este tipo de motores con núcleos SMC mejora enormemente y, por lo tanto, el costo de manufactura también se reduce significativamente. Con el desarrollo del material SMC, también se mejora el rendimiento de los núcleos, y puede competir con el de las maquinas convencionales. Para la producción de tipo comercial, el motor de rotor de polos de mandíbula con un núcleo SMC es un buen candidato para su fabricación en masa, ya que puede proporcionar un rendimiento relativamente alto con un costo de fabricación muy bajo [58, 59]. Todos estos factores favorables para la producción de este tipo de motor, cuya característica es la de poseer menos piezas, hace que este tipo de motor sea de fácil montaje y fácil desmontaje, permitiendo esto, que cada una de sus partes pueden ser insertadas en el ciclo de vida de la maquina eléctrica rotativa como un componente fácilmente reutilizable.



## **4.8 Atributos Técnicos para el Diseño de un Motor Eléctrico Construido con Materiales Ferromagnéticos Modernos**

El procedimiento de diseño, en términos de dimensiones de un motor eléctrico, depende de varios parámetros como el par deseado a una velocidad específica, el tipo de encapsulado, el tipo de refrigeración, el ciclo de trabajo de la carga. y la intensidad con que se utilizan los circuitos eléctricos y magnéticos. A pesar de que se han realizado muchos estudios sobre técnicas de optimización aplicadas en el proceso de diseño de motores utilizando modelos clásicos y otros de avanzada como los métodos de algoritmos genéticos y las redes neuronales utilizando la inteligencia artificial, se observa que el principal inconveniente de estos estudios radica en que el diseño de un motor eléctrico solo toma en cuenta un determinado material ferromagnético (el hierro), por lo que se tiene muy poca información sobre la influencia del cambio de material en el diseño de sus partes con otro material, sin embargo, desde el punto de vista de los fabricantes, esta información es crucial, especialmente hoy en día que hay muchos materiales disponibles comercialmente en el mercado y muchos más en proceso de estudio.

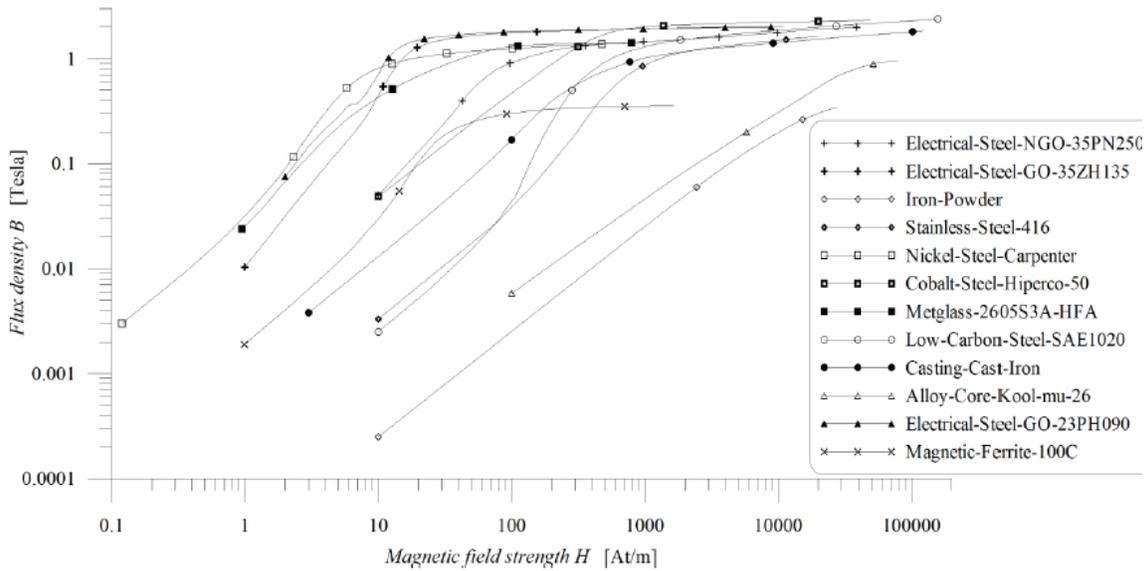
### **4.3.1 Efectos de la Aplicación de Materiales Ferromagnéticos en un Motor de Inducción**

Este trabajo presenta los resultados de una de investigación acerca del diseño de un motor de inducción [12], analizando los efectos de varios materiales magnéticos blandos en aspectos como: eficiencia, factor de potencia, par de salida, pérdidas, peso y costo. Se examinan un total de veintidós materiales diferentes de datos de fabricantes recientes.

A continuación, se muestra la aplicación de los materiales estudiados al núcleo del estator y del rotor del motor. En este punto, los autores [12] probaron el uso de veintidós diferentes materiales para los dos núcleos, diez de ellos estaban disponibles a través de la base de datos del software *ANSYS® EM Suite* (software utilizado para las simulaciones en la investigación), mientras que los doce restantes fueron procesados e incorporados a la base de datos por los autores. Para actualizar la base de datos del software utilizado en la investigación, en primer lugar, se recuperaron datos reales de materiales disponibles



comercialmente y, en segundo lugar, se introdujeron los datos de las curvas de  $B-H$  relativas de estos materiales. Las curvas  $B-H$  de los doce materiales agregados se muestran en la Fig. 4.19.



**Figura 4.19.** Curvas B-H de los doce materiales adicionales disponibles comercialmente Fuente: Y. Karnavas y I. Chasiotis (2017)

Para cada uno de los materiales se realizaron numerosas simulaciones de un motor de inducción y se obtuvieron valores de magnitudes importantes como: eficiencia ( $\eta$ ), torque de salida ( $T$ ), factor de potencia ( $pf$ ) y corriente de fase ( $I_{ph}$ ). Los resultados de estas pruebas se observan en la figura 4.20. En la tabla de esta figura se puede ver que los materiales “Iron-Powder”, “Magnetic-Ferrite-100C”, “Mu-metal” y “Alloy-Core Kool-mu-26” no alcanzan el torque nominal deseado predefinido por los autores de 10,15 Nm., obtienen una relación de eficiencia muy baja y también exhiben altas corrientes de estator, por tanto, estos materiales son los primeros descalificados para ser tomados en cuenta para la fabricación de un motor de inducción. Otros materiales rechazados para ser candidatos según los criterios técnicos de los autores son: “Elec-Steel NGO-35PN250”, “M19-24G”, “M19-24G 2DSF-920”, “Steel- 1008”, “Steel-1010”, “Steel-1018”, “Steel-1010-2DFSO-950”, “Stainless-Steel-416” y “Castings-Cast-Iron” debido a que no tienen un valor de eficiencia establecida en un rango entre 75% y 80%.



Soft Magnetic Material (Commercial Name)	Efficiency (%)	Torque (Nm)	Power factor	Phase Current (A)
Iron-Powder	1.050	0.840	0.846	21.117
Magnetic-Ferrite-100C	1.178	0.928	0.834	20.929
Mu-metal	2.515	1.720	0.788	19.362
Alloy-Core-Kool-mu-26	3.314	2.118	0.765	18.623
Castings-Cast-Iron	47.991	10.347	0.627	7.486
M19-24G-2DSF-920	55.389	10.314	0.674	6.278
Stainless-Steel-416	59.572	10.280	0.652	5.787
Steel-1010-2DFSO-950	67.561	10.224	0.701	4.738
M19-24G	68.459	10.215	0.729	4.495
Steel-1010	72.539	10.194	0.754	4.099
Steel-1018	73.015	10.197	0.760	4.038
Elec.-Steel-NGO-35PN250	73.815	10.188	0.772	3.935
Steel-1008	74.415	10.183	0.781	3.857
Metglas-2605S3A-HFA	75.245	10.178	0.794	3.749
Low-Carbon-St.-SAE1020	75.666	10.176	0.802	3.694
Cobalt	76.822	10.168	0.823	3.541
Nickel-Steel-Carpenter	78.555	10.160	0.861	3.310
Nickel	78.998	10.156	0.876	3.249
Elec.-Steel-GO-23PH090	79.505	10.155	0.886	3.180
Elec.-Steel-GO-35ZH135	79.649	10.155	0.890	3.160
Cobalt-Steel-Hiperco-50	79.900	10.153	0.897	3.124
Iron	80.004	10.153	0.900	3.110

**Figura 4.20.** Tabla de resultados de la influencia de los 22 materiales magnéticos blandos examinados en las principales características electromecánicas de un motor de inducción  
Fuente: Y. Karnavas y I. Chasiotis (2017)

En este punto, solo quedan nueve de los veintidós materiales candidatos, y ahora se considera el costo del material. Los autores [12] realizaron una búsqueda exhaustiva en el mercado internacional del precio de los materiales en estudio ([www.infomine.com](http://www.infomine.com), precios al 16/02/2016) y en la figura 4.21 se observa la tabla con el rendimiento de los materiales restantes junto con el peso neto total del motor y el costo por kilo correspondiente en orden ascendente.



Soft Magnetic Material (Commercial Name)	Efficiency (%)	Power factor	Phase Current (A)	Total Weight (kg)	Cost (\$/kg)
Iron	80.004	0.900	3.110	7.861	0.092
Low-Carbon-St.-SAE1020	75.666	0.802	3.694	7.863	0.500
Elect.-Steel-GO-35ZH135	79.649	0.890	3.159	7.676	0.920
Elect.-Steel-GO-23PH090	79.505	0.886	3.179	7.676	0.920
Nickel	78.998	0.876	3.249	8.726	16.630
Metglas-2605S3A-HFA	75.245	0.794	3.749	7.676	20.000
Nickel-Steel-Carpenter	78.555	0.861	3.309	7.634	23.170
Cobalt	76.822	0.8236	3.541	8.694	31.500
Cobalt-Steel-Hiperco-50	79.900	0.897	3.124	8.062	223.330

**Figura 4.21.** Tabla de rendimiento de materiales candidatos en cuanto a eficiencia, factor de potencia, corriente de fase, peso total y costo comercial

Fuente: Y. Karnavas y I. Chasiotis (2017)

El siguiente conjunto de simulaciones de la investigación [12] se refieren al consumo de material del motor para las partes del estator y del rotor considerando la geometría y el costo de los materiales. De los resultados obtenidos se llegan a varias conclusiones desde el punto de vista técnico-económicas, las cuales se muestran a continuación:

- a) Algunas aleaciones de níquel y cobalto que están disponibles comercialmente en la actualidad tienen propiedades mucho mejores que las convencionales. Sin embargo, el costo de estas nuevas aleaciones mejoradas sigue siendo significativamente alto en comparación con el costo de sus candidatos convencionales, por ejemplo, el costo de "Cobalt" y "Cobalt-Steel-Hiperco-50" es prácticamente inaplicable para la construcción de un motor de inducción por sus elevados costos.
- b) Un factor que afecta el comportamiento del material se relaciona con su proceso de fabricación. Esto se ve claramente para los materiales "Iron", "Casting-Cast-Iron" y "Iron-Powder". Aunque todos proceden del mismo constituyente, presentan un comportamiento diferente con respecto a las variables estudiadas en la investigación. Específicamente, mientras que los dos primeros satisfacen la especificación de torque deseada, el segundo funciona mal en términos de eficiencia y factor de potencia. Al mismo tiempo, el tercero funciona mal para cualquier especificación. Por esta razón el material "Iron", cumple con las características para poder ser utilizado en la fabricación de motor de inducción, ya que, genera valores



deseados de torque, eficiencia y factor de potencia, y su costo \$/Kg es el menor entre todos los materiales estudiados

- c) Los aceros “*Electrical-Steel-GO-35ZH135*” y “*Electrical-Steel-GO-23PH090*”, son aleaciones que tienen algunas aplicaciones de ingeniería eléctrica ya que exhiben ciertas propiedades magnéticas como una región de histéresis relativamente pequeña (Figura 4.14) y bajas pérdidas en el núcleo. Si el motor diseñado tiene núcleos de rotor y estator con este tipo de aleaciones tendría una admisible eficiencia ( $\sim 80\%$ ), un factor de potencia aceptable ( $\sim 0,9$ ) y el peso total del motor y el costo, serían más bajos debido a su menor densidad de masa y el precio \$/Kg
- d) Luego de la evaluación de los resultados de las simulaciones a los materiales con los softwares donde se evaluaban las variables técnico-económicas a los nueve candidatos finales, se podría decir que las versiones “*Iron*”, “*Electrical-Steel-GO-35ZH135*” y “*Electrica-Steel-GO-23PH090*” son aceptados porque pueden ser utilizados para un diseño práctico y eficiente de un motor. La idoneidad de cada aleación para un tipo específico de aplicación (es decir, industrial, domésticos o de uso general) pueden decidirse fácilmente mediante el método de clasificación propuestos en la investigación [13]. No obstante, se ha demostrado claramente que la "idoneidad" de un material magnético blando disponible comercialmente para un motor de inducción moderno y de alta eficiencia debe examinarse a profundidad desde muchas perspectivas.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

Los conceptos básicos del reciclaje pueden ser aplicados en algunas máquinas eléctricas, especialmente cuando su proceso de fabricación hace que poseen una larga vida útil y sus principios tecnológicos no varían significativamente, como es el caso de motores de inducción pequeños o medianos de baja potencia. En este estudio se observó que las piezas más susceptibles a ser recicladas son: la carcasa, el rotor, el estator y el devanado, pero en distintos tipos de reciclaje.

La característica principal que debe tener un motor susceptible a ser reciclado es que debe ser fácil de armar y desarmar, y dependiendo del número de partes que posea, el proceso para que una pieza pueda ser insertada de manera óptima en la cadena del proceso de desagregado de la vida de una máquina eléctrica rotativa, se facilita o se dificulta. Otro aspecto a tomar en cuenta, es la condición en que se encuentran estas piezas, esto debido a que, dependiendo de su estado, estas se ubicarían en un tipo de reciclaje de primera, segunda o tercera clase.

Para tener un diagnóstico sencillo y preciso del estado de las partes, es necesaria la realización de pruebas de aceptación de cada componente, desde las más básicas como la inspección visual y medición de aislamiento, hasta las que necesitan equipos modernos como las pruebas de ultrasonido, cuyos resultados servirán para tomar la decisión de la ubicación de cada pieza en el proceso del ciclo de vida útil de las partes de una máquina eléctrica rotativa.

Es importante destacar que para que estos componentes conformen un sistema de reciclaje 100% eficiente es necesario cumplir con características de diseño como de



funcionamiento, que tome en cuenta las dimensiones, tamaño y el número de piezas, cuyos estándares están sujetas al establecimiento de normas técnicas y leyes, pero debido a la gran cantidad de fabricantes y tipos de motores eléctricos de diferentes tamaños y números de piezas, se complica el proceso de reutilización de las piezas que conforman una máquina eléctrica.

Existen diferentes tipos de materiales magnéticos blandos, los cuales han sido objeto de investigación recientemente, y estas se han realizado para conocer si estos pueden ser utilizados en nuevos diseños para la construcción de máquinas eléctricas modernas. Los materiales que se estudiaron en este trabajo son: aleaciones magnéticas blandas (SMC), compuestos magnéticos blandos y metal amorfo. Hasta ahora se han desarrollado máquinas con núcleos SMC como la del rotor de mandíbula que tiene como ventaja principal la capacidad de reducir las pérdidas por corrientes parásitas y la reducción del número de piezas, simplificando el reciclaje de sus partes, aunque, su resistencia mecánica, la capacidad de resistencia a las vibraciones, la degradación mecánica, la vida útil y la degradación potencial de las propiedades electromagnéticas todavía no se tienen conclusiones convincentes para su desarrollo en máquinas eléctricas.

En cuanto al metal amorfo, investigaciones han demostrado la ventaja de segmentar las partes magnéticamente influyentes de una máquina eléctrica, sin embargo, esto da como resultado pérdidas adicionales y un rendimiento inferior al esperado debido al cambio de propiedades magnéticas, lo cual hace que actualmente no se pueda utilizar para la fabricación de tipos de motores eléctricos estudiados en este trabajo. Por último, las aleaciones magnéticas blandas, a pesar de que presentan algunas ventajas para el diseño de máquinas eléctricas, son más los inconvenientes que tienen para la construcción de nuevos diseños de máquinas eléctricas, por lo cual el proceso de estudio de este material se ha centrado en establecer aleaciones con otros materiales.

Un motor de rotor de mandíbula, permite que el reciclaje de sus partes sea más fácil, ya que, por su número de partes, su montaje y desmontaje es más sencillo. En este tipo de motores se pueden usar los mismos efectos de dimensionamiento como en los de corriente



alterna convencionales, con algunas excepciones. Su principal ventaja radica en su capacidad para producir valores de torque mucho más altos que los que se pueden obtener con una máquina convencional, sin embargo, la alta densidad de torque produce que el flujo de fuga es a menudo alto, lo que resulta en un factor de potencia bajo. El motor de rotor de mandíbula puede ser competitivo para aplicaciones que exigen la producción en masa de motores y donde el costo y el tamaño son un problema, por lo que se pueden usar como motores estándar, de tamaño mediano y de uso general.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda profundizar sobre el tema de estandarización de equipos a partir de las investigaciones más recientes, que lleven a la realización de propuestas en cuanto a las dimensiones estándar de una máquina eléctrica rotativa, tales como: entrehierro, longitudes y diámetros interiores y exteriores de núcleos ferromagnéticos, ya que este es un punto fundamental para el avance del reciclaje de las máquinas eléctricas rotativas.

Monitorear las investigaciones que se realizan actualmente en cuanto a los materiales ferromagnéticos modernos, que establezcan vínculos para la disminución de las partes eléctricas de un motor eléctrico e incentiven la realización de trabajos de investigación dentro de los institutos de educación universitaria del país, que faciliten el proceso de reutilización de las piezas de una máquina eléctrica.

Establecer vínculos entre los institutos universitarios del país con la WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment) para implementar el sistema de reciclaje en Venezuela, estableciendo campañas informativas que colaboren con la formación del estudiante en esta área, a fin de comenzar con experimentos a pequeña escala que concienticen a los universitarios en el tema.

Proponer una línea de investigación que abarque los conocimientos, inquietudes, prácticas y perspectivas de análisis que permitan el desarrollo de investigaciones y proyectos orientados hacia el tema de la reutilización de las partes de una máquina eléctrica.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A New Circular Vision for Electronics. Time for a Global Reboot (2019). World Economic Forum. Switzerland.
- [2] R. Hernández and J. R. Pacheco. (2017). Recycling Rotating Electrical Machines. Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. pp 50-56. Medellín, Colombia.
- [3] Brunner, Conrad U., Waide, Paul (2011). Energy Efficiency Series. Energy Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. International Energy Agency. France.
- [4] Götz T. and Tholen L. (2016). Stock Model Based Bottom-up Accounting for Washing Machines: Worldwide Energy, Water and Greenhouse Gas Saving Potentials 2010 – 2030. Germany.
- [5] Umesh Kumar, D.N. Singh. (2013). E – Waste Management through Regulations. International Journal of Engineering Inventions.
- [6] C. Herrmann, T. Luger, T. Spengler, E. Schmid, G. Walther. (2006). Design and Control of material flow networks for the recycling of WEEE. Germany.
- [7] Khalid A. Babarki, Robert A. Bennett, Subba Rao, Matthew Franchetti (2003). Recycling performance of firms before and after adoption of the ISO 14001 standard.
- [8] R. Hernández, J. Salinas, J.R. Pacheco (2001). “Design Principles for Recycling Induction Motors”. IEEE INSPEC Accession Number: 7048690. Cambridge, Massachusetts. USA.
- [9] Bi Bo and Kayoko Yamamoto (2010). Characteristics of E-waste Recycling Systems in Japan and China. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering. Japan.
- [10] Márquez C., (2015). “Reciclaje de Máquinas Eléctricas Asíncronas de 3 HP-100 HP”. Tesis de Especialización en Distribución de Energía Eléctrica. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.



- [11] Link R. (2016). "Innovative approaches to recycling of small and electric motors from end-of-life vehicles, electric bicycles and industrial machinery". Master of Science Thesis. Royal Institute Technology. Stockholm, Sweden.
- [12] Y. Karnavas and I. Chasiotis (2017). "Influence of Soft Magnetic Materials Application to Squirrel Cage Induction Motor Design and Performance". Engineering Journal. Volume 21. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. Bangkok, Thailand.
- [13] A. Porteous (2008). "Dictionary of Environmental Science and Technology". Fourth Edition. UK.
- [14] R. Hernández, J. Salinas, J.R. Pacheco (2000). "Design Principles for Recycling Large Electric Machinery"., International Conference on Electrical Machines ICEM 2000, vol. 3. pp 1679-1682. Helsinki, Finland.
- [15] Chávez A. (2012). "Ensayos de Termografía a Núcleos de Estatores de Maquinas Eléctricas Rotativas". Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.
- [16] Villalobos M. Maquinas Eléctricas. Ingeniería en Automatización y Control Industrial. Universidad Tecnológica de Chile.
- [17] Fitzgerald, A. E., Kingsley Jr. C., Umans, S. D. (1983). Electric Machinery, Mc Graw Hill.
- [18] Bose, B. K. (2006). Power Electronics and Motor Drives. Academic Press Publications. London, U.K.
- [19] Pflueger G. and Bosch R. (2003). Claw-Pole Rotor and Production Method Therefor, USA.
- [20] Perez Sylvain (2014). "Contribution au Dimensionnement Optimal D'alternateur à Griffes Sans Aimant - Apport des Alliages FeCo". Thèse de doctorat. INP Grenoble. France.
- [21] Martínez S. (2006). Materiales magnéticos puros, compuestos e híbridos. Su síntesis mediante un proceso de Pechini modificado y su caracterización magnética, estructural y morfológica. Centro de Investigaciones de Química Aplicada. Ciudad de México, México.
- [22] E.E. Staff Massachusetts Institute of Technology (1981). Circuitos Magnéticos y Transformadores. Editorial Reverté. Argentina.



- [23] FEDUPEL (2006). Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Caracas, Venezuela.
- [24] Arias G. Fidias (2012). “El Proyecto de Investigación. Introducción a la metodología Científica”. 6ta Edición. Editorial Episteme. Venezuela.
- [25] Rodríguez P. Miguel A. (2008). “Constitución de Maquinas Eléctricas”. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria. Santander, España.
- [26] Oscar Poncelas. (2014). “Diagnóstico de Motores de Inducción Mediante la Adquisición de Corrientes de Estator con Sonda Rogowski”. UPC
- [27] Quispe E., Bazurto A and Mendoza R. (2016). “Causes and Failures Classification of Industrial Electric Motor”. Universidad Autónoma de Occidente. Cali, Colombia
- [28] Olarte W. y Botero M. (2011). “Detection of Ultrasound: a Technique Used in the Predictive Maintenance”. Revista Scientia Et Technica, vol. XVII, núm. 47. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.
- [29] R. Hernández, J. Salinas, J.R. Pacheco (2001). “Design Principles for Recycling Induction Motors”. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). pp 782-788. Cambridge, USA.
- [30] Baba K. (2010). “Hitachi’s Involvement in Material Resource Recycling,” Hitachi Review, vol. 59, no. 4, pp. 180-187. Japan.
- [31] S. T. Lundmark and E.S. Hamdi. (2006). “Construction, Operation and Internal Design of a Claw-Pole Servo Motor”. Accepted Publication in Electromotion.
- [32] International Standard. IEC 60072 (1991). Dimensions and output Series for Rotating Electrical Machines. I.E. Commission.
- [33] International Standard. IEC 60034 (2004). Rotating Electrical Machines. I.E. Commission.
- [34] National Electrical Manufacturers Association (1999). Motors and Generators Nema Standards Publication No. MG 1.
- [35] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova (2013). “Design of Rotating Electrical Machines”. 2nd edition. John Wiley & Sons. New York, USA.
- [36] International Electrotechnical Commission (IEC) (1991). Dimensions and output series for rotating electrical machines - Part 1: Frame numbers 56 to 400 and flange numbers 55 to 1080, Standard IEC 60072-1.



- [37] National Electrical Manufacturers Association (NEMA), (2011). Motors and Generators, Standard NEMA MG-1, 2011.
- [38] S. Taghavi and P. Pillay. (2016). “A novel grain-oriented lamination rotor core assembly for a synchronous reluctance traction motor with a reduced torque ripple algorithm,” IEEE Transactions on Industry Applications. USA.
- [39] N. Bianchi and B. J. Chalmers (1999). “Effect of the distribution of the laminations in an axially laminated reluctance motor”. Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives. Canterbury, UK.
- [40] T. Tomida, N. Sano, S. Hinotani, K. Fujiwara, H. Kotera, N. Nishiyama, and Y. Ikkai. (2005). “Application of fine-grained doubly oriented electrical steel to ipm synchronous motor”. IEEE Transactions on Magnetics. USA.
- [41] D. Kowal, P. Sergeant, L. Dupre, and A. V. den Bossche (2010). “Comparison of nonoriented and grain-oriented material in an axial flux permanentmagnet machine”. IEEE Transactions on Magnetics, USA.
- [42] W. Fernando and M. Barnes (2011). “Model based optimization and fault tolerant control of permanent magnet machines with harmonic injection pulse width modulation”. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), IEEE, USA.
- [43] W. Fernando, M. Barnes, and O. Marjanovic (2010). “Modelling and control of variable frequency multiphase multi-machine ac-dc power conversion systems”. Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), 5<sup>th</sup> IET International Conference. Manchester, UK.
- [44] W. Fernando, M. Barnes, and O. Marjanovic (2011). “Direct drive permanent magnet generator fed ac–dc active rectification and control for more-electric aircraft engines”. IET Electric Power Applications. UK.
- [45] Nuwantha Fernando and Fuad Hanin. (2017). “Magnetic Materials for Electrical Machine Design and Future Research Directions: A Review”. School of Engineering RMIT University. Melbourne, Australia.
- [46] L. Svensson, A. Reinap, M. Andersson, and M. Alakla (2012). “New manufacturing methods for electric motors using different soft magnetic material combinations”. Electric Drives Production Conference 2nd International. Nuremberg, Germany.



- [47] T. Ishikawa, S. Sato, S. Takeguchi, and A. Matsuo (2012). "Design of a dc motor made of soft magnetic composite core by the experimental design method". IEEE Transactions on Magnetics. USA.
- [48] A. G. Jack, B. C. Mecrow, and C. P. Maddison (1999). "Combined radial and axial permanent magnet motors using soft magnetic composites". Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives. Canterbury, UK.
- [49] L.-O. Pennander, G. Nord Höganäs and K. Maezawa, M. Saito (2005). "Development of a Soft Magnetic Composite Core for a Stirling Cooler Linear Motor". LDIA. Kobe-Awaji, Japan.
- [50] M. F. Hsieh, C. H. Hsu, C. M. Fu, and Y. M. Huang (2005). "Design of transformer with high-permeability ferromagnetic core and strengthened windings for short-circuit condition" IEEE Transactions on Magnetics. USA.
- [51] N. Ertugrul, R. Hasegawa, W. L. Soong, J. Gayler, S. Kloeden, and S. Kahourzade (2015). "A novel tapered rotating electrical machine topology utilizing cut amorphous magnetic material". IEEE Transactions on Magnetics. USA.
- [52] P. Kueser, J. Toth, K. Detert and R. Towner (1970). "High temperature (800° to 1600°F) magnetic materials". Report N° NASA CR-1460. Contract NA 3-6465. National Aeronautics and Space Administration. Washington, USA.
- [53] P. Kueser P and J. Toth (1973). "Development and evaluation of magnetic and electrical materials capable of operating in the 800° to 1600° F temperature range". Report No. NASA CR-2224. Contract NA 3-6465. National Aeronautics and Space Administration. Washington, USA.
- [54] K. Jo Sunday and K. McQuaig (2017). "Effect of Impurities on Aging of Sintered Soft Magnetic Materials". Drexel University. Philadelphia, USA.
- [55] X. Zhang, R. P. del Real, M. Vázquez, and L. H. Lewis (2019). "Consequences of aging on ferromagnetic amorphous  $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$  microwires for advanced inductive applications". AVS Quantum Science. Joint MMM-Intermag Conference, The IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG) and the Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM). Washington DC, USA.
- [56] S. T. Lundmark (2005). "Application of 3D Computation of Magnetic Fields to the Design of Claw-Pole Motors". Doctoral thesis, Department of Energy and Environment,



Chalmers University of Technology, p. 118. Gothenburg, Sweden.

[57] G. Henneberger, M. Bork (2004). "Development of a New Transverse-Flux Motor", Scientific magazine Electromotion.

[58] Guo Y., Zhu J. and Dorrell D.G. (2009). "Design and analysis of a claw pole permanent magnet motor with molded soft magnetic composite core". IEEE Trans. Magn. USA.

[59] Deodha, R.P., Pride A. and Bremner, J.J. (2015). "Design method and experimental verification of a novel technique for torque ripple reduction in stator claw-pole PM machines". IEEE Trans. Ind. USA.



# Anexos



## DESIGN PRINCIPLES FOR RECYCLING INDUCTION MOTORS

Rafael Hernández-Millan.

Dayco, Edificio Dayco, calle Londres,  
Las Mercedes, Caracas, VENEZUELA  
E-mail: [daycohost2@telcel.net.ve](mailto:daycohost2@telcel.net.ve)

Universidad Central de Venezuela,  
Electrical Engineering School, Power Department,  
VENEZUELA.

Jesús Rafael Pacheco-Pimentel and Jaimito Salinas.

Universidad Simón Bolívar, Sede del Litoral, Department of  
Industrial Technology, VENEZUELA.  
E-mail: [jpacheco@usb.ve](mailto:jpacheco@usb.ve), [jsalinas@usb.ve](mailto:jsalinas@usb.ve)  
[jrpachecop@etheron.net](mailto:jrpachecop@etheron.net)

**Abstract.** Establishes design principles and the concept for recyclable induction motors i. e. motor or machine parts may be reused. Technological issues arising from following machine components are covered: stator insulation, rotor insulation, stator core, rotor core, stator windings, rotor windings, bearings, shaft and frame.

Induction motors designed in this manner should have: higher reliability and availability; lower initial and operating costs; smaller losses and environmental advantages. Required machine standards to achieve these goals are discussed, covering: speed, nominal voltage, capacities, shapes, dimensions, insulation, cores, windings, bearings, shafts and frames.

Economic trends dictate that to be competitive with unconventional drives or energy converters of any kind, parts interchangeability and recycling should be taken into account. Furthermore, legislative efforts have begun to mandate recycling or manufacturer "takeback"; therefore, consideration of these matters is a necessity. Residual costs at the end of useful life of recyclable induction motors do not need to be negative; rather, designers and industry should maximize terminal value of an installation. It is offered a new line of enquiry of how to construct large and small induction motors that comply with whole society needs.

**Keyword:** Design, Recycling, induction motors.

### 1 INTRODUCTION

Electromagnetic characteristics are essential features of an induction motor. Having decided unit rating, required inertia and speed; physical dimensions of a machine are selected from a number of combinations of rotor, stator (inner and outer) core diameters and core length and yet allowing rating to be obtained with economic utilization of construction materials. Normally, in large and small induction motors, the machine voltage is defined by the power system engineer. The operational cycle has a bearing on machine efficiency and whether no-load or full-load losses, for instance, take precedence. All these requirements must be woven into the electrical design to form the starting point for the design of mechanical structures to provide necessary interrelationships between stationary and rotating parts.

If to those design ideas, we add recycling principles, we are thinking, theoretically, of reused induction motors, or machines whose parts may be reused many times. It is definitively necessary, for achieving effective recycling to assemble and to disassemble the induction motor in a very simple manner, and to standardize; sizes, shapes and materials (frame, core, slots and windings). Some



justifications for recycling are; to standardize design procedures, construction, and specifications to diminish initial, operational and maintenance costs. Induction motors recyclable are in harmony with world tendency called "*takeback product*", with a positive impact on the environment.

## 2 WHAT IS INDUCTION MOTOR RECYCLING ?

When an induction motor is no longer useful to an industry or a consumer, it can be handled, generally, within following categories[8]:

1. Discarded into the environment.
2. Placed in a permitted landfill.
3. Put to a high-value use, breaking it down into its components, melting steel, copper and aluminum.
4. Rebuilt (totally or partially), some components discarded or reused, or rebuilt motor.
5. Reused.

Categories 1 and 2 are not recycling. Categories 3, 4 and 5 may be regarded as recycling. Categories 1 and 2 damage the environment (external negative value). Categories 3, 4 and 5 create value at life end of the induction machine.

## 3 THE RECYCLABLE INDUCTION MOTOR

A recyclable induction motor is a simple one, easy to assemble and easy to disassemble its stator and rotor cores. A recyclable induction motor uses few materials; it uses materials that do not age significantly on operation, or it uses materials that can be restored "economically" to unaged specifications or it uses materials whose electrical, magnetic and

mechanical characteristics improve with aging. Recyclable induction motor parts may be used "economically" later on another machine of equal or different size. A recyclable induction motor has the highest reliability and availability, the lowest initial and operating costs and the lowest losses; and could be used in a world of manufacturers and users ruled by standards and mechanisms that value and promote recycling, from an "economic" point of view.

## 4 DESIGN PRINCIPLES FOR RECYCLING

Design principles for recycling induction motor might be stated as follows:

- Simplify parts.
- Design, both, for assembly and disassembly.
- Reduce material diversity.
- Maximize usage of recyclable materials.
- Insulators should not age and should be hardened by reversible processes or its characteristics should improve with time.
- Ferromagnetic plates and conductors should not age or its characteristics should improve with time.
- Manufacturers and users relations should be governed by:
  - a) Standards including shapes and dimensions
  - b) Mechanisms that allow for new machines to be made of used or rebuilt parts.

## 5 DIMENSIONS

The initial step on the design of an induction motor requires a specification of performance. The main data needed by the design engineer are power, power factor, line voltage, starting current, frequency, number of phases,

temperature rise of the windings and cores, rated speed and inertia.

Design might begin with a broad dimensional study, as for example, an analysis of the output coefficient [2] defined as:

$$\xi_1 = \frac{P}{D_g^2 L_c N} \quad (1)$$

Where:  $P$  = rated power.  
 $D_g$  = airgap diameter.  
 $L_c$  = gross stator core length.  
 $N$  = synchronous speed.

$\xi_1$  is approximately constant within certain ranges. Thus, it is possible to relate rotor volume, synchronous speed and power. Therefore, rotor and stator internal diameters can be standardized. The stator outer diameter follows a similar relationship [2].

$$\xi_2 = \frac{P}{D_0^3 L_c N} \quad (2)$$

Where:  $D_0$  = stator outer diameter.  
 $\xi_2$  is approximately constant within certain ranges too.

Accordingly, external stator core diameter is closely related to stator core inner diameter and rotor core outer diameter. To achieve needed power the length can be varied. Slots dimension must be standardized too, if ferromagnetic plates are to be interchanged. Figures 1, 2, 3 and 4 show internal and external ferromagnetic core diameters considered.

In addition to synchronous speed, capacity, voltage and current standard values, we have to add dimensions and shapes. For standard dimensions, it is understood, inner and outer stator core diameters, inner and outer rotor

core diameters and slot shapes and dimensions; thus, standard ferromagnetic plates can be used. Ventilating ducts have to be provided in standard dimensions and specified locations too, while refrigerant speeds could be established by manufacturers.

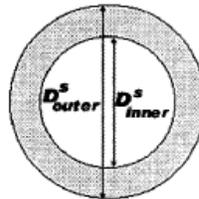


Fig 1. Inner and outer stator core diameters.

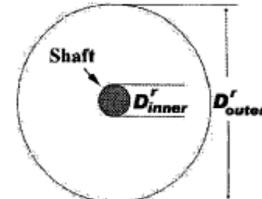


Fig 2. Rotor core diameters.

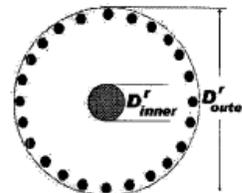


Fig 3. Squirrel cage rotor core diameters

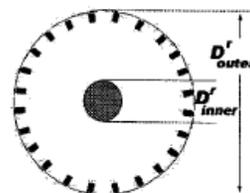


Fig 4. Wound rotor core diameters.

## 6 RECYCLABLE WINDINGS

An induction motor with recyclable stator windings could be designed, at least in two ways:

- One of them is that of a radically new machine with stator slots, in which windings, based on conventional circular power cables, lie in circular bores. An innovative stator design with slots having cylindrical openings and a unique winding arrangement are at the heart of this new concept. Power cables are threaded through the slots with outside semiconducting layers. The winding cables are flexible and easy to bend, simplifying handling, assembly, disassembly and maintenance [3].

- Another way, is an air-gap winding [4] having no iron teeth in the active region as a continuation of ferromagnetic plates (see fig.5). Structurally, the winding employs bonded joints between conductors. A complete air-gap winding machine, means the stator and rotor conductors are not embedded in slots in stator and rotor iron but are, rather, suspended by a structure in the active air-gap region of the machine. Thus, the induction machine can be assembled and dismantled quicky and easily. With these windings, standardization of stator and rotor cores depends mainly on stator and rotor outer and inner core diameters. The teeth spaces might be filled with soft magnetic composites (bonded iron powder).

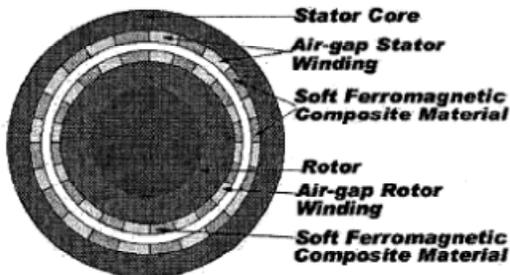


Fig. 5 Air Gap windings

Windings of the kind just described can be specified in a standard manner and construction technologies for mass production may be applied.

Squirrel cage rotor windings pose two different problems when recycling is required:

- The first one deals with windings where no specific damage has been caused at life end. The entire rotor might be reused with little maintenance.
- The second problem is related to reuse of core and windings separately. To achive this need, at least one end of the winding

cage should be disassembled without causing permanent damages through specials mechanisms. In this case, for core and cage, standard dimensions and shapes are needed.

## 7 MATERIALS

### 7.1 Cores

All ferromagnetic materials to consider should have among their characteristics the capacity to be regenerated to initial conditions or where aging mechanisms [9] are neutralized. It is obvious, the need for ferromagnetic plates with small or no age tendency, or even better materials whose characteristics improve with aging. These materials should have low losses, minimum contamination, low impurities and being soft and elastic and their electromagnetic properties should no be sacrificed. In general, losses, impurities and plastic deformations accelerate aging and make less effective or complicated, regenerating treatments.

### 7.2 Winding insulation

Insulating winding systems can be trated in two ways:

- In a recyclable induction motor, preferably, insulations materials for windings should *“become hard with reversible transformation”* and be homogeneous. Hardening with reversible transformation imply that insulators should losse their hardening and recover its properties using relevant treatments. Ideally, windings insulation should be removed easily too.
- The epoxy resin used on modern induction motors, is an example of hard insulations, this material can be removed, with great difficulty but it has demonstrated long life

characteristics. If such type of insulation is used in recyclable induction motor, it should be assumed that windings will be hard to be recycled but in airgap windings.

Electrical insulating varnishes are an important category of protective materials. These coats should be easily removed and regenerated with a appropriate chemical thermal treatment. They are used to coat layer tapes and wrappers, wedges, core plates and other main constructional parts.

### 7.3 Conductors

For iron, copper and aluminum; the industrial system presents an interesting picture. Techniques for recycling these metals are well established, and there is an infrastructure for collecting scrap. However, the greatest end value of a recycled induction machine is obtained when: a) ferromagnetic plates are reused as ferromagnetic plates with equal shapes or even better entire cores are reused and b) coils (metal conductors: copper and aluminium) are reused as coils; or, even better, entire windings. Therefore, again, standard dimensions, shapes and capacities ought to be established; and coils must be designed with minimum or no aging tendencies.

## 8 AGING MECHANISMS

Following situations cause aging on induction machines materials and structures:

- Operational aging situations are related to stresses associated to induction machine operation, characterized as temperature, current densities and voltage cycles, peripheral speed, vibration levels, etcetera, causing non reversible chemical reactions, stresses or deformations.

- Non-operational aging situations may cause non reversible chemical reactions, stresses or deformations too.

In general , reducing operational stress levels: a) increases life, b) facilitates restoration of materials original specifications, and c) diminishes occurrence of irreversible processes. Thus, design of recyclable induction motors demand analysis of stress levels in an "economic" manner.

Induction motor structures deteriorate mainly during operating normal and abnormal conditions. Thermal, electrical and mechanical stresses can cause cracks or deformations or discharges or chemical reactions that destroy the structure integrity. These mechanisms, isolated, are well known, however, composite aging is not well understood. Structures of large sets (machines and load) are too complex for complete analysis; thus, simplifying assumptions are required and results seldom match field behaviour. Stress corrosion, partial discharges, vibration levels, mechanical forces and hot spots are just a few examples that combined, cause aging in a manner difficult to predict. Again, standard structures, standard dimensions and standard shapes might allow deeper statistical analysis, allowing in the future, better designs.

## 9 NEW WORK

- Patent developments.
- Standard dimensions project.
- Proposals for shape standards.
- Formulation of robust "economic" methodologies to study design options on electrical machinery construction and suggested data.
- Prototype development and testing.



## 10 INDUSTRY TENDENCIES ON LARGE INDUCTION MOTOR MANUFACTURING

Most probably, the future will not see original equipment manufacturers developing induction motor components. Rather we anticipate a world of “modern” cooperation where:

- Component developers as insulation and ferromagnetic sheet producers, coil manufactures and core, shaft and frame builders will form partnerships or they will establish strategic alliances to share designs and information for machine developments.
- Original equipment manufacturers will assume the role of integrators.
- There will be intense competition based upon specialized knowledge and large scale production (free trade based upon international specialization using comparative advantages).
- Low cost component developers will expand their operations to capture and internalize technology.
- Standards, and only standards, will ensure part compatibilities.
- Original equipment manufacturers and component developers will partner with machine users through standards, to optimize testing and to reduce time and overall cost to bring electrical machines into the market.
- There will be mechanisms for acquisition of knowledge (open knowledge). No knowledge monopolies. No dominant knowledge firms.

## 11 CONCLUSIONS

- When an induction motor is easily assembled and disassembled, an easily maintained machine is obtained.

Furthermore, when an induction motor is built using standard components, maintenance is cost effective too. Therefore, when recycling principles are used, reduction on maintenance costs are achieved.

- A recyclable induction motor is an ideal machine. Ideal machines do not exist. But ideal machines show designers and users goals, objectively and mark industrial tendencies.
- Ideas presented apply to classic asynchronous alternating current rotating electric machinery. For this reason, it is discussed: a) Definition of a recyclable induction motor, b) Design principles for recycling and, c) Industry tendencies on large electric machines manufacturing. The discussion applies somehow to: a) small machines, b) to all types of rotating electric machines (synchronous, reluctance, direct current, etcetera) and c) to non rotating electric machines (transformers, reactors, etcetera).
- To build recyclable induction motor makes sense when it does “economic” sense. “Economic” means, in this work, overall economic consideration and it does not mean microeconomic evaluation from a manufacturer or a user limited views, that is to say: external costs, real energy and interest costs have to be considered, residual value of an equipment at life end of an installation must be accounted for and society should be viewed as a global one and no from regional perspectives.

## REFERENCES

- [1] R. HERNANDEZ, J. SALINAS, J.R. PACHECO, “*Design Principles for Recycling large Electric Machinery*,”., International Conference on Electrical



- Machines ICEM 2000, vol 3. pp 1679.  
Helsinki, Finland. September 2000.
- [2] V.B. HONSINGER, "Sizing Equations for Electrical Machinery," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol EC-2, N°1, march 1987.
- [3] L. MATS, *Powerformer a radically new rotating machine*, ABB Review, 2/98.
- [4] J. L. KIRTLEY, J. L. SMITH, S. D. UMANS, W. HAGMAN, "Ten MVA Air-gap Armature Windings: Thermal, Structural and Dielectric Result," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol 9 N°2, june 1994. pp 349-356.
- [5] W. TILLAR SHUGG, *Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1986.
- [6] E. L. BRANCATO, "A Pathway to Multifactor Aging", IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol 28, N°5, October 1993.
- [7] P. L. ALGER, *Induction Machines*, Gordon and Breach Science Publishers, Great Britain, 1970.
- [8] L. B. LAVE, C. HENDRICKSON, F. C. McMICHAEL, "Recycling Decisions and Green Design", Environmental, Science and Technology, vol 28, N° 1, 1994, pp 18A-24A.
- [9] Z. GODEC, "Aging of Grain-Oriented Electrical Steel Strips", IEEE Trans. on Magnetics, vol MAG-14, N°1, january 1978.



Helsinki University of  
Technology  
Espoo Finland

## DESIGN PRINCIPLES FOR RECYCLING LARGE ELECTRIC MACHINERY.

Rafael Hernández-Millan.

Dayco, Av Francisco de Miranda,  
Edif. Edicampo, piso 7, Campo Alegre,  
Chacao, Caracas, VENEZUELA.  
E-mail: [daycohojov@telcel.net.ve](mailto:daycohojov@telcel.net.ve)

Universidad Central de Venezuela  
Electrical Engineering School  
Power Department  
Caracas Venezuela

Jaimito Salinas and  
Jesús Rafael Pacheco-Pimentel.

Universidad Simón Bolívar, Sede del Litoral,  
Department of Industrial Technology,  
Baruta, Edo Miranda, VENEZUELA.  
Postal Code: 1086-A, Post Office Box: 89024.  
E-mail: [jpacheco@usb.ve](mailto:jpacheco@usb.ve), [jsalinas@usb.ve](mailto:jsalinas@usb.ve)

### ABSTRACT

Establishes design principles for large classic rotating and recyclable electric machinery (synchronous and induction) i. e. machine parts may be reused. In this respect, recommended materials are discussed. Technological issues arising from following machine components are covered: stator insulation, rotor insulation, stator core, rotor core, stator windings, rotor windings, bearings, shaft, and frame.

Machines designed in this manner should have: higher reliability and availability; lower initial and operating costs; smaller losses and environmental advantages.

Required machine standards to achieve these goals are discussed, covering: speed, nominal voltage, capacities, shapes, dimensions, insulation, cores, windings, bearings, shafts and frames.

Economic trends dictate that to be competitive with unconventional drives or energy converters of any kind, parts interchangeability and recycling should be taken into account. Furthermore, legislative efforts have begun to mandate recycling or manufacturer "takeback"; therefore, consideration of these matters is a necessity. It is shown, residual costs at the end of useful life of a rotating machine does not need to be negative; rather, designers and industry should maximize terminal value of an installation. In this respect, external costs are discussed.

It is offered a new line of enquiry of how to construct large machines that comply with whole society needs.

**Keyword:** Design, Recycling, Large Electric Machinery.

### 1 INTRODUCTION

Electromagnetic characteristics are essential features of an electric machine. Having decided unit rating, required inertia and speed; physical dimensions of a machine are selected from a number of combinations of rotor, stator (inner and outer) core diameters and core length and yet allowing rating to be obtained with economic utilization of construction materials. Normally, in large generators, the machine voltage is left, within limits, to the machine designer so that required parameters and operational characteristics can be obtained adequately. The operational cycle has a bearing on machine

efficiency and whether no-load or full-load losses, for instance, take precedence. All these requirements must be woven into the electrical design to form the starting point for the design of mechanical structures to provide necessary interrelationships between stationary and rotating parts.

If to those design ideas, we add recycling principles, we are thinking, theoretically, of machines whose parts may be used many times. It is definitively necessary, for achieving effective recycling to assemble and to disassemble the machine in a very simple manner, and to standardize; sizes, shapes and materials (frame, core, slots and windings). Some justifications for recycling are; to standardize design procedures, construction, and specifications to diminish initial, operational and maintenance costs. Machines recyclable are in harmony with world tendency called "takeback product", with a positive impact on the environment.

### 2 THE RECYCLABLE ELECTRICAL MACHINES

A recyclable electric machine is a simple one; easy to assemble and easy to disassemble; a recyclable electric machine uses few materials that do not age significantly on operation, or it uses materials that can be restored "economically" to unaged specifications or it uses materials whose electrical, magnetic and mechanical characteristics improve with aging; recyclable electric machine parts may be used "economically" later on another machine of equal or different size; recyclable electric machines have the highest reliability and availability, the lowest initial and operating costs and the lowest losses; and a recyclable machine is used in a world of manufacturers and users ruled by standards and mechanisms that value and promote recycling, from an "economic" point of view.

### 3 DESIGN PRINCIPLES FOR RECYCLING

Design principles for recycling large electrical machines might be stated as follows:

- Simplify parts.
- Design, both, for assembly and disassembly.
- Reduce material diversity.
- Maximize usage of recyclable materials.
- Insulators should not age and should be hardened by reversible processes or its characteristics should improve with time.

- Ferromagnetic plates and conductors should not age or its characteristics should improve with time.
- Manufacturers and users relations should be governed by:
  - a) Standards including shapes and dimensions and b)
  - Mechanisms that allow for new machines to be made of used parts.

**4 DIMENSIONS**

The initiation of the design of a large machine requires a specification of performance. The main data required by the design engineer are power output, power factor, line voltage, frequency, number of phases, temperature rise of the windings and cores, rated speed and inertia.

The starting point of a design might begin with a broad dimensional study, as for example, an analysis of the output coefficient [1] defined as:

$$\xi_1 = \frac{P}{D_g^2 L_c N} \tag{1}$$

Where:

- $P$  = rated power.
- $D_g$  = airgap diameter.
- $L_c$  = gross stator core length.
- $N$  = synchronous speed.

$\xi_1$  is approximately constant within certain ranges. Thus, it is possible to relate rotor volume, synchronous speed and power. Therefore, rotor and stator internal diameters can be standardized. The stator outer diameter follows a similar relationship [2].

$$\xi_2 = \frac{P}{D_0^3 L_c N} \tag{2}$$

Where:

- $D_0$  = stator outer diameter.
- $\xi_2$  is approximately constant within certain ranges too.

Accordingly, external stator core diameter is closely related to stator core inner diameter and rotor core outer diameter. To achieve needed power the length can be varied. Slots dimension must be standardized too if ferromagnetic plates are to be interchanged. Figures 1, 2, 3, 4, 5 and 6 show internal and external ferromagnetic core diameters considered.

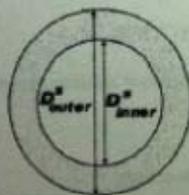


Fig 1 Inner and outer stator core diameters

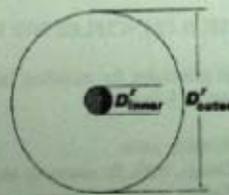


Fig 2 Solid rotor core diameters

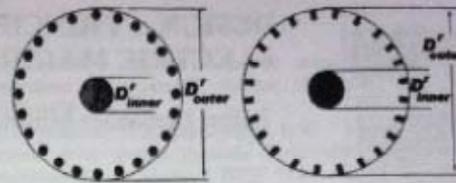


Fig 3 Squirrel cage rotor core diameters

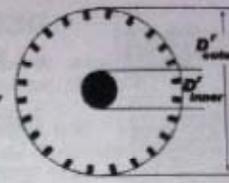


Fig 4 Wound rotor core diameters

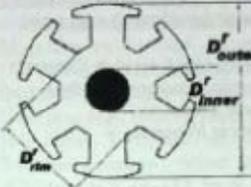


Fig 5 Salient pole rotor core diameters

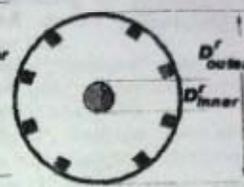


Fig 6 Turbogenerator rotor core

In addition to synchronous speed, capacity, voltage and current standard values, we have to add dimensions and shapes. For standard dimensions, it is understood, inner and outer stator core diameters, inner and outer rotor core diameters and slot shapes and dimensions; thus, standard ferromagnetic plates can be used. Ventilating ducts have to be provided in standard dimensions and specified locations too, while refrigerant speeds could be established by manufacturers.

**5 RECYCLABLE WINDINGS**

An electrical machine with recyclable windings could be designed, at least in two ways:

- One of them is that of a radically new machine that include both stator and rotor slots; in which windings, based on conventional circular high voltage power cables, lie in circular bores. An innovative stator and rotor design with slots having cylindrical openings and a unique winding arrangement are at the heart of this new concept [3].

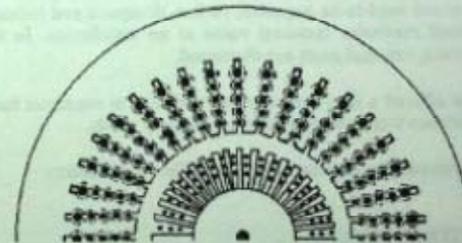


Fig 7. Stator and rotor sections with circular bores and circular power cables.

High-voltage cables are threaded through the slots with outside semiconducting layers (see fig 7). The winding cables are flexible and easy to bend, simplifying handling, assembly, disassembly and maintenance.

- Another way, is an air-gap winding [4] having no iron teeth in the active region as a continuation of ferromagnetic plates (see fig 8). Structurally, the winding

employs bonded joints between conductors. A complete air-gap winding machine, means the stator and rotor conductors are not embedded in slots in stator and rotor iron but are, rather, suspended by a structure in the active air-gap region of the machine. This is necessary to be able to assemble and to dismantle the machine quickly and easily. With these windings, standardization of stator and rotor cores depends only on stator and rotor outer and inner core diameters. The teeth spaces might be filled with soft magnetic composites (bonded iron powder).

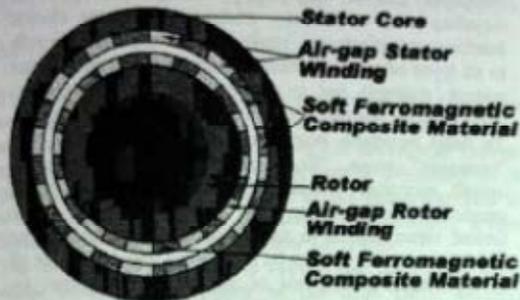


Fig. 8 Air Gap windings

Windings of the kind just described can be specified in a standard manner and construction technologies for mass production may be applied.

Squirrel cage rotor or stator windings pose two different problems when recycling is required:

- The first one deals with windings where no specific damage has been caused at life end. The entire rotor might be reused with superficial maintenance.
- The second problem is related to reuse of core and windings separately. To achieve this need, at least one end of the winding cage should be disassembled without causing permanent damages through special mechanisms. In this case, for core and cage, standard dimensions and shapes are needed.

## 6 MATERIALS

### 6.1 Cores

All ferromagnetic materials to consider should have among their characteristics the capacity to be regenerated to initial condition or where aging mechanisms [5] are neutralized. It is obvious, the need for ferromagnetic plates with small or no age tendency, or even better materials whose characteristics improve with aging. These materials should have low losses, minimum contamination, low impurities and being soft and elastic and their electromagnetic properties should not be sacrificed. In general, losses, impurities and plastic deformations accelerate aging and make less effective or complicated, regenerating treatments.

### 6.2 Winding insulation

Insulating winding systems can be treated in two ways:

In large recyclable machines, preferably, insulation materials for windings should "become hard with reversible

transformation" and be homogeneous. Hardening with reversible transformation imply that insulator should lose their hardening and recover its properties using relevant treatments. Ideally, windings insulation should be removed easily too.

The epoxy resin used on modern machines (see Fig 9), is an example of hard insulations, this material can be removed, with great difficulty but it has demonstrated long life characteristics. If such type of insulation is used in recyclable machine, it should be assumed that windings will be hard to be recycled but in airgap windings.

Electrical insulating varnishes are an important category of protective materials. These coats should be easily removed and regenerated with a appropriate chemical thermal treatment. They are used to coat layer tapes and wrappers, wedges, core plates and other main constructional parts.

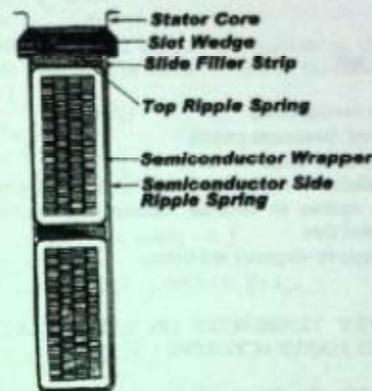


Fig. 9 Slot with typical conductor.

### 6.3 Conductors

For iron, copper and aluminium, the industrial system presents an interesting picture. Techniques for recycling these metals are well established, and there is an infrastructure for collecting scrap. However, the greatest end value of an electric machine is obtained when: a) ferromagnetic plates are reused as ferromagnetic plates with equal shapes and b) coils (metal conductors: copper and aluminium) are reused as coils, or, even better, entire windings. Therefore, again, standard dimensions, shapes and capacities ought to be established; and coils must be designed with minimum or no aging tendencies.

## 7 AGING MECHANISMS

Following situations cause aging on electric machinery materials and structures:

- Operational aging situations are related to stresses associated to machine operation, characterized as temperature, current densities and voltage cycles, peripheral speed, vibration levels, etcetera, causing non reversible chemical reaction or deformations.
- Non-operational aging situations may cause non reversible chemical reactions and deformations too.

In general, reducing operational stress levels: a) increases life, b) facilitates restoration of materials original specifications, and

c) diminishes occurrence of irreversible processes. Thus design of recyclable electrical machines demands analysis of stress levels in an "economic" manner.

Electrical machine structures deteriorate mainly during operating normal and abnormal conditions. Thermal, electrical and mechanical stresses can cause cracks or deformations or discharges or chemical reactions that destroy the structure integrity. These mechanisms, isolated, are well known, however, composite aging is not well understood. Structures of large sets (machines and load) are too complex for complete analysis; simplifying assumptions are required; thus, results seldom match field behaviour. Stress corrosion, partial discharges, vibration levels, mechanical forces and hot spots are just a few examples that combined, cause aging in a manner difficult to predict. Again, standard structures might allow deeper statistical analysis, allowing in the future, better reusable designs.

## 8 NEW WORK

- Patent developments.
- Standard dimensions project.
- Proposals for shape standards.
- Formulation of robust "economic" methodologies to study design options on electrical machinery construction and suggested data.
- Prototype development and testing.

## 9 INDUSTRY TENDENCIES ON LARGE ELECTRIC MACHINES MANUFACTURING

Most probably, the future will not see original equipment manufacturers developing electrical machine components. Rather we anticipate a world of "modern" cooperation where:

- Component developers as insulation and ferromagnetic sheet producers, coil manufacturers and core, shaft and frame builders will form partnerships or will establish strategic alliances to share designs and information for machine developments.
- Original equipment manufacturers will assume the role of integrators.
- There will be intense competition based upon specialized knowledge and large scale production (free trade based upon international specialization using comparative advantages).
- Low cost component developers will expand their operations to capture and internalize technology.
- Standards, and only standards, will ensure part compatibilities.
- Original equipment manufacturers and component developers will partner with machine users through standards, to optimize testing and to reduce time and overall cost to bring electrical machines into the market.
- There will be mechanisms for acquisition of knowledge (open knowledge). No knowledge monopolies. No dominant knowledge firms.

## 10 CONCLUSIONS

- When an electric machine is easily assembled and disassembled, an easily maintained machine is obtained.

Furthermore, when a machine is built using standard components, maintenance is cost effective too. Therefore, when recycling principles are used, reduction on maintenance costs are achieved.

- A recyclable electric machine is an ideal machine. Ideal machines do not exist. But ideal machines show designers and users goals objectively and mark industrial tendencies.
- Although, ideas presented apply to large classic (synchronous and asynchronous) alternating current rotating electric machinery, discussed: a) Definition of a recyclable electric machine, b) Design principles for recycling and, c) Industry tendencies on large electric machines manufacturing, apply to small machines as well, to all types of rotating electric machines (reluctance, direct current, etcetera) and to non rotating electric machines (transformers, reactors, etcetera).
- To build recyclable machines makes sense when it does "economic" sense. "Economic" means, in this work, overall economic consideration and it does not mean microeconomic evaluation from a manufacturer or a user limited views, that is to say: external costs, real energy and interest costs have to be considered, residual value of an equipment at life end of an installation must be accounted for and society should be viewed as a global one and no from regional perspectives.

## REFERENCES

- [1] J. H. WALKER, *Large synchronous machines Design, manufacture and operation*, Clarendon Press Oxford, Great Britain, 1981.
- [2] V. B. HONSINGER, "Sizing Equations for Electrical Machinery.", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol EC-2, N°1, march 1987.
- [3] L. MATS, *Powerformer a radically new rotating machine*, ABB Review, 2/98.
- [4] J. KITLEY, J. SMITH, S. UMANS, W. HAGMAN, "Ten MVA Air-gap Armature Windings: Thermal, Structural and Dielectric Result.", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol 9 N°2, june 1994.
- [5] Z. GODEC, "Aging of Grain-Oriented Electrical Steel Strips", IEEE Trans. on Magnetics, vol MAG-14, N°1, january 1978.
- [6] W. TILLAR SHUGG, *Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1986.
- [7] E. L. BRANCATO, "A Pathway to Multifactor Aging", IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol 28, N°5, October 1993.