



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Los prototipos como fase de  
desarrollo y optimización de  
motores eléctricos**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Arturo Artemio Castelán Mijangos

**ASESOR DE INFORME**

M.F. Gabriel Hurtado Chong



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

# FACULTAD DE INGENIERÍA

## ÍNDICE GENERAL

### Índice de figuras

### Índice de tablas

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	3
1.2	Descripción de la empresa	3
1.2.1	Historia	3
1.2.2	Fundadores	4
1.3	Misión, Visión y contexto social	6
1.3.1	Misión	6
1.3.2	Visión	6
1.3.3	Valores	6
1.4	WEG en México	7
1.5	Descripción del puesto	7
1.5.1	Actividades desempeñadas	8
2	Antecedentes	10
2.1	Máquinas eléctricas	10
2.1.1	Motor eléctrico	10
2.1.2	Tipos de motores eléctricos	12
2.1.3	Conceptos básicos	14
2.1.3.1	Motor de Inducción	15
2.1.4	Evolución del motor eléctrico	17
2.1.5	Aplicaciones	19
2.2	Normativas para motor eléctrico	20
2.2.1	Norma NEMA	21
2.2.1.1	NEMA MG 1	21
2.2.2	Norma IEC	21
2.2.2.1	IEC 60034-2-1	21
2.2.3	NEMA vs. IEC	22
2.2.3.1	Voltaje y frecuencia	22
2.2.3.2	Factor de servicio y régimen de servicio	23
2.2.3.3	Clases de aislantes	25

2.2.3.4	Medición de eficiencia	26
2.2.3.5	Tamaños y designación de carcasas	26
2.2.3.6	Formas constructivas	29
2.2.4	México y la Norma NOM.	31
2.3	Organismos de certificación	31
2.3.1	UL	32
2.3.2	CSA	32
2.3.3	ANCE	33
2.4	Ingeniería Mecánica y el motor eléctrico.	33
2.4.1	Principales componentes mecánicos	34
2.4.1.1	Tapas y bridas	34
2.4.1.1.1	Brida y tapa delantera	35
2.4.1.1.2	Tapa trasera	37
2.4.1.2	Carcasas	38
2.4.1.3	Flechas	40
2.4.1.4	Cojinetes	44
2.4.1.5	Ventiladores	46
2.4.1.6	Sellos	48
2.4.2	Optimizaciones mecánicas	53
2.4.3	Desarrollo de productos	56
2.4.4	Ensayos de laboratorio	59
3	Actividades desarrolladas	66
3.1	Control de proyectos especiales.	66
3.1.1	El diseñador y el equipo de trabajo.	71
3.1.2	Modelos físicos.	75
3.1.3	Ingeniería del producto	78
3.1.4	Caso de éxito.	79
3.1.4.1	Motores para industria alimenticia y farmacéutica.	79
3.1.4.1.1	Impacto económico.	86
3.1.5	Nuevas líneas de producto	87
3.2	Prototipos virtuales.	91
3.2.1	Desarrollo de tapas en hierro fundido	91
3.2.2	Reducción de calibre en carcasas.	102
4	Conclusiones	111
5	Bibliografía	115

# **FACULTAD DE INGENIERÍA**

# Índice de figuras

Figura 1.1 Línea de tiempo	4
Figura 2.1 Motor y generador (Mora, 2003)	11
Figura 2.2 Partes de un motor eléctrico (Motores Eléctricos, 2019)	12
Figura 2.3 Chapas rotor y estator (Indiamart, 2019)	12
Figura 2.4 Clasificación de los motores eléctricos (WEG, 2017)	13
Figura 2.5 Estator bobinado (Topbagsui, 2019)	15
Figura 2.6 Rotor jaula de ardilla (DocPlayer, 2019)	15
Figura 2.7 Curva característica de un motor Par vs. Velocidad (Umans, 2014)	16
Figura 2.8 Evolución del motor eléctrico (WEG, 2019)	18
Figura 2.9 Pérdidas en un motor eléctrico (Mora, 2003)	18
Figura 2.10 Designación NEMA (NEMA, 2009)	27
Figura 2.11 Designación IEC (Tesla, 2019)	27
Figura 2.12 Formas constructivas (WEG, 2017)	30
Figura 2.13 Tapa Cerrada (WEG CAD Library, 2019)	35
Figura 2.14 Tapa Abierta (WEG CAD Library, 2019)	35
Figura 2.15 Tapa brida FC (WEG CAD Library, 2019)	36
Figura 2.16 Brida tipo D (NEMA, 2009)	36
Figura 2.17 Brida tipo C (NEMA, 2009)	37
Figura 2.18 Tapa trasera con caja de conexión (WEG CAD Library, 2019)	38
Figura 2.19 Carcasa Hierro fundido (WEG CAD Library, 2019)	39
Figura 2.20 Carcasa cerrada de acero rolado (WEG CAD Library, 2019)	40
Figura 2.21 Flecha	41
Figura 2.22 Secciones críticas de un eje.	42
Figura 2.23 Rodamiento de esferas (SKF Rodamiento de esferas, s.f.)	45
Figura 2.24 Rodamiento de rodillos (SKF Rodamiento de rodillos, s.f.)	45
Figura 2.25 Cojinetes de deslizamiento (SKF Cojinetes de deslizamiento, s.f.)	45
Figura 2.26 Ventilador Motor (servicios, 2019)	47
Figura 2.27 Curva característica de un ventilador (Salvador Escoda S.A., 2019)	47
Figura 2.28 Clasificación de sellado de fluidos (Figueroa, 2019).	48
Figura 2.29 Sello de labio (Glowny Mechanik, 2016)	49
Figura 2.30 Sello de laberinto (SKF, 2019)	49
Figura 2.31 V Ring (SKF, 2019)	49
Figura 2.32 Perfiles de retenes (SKF, 2019)	50
Figura 2.33 Gráfica de selección de material de retén (Anyseals, 2019)	52
Figura 2.34 Análisis modal en motor (Cassiano A. Cezario, 2014)	54
Figura 2.35 Simulación de flujo en ventiladores (Cassiano A. Cezario, 2014)	55
Figura 2.36 Etapas de una simulación	55
Figura 2.37 Diagrama de flujo de desarrollo de proyecto	58
Figura 2.38 Norma aplicables a ensayos de motores de inducción.	59
Figura 2.39 Puntos de medición de la vibración (NEMA, 2019)	63
Figura 2.40 Puntos de medición de ruido en una máquina eléctrica.	64
Figura 3.1 Flujo de proyectos especiales	68
Figura 3.2 Variables en el desarrollo de un producto (Ullman, 2010).	69
Figura 3.3 Relación costo- diseño- manufactura (Ullman, 2010).	70
Figura 3.4 El equipo de diseño (Ullman, 2010).	73
Figura 3.5 Flujo de integración de un equipo.	74

## FACULTAD DE INGENIERÍA

Figura 3.6 Entendiendo la necesidad del producto (Ullman, 2010).	76
Figura 3.7 Motor especial lavable.	80
Figura 3.8 Cotas críticas para montaje y funcionamiento de retenes. (WEG - Retenes)	84
Figura 3.9 Diámetro interno de reten vs eje. (WEG - Retenes)	85
Figura 3.10 Flujo de desarrollo de nuevas líneas de productos.	88
Figura 3.11 Actividades correspondientes las tres fases de proyecto.	89
Figura 3.12 Motor para uso agrícola (Propiedad WEG).	90
Figura 3.13 Motor para secado de granos (WEG, 2019).	90
Figura 3.14 Motor lavable (Propiedad WEG).	90
Figura 3.15 Propuesta de tapas de aluminio para hierro fundido	92
Figura 3.16 Esquema de circularidad. (GRUPO TECNOLOGÍA MECÁNICA, 2020)	93
Figura 3.17 Esquema de aplicación de fuerza por las mordazas	93
Figura 3.18 Perfil de deformación generado por las mordazas	93
Figura 3.19 Perfil de deformación generado después de retirar las fuerzas aplicadas por las mordazas.	94
Figura 3.20 Sobre-metal, ángulo de extracción y radios en piezas fundidas (WPS-6517)	94
Figura 3.22 circunferencias generadas en el método LSC. (Sui, 2012)	97
Figura 3.23 Resultados de simulación.	98
Figura 3.24 Comparativa de distribución normal de tapa referencia (Verde) vs Propuesta (Azul).	100
Figura 3.25 Maquinado de guías (Propiedad de WEG)	103
Figura 3.26 Deformación de carcasas con propuesta de chapa de 1.5 mm	103
Figura 3.27 Pares de contacto empleados (Carcasa – Estator – Pie)	105
Figura 3.28 Malla empleada.	105
Figura 3.29 Resultados de simulación (Deformaciones).	106
Figura 3.30 Tolerancias de maquinado de guías en carcasa.	107
Figura 3.31 Representación gráfica de deformaciones.	108
Figura 3.32 Principales cotas con influencia en el juego radial de un motor (WPS-6344, propiedad de WEG).	109
Figura 3.33 Resultado de análisis de tolerancias de juego radial con las tolerancias propuestas en el maquinado de guías de tapas (propiedad de WEG).	110

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Relación Voltaje Frecuencia (NEMA Water energy toolkit, 2019)	22
Tabla 2.2 Régimen de servicio (WEG, 2017)	24
Tabla 2.3 Tipos de aislantes IEC (NEMA Water energy toolkit, 2019)	26
Tabla 2.4 Equivalencias Carcasa IEC y NEMA	28
Tabla 2.5 Primer dígito IP (WEG, 2017)	29
Tabla 2.6 Segundo dígito IP (WEG, 2017)	29
Tabla 2.7 Designación formas constructiva (Roydisa, 2019)	30
Tabla 2.8 Ensayos realizados a motor de inducción (Rüncos F. , 2017).	60
Tabla 2.9 Tipos de aislamientos y límites de elevación de temperatura (Rüncos F. , 2017)	62
Tabla 2.10 Límites de vibración en mm/s r.m.s (NEMA, 2009)	63
Tabla 3.1 Identificación de tareas y secuencia de desarrollo	76
Tabla 3.2 Fallo y causas posibles de corriente en vacío elevada.	81
Tabla 3.3 Diferencia entre proyectos	82
Tabla 3.4 Fallo y posible causa de rompimiento de reten.	83
Tabla 3.5 Interferencias entre reten y eje. (WEG - Retenes)	85
Tabla 3.6 Proyecto de motores lavables.	87
Tabla 3.7 Tapas y bridas propuestas	95
Tabla 3.8 Herramientales empleados en maquinado y sus propiedades mecánicas.	95
Tabla 3.9 Tabla de resultados (Referencia)	99
Tabla 3.10 Tabla de resultados (Propuesta)	99
Tabla 3.11 Promedio y desviación estándar de los errores de circularidad obtenidos (Referencia)	99
Tabla 3.12 Promedio y desviación estándar de los errores de circularidad obtenidos (Propuesta)	100
Tabla 3.13 Alcance del proyecto.	101
Tabla 3.14 Resultados de análisis económico.	102
Tabla 3.15 Materiales base para simulación.	104
Tabla 3.16 Propiedades mecánicas de los materiales empleados.	104
Tabla 3.17 Controles de malla.	106
Tabla 3.18 Calidad de malla.	106
Tabla 3.19 Comparativa de errores de circularidad en carcasas de 1.5 mm y 1.9 mm sin maquinado de guías.	107

# **FACULTAD DE INGENIERÍA**





# 1 INTRODUCCIÓN

Al encontrarme en el último semestre de la licenciatura de ingeniería mecánica, tuve la oportunidad de ejercer de una manera profesional todos aquellos conocimientos que adquirí durante mi formación académica. Las puertas me fueron abiertas por una empresa manufacturera de origen brasileño, dedicada principalmente a la fabricación de motores eléctricos, aunque en los últimos años se ha atrevido a incursionar en diferentes áreas, tales como automatización y control, dispositivos de protección, motorreductores, generación y distribución de energía, además de tener presencia en la industria química con productos como pinturas y barnices.

Así es como WEG, nombre dado a partir de las iniciales de cada uno de sus fundadores, se ha convertido en una empresa con filiales en 29 países y fábricas en 12 países con un portafolios de más de 460 líneas de productos (WEG, 2018). Hablando del área específica de desarrollo en la que me encuentro, se tiene una producción anual de 16 millones de motores eléctricos

Durante mi estancia laborando en la empresa, me he desempeñado en diferentes labores y he participado en una gran diversidad de proyectos, enmarcando de esta forma la diversidad y la capacidad de adaptación que debe desarrollar un ingeniero para la vida profesional. Mi ingreso a la empresa fue el 11 de noviembre de 2016; con tres meses de prueba, en los cuales desarrollé labores de atención a planta, tiempo manejado como de aprendizaje y acercamiento al producto, dado que me encontraba en el departamento de Ingeniería de producto, era de suma importancia conocer lo que se desarrolla (motores eléctricos). Pasado este tiempo inicial de aprendizaje y capacitación, que es continuo, fue momento de comenzar a involucrarme con las labores cotidianas de un departamento de ingeniería. A partir de entonces, comenzó la travesía en el mundo de las consultas, proyectos, prototipos, mejoras, coordinación y desarrollo de nuevos productos, empleando como herramientas normas, procedimientos de cálculo, software de diseño y simulación.

Estas nuevas responsabilidades me abrieron paso para desarrollarme como ingeniero y permitirme explorar de una manera diferente la ingeniería; es decir, una ingeniería fuera de lo académico, donde la toma de decisiones, la solución de problemas, las propuestas de mejora, incluso la reducción de costos, son temas cotidianos y cruciales para la empresa. Al final, es una actividad económica, y, como tal, entre menos errores y costos, mayores ganancias. En este punto es donde un ingeniero recién egresado entiende que la ingeniería es una mezcla de física y economía; la primera cimienta las bases matemáticas y las leyes naturales para dar una solución a un problema, y la segunda

pretende optimizar los recursos empleados.

Por lo anterior, presento este informe de trabajo profesional basado en los lineamientos establecidos para titulación por esta modalidad.

En el primer capítulo se da una descripción detallada de la empresa, al igual que del puesto que he desempeñado y de las actividades, proyectos y demás tareas que he desarrollado durante mi estancia en la empresa, incluyendo una reseña histórica de la misma, desde su fundación hasta la actualidad. Se incluye, también, una pequeña descripción del portafolios de productos, profundizando en mi área principal de labores, que son los motores eléctricos.

En el segundo capítulo se introduce el concepto de *motor eléctrico*, sus especificaciones, aplicaciones, así como la actualidad y un breve panorama del futuro de los motores eléctricos, y su importancia en la industria y vida cotidiana del hombre. Esto cimienta las bases para justificar las actividades desempeñadas, las cuales se describen con detenimiento en el tercer capítulo, recordando que, como actividad económica, una ganancia monetaria es un objetivo indispensable. Se realiza una breve inmersión a los ensayos de laboratorio que permiten tomar decisiones, valorar proyectos, incluso certificarlos ante diferentes entidades.

En resumen, en el desarrollo del segundo capítulo, se hace mención de las normas empleadas, procedimientos, uso de herramientas de software, ensayos de laboratorio, certificaciones y su relación con las bases teóricas obtenidas durante el transcurso de la formación académica como ecuaciones, criterios de diseño, presentación de informes y planeamiento de proyectos.

El tercer capítulo se centra en describir los proyectos más relevantes desarrollados y llevados a cabo, como son: la implementación de la metodología para desarrollo de productos especiales, cada proyecto con especialidades eléctricas y mecánicas diferentes definidas por el mercado, y la aplicación, optimización de componentes mecánicos mediante el empleo de simulaciones, abordando los temas, desde la perspectiva de prototipado y su impacto en la generación de nuevos negocios y reducción de costos.

Como capítulo final, se presenta un resumen de las actividades antes descritas con un análisis crítico acerca del enfoque de la ingeniería práctica, destacando las necesidades teóricas para poder desempeñar las labores, y con esto concluir el presente informe.

## 1.1 Objetivos

- Presentar un informe de actividades profesionales desarrolladas durante el periodo de julio/2017 a enero/2020, bajo la modalidad de titulación por experiencia profesional.
- Exponer el impacto de las actividades desempeñadas como ingeniero dentro de un ambiente laboral y su impacto en el crecimiento de la compañía.
- Realizar un análisis crítico de las necesidades de la formación teórica de un ingeniero para desempeñarse en el mundo laboral.

## 1.2 Descripción de la empresa

WEG es una empresa de origen brasileño dedicada principalmente al desarrollo y fabricación de motores eléctricos. En la década de los 80 comenzó con la producción de componentes electrónicos, productos para automatización industrial, transformadores de fuerza y distribución, pinturas líquidas y en polvo, así como barnices electroaislantes.

### 1.2.1 Historia

El 16 de septiembre de 1961, en una pequeña ciudad del sur de Brasil, Jaraguá Do Sul, tres hombres con visión y ambición comenzaron una pequeña relación que culminaría en lo que hoy es una de las empresas con mayor presencia en el mercado de motores eléctricos. Werner Ricardo Voigt, Eggon João de la Silva y Geraldo Werninghaus, fundadores de la empresa que toma como nombre las iniciales de cada uno de ellos, y con sus habilidades de electricista, administrador y mecánico, respectivamente, surgió lo que fue llamado "electromotores Jaraguá", que dio paso al nombre que rompería fronteras WEG. (WEG, 2018)

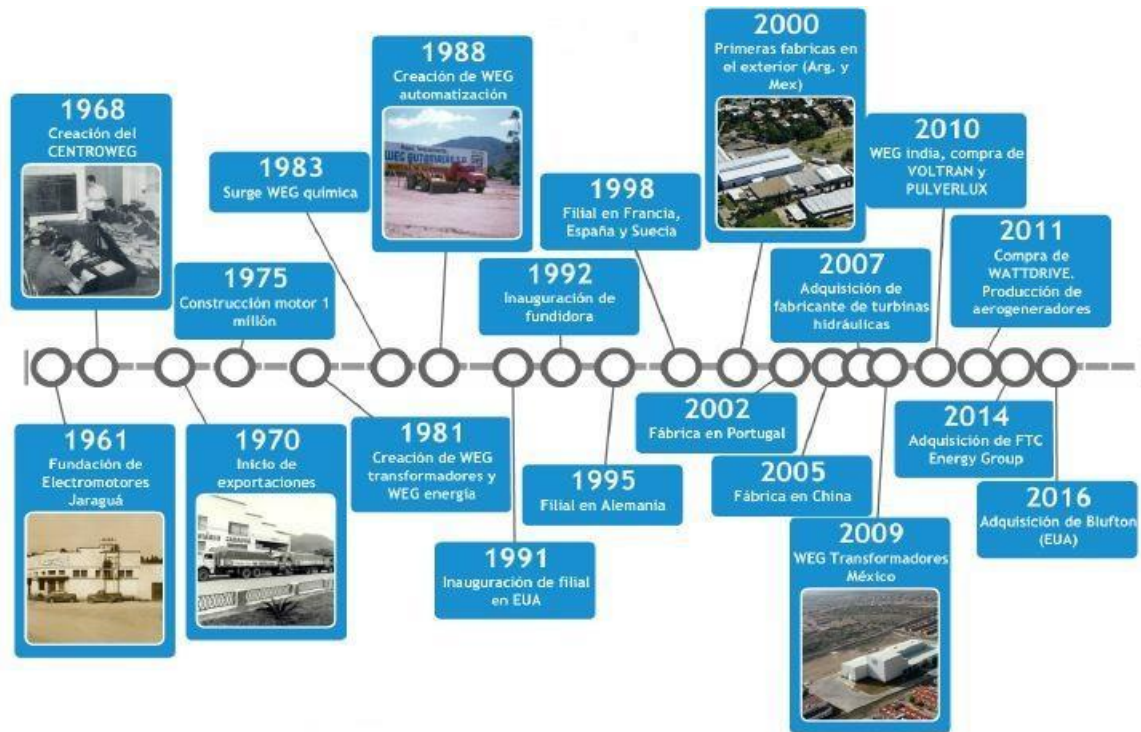


Figura 1.1 Línea de tiempo

## 1.2.2 Fundadores

### Werner Ricardo Voigt

“En toda nuestra vida personal y profesional, siempre primamos por la honestidad. Jamás intentamos lucrar perjudicando a alguien”

Descendiente de inmigrantes alemanes, Werner Ricardo Voigt nació el día 8 de septiembre de 1930. Desde niño tuvo la electricidad como una pasión. Werner también despertó temprano a los placeres de la lectura por medio de su abuelo, Leo Schulz, constructor y profesor, que recibía innumerables libros y revistas técnicas de Alemania.

De adolescente, vivió en Joinville, donde estudió en SENAI y trabajó en el taller de Werner Strohmeyer. A los 18 años fue convocado para servir al Ejército, en Curitiba/PR. Luego del servicio militar, fue uno de los dos soldados seleccionados para frecuentar la Escuela Técnica Federal, donde se especializó en radiotelegrafía y electrónica.

En septiembre de 1953, Werner instaló un pequeño taller en el Centro de Jaraguá do Sul. Este prestaba sus servicios a los pocos vehículos motorizados que circulaban por Jaraguá y alrededores; más tarde, utilizaría su talento para dar inicio a una de las mayores empresas del mundo: WEG.

Werner Ricardo Voigt ideó el prototipo de un motor que se tornó en el producto originario de WEG. Su personalidad y espíritu llevaron a WEG a convertirse en una empresa con innovación, y a la vanguardia y modernidad técnica. En 2008 monta en Schroeder/SC el Centro de Enseñanza Técnica y Educacional Werner Ricardo Voigt, favoreciendo con oportunidades de enseñanza a los jóvenes de la región. En junio de 2016, a los 85 años, Werner Ricardo Voigt fallece de causas naturales en Jaraguá do Sul. (WEG, 2019)

### **Eggon João da Silva**

“Hombres motivados por una idea son la base del éxito”

Eggon João da Silva nació el 17 de octubre de 1929. Hijo de Emilio da Silva y Magdalena da Silva; Emilio fue profesor, fotógrafo, carpintero, ebanista, músico y comerciante, entre otras actividades que realizó en vida. Escribió el libro *Jaraguá do Sul - La población del Valle de Itapocu*, referencia para muchos estudiosos de la historia catarinense.

Eggon comenzó a trabajar desde temprana edad en una oficina notarial de Jaraguá do Sul, adquiriendo habilidades administrativas muy rápidamente. Posteriormente se convirtió en socio de una empresa dedicada a la fabricación de tubos para escape de vehículos, para adquirir un reto mayor. Junto a Werner y Geraldo, Eggon no sólo estuvo presente en la fundación de WEG, sino que estuvo presente en la creación de consejos de otras empresas.

En septiembre de 2015, a los 85 años, Eggon João de la Silva fallece de causas naturales en un hospital de Jaraguá do Sul. (WEG, 2019)

### **Geraldo Werninghaus**

“Nosotros crecimos porque desde el inicio pensamos en grande”

Geraldo Werninghaus nació el 26 de noviembre de 1932. A los 14 años comenzó su aprendizaje como mecánico, sumergiéndose en un mundo de tornos, fresas, grasa y estopas. A los 29 años fue invitado a formar parte de la sociedad junto con Eggon y Werner, que, aportando sus sólidos conocimientos en mecánica, así como su creatividad para solucionar problemas, fueron de gran utilidad para formar una empresa de referencia en Brasil.

En la fábrica, Werninghaus se encargaba de la producción. Era considerado un líder con gran enfoque en la producción y en los equipos de trabajo. Era una persona dedicada al trabajo y a la

comunidad. El 10 de febrero de 1999, un accidente de tránsito interrumpió precozmente la carrera y vida de Geraldo Werninghaus. (WEG, 2019)

## 1.3 Misión, Visión y contexto social

### 1.3.1 Misión

*Crecimiento continuo y sustentable, manteniendo la simplicidad*

### 1.3.2 Visión

*Ser referencia global en máquinas eléctricas y con amplia línea de productos, ofreciendo soluciones eficientes y completas*

### 1.3.3 Valores

- Compañía humana
- Trabajo en equipo
- Eficiencia
- Flexibilidad
- Innovación
- Liderazgo

## 1.4 WEG en México

WEG es el más reconocido fabricante brasileño de motores eléctricos. Su historia en México inicia en los años 80, pero no fue sino hasta el año 2000, con la compra de su primera planta en Tlalnepantla de Baz, Estado de México, que la empresa inició un proceso acelerado de expansión en el país. En 2003 la empresa compró Mabe Motores; en 2004 construyó su nueva planta en Huehuetoca, Estado de México, y en 2006 las empresas WEG y VOLTRAN concretaron una alianza estratégica que les permitiría tener una mayor proyección en el mercado de América del Norte. En 2010 WEG amplió su participación en VOLTRAN del 30% al 60%.

Para el año 2014 se anuncia una nueva inversión de casi \$120 000 millones de dólares en el estado de Hidalgo, la cual consta de una planta para fundición de los componentes empleados en la planta de motores ubicada en Huehuetoca, Estado de México. (WEG, 2014)

## 1.5 Descripción del puesto

Me he desarrollado como proyectista mecánico en el Departamento de Ingeniería del Producto. Ahí desarrollo actividades de modificación de planos (ejes, carcasas, tapas, cajas de conexión, etc.); asimismo, realizo proyectos con solicitudes especiales, tales como salidas de flecha, formas constructivas,<sup>1</sup> desarrollo y optimización de componentes, entre otras. Para poder desempeñar este puesto, son requeridas habilidades analíticas, manejo de software de diseño, conocimiento en mecánica de materiales, conocimiento de normas y estandarizaciones de componentes. Así mismo, he desempeñado labores de coordinación de muestras y prototipos enfocado en la entrega de productos de calidad y en tiempo.

---

<sup>1</sup> Características dimensionales estandarizadas en diferentes normalizaciones como NEMA o IEC.



## 1.5.1 Organigrama

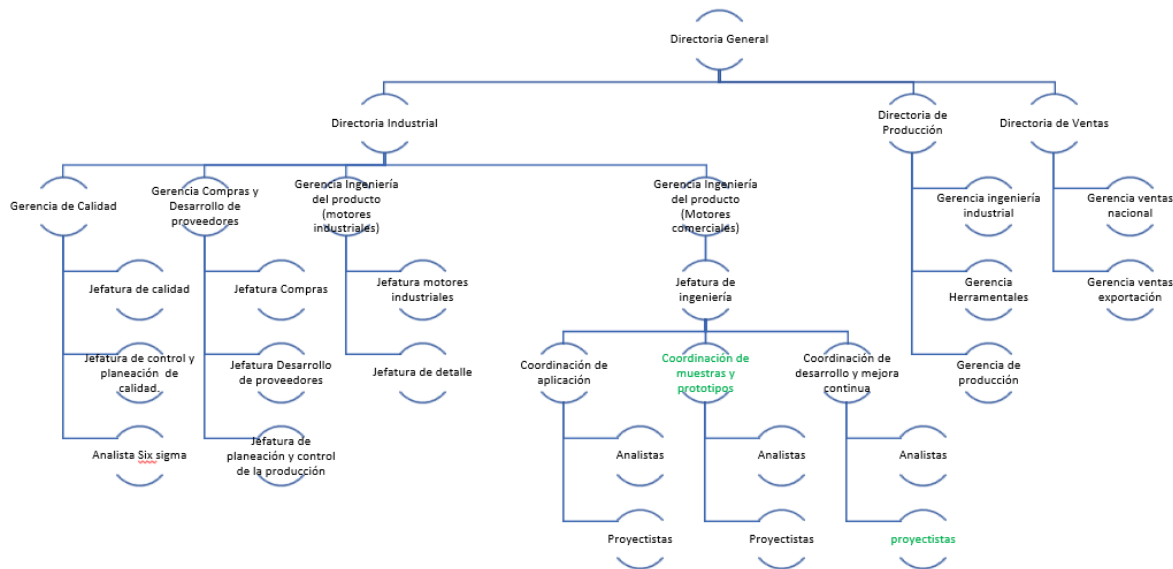


Figura 1.2 Organigrama<sup>2</sup>

## 1.5.2 Actividades desempeñadas

Las principales actividades desempeñadas durante el periodo en que he laborado en la empresa se listan a continuación:

- Modificaciones a planos y listas técnicas (L.T):<sup>3</sup> modificaciones realizadas para atender alguna solicitud de proceso, como tolerancias (bajo un previo análisis del impacto en el producto), corrección de errores o cambios del cliente al producto.
- Detallamiento de L.T: generación de los conjuntos de materiales necesarios para el ensamble en piso de los motores, así como los planos que sean necesarios.
- Atención a planta: resolver dudas en cuanto a especificaciones del producto para las líneas de producción, así como participación en el análisis de falla del producto.

<sup>2</sup> Dentro del organigrama se resaltan en verde los puestos y roles desempeñados.

<sup>3</sup> Nombre proporcionado a los conjuntos de materiales necesarios para la fabricación del motor eléctrico listado de manera estratégica para rutas de producción.

- Coordinación de prototipos: generación de indicadores de atención en plazo de nuevos productos, revisión y mejora de flujos de trabajo, y liberación de prototipo.
- Creación y optimización de materiales: desarrollar componentes nuevos, como tapas, empleando herramientas de simulación para su optimización estructural, así como mejorar materiales ya existentes para el cumplimiento de alguna normativa, especificación o liberación de línea.
- Desarrollo de nuevas líneas.

## **2 ANTECEDENTES**

### **2.1 Máquinas eléctricas**

Las máquinas eléctricas son el resultado de la aplicación de diversos fenómenos físicos como los principios del electromagnetismo y la ley de inducción de Faraday. Durante toda su historia, las máquinas eléctricas se han destacado por sus diversas aplicaciones, generación, transporte y uso de la energía eléctrica, y sus transformaciones también proveídas por la máquina eléctrica. Por lo cual, es posible clasificar las máquinas eléctricas de la siguiente manera:

- Generador: transforma la energía mecánica en eléctrica.
- Motor: transforma la energía eléctrica en mecánica.
- Transformador: transforma una energía eléctrica de entrada con características particulares en otra energía eléctrica de salida con características diferentes.

De la clasificación mencionada anteriormente, se destaca el motor eléctrico, debido a que es el área de desarrollo profesional en el cual me encuentro y es motivo de un mayor detallamiento.

#### **2.1.1 Motor eléctrico**

Como se describió anteriormente, un motor eléctrico es una máquina eléctrica rotativa que se encarga de transformar la energía eléctrica en mecánica. Este puede ser alimentado por una corriente continua o alterna, proveída por una fuente externa.

A pesar de que se está tratando como motor eléctrico a la máquina rotativa, se tiene un principio de reciprocidad, es decir, un motor eléctrico puede funcionar como generador y viceversa.

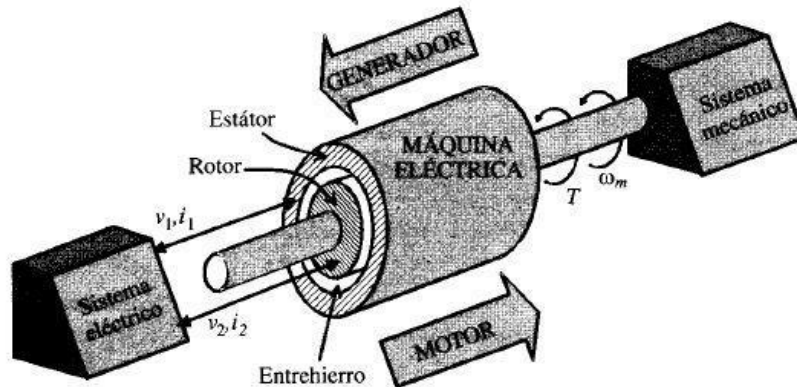


Figura 2.1 Motor y generador (Mora, 2003)

El estudio de los motores se puede realizar a través de teorías unificadas que intentan describir el funcionamiento de los tres tipos de máquinas eléctricas, mediante ecuaciones complejas. Sin embargo, el objetivo de este escrito no es éste, por lo cual se tratarán los conceptos de una manera más práctica.

Un motor eléctrico está constituido principalmente de dos componentes necesarios para su funcionamiento:

- Estator
- Rotor

El estator es la parte fija, mientras el rotor la parte móvil. El rotor se monta sobre un eje que generalmente descansa sobre dos rodamientos, que, a su vez, se pueden apoyar en las tapas y carcasa que se encuentran sujetos al estator. El estator y el rotor constituyen entre un 60% y 80% del precio del motor, y están fabricados de materiales ferromagnéticos, troquelados en chapas de acero con diversos diseños de ranura.

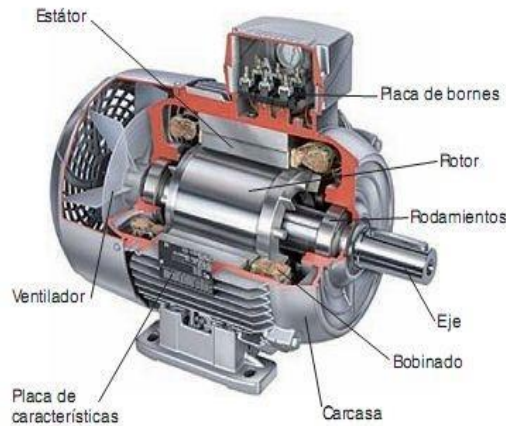


Figura 2.2 Partes de un motor eléctrico (Motores Eléctricos, 2019)

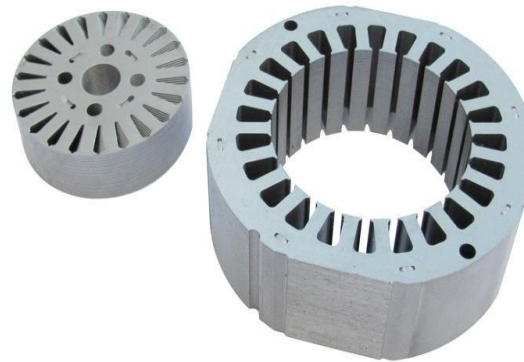


Figura 2.3 Chapas rotor y estator (Indiamart, 2019)

Los motores eléctricos poseen diversas características constructivas, que varían entre posición de la caja de conexión: si éste es abierto o cerrado, si será montado para aplicación de manera horizontal o vertical (con la salida del eje hacia arriba o hacia abajo). No obstante, la clasificación más común empleada es por el tipo de alimentación.

### 2.1.2 Tipos de motores eléctricos

Los motores eléctricos comúnmente se clasifican por el tipo de alimentación con el que éste es accionado. A continuación, se muestra su clasificación:

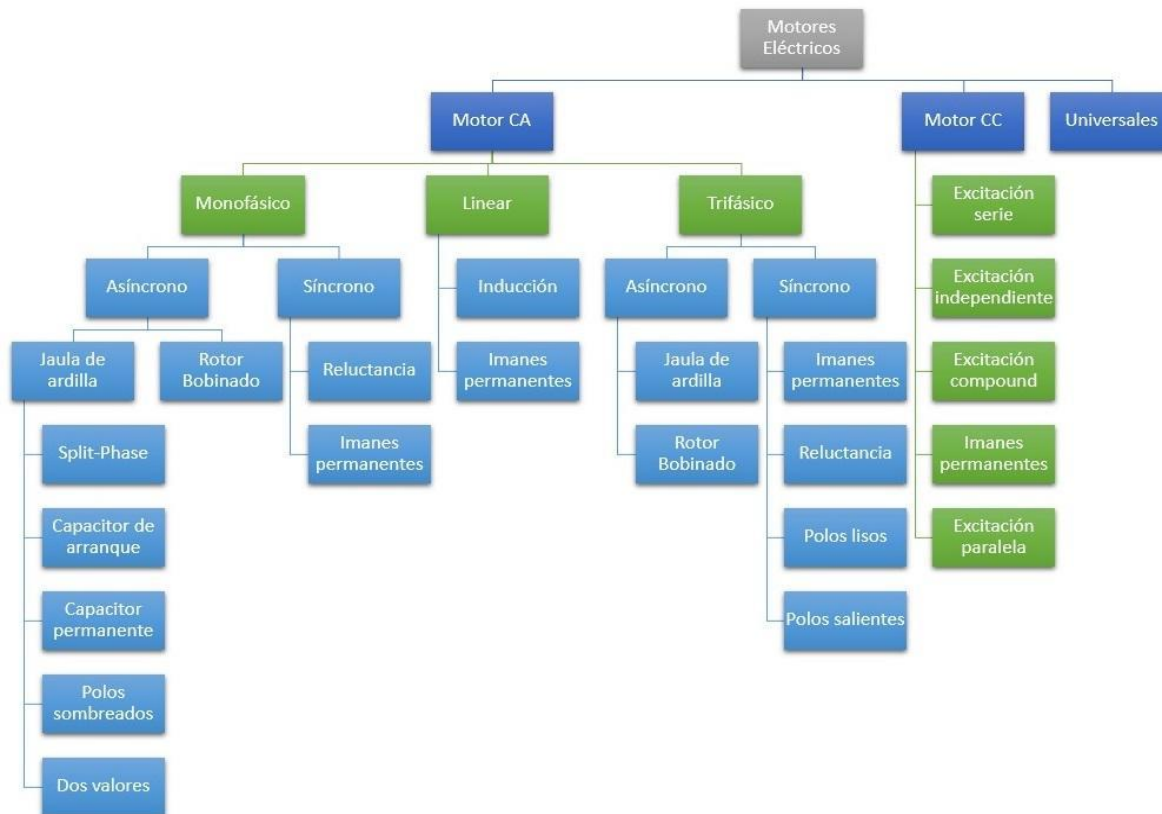


Figura 2.4 Clasificación de los motores eléctricos (WEG, 2017)

### ***Motor de corriente continua***

Son motores de costo elevado, y se requiere una fuente de alimentación con corriente continua, o bien, un dispositivo que transforme la corriente de alterna a continua. Estos motores pueden funcionar con velocidad ajustable, además de ser controlables fácilmente y con gran precisión.

### ***Motores de corriente alterna***

Estos motores son los más empleados debido a que la distribución de la energía eléctrica es alterna, los principales tipos son:

***Motores síncronos.*** Funcionan a velocidad constante sin ninguna influencia de deslizamiento, es decir, la rotación de salida en la flecha es igual a la rotación del campo magnético generado. Este tipo de motores se fabrica para grandes potencias, debido a que para potencias pequeñas el costo de producción es muy elevado.

*Motores de inducción.* También conocidos como motor asíncrono. Funcionan con una velocidad constante, presentando una variación respecto a la velocidad del campo magnético; es decir, existe un deslizamiento entre la rotación del rotor y el campo magnético ( $n_{flecha} < n_{campo\ magnético}$ ).

*Motores universales.* Este tipo de motores se caracteriza principalmente por ser empleado con ambos tipos de alimentación, tanto de corriente continua como alterna. Su principal uso es en herramientas portátiles, ya que ofrece altas rotaciones y torques de arranque.

Aunque la empresa cuenta con una gran cartera de productos en cuanto a motores eléctricos se refiere, en la planta de México solo se fabrican motores de inducción, por lo cual son motivo de un mayor detallamiento en el presente escrito.

### **2.1.3 Conceptos básicos**

#### **¿Cómo funciona un motor eléctrico?**

El principio de funcionamiento de un motor eléctrico obedece, principalmente, a la interacción de dos fenómenos: el eléctrico y el magnético. Como se describió anteriormente, los dos principales componentes de un motor eléctrico son el rotor y el estator; dependiendo del tipo de motor (Figura 2.4), alguno o ambos tendrán bobinas, que son alambres de cobre o aluminio enrollados en un determinado perímetro. Éstos están cubiertos por algún aislante eléctrico, y se alojan en las ranuras del rotor y/o estator, según el tipo de motor, esto produce un campo eléctrico que interactúa con otro para provocar el movimiento rotativo. Dependiendo del tipo de motor, el otro campo magnético puede ser generado por imanes o inducido por el primer campo.

Varios científicos enfocaron sus estudios en este tipo de máquinas, tales como Werner Von Siemens, Galileo Ferraris o Nicola Tesla.



Figura 2.5 Estator bobinado (Topbagsui, 2019)

### 2.1.3.1 Motor de Inducción

Las máquinas de corriente alterna se clasifican en dos categorías: *síncronas* y *de inducción*. Para ambas máquinas, los bobinados son prácticamente los mismos, con la diferencia de que el rotor está cortocircuitado y no presentan conexiones externas. Como puede verse en la Figura 2.4, los motores rotativos de corriente alterna pueden ser de tipo asíncrono o síncrono, acotando el objeto de estudio. Debido al alcance en producción de la empresa, se detallan motores rotativos, asíncronos y de jaula de ardilla, ya que estos son los fabricados en México y detallados por el Departamento de Ingeniería.

Un motor asíncrono jaula de ardilla funciona bajo el principio de inducción producida sobre el rotor al cortocircuitar los anillos; el rotor generalmente está hecho de barras sólidas de aluminio y es inyectado en un paquete formado por láminas de acero (Figura 2.3).

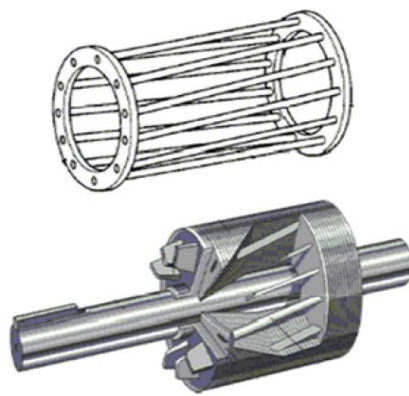


Figura 2.6 Rotor jaula de ardilla (DocPlayer, 2019)



El rotor en un motor de inducción no es excitado por ninguna fuente externa; en lugar de eso, las corrientes son inducidas al rotor, cortocircuitado por sus anillos extremos cuando éste es excitado por el campo magnético generado por el estator, teniendo como principal característica torque cero cuando se alcanza la rotación síncrona.

Como las corrientes del rotor son inducidas por el estator, un motor de inducción puede verse como un transformador en el cual la potencia eléctrica es transformada, con un cambio en la frecuencia y en energía mecánica.

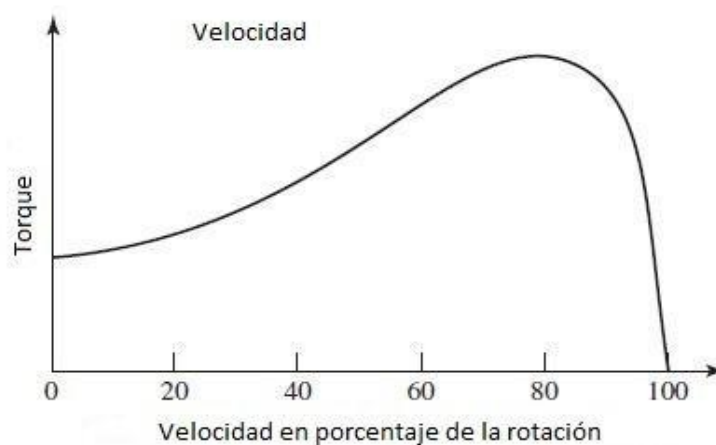


Figura 2.7 Curva característica de un motor Par vs. Velocidad (Umans, 2014)

Como se mencionó con anterioridad, en un motor asíncrono el rotor no gira a la velocidad síncrona; es decir, está deslizado respecto a la velocidad de rotación del campo inducido en el estator. La forma de calcular este deslizamiento es de la siguiente manera (WEG, 2017):

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2.1)$$

Donde:

$s$  → Deslizamiento

$n_1$  → Velocidad síncrona

$n$  → Velocidad asíncrona

La velocidad síncrona puede ser calculada como (WEG, 2017):

$$n_s = \frac{60f_l}{P} \quad (2.2)$$

Donde:

$f_l \rightarrow$  Frecuencia de red

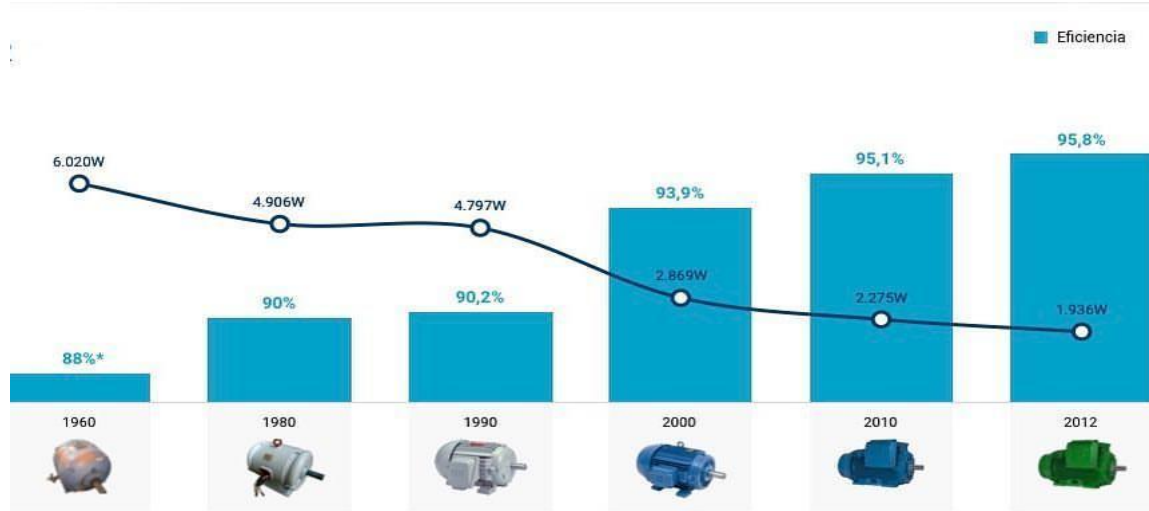
$P \rightarrow$  Número de par de polos

Aunque las máquinas de inducción han sido empleadas en su mayoría como motores, éstos también presentan una buena respuesta como generador, principalmente para la transformación de energía eólica a eléctrica.

#### 2.1.4 Evolución del motor eléctrico

La creciente demanda por la energía eléctrica para sustentar el desarrollo mundial, requiere de grandes inversiones en generación de energía. Estos recursos dependen en su gran mayoría de recursos naturales no renovables; una de las mayores estrategias es mejorar la eficiencia de las máquinas empleadas para la conversión de energía. Se estima que el 40% de la energía global que se produce, está relacionada con los motores eléctricos y su aplicación (Eficiencia WEG, s.f.). Como consecuencia de esta necesidad, y con el objetivo de disminuir el impacto ambiental, los gobiernos de los países han establecido requisitos mínimos de consumo de energía.

Por lo anterior, se ha tenido un gran proceso de desarrollo y evolución tecnológica en los motores eléctricos, con el fin de cumplir dichas normativas, además de disminuir los costos de producción.



\* En referencia a un motor 60 HP

Figura 2.8 Evolución del motor eléctrico (WEG, 2019)

Como se puede observar en la Figura 2.8, a lo largo de los años se han mejorado los consumos energéticos de los motores y por consecuencia su eficiencia. La evolución ha sido una necesidad, debido a los impactos ambientales y las normas cada día más rigurosas para eficiencia energética; esto ha desencadenado un arduo trabajo en mejoras tecnológicas y tareas de investigación.

También la relación de masa activa por Watt entregado del motor ha evolucionado; es decir, no solo tenemos motores más eficientes sino de menor tamaño. Una de las principales razones de esta mejora es debido al desarrollo de los materiales aislantes que permiten explotar de mejor manera la conversión de la energía por el motor, necesitando menor espacio para su empleo con mejores resultados de aislamiento.

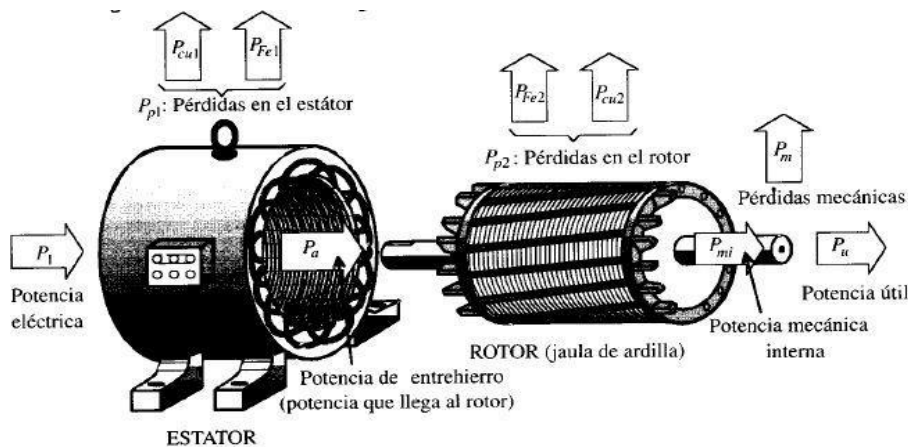


Figura 2.9 Pérdidas en un motor eléctrico (Mora, 2003)

Como se describe en la Figura 2.9, la potencia que la máquina absorbe de la red presenta varias pérdidas hasta su conversión a mecánica. La potencia absorbida de la Red  $P_1$  llega al estator, donde parte se pierde en forma de calor por efecto Joule  $P_{cu1}$ , y otra parte en el hierro  $P_{Fe1}$ .

La potencia restante que llegará al rotor se denomina potencia en el entrehierro; en el rotor también aparecen pérdidas por efecto joule  $P_{cu2}$  y se presentan pérdidas en el hierro  $P_{Fe2}$ ; sin embargo, debido a las bajas frecuencias que se desarrollan en el rotor, éstas suelen ser despreciables para efectos de cálculo.

Para concluir, se presentan pérdidas mecánicas  $P_m$ , debido a rodamientos, ventiladores y demás cargas que se presenten sobre el rotor, siendo la potencia útil la entregada en el eje  $P_{útil}$ . Entonces, la eficiencia de un motor eléctrico puede expresarse de la siguiente manera (Mora, 2003):

$$\eta = \frac{P_{util}}{P_1} = \frac{P_{util}}{P_{util} + P_{cu1} + P_{Fe1} + P_{cu2} + P_{Fe2} + P_m} \quad (2.3)$$

Como puede observarse de manera general, las pérdidas en un motor eléctrico exigen desarrollos y mejoras tecnológicas en temas de materiales, optimizando las propiedades electromagnéticas de los mismos, ya sea mediante la ciencia de materiales, o bien, mediante tratamientos térmicos, temas de mejoras de eficiencia en componentes mecánicos (rodamientos, chumaceras, sellos, etc.). Como consecuencia de la temperatura, tenemos bajos desempeños, por lo cual es importante mantener temperaturas estables y deseablemente bajas; por ello es importante el desarrollo y estudio de flujos de calor en carcasas, ventiladores, intercambiadores de calor, etc. Todo lo anterior, desde una perspectiva empresarial, debe ser analizado bajo la optimización económica, por lo cual es común hacer análisis para reducir costos, retirando componentes, disminuyendo masas mediante análisis estructurales detallados, siendo ésta otra causa de mejora y optimización en motores eléctricos.

## 2.1.5 Aplicaciones

Los motores eléctricos tienen una presencia muy grande en la industria, además de contar con diversas aplicaciones comerciales. Dentro de la gran gama de aplicaciones que se tienen de los motores, se pueden destacar e identificar muy rápidamente los ventiladores, compresores, bombas de agua tanto

industriales como domésticas, reductores, molinos, industria petrolera, etc., y todas sus variantes y necesidades según el área de operación. Por ejemplo, motores lavables y de acero inoxidable para la industria alimenticia y farmacéutica, motores sumergibles para tratamiento de aguas residuales, bombas de calor, áreas con ambientes explosivos, etc. También se encuentran presentes en electrodomésticos y herramientas de mano.

Se puede desarrollar una gran lista de aplicaciones y usos de los motores ya que, como se mencionó anteriormente, se estima que el 40% de la energía producida mundialmente está relacionada con los motores eléctricos y su aplicación. Por lo tanto, es evidente su gran gama de usos. Actualmente, con el despertar de la conciencia ambiental, se está buscando mejorar la eficiencia en las transformaciones de energía, y el motor eléctrico es la máquina ideal para esto, ya que permite alcanzar grandes eficiencias en la conversión de energía, siendo un gran ejemplo la aplicación en autos eléctricos donde se pretende reducir los efectos ambientales por el empleo de motores de combustión interna.

Las aplicaciones son tan variadas, que es fácil poder encontrar un motor eléctrico con tan solo voltear a nuestro alrededor; por lo cual esta máquina debe presentar una gran solución a los problemas ambientales actuales.

## **2.2 Normativas para motor eléctrico**

Las normas son un mecanismo de estandarización en el mundo industrial y/o académico, con el fin de tener un patrón bajo el cual todos puedan competir de una manera arbitrada. Además, como se mencionó, las necesidades actuales en eficiencia energética provocan una aplicación más rigurosa. Además de una estandarización y mejoras energéticas, las normas buscan ofrecer seguridad al usuario, fungiendo como jueces de conformidad y evitando que productos de baja calidad circulen por el mercado. (Arteaga Noguera)

## 2.2.1 Norma NEMA

NEMA, que por sus siglas es National Electrical Manufacturers Association, es la asociación de comercio más grande en los Estados Unidos, la cual representa los intereses de los fabricantes de la industria eléctrica, y cuyo objetivo es establecer la estandarización de este sector. Fue fundada el 1 de septiembre 1926 con oficinas en las cercanías de Washington, D.C. Sus miembros son compañías fabricantes de productos eléctricos utilizados en las áreas de transmisión, generación, distribución, control y consumo de la energía eléctrica. (NEMA, 2019)

### 2.2.1.1 NEMA MG 1

Dentro de toda la gama de productos eléctricos, se encuentra la norma NEMA MG 1, la cual asiste al usuario para una selección apropiada de motores y generadores. También contiene información concerniente al desempeño, seguridad, pruebas, construcción y manufactura de los motores y generadores. (NEMA, 2019)

## 2.2.2 Norma IEC

La Comisión Electrotécnica Internacional, IEC (International Electrotechnical Commission), es una organización de normalización basada en el consenso en el campo eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas, y gestiona sistemas de evaluación de la conformidad.

### 2.2.2.1 IEC 60034-2-1

La IEC ha contribuido al desarrollo de sistemas de motores eléctricos mediante estandarización de pruebas internacionales, como la IEC 60034-2-1 para motores eléctricos. Esto permite a los gobiernos especificar sus niveles de eficiencia mínimos para sus estándares de rendimiento energético. (IEC, 2019)

### 2.2.3 NEMA vs. IEC

Para realizar una comparación entre estas dos normativas dominantes en el mercado de los motores eléctricos, se indican los principales puntos a tomar en cuenta como comparativa entre ambas normas:

- Voltaje y frecuencia
- Factor de servicio /Régimen de servicio
- Clases de aislantes
- Medición de eficiencia
- Tamaños y designación de carcasas
- Formas constructivas

#### 2.2.3.1 Voltaje y frecuencia

A nivel mundial se manejan dos estándares de frecuencia de alimentación en las redes, para los cuales tanto la norma NEMA como IEC tienen una relación diferente en voltajes, conforme a la siguiente tabla:

Voltaje nominal @50 [Hz]		Voltaje nominal @60 [Hz]	
NEMA	IEC	NEMA	IEC
220		115	
	230		120/208
	230/400	200	
380	500		240
	400/690	230	230/400
	1000		277/400
			347/600
		460	
		575	
			600

**Tabla 2.1 Relación Voltaje Frecuencia (NEMA Water energy toolkit, 2019)**

### 2.2.3.2 Factor de servicio y régimen de servicio

El *factor de servicio* (SF) es una definición de la norma NEMA MG 1. Esta designación hace referencia al porcentaje extra al que puede operar un motor continuamente, es decir, para un motor con factor de servicio de 1.15 de 200 HP, puede operar continuamente a  $200 \times 1.15 = 230$  HP. Las razones para definir y tener necesidad de este factor se enlistan a continuación:

- No tener certeza en los requerimientos de potencia de la aplicación
- Sobrecargas intermitentes
- Voltajes de alimentación desbalanceados
- Seguridad a los usuarios.

En cambio, el *régimen de servicio* es la forma en la que la norma IEC considera las variables antes mencionadas mediante una secuencia gráfica de operación. Los motores normales son proyectados para régimen continuo, la carga es constante y por tiempo indefinido. En los casos en que la carga varía de forma previsible, el régimen podrá ser indicado numéricamente o por medio de gráficos que representan la variación en función del tiempo conforme a la siguiente tabla:



<b>Régimen</b>	<b>Descripción</b>
<b>S1</b>	Funcionamiento a carga constante de duración suficiente para que se alcance el equilibrio térmico
<b>S2</b>	Funcionamiento a carga constante, durante un cierto tiempo, inferior al necesario, para alcanzar el equilibrio térmico, seguido de un período de reposo de duración suficiente para restablecer la temperatura del motor
<b>S3</b>	Secuencia de ciclos idénticos, cada cual incluyendo un período de funcionamiento con carga constante y un período desenergizado y en reposo. En este régimen, el ciclo es tal que la corriente de arranque no afecta de modo significativo la elevación de temperatura
<b>S4</b>	Secuencia de ciclos de régimen idénticos, cada cual, consistiendo en un período de arranque, un período de funcionamiento a carga constante y un período de reposo, siendo tales períodos muy cortos, para que se alcance el equilibrio térmico
<b>S5</b>	Secuencia de ciclos de régimen idénticos, cada cual, consistiendo en un período de arranque, un período de funcionamiento a carga constante, un período de frenado eléctrico y un período desenergizado y en reposo
<b>S6</b>	Secuencia de ciclos de régimen idénticos, cada cual consistiendo en un período de funcionamiento a carga constante y un período de funcionamiento en vacío, no existiendo período de reposo
<b>S7</b>	Secuencia de ciclos de regímenes idénticos, cada cual, consistiendo en un período de arranque, un período de funcionamiento a carga constante y un período de frenado eléctrico, no existiendo el período de reposo
<b>S8</b>	Secuencia de ciclos de regímenes idénticos, cada ciclo consiste en un período de arranque y un período de funcionamiento a carga constante, correspondiendo a una determinada velocidad de rotación, seguidos de uno o más períodos de funcionamiento a otras cargas constantes, correspondientes a diferentes velocidades de rotación
<b>S9</b>	Régimen en el cual generalmente la carga y la velocidad varían no periódicamente, dentro del rango de funcionamiento admisible, incluyendo frecuentemente sobrecargas aplicadas que pueden ser muy superiores a la carga de referencia
<b>S10</b>	Régimen que consiste en un número específico de valores distintos de cargas (o cargas equivalentes) y, si es aplicable, velocidad, siendo cada combinación carga/velocidad mantenida por un tiempo suficiente para permitir que la máquina alcance el equilibrio térmico

**Tabla 2.2 Régimen de servicio (WEG, 2017)**

### 2.2.3.3 Clases de aislantes

NEMA identifica los tipos de aislantes como A, B, F y H, los cuales están referenciados a los incrementos de temperatura calculados por el método de las resistencias<sup>4</sup> y basado en una temperatura ambiente de 40 °C. Para motores de bajo voltaje. (NEMA Water energy toolkit, 2019)

Nota	Clase A (105 °C)	Clase B (130 °C)	Clase F (155 °C)	Clase H (180 °C)
<b>1</b>	60	80	105	125
<b>2</b>	70	90	115	---
<b>3</b>	65	85	110	130
<b>4</b>	65	85	110	---
<i>Nota 1</i>	<i>Motores con SF 1.0, diferentes a la nota 3 y 4</i>			
<i>Nota 2</i>	<i>Todos los motores con SF 1.15 y superior</i>			
<i>Nota 3</i>	<i>Motores totalmente cerrados no ventilados con SF de 1.0</i>			
<i>Nota 4</i>	<i>Motores con embobinados encapsulados y SF de 1.0</i>			

Tabla 2.3 Tipos de aislantes NEMA (NEMA Water energy toolkit, 2019)

<sup>4</sup> El método de las resistencias hace referencia a la comparación de los valores de resistencia en los devanados antes de la prueba (en frío) y justo después de finalizar el ensayo (en caliente), sabiendo que la resistencia depende de la temperatura, se emplean relaciones para obtener esta elevación.

Dentro de IEC, también se tienen diferentes tipos de aislantes; sin embargo, estos se basan en la máxima temperatura soportable.

IEC Designación de clase	Letra
90	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	N
220	R
250	-

Tabla 2.3 Tipos de aislantes IEC (NEMA Water energy toolkit, 2019)

#### **2.2.3.4 Medición de eficiencia**

Para la medición de la eficiencia, la IEC emplea el método de la segregación de pérdidas; este método es empleado por la mayoría de los fabricantes de motores eléctricos.

Mientras tanto, NEMA MG 1 hace referencia al uso de tablas (basadas en el 20% de pérdidas), donde se puede encontrar la eficiencia nominal y el valor mínimo para aprobación. Aquí se pueden presentar dos posibles situaciones: cuando se tiene un lote de motores, su promedio debe ser mayor al mínimo especificado; mientras que, para una sola pieza, el valor obtenido debe ser mayor o igual al mínimo especificado en tablas.<sup>5</sup> (NEMA Water energy toolkit, 2019)

#### **2.2.3.5 Tamaños y designación de carcasas**

NEMA MG 1 asocia el tamaño de carcasa basada en el envoltorio del motor, potencia y rotación; mientras IEC no tiene ningún tipo de designación asociado a estos valores. Estas designaciones son

---

<sup>5</sup> Tabla 12-10 de Norma NEMA MG1.

importantes, ya que son las principales variantes de montaje. También cada norma especifica las dimensiones estándar que debe cumplir el motor (Figura 2.10 y Figura 2.11).

Los primeros dos dígitos en la designación de una carcasa NEMA representan cuatro veces la altura al centro de la flecha (cota D en NEMA y H en IEC) en pulgadas para armazones 143 en adelante. Para armazones 42, 48 y 56, es el valor mencionado entre 16. Para IEC la designación de la carcasa es respecto a la altura del pie al centro de la flecha, siendo medido en milímetros. (Miranda Systems, 2019)

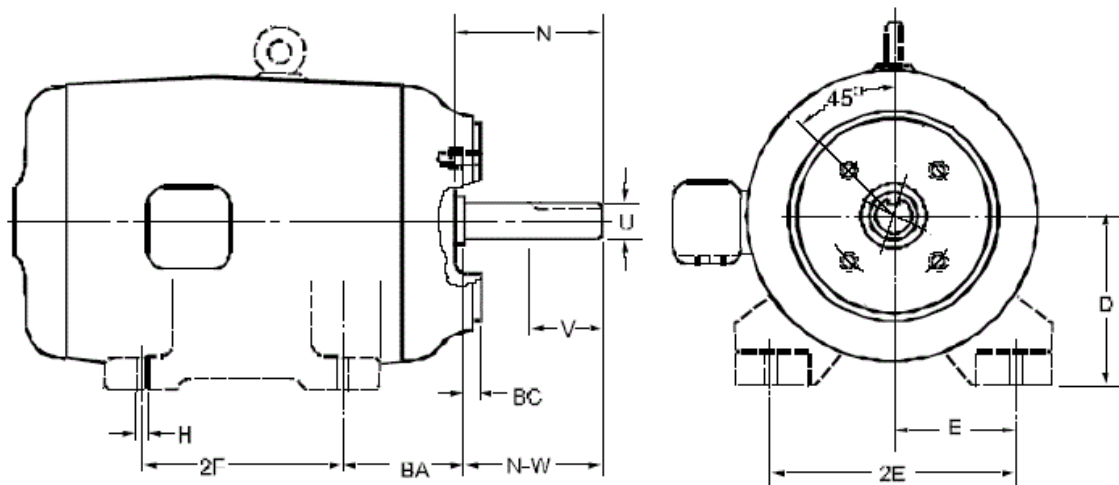


Figura 2.10 Designación NEMA (NEMA, 2009)

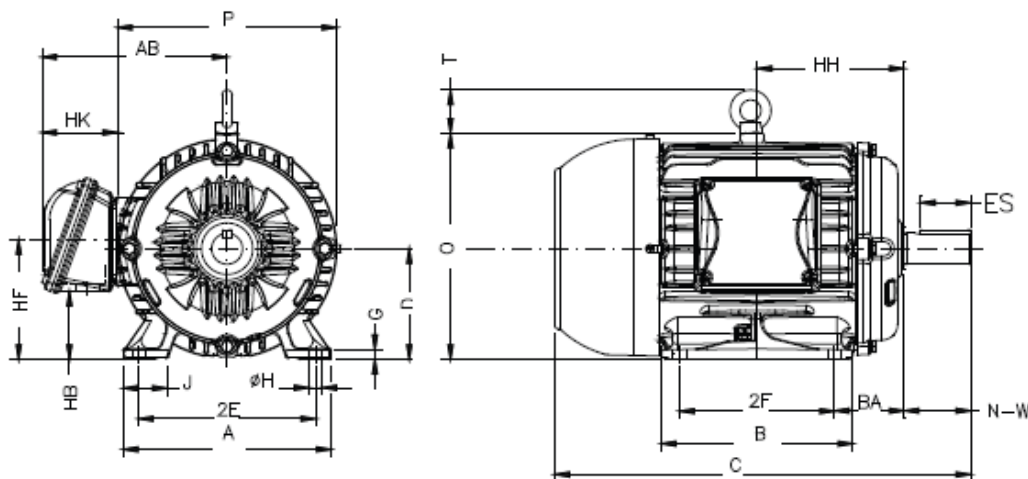


Figura 2.11 Designación IEC (Tesla, 2019)

Existen medidas cercanas entre ambas normativas y, por lo tanto, se pueden indicar algunas equivalencias como se muestra en la siguiente tabla:

<b>IEC</b>	56	63	71	80	90	100	112	132	160	180	225	280
<b>NEMA</b>	---		42	48	56/143	---	180	210	250	280	360	440

**Tabla 2.4 Equivalencias Carcasa IEC y NEMA**

Dentro de la nomenclatura de la designación de armazones también pueden existir prefijos y sufijo (Prefijo + Carcasa + sufijo); éstos pueden indicar alguna medida especial, tipo de montaje, uso de brida, especialidad en flecha, etc. Algunos de los sufijos más comunes son:

Z → Longitud especial en flecha, chaveta rosca, etc.

JM → Motor para montaje en bomba

J → Motor para bomba tipo “Jet”

C → Motor para acoplamiento con brida C

Otro parámetro importante para considerar en el desarrollo de los proyectos es el grado de protección IP (International Protection). Éste está formado por dos números, siendo el primero el indicativo de protección contra partículas sólidas (polvo, fibras, etc.), y el segundo contra penetración de líquidos como agua. Esto va a requerir del uso o no de sellos mecánicos o ajustes especiales en componentes.

**(WEG, 2017)**

Conforme a lo descrito anteriormente, el grado de protección se designa de la siguiente manera: IP 21, IP 23, IP 55, etc. A continuación, se muestran tablas de referencia que describen cada valor:

Dígito	Descripción
0	Sin protección
1	Protección contra la entrada de cuerpos extraños de dimensiones superiores a 50 mm
2	Protección contra la entrada de cuerpos extraños de dimensiones superiores a 12 mm
3	Protección contra la entrada de cuerpos extraños de dimensiones superiores a 2,5 mm
4	Protección contra la entrada de cuerpos extraños de dimensiones superiores a 1,0 mm
5	Protección contra la acumulación de polvos perjudiciales al motor
6	Totalmente protegido contra el polvo

Tabla 2.5 Primer dígito IP (WEG, 2017)

Dígito	Descripción
0	Sin protección
1	Protección contra gotas de agua en la vertical
2	Protección contra gotas de agua hasta la inclinación de 15° en relación a vertical
3	Protección contra agua de lluvia hasta la inclinación de 60° en relación a vertical
4	Protección contra salpicaduras provenientes de todas direcciones
5	Protección contra chorros de agua provenientes de todas las direcciones
6	Protección contra olas de agua
7	Inmersión temporal
8	Inmersión permanente

Tabla 2.6 Segundo dígito IP (WEG, 2017)

El conocimiento de estos parámetros y designaciones permite desarrollar un proyecto mecánicamente con las especialidades requeridas para cada aplicación o según necesidades del cliente.

### 2.2.3.6 Formas constructivas

Las formas constructivas definen el tipo de montaje del motor y la forma de acoplarse con la carga. De esta forma constructiva se determinan los criterios para el proyecto a desarrollar, por ejemplo, no se considera la misma carga en rodamientos para un motor horizontal que para uno vertical.

Forma Constructiva	Configuración																	
	Referencia	B3R(E)	B3L(D)	B3T	B5R(E)	B5L(D)	B5T	B35R(E)	B35L(D)	B35T	B14R(E)							
Detalles	Carcasa	Con patas	Con patas	Sin patas	Sin patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Sin patas							
	Punta del eje	A la izquierda	A la derecha	A la izquierda	A la derecha	A la izquierda	A la derecha	A la izquierda	A la derecha	A la izquierda	A la izquierda							
	Fijación	Base o carriles	Base o carriles	Brida FF	Brida FF	Base o brida FF	Base o brida FF	Base o brida FF	Base o brida FF	Brida FC	Brida FC							
Forma Constructiva	Configuración																	
	Referencia	B14L(D)	B14T	B34R(E)	B34L(D)	B34T	V5	V5R(E)	V5T	V6	V6R(E)	V6T	V1	V3				
Detalles	Carcasa	Sin patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Sin patas	Sin patas	Sin patas	Sin patas					
	Punta del eje	A la derecha	A la izquierda	A la derecha	Abajo	Arriba	Abajo	Arriba	Abajo	Arriba	Abajo	Arriba	Arriba					
	Fijación	Brida FC	Base o brida FC	Base o brida FC	Pared	Pared	Pared	Pared	Pared	Brida FF	Brida FF	Brida FF	Brida FF					
Forma Constructiva	Configuración																	
	Referencia	V15	V15R(E)	V15T	V36	V36R(E)	V36T	V18	V19	B6	B6R(E)	B6T	B7	B7R(E)	B7T	B8	B8R(E)	B8T
Detalles	Carcasa	Con patas	Con patas	Sin patas	Sin patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas	Con patas
	Punta del eje	Abajo	Arriba	Abajo	Arriba	Abajo	Arriba	Abajo	Arriba	Para frente	Para frente	Para frente	Para frente	Para frente	Para frente	Para frente	Para frente	Para frente
	Fijación	Pared o brida FF	Pared o brida FF	Brida C	Brida C	Pared	Pared	Pared	Pared	Pared	Pared	Pared	Pared	Pared	Pared	Pared	Pared	Techo

Figura 2.12 Formas constructivas (WEG, 2017)

Los motores son normalmente suministrados en la forma constructiva B3L(D), (motor con pies, para montaje horizontal, eje situado a la derecha viendo de frente la caja de conexiones).

Para poder leer los códigos de formas constructivas, es necesario comprender el significado de cada una de las designaciones que conforman la forma constructiva. Las designaciones tienen las siguientes interpretaciones:

	Posición del motor		Carcasa		Brida			Caja de conexión viendo el eje		
<b>Designación</b>	B	V	3		5	14		L	R	T
<b>Descripción</b>	Horizontal	Vertical	Con pies	Sin pies	Brida FF	Brida FC	Sin brida	Derecha	Izquierda	Arriba

Tabla 2.7 Designación formas constructiva (Roydisa, 2019)

Existen muchas otras configuraciones en las formas constructivas de motores eléctricos, por lo cual se recomienda el uso de tablas similares a la Figura 2.12.

## 2.2.4 México y la Norma NOM.

La distribución mundial de motores basados en la estandarización de las normas NEMA e IEC tiene gran presencia mundial, cada uno enfocado a un mercado o zona geográfica; es decir, NEMA se distribuye en mercados de América, mientras IEC es principalmente para mercado europeo. Para poder comercializar un motor en cierta región es necesario cumplir con las normas internacionales y locales de cada país.

Para la comercialización de motores en México, el mercado exige el cumplimiento de las normas NOM-014-ENER y NOM-016-ENER, que son normas principalmente de eficiencia energética.

NOM-014-ENER-2004 → Eficiencia energética de motores eléctricos de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, enfriados con aire, en potencia nominal de 0.180 kW a 1.5 kW. Límites, método de prueba y marcado. (Gobierno de México, 2019)

NOM-016-ENER-2016 → Eficiencia energética de motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, en potencia nominal de 0.746 kW a 373 kW. Límites, método de prueba y marcado. (Gobierno de México, 2019)

De manera general, cada una de estas normas establece los valores de eficiencia nominal, el método de prueba para su evaluación, los criterios de aceptación y las especificaciones de información mínima a marcar en la placa de datos de los motores eléctricos, arriba mencionados con sus alcances y limitaciones.

## 2.3 Organismos de certificación

Los Organismos de Certificación son personas morales que tienen por objeto realizar tareas de certificación; esto es, evaluar que un producto, proceso, sistema o servicio se ajusta a las normas,



lineamientos o reconocimientos de organismos dedicados a las normalizaciones nacionales o internacionales (Secretaría de Economía, 2019). Dentro del ámbito de motores eléctricos destacan las certificaciones UL, CSA y ANCE.

### **2.3.1 UL**

La marca UL, certificación emitida por Underwriters Laboratories, es uno de los símbolos con mayor reconocimiento de que un producto cumple con garantía los estándares de seguridad y calidad de los productos en Estados Unidos y Canadá, lo que le hace altamente competitivo para su libre circulación en los mercados internacionales. (CablesRCT, 2019)

Las certificaciones UL son de carácter voluntario; sin embargo, estas han generado un gran prestigio por lo que su certificación se ha convertido en una necesidad para seguridad, calidad y confianza del producto dando tranquilidad a los usuarios finales. Cuando un producto se encuentra marcado con la certificación UL, se asume que el laboratorio independiente UL realiza auditorías periódicas a los fabricantes, así como ensayos presenciales a muestras representativas obtenidas del mercado de estos productos, de esta manera verifican que estos productos cumplen con sus normas de seguridad vigentes.

Así, las marcas UL pueden ser empleadas junto con otras certificaciones de producto como por el ejemplo la CSA.

### **2.3.2 CSA**

La asociación canadiense CSA (Canadian Standard Association) es una compañía privada que redacta, prueba y certifica las normas de seguridad para los productos, con la misión de mejorar la seguridad, salud, el ambiente y la economía de los más de 40 mercados en los que tiene presencia. La marca CSA es reconocida y aceptada por las autoridades reguladoras y tiene presencia en billones de productos alrededor del mundo. (CSA, 2019)

Al igual que UL, CSA también es de carácter voluntario: no existen leyes que requieran su marca en los productos. No obstante, tenerla se traduce en beneficios para las compañías, pues su reconocimiento a nivel mundial, en cuanto a estándares y certificaciones, es garantía de productos que proporcionan seguridad y calidad al usuario.

### 2.3.3 ANCE

La asociación de normalización y certificación (ANCE), es una institución privada, creada con la finalidad de brindar apoyo en materia de certificación de productos para el sector eléctrico. Dentro de sus actividades, se destacan la verificación, inspección, pruebas de laboratorio y capacitación de los clientes para poder ostentar la marca.

Aunque su presencia se nota principalmente en el mercado nacional mexicano, también tiene presencia en otros países con oficinas en Washington, D.C. y China. La misión de esta institución es “Aportar valor al consumidor en su calidad de vida mediante la seguridad, salud, desempeño y el mejor uso de los recursos del planeta, con soluciones de normalización, calibración, pruebas de laboratorio, certificación, inspección, formación profesional y ensayos de aptitud, como base para el desarrollo industrial y tecnológico con innovación”. (ANCE, 2019)

## 2.4 Ingeniería Mecánica y el motor eléctrico.

Ahora bien, el motor eléctrico se destaca principalmente por sus características eléctricas, como la gran eficiencia en la transformación de la energía que logran desempeñar. Esto les cede gran parte del desarrollo de estudios e investigaciones a las propiedades eléctricas y sus desempeños; sin embargo, se requiere de componentes mecánicos para poder cumplir su propósito en la aplicación. Además de existir las necesidades particulares de la aplicación, también se desarrollan nuevas necesidades generales, siendo estas las razones principales para el desarrollo de una nueva línea de producto. En cualquiera de los dos casos anteriores se requiere analizar si los componentes existentes son aptos para las necesidades; por lo tanto, se debe realizar una revisión del proyecto, verificando todos los componentes nuevos o especiales, lo cual da la seguridad de que éstos cumplan con las normativas descritas con anterioridad; que posean factibilidad de fabricación, y que cumplan las necesidades estructurales y enfriamiento requeridos por el proyecto.

En ocasiones, las especialidades (eléctrica o mecánica) requieren del desarrollo de un prototipo para verificar desempeños, validar componentes o ensambles. Esto con la finalidad de ofrecer productos de calidad. Dentro de las principales especialidades, se pueden mencionar torques de partida, temperaturas máximas, salidas de flecha especiales, tapas o bridas fuera de norma, etc. Para el desarrollo de una línea se debe realizar análisis de mercado, definir un alcance y desarrollar los componentes necesarios.

## **2.4.1 Principales componentes mecánicos**

Un motor eléctrico se constituye por diversos componentes en la Figura 2.2 Partes de un motor eléctrico (Motores Eléctricos, 2019) muestran una imagen con los principales componentes, de los cuales se pueden descartar el estator y el rotor dentro de los alcances de la ingeniería mecánica, como componentes a desarrollar. Si bien, para su fabricación están presentes áreas correspondientes a la ingeniería mecánica (Procesos de manufactura, tratamientos térmicos, inyección, etc.), los procesos o diseños presentan criterios muy bien delimitados y establecidos por las necesidades de proceso o fabricación.

Por lo anterior, no se considerarán estator y rotor como componentes modificables por los alcances de un ingeniero mecánico.

### **2.4.1.1 Tapas y bridas**

Las tapas son uno de los componentes principales en los motores eléctricos, generalmente diseñadas para alojar los rodamientos, y, dependiendo de la aplicación del motor, pueden ser abiertas o cerradas. Se pueden fabricar de diferentes materiales, siendo los principales hierro, aluminio y acero soldado, aunque existen desarrollos para uso de materiales poliméricos. El proyecto estructural debe presentar la rigidez mecánica suficiente para atenuar vibraciones provenientes de las imperfecciones del circuito magnético, el desalineamiento del rotor dentro del estator, además de presentar frecuencias lejos de la rotación del rotor y frecuencia de alimentación. (Rüncos F. , 2017)



Figura 2.13 Tapa Cerrada (WEG CAD Library, 2019)



Figura 2.14 Tapa Abierta (WEG CAD Library, 2019)

#### 2.4.1.1.1 Brida y tapa delantera

Así pues, la diferencia entre una tapa y una brida es que, mientras la primera sólo hace la función de brindar soporte al rotor con los rodamientos, la segunda, además de brindar soporte al rodamiento, está prevista para montaje directo en la aplicación. Por otra parte, una de las consecuencias de poseer acople con la aplicación mediante brida, es que se requiere estandarizar estas dimensiones, dando como resultado a los diferentes tipos de bridas existentes en el mercado, por lo cual se tiene que recordar nuevamente que la forma constructiva depende directamente del acoplamiento. Por ello, no se deja de lado que existen dos normas principales para dimensiones de montaje (NEMA e IEC), las cuales especifican las dimensiones de bridas a emplear y sus designaciones. Para fines de este escrito, se detallarán las bridas empleadas en los productos fabricados dentro de la empresa y en la línea de producto en que me he desarrollado.



Figura 2.15 Tapa brida FC (WEG CAD Library, 2019)

Entre las bridas más utilizadas, se encuentran FF, FC y FC-DIN (WEG, 2017). Sin embargo, dentro de la designación de NEMA MG1, que es la principal norma empleada para la venta de motores comerciales fabricados en México por la empresa, se encuentran especificaciones para diferentes tipos de bridas y las más comunes son D y C.

Por su parte, la Brida D se distingue por tener barrenos pasantes, con una distancia al centro entre ellos mayor que la C. Suelen emplearse, entonces, en aplicaciones de alta velocidad, además de brindar flexibilidad en el montaje debido a que puede ser anclado de la aplicación al motor o viceversa.

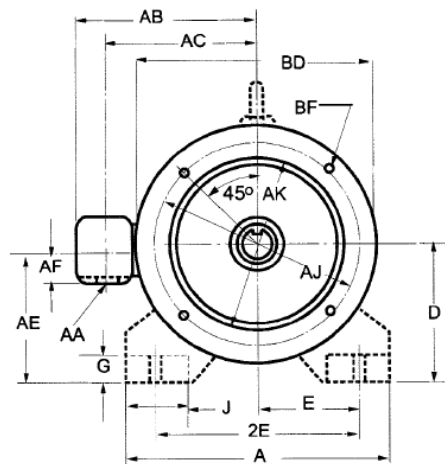


Figura 2.16 Brida tipo D (NEMA, 2009)

Así, la brida tipo C, está denominada principalmente por el diámetro al centro de los barrenos de anclaje, los cuales son roscados. Es empleada principalmente en aplicaciones que no requieren gran rigidez, cuyo espacio está restringido.

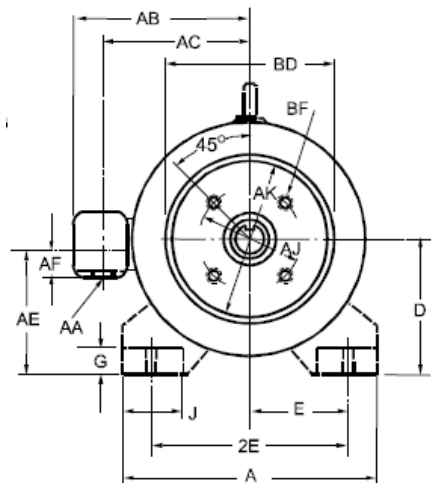


Figura 2.17 Brida tipo C (NEMA, 2009)

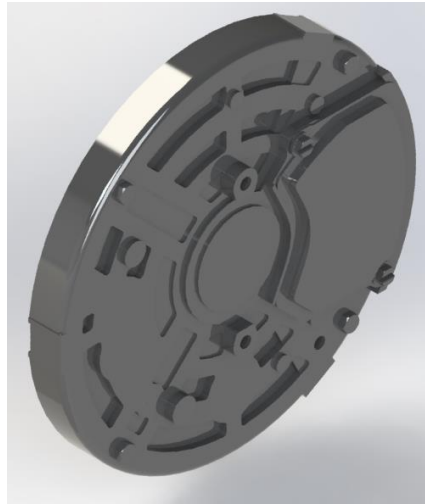
Las cotas características en cada caso son AJ y BD, las cuales dependen del tipo de brida y pueden ser empleadas en diversas carcasas.

Particularmente, el diseño de las tapas no precisa cumplir con cotas específicas normadas; por lo general, estas solo requieren el cumplimiento de cotas en conjunto con el motor completo; sus principales características se definen, pues, de las necesidades del proyecto, motor abierto, cerrado, concepto de ventilación y montaje, grado de protección (Requerimiento de sellos mecánicos), etc. Por tanto, estas características para el diseño de tapas no son restrictivas a las tapas; antes bien, se deben considerar, además de las cotas de montaje para el diseño de una brida.

#### 2.4.1.1.2 Tapa trasera

Además de las funciones descritas para bridas y tapas delanteras, las tapas traseras pueden poseer otros tipos de necesidades: por ejemplo, provisiones para montajes de frenos, aletas de ventilación,<sup>6</sup> protectores térmicos, cajas de conexión integradas, etc. Éstas se diseñan con alojamientos para rodamientos más pequeños a la tapa o brida delantera (si la aplicación no es especial), ya que las mayores cargas se presentan en la parte delantera.

<sup>6</sup> Para carcasas roladas totalmente cerradas



**Figura 2.18 Tapa trasera con caja de conexión (WEG CAD Library, 2019)**

Así, estas tapas tampoco están normadas al cumplimiento de alguna dimensión como componente. Sin embargo, deben cumplir con algunas cotas específicas como conjunto motor completo, además de que se deben considerar las normas de seguridad con las que será marcado el motor para tomar en cuenta que el diseño sea apto para satisfacer dichas normas. Por ejemplo, para un motor abierto se debe restringir la entrada de un dedo articulado que pueda tener contacto con partes móviles y/o calientes que dañen o representen un peligro para el usuario.<sup>7</sup>

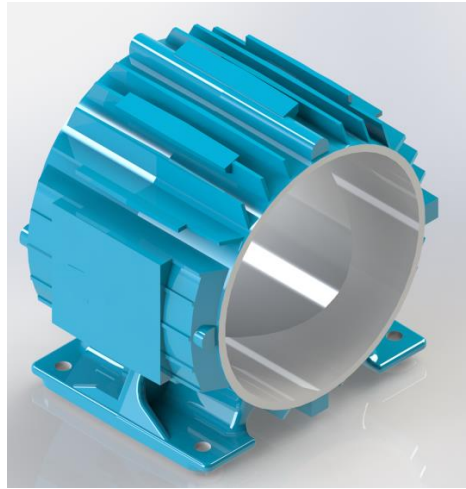
#### **2.4.1.2 Carcasas**

Por definición, una carcasa se puede interpretar como un armazón externo al estator. La carcasa se desempeña como soporte al núcleo magnético de la máquina y generalmente brinda los anclajes mediante pies. Ésta debe ser proyectada de tal manera que brinde la rigidez adecuada para no permitir vibraciones indeseables. Al igual que las tapas, éstas pueden ser de diferentes materiales; entre los principales, se puede encontrar el hierro fundido, aluminio y acero. Aunque ya existen desarrollos para aplicación de materiales poliméricos aún no se cuenta con tales productos en el portafolio de la empresa.

---

<sup>7</sup> Conforme a UL 982

Es importante mencionar que se cuenta con diferentes líneas de productos, y, por lo tanto, con diferentes criterios, componentes y materiales. Por lo general, las carcasas de hierro fundido suelen ser empleadas en motores industriales y están provistas de aletas para el intercambio de calor, mejorando los desempeños del motor. Las aletas, dependiendo de la aplicación, se pueden encontrar paralelas al eje o de manera transversal. Estas carcasas generalmente son cerradas.

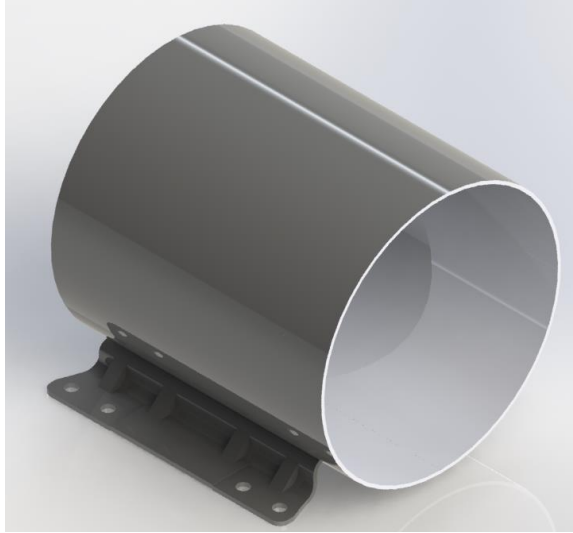


**Figura 2.19** Carcasa Hierro fundido (WEG CAD Library, 2019)

Las carcasas de aluminio, al igual que las de hierro, se componen por zonas aletadas para mejora de intercambio de calor; sin embargo, éstas no suelen emplearse en armazones grandes.

Dentro de las carcasas de acero, se encuentran las carcasas roladas, las cuales se constituyen por una lámina de acero de un calibre en específico, que es sometido al proceso de rolado, y después una soldadura finaliza su fabricación. Con diferencia de las carcasas anteriores, en este caso se puede encontrar, como estándar, carcasas abiertas y cerradas. Para la ventilación, en estas carcasas se tiene como concepto ventilación externa e interna, siendo la externa el intercambio por la carcasa, e interna con las cabezas de bobina del estator. Este concepto de carcasa se suele emplear en motores pequeños con aplicaciones no tan exigentes.





**Figura 2.20** Carcasa cerrada de acero rolado (WEG CAD Library, 2019)

Las carcasas en acero soldado no se suelen usar en máquinas de gran tamaño. El principal reto dentro del diseño de una carcasa es prever los modos naturales de vibración. Sin embargo, no existe un método analítico para determinar estos modos, por lo tanto, es aconsejable realizar simulaciones mediante software de elementos finitos. (Rüncos F. , 2017)

Así, los criterios de diseño para que la carcasa presente rigidez son que las frecuencias naturales se encuentren lejos de las siguientes frecuencias:

- Frecuencias de rotación de las máquinas.
- Frecuencia de la red de alimentación.
- Frecuencia múltiplo de la frecuencia de alimentación.

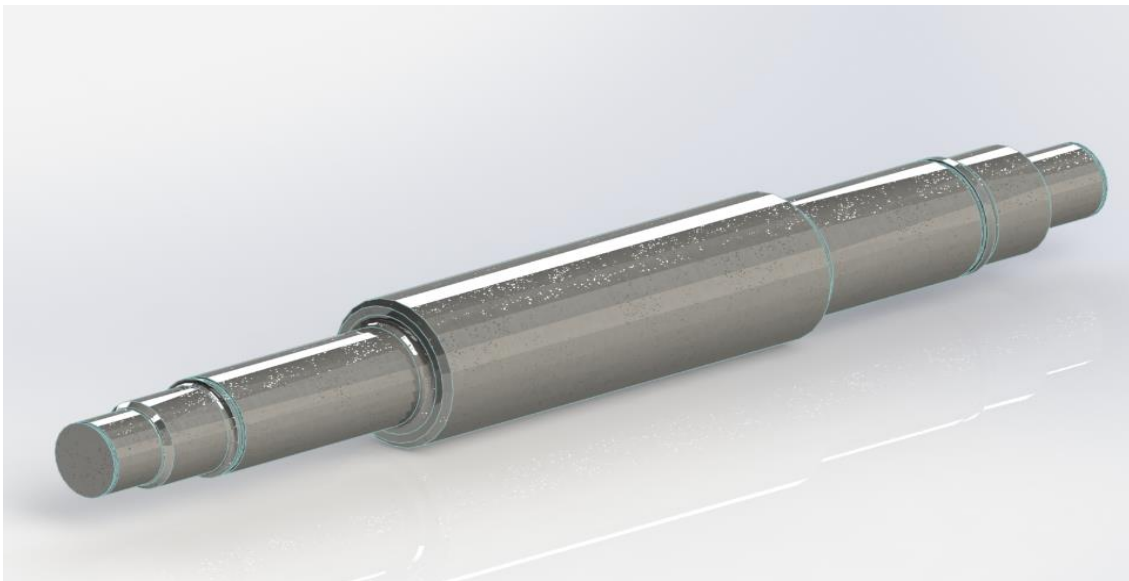
### **2.4.1.3 Flechas**

Una flecha es un elemento rotatorio, por lo general, de sección circular transversal, que se emplea para transmitir potencia o movimiento. El diseño de una flecha tiene mucha interdependencia con el de los componentes, ya que estos dictarán algunas formas tentativas debido a su tamaño y los espacios que requieren para ser ocupados (G. Budynas & Keith Nisbett, 2008). Dentro del diseño de un eje, además de considerar los componentes que se encontrarán acoplados o en contacto directo con la flecha, se deben considerar los siguientes temas:

- Selección de material
- Configuraciones geométricas (Salidas de flecha, rodamientos, rotores)
- Esfuerzo y resistencia (Estática y fatiga)
- Deflexión
- Vibraciones por frecuencia natural.

Para los motores comerciales, los componentes que generalmente son empleados en los ejes son rodamientos de esferas, centrífugos,<sup>8</sup> rotores inyectados, frenos electromagnéticos, ventiladores, etc. Las salidas de flechas están estandarizadas conforme a normas (NEMA o IEC), por lo cual las fuerzas axiales y radiales máximas se encuentran definidas. También debe soportar el peso del rotor y los esfuerzos electromagnéticos generados en el entrehierro debido a asimetrías electromagnéticas. Además, las cargas de la aplicación, que como ya se mencionó en motores estándar se encuentran normadas.

La geometría interna de la flecha varía dependiendo del fabricante, el cual presenta criterios de diseño propios y limitaciones debido a herramientas o procesos. Por lo cual, es común estandarizar tolerancias, ajustes, desahogos y longitudes.



**Figura 2.21 Flecha**

<sup>8</sup> Es un interruptor eléctrico el cual se acciona mediante las fuerzas centrífugas y está diseñado para que su apertura sea a velocidades angulares determinadas.

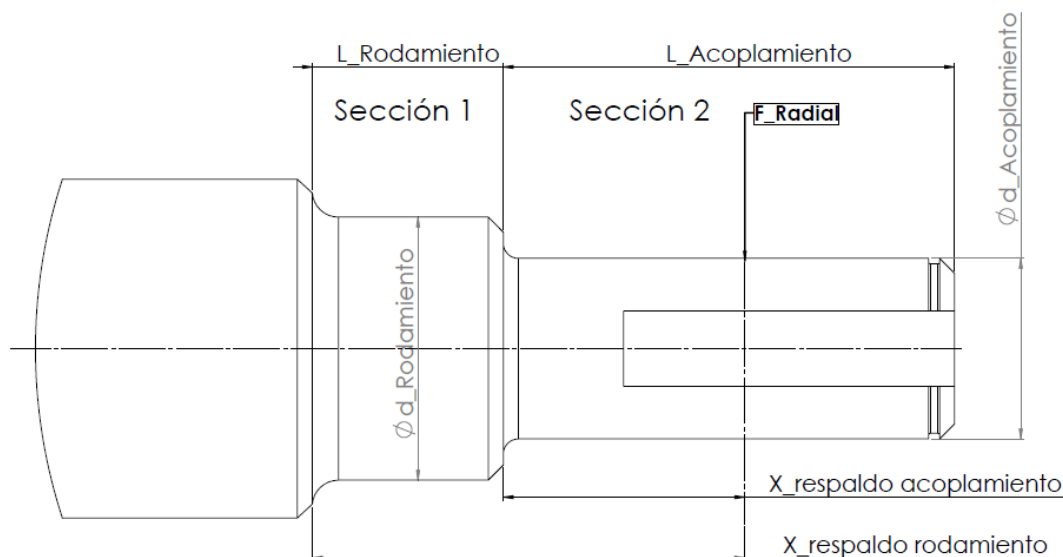
La selección de los materiales dependerá directamente de la aplicación del motor, aunque ya se tienen estandarizaciones de estos, también debe considerarse facilidades de compra y costos; por ejemplo, es común encontrar flechas fabricadas en acero 1040 o 1045.

Los cálculos de rigidez y fatiga se emplean cuando se tienen salidas de flecha especial, o bien, se solicita o requiere algún rodamiento o componente especial que modifique la geometría “estándar” del diseño<sup>9</sup>.

Así, los cálculos de velocidad crítica son empleados, en su mayoría, en motores de gran tamaño, ya que la longitud y la masa que poseen los hace más susceptibles a entrar en frecuencia natural incrementando las posibilidades de generar vibraciones destructivas al motor. La manera de prever este efecto es reduciendo la longitud entre rodamientos o bien disminuyendo diámetros para tener masas más pequeñas.

Cuidar estas rotaciones críticas es responsabilidad del proyectista; y el ingeniero de aplicación debe conocer al menos las dos primeras rotaciones críticas.

Ahora, en la punta de la flecha del motor, actúa el torque máximo de la máquina y los esfuerzos provenientes del acoplamiento. Para su análisis se pueden considerar dos secciones críticas: la primera, al asiento del acoplamiento, y la segunda, al asiento de los cojinetes.



**Figura 2.22 Secciones críticas de un eje.**

<sup>9</sup> Conforme a las dimensiones y cargas especificadas en la normativa que rige el diseño del motor

Estas dos secciones deben ser dimensionadas correctamente para soportar los esfuerzos combinados del torque máximo y los provenientes de la aplicación. Así, los esfuerzos axiales, en comparación al momento flexionante y torsiones, son despreciables (G. Budynas & Keith Nisbett, 2008).

$$M_{Flector1} = F_{radial} \cdot X_{Respaldo\ acoplamiento} \quad (2.4)$$

$$M_{Flector2} = F_{radial} \cdot X_{Respaldo\ rodamiento} \quad (2.5)$$

Existen diversas teorías de falla dentro de diseño, las teorías generales más aceptadas son:

Materiales dúctiles:

- Esfuerzo cortante máximo (ECD)
- Energía de distorsión (ED)
- Mohr Coulomb dúctil (CMD)

Materiales frágiles:

- Esfuerzo normal máximo (ENM)
- Mohr Coulomb frágil (CMF)
- Mohr Modificada (MM)

Las teorías de falla anteriores se emplean por diferentes razones y criterios del diseñador. Sin embargo, para materiales dúctiles (como los aceros), la teoría favorita y más común es la energía de distorsión. A continuación se muestran los criterios para dimensionamiento de un eje en sus dos secciones críticas (Rüncos F. , 2017):

$$d_{Mínimo\ punta\ del\ eje} = \sqrt[3]{\frac{32}{\pi \cdot \sigma_{admisible}} \cdot \sqrt{M_{Flector1}^2 + \frac{3}{4}T_{máximo\ en\ el\ eje}^2}} \quad (2.6)$$

$$d_{Mínimo\ asiento\ del\ rodamiento} = \sqrt[3]{\frac{32}{\pi \cdot \sigma_{admisible}} \cdot \sqrt{M_{Flector2}^2 + \frac{3}{4}T_{máximo\ en\ el\ eje}^2}} \quad (2.7)$$

Donde:

$$\sigma_{admisible} \leq \frac{2}{3} \sigma_{cedencia}$$

Las ecuaciones descritas anteriormente se obtienen por el criterio de energía de distorsión, que es el criterio con mayor aceptación en el diseño con materiales dúctiles.

#### **2.4.1.4 Cojinetes**

El término cojinete se emplea para describir al elemento que transfiere la carga principal mediante elementos que experimentan contacto rodante (ver Figura 2.23 a Figura 2.25 a 2.25). Dentro de una máquina eléctrica girante desempeñan la función de permitir el giro de la flecha de la máquina a través del cual el torque es transmitido. Además de esa función, los cojinetes garantizan la centralización del rotor dentro del paquete de chapas del estator, que es importante para el buen desempeño electromagnético del motor. Evidentemente, existen otros factores como encajes de tapas, asientos de rodamientos en el cubo de la tapa que afectan esta centralización. (Rüncos F. , 2017)

La selección del tipo de cojinete está relacionada básicamente con las condiciones de aplicación. Existen cojinetes de gran costo, así como cojinetes muy económicos; entonces, se debe emplear el criterio técnico-económico para la selección.

Existen tres tipos de cojinetes que pueden ser empleados en un proyecto de máquina eléctrica:

- Rodamientos de esferas.
- Rodamientos de rodillos cilíndricos o cónicos.
- Cojinetes de deslizamiento.



**Figura 2.23 Rodamiento de esferas**  
(SKF Rodamiento de esferas, s.f.)



**Figura 2.24 Rodamiento de rodillos**  
(SKF Rodamiento de rodillos, s.f.)



**Figura 2.25 Cojinetes de deslizamiento**  
(SKF Cojinetes de deslizamiento, s.f.)

Los criterios para la selección de los cojinetes, si no están especificados por el cliente, son:

- Rodamientos de esferas con grasa (siempre que la aplicación lo permita).
- Cuando los esfuerzos radiales no permitan el uso de rodamientos de esferas se pueden emplear de rodillos cilíndricos.
- En caso de que las soluciones anteriores no cumplan las necesidades de aplicación se deben emplear rodamientos auto compensadores o de esferas de contacto angular.
- En casos más específicos y con aplicaciones de mucha exigencia, se opta por los cojinetes hidrodinámicos.

Durante el proyecto se debe definir:

- El tipo de cojinete.
- Vida del cojinete.
- Tipo de lubricante.
- Intervalo de lubricación.
- Cantidad de lubricante.
- Localización de los sensores de temperatura, si existen.

Dentro de las definiciones anteriores la vida de un cojinete, depende de valores estadísticos y en condiciones de montaje, lubricación, sellado y temperaturas óptimas. Entonces, la fatiga de los metales será la única causa de falla. La medida de la vida de un cojinete individual se define como el número total de revoluciones (u horas a una velocidad constante) de operación del cojinete, hasta que se presente el criterio de falla. La vida nominal de un grupo de cojinetes de bolas o de rodillos prácticamente idénticos, se define como el número de revoluciones (u horas a una velocidad constante), que 90% de un grupo de cojinetes alcanza o excede, antes de que se desarrolle el criterio

de falla. Los términos vida mínima, vida L10 y vida B10 también se utilizan como sinónimos de vida nominal. La vida nominal es, pues, la ubicación del décimo percentil de la distribución de revoluciones a la falla del grupo de cojinetes (G. Budynas & Keith Nisbett, 2008).

El cálculo de la vida útil de un rodamiento bajo diferentes condiciones de rotación y cargas se puede calcular como (NSK, 2019):

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^{\rho} \rightarrow \text{en millones de revoluciones con 90\% de confiabilidad} \quad (2.8)$$

Para convertir L10 en horas:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \left(\frac{C}{P}\right)^{\rho} \quad (2.9)$$

Donde:

$C \rightarrow$  Capacidad de carga dinámica del rodamiento (Catálogo)

$P \rightarrow$  Carga equivalente aplicada al rodamiento

$\rho \rightarrow 3$  para bolas,  $\frac{10}{3}$  para rodamientos de rodillos

$n \rightarrow$  Velocidad de rotación (rpm)

#### **2.4.1.5 Ventiladores**

El ventilador es un componente mecánico que convierte energía mecánica de rotación de un gas en energía aerodinámica, incrementando consecuentemente su presión. Los ventiladores pueden ser axiales o centrífugos.

En un ventilador axial el flujo del fluido es paralelo al eje, mientras que en los ventiladores centrífugos el flujo del fluido es sustancialmente radial.



Figura 2.26 Ventilador Motor (servicios, 2019)

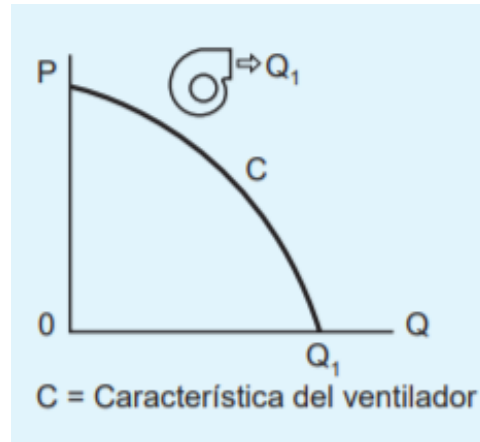


Figura 2.27 Curva característica de un ventilador (Salvador Escoda S.A., 2019)

El flujo  $Q$  es el volumen de fluido desplazado por el ventilador en la unidad de tiempo. La presión total del ventilador ( $P_{Total Ventilador}$ ) es la diferencia entre la presión total de salida ( $P_{Total Salida}$ ) y la presión total de entrada del ventilador ( $P_{Total Entrada}$ ).

La presión cinética o de velocidad del ventilador es la presión correspondiente a la velocidad de salida del fluido del ventilador y está dada por: (Rüncos F. , 2017)

$$p_{cinéticaVentilador} = \frac{1}{2} \gamma_{Fluido} V^2 \quad (2.10)$$

Donde:

$$\gamma_{Fluido} \rightarrow kg/m^3$$

Por lo tanto, la presión estática del ventilador ( $P_{Estática Ventilador}$ ) es la presión total del ventilador menos la presión de velocidad:

$$p_{estáticaVentilador} = p_{totalVentilador} - p_{cinéticaVentilador} \quad (2.11)$$

Entonces, la potencia del ventilador ( $P_{Eje Ventilador}$ ) es la potencia necesaria en la flecha para mantener el ventilador operando a una rotación con un flujo  $Q$ . Esta potencia es calculada por:



$$P_{EjeVentilador} = \frac{Q \cdot p_{totalVentilador}}{\eta_{ventilador}} \quad (2.12)$$

La curva característica de un ventilador mostrada esquemáticamente en la Figura 2.27 (Salvador Escoda S.A., 2019), debe ser levantada experimentalmente por el fabricante. Estas curvas proporcionan al proyectista una mayor certeza en la determinación del flujo necesario para una buena ventilación. Aunque en muchas ocasiones se pueden enfrentar dificultades de selección entre ventilador axial o radial, es recomendable tener bases de datos de máquinas ya fabricadas y ensayadas, donde el desempeño de los ventiladores es conocido.

#### 2.4.1.6 Sellos

Dentro de la industria actual suelen encontrarse procesos donde, para obtener determinado producto, se requiere trasladar fluidos de un lugar a otro; por lo cual, es necesario evitar el desperdicio de estos fluidos por fugas; en otras ocasiones es imprescindible que estos fluidos no ingresen dentro de máquinas, para no afectar su funcionamiento normal. Los sellos se pueden dividir de la siguiente manera:

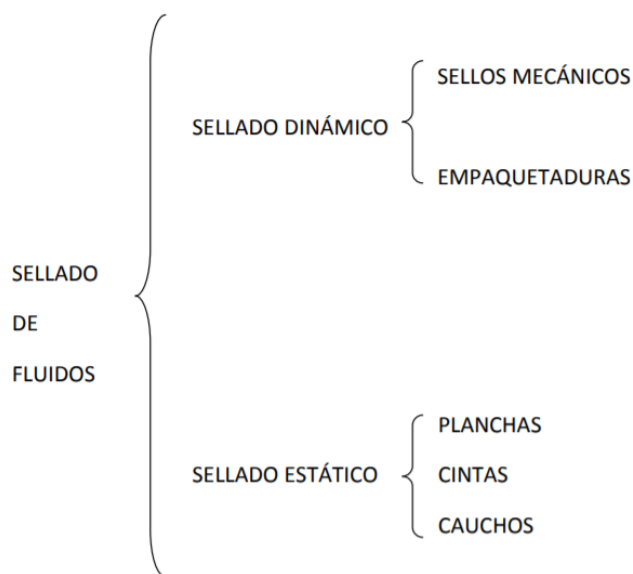


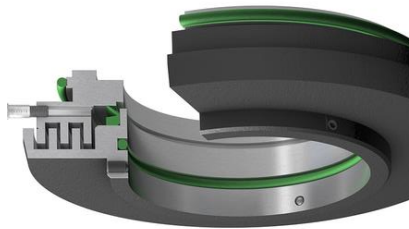
Figura 2.28 Clasificación de sellado de fluidos (Figuroa, 2019).

Por su parte, en máquinas eléctricas rotativas se emplean sellos dinámicos y más particularmente sellos mecánicos. De manera general, un sello mecánico consiste en dos superficies anulares de rozamiento que están empujando una contra otra. En motores eléctricos una superficie está fija a la máquina y la otra a la flecha, girando con ésta. Convencionalmente, un motor puede ser sellado con un sello mecánico axial o un sello radial (VELÁZQUEZ, 2011). Existen diversos tipos de sellos mecánicos; sin embargo, los más empleados dentro de los motores eléctricos son los siguientes:

- Radiales de labio (Retenes).
- Laberinto
- V´ring



**Figura 2.29 Sello de labio (Glowny Mechanik, 2016)**



**Figura 2.30 Sello de laberinto (SKF, 2019)**



**Figura 2.31 V´Ring (SKF, 2019)**

Cada uno tiene características y principios de funcionamiento diferentes. Por ejemplo, como se mencionó, el retén es un sello mecánico radial que puede variar en materiales del labio (conforme a necesidades de ambiente y aplicación), para garantizar su confiabilidad y desempeño, además de contar con diversos perfiles; este tipo de sellos es el más empleado en motores comerciales para garantizar grados de protección IP 55.

				Diseño						
				Diámetro exterior		Labio de sellado u obturante - primario		Labio secundario		
R, RG	Caucho de nitrilo		Configuración	Código de material	Configuración	Código de material	A = de contacto B = sin contacto			
V	Caucho fluorado									
PTFE	Politetrafluoretileno									
Tipos de retenes										
HMS5		HMSA10		Caucho	RG, V	Straight	RG, V	B (HMSA10)		
HMS4		HMSA7		Caucho	R, V	Straight	R, V	A (HMSA7)		
CRW1		CRWH1		Metal + Bore-Tite	-	SKF WAVE	R, V	N/D		
CRWA1		CRWAH1		Metal + Bore-Tite	-	SKF WAVE	R, V	B		
CRW5		CRWA5		Metal + Bore-Tite	-	SKF WAVE	R, V	B (CRWA5)		
CRS1		CRSH1		Metal + Bore-Tite	-	Recta	R, V	N/D		
CRSA1		CRSAH1		Metal + Bore-Tite	-	Recta	R, V	A		
RD10		RD30		RD60		Metal	-	Especial	PTFE	N/D
RD11		RD70		RD71		Metal	-	Especial	PTFE	A (RD11, RD71)

Figura 2.32 Perfiles de retenes (SKF, 2019)

Ahora bien, los sellos de laberinto suelen emplearse en aplicaciones que requieran altas velocidades y temperaturas de operación, montados sobre el eje; forman un sello laberíntico de múltiples etapas con las ranuras del sello del soporte, por lo cual el fluido que se encuentre dentro, o que quiera entrar, deberá pasar por un camino difícil antes de lograr su cometido. Este tipo de sellos suele ser empleado en máquinas eléctricas de gran tamaño.

Un anillo en V consta de un cuerpo de sello, un labio de sello flexible con forma cónica y una “bisagra” elástica integral. Se estira y se instala directamente sobre el eje, donde permanece sujeto en su posición gracias a la tensión inherente del cuerpo del sello. Gira con el eje y funciona como sello axial contra una superficie de contacto estacionaria. El labio de sello flexible aplica una presión de contacto contra la superficie de contacto que es relativamente baja, pero suficiente como para mantener la función de sellado. Como resultado de la fuerza centrífuga, la presión de contacto del labio disminuye a medida que aumenta la velocidad. Esto significa que las pérdidas por fricción y calor se mantienen en los niveles mínimos, lo que mejora la resistencia contra el desgaste y prolonga la vida útil. (SKF, 2019)

Para seleccionar un sello mecánico en un motor eléctrico, se deben considerar los siguientes parámetros:

1. Fluido/Ambiente → Conocer esta característica es importante ya que esto permitirá determinar si este ambiente será corrosivo y proveer los materiales para ello, siendo muy empleados los aceros inoxidable. Para esta selección se pueden tener sellos de materiales en  $\text{EPR}^{10}$  o Viton.<sup>11</sup>
2. Temperatura → Esta característica debe considerarse, porque, en ocasiones, el funcionamiento del equipo estará en condiciones extremas (por debajo de los  $-30^{\circ}\text{C}$  y por encima de los  $120^{\circ}\text{C}$ ), lo cual puede ser causa de una falla en el sello, ya que los materiales tienen temperaturas de operación límite.
3. Velocidades de rotación → Esta característica está relacionada directamente con el tiempo de vida útil y confiabilidad del sello.

Para motores comerciales se emplean comúnmente los sellos tipo retentor, por lo que estos serán descritos con mayor profundidad. Como uno de los criterios de selección, se tienen estandarizados dos materiales principales:

- Goma nitrílica (NBR)
- Fluoroelastómero (Viton)

La selección en este punto se debe de realizar conforme a la velocidad de rotación de operación y el diámetro del eje.

---

<sup>10</sup> Caucho etileno propileno, también conocido como EPM.

<sup>11</sup> Fluoroelastómero, bien conocido por su excelente resistencia a la temperatura y químicos agresivos.

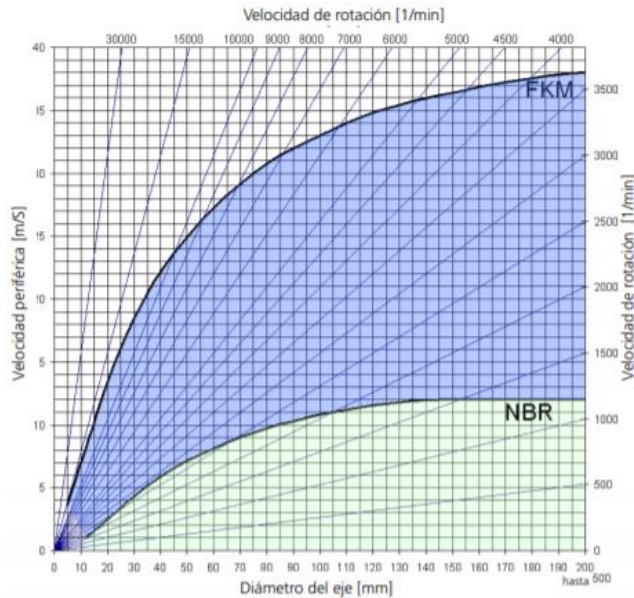


Figura 2.33 Gráfica de selección de material de retén (Anyseals, 2019)

Para el ambiente y uso es importante considerar lo siguiente:

**NBR**

- Uso en aplicaciones generales.
- Ambientes con agua caliente hasta 100°C y ácidos orgánicos.
- Líquidos a presión difícilmente inflamables.
- Soluciones polares.
- Temperaturas de operación entre -20 y 100°C.

**Fluoroelastómero (FPM/FKM/Viton)**

- Ambientes con temperaturas de -20 hasta 200°C.
- Poco permeable a gas.
- Resistente a aceites minerales y sintéticos.
- Resistente a la intemperie, exposición de luz y propagación de llamas.
- Velocidades de alta velocidad periférica.

Aunque se pueden extender los materiales y condiciones aptas de aplicación de estos en los retenes, se debe considerar que estos dos materiales cubren prácticamente todas las condiciones de aplicación en motores comerciales.

## 2.4.2 Optimizaciones mecánicas

En los apartados anteriores se describieron los principales componentes mecánicos que se encuentran y conforman un motor eléctrico; sin embargo, a pesar de que ya se tienen criterios para su desarrollo y producción, aún existen áreas de oportunidad y mejoras. Estas mejoras normalmente surgen de alguna necesidad de competitividad de mercados, intentando reducir costos; pero, como ya se mencionó en un inicio, la situación ambiental actual obliga a las empresas a tener un segundo objetivo en las mejoras y optimizaciones. Con lo anterior, se puede apreciar que una mejora u optimización tiene una ventaja ambiental (en la mayoría de los casos).

Una práctica comúnmente empleada de generar ideas para mejoras es mediante un “Benchmarking”.<sup>12</sup> De éste se pueden obtener ideas para nuevos productos, o bien, mejoras en los ya existentes. Sin embargo, se debe ser cuidadoso con las patentes existentes y vigentes al momento de emplear algún tipo de proceso, concepto o diseño.

Una herramienta más, empleada tanto en el desarrollo de los nuevos productos como en la optimización de los ya existentes, es el método de los elementos finitos. Si bien existen programas comerciales en el mercado, no es el objetivo describirlos. El método de elementos finitos se está extendiendo como una solución rápida a problemas prácticos de la ingeniería a nivel industrial, además de ser una herramienta para diseños optimizados y prototipado.

Aunque el alcance de este método incluye problemas estructurales en sólidos, fluidos y transferencia de calor, los problemas típicos, resueltos en un ambiente laboral, involucran análisis estructurales. Por ello el presente escrito se centrará en éstos. Para comprender la física de los problemas se deben realizar algunas suposiciones, las cuales serán involucradas en las ecuaciones diferenciales que gobiernan el fenómeno.

Es evidente que el método de los elementos finitos (FEM) resolverá sólo los modelos matemáticos seleccionados, y todas las suposiciones hechas para realizar el análisis se verán reflejadas en la solución. En este punto es donde se entiende que el resultado puede tener variaciones, dependiendo de los modelos seleccionados y de las suposiciones realizadas. Es decir, se tiene una variación dependiendo de quién esté realizando el análisis. La diferencia entre los resultados (dentro de la empresa) y los datos experimentales presentan una variación de un 45% a un 85% (ANSYS, 2019).

---

<sup>12</sup> Consiste en la comparación de productos, servicios y procesos de aquellas empresas que poseen mejores prácticas, con el objetivo de adquirir ese conocimiento.

Por lo anterior, se tuvo la necesidad de desarrollar métodos de simulación estandarizados, empleando herramientas comerciales, permitiendo que la variación entre usuarios y datos experimentales oscilara entre 11% y 13% (ANSYS, 2019), así como una reducción en tiempos de simulación. Esto concentraba mejoras, optimizaciones y prototipos virtuales con mayor rapidez y precisión.

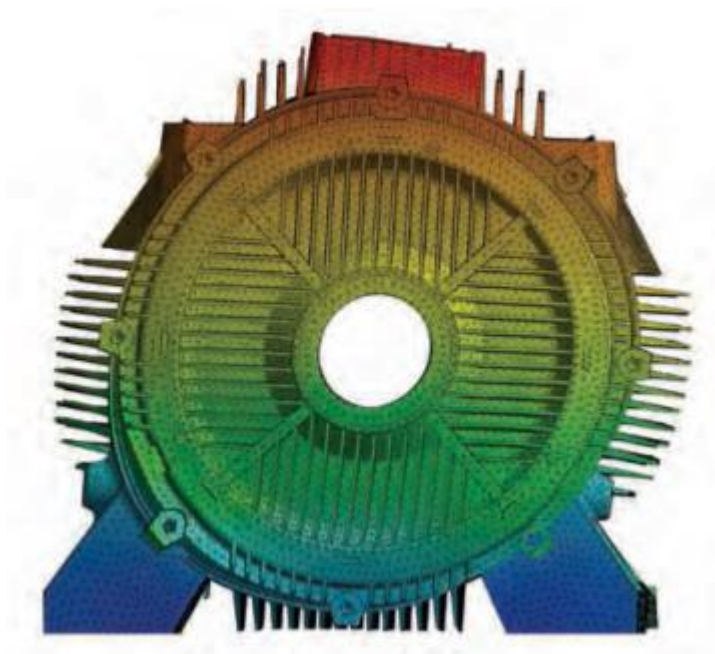


Figura 2.34 Análisis modal en motor (Cassiano A. Cezario, 2014)

Los principales usos de simulaciones dentro del ámbito de los motores eléctricos son:

- Evaluar diferentes tipos y diseños de ventiladores.
- Reducir el ruido en las máquinas, prediciendo ruidos aerodinámicos y electromagnéticos.
- Reducir las temperaturas de operación de los rodamientos.
- Reducir las pérdidas en los ventiladores y mejorar la eficiencia energética.
- Análisis estructurales en componentes (principalmente tapas y bridas).



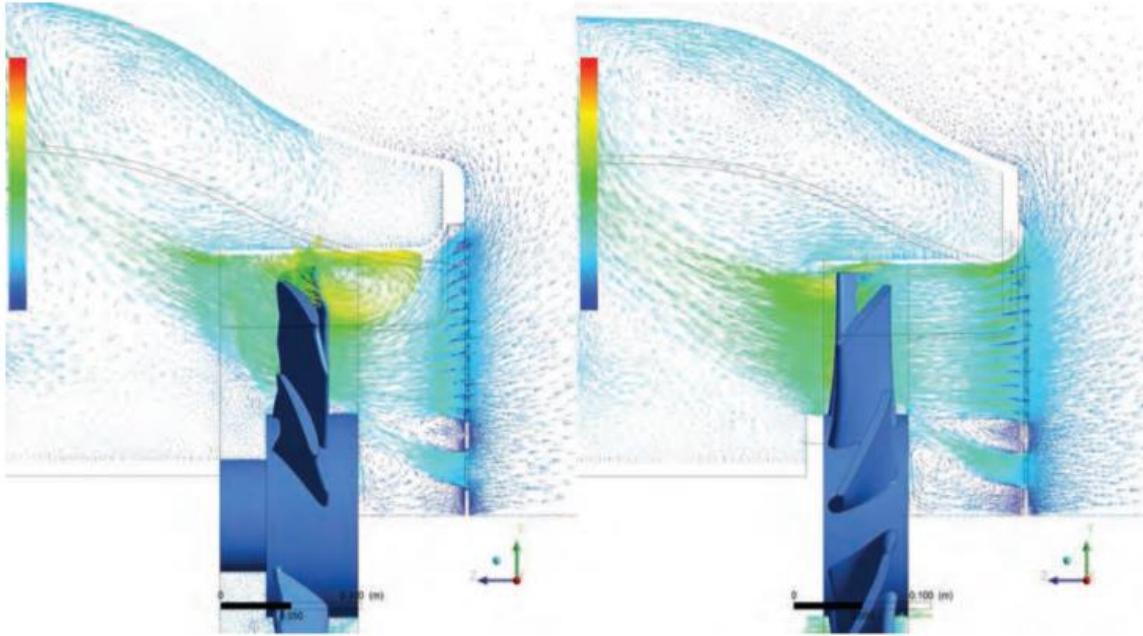


Figura 2.35 Simulación de flujo en ventiladores (Cassiano A. Cezario, 2014)

La empresa, como grupo, ha pasado de realizar 4 simulaciones al mes en 2005 a más de 800 mensuales en 2014 (Cassiano A. Cezario, 2014). Dentro de WEG México, actualmente se realizan sólo análisis en el ámbito estructural. Para poder realizar una simulación es importante considerar tres etapas básicas:



Figura 2.36 Etapas de una simulación



Como se menciona al inicio, las necesidades de realizar simulaciones nacen a partir de la necesidad de analizar problemas complejos de multifísica para su comprensión u optimización. Sin embargo, otras ventajas de este tipo de análisis son la reducción de costos y tiempos de respuesta, logrando realizar prototipos virtuales menos costosos que los físicos y con menores tiempos de desarrollo y mayor variabilidad de parámetros.

A pesar de que las simulaciones representan una gran herramienta de desarrollo, optimización y reducción de costos, no es la única herramienta disponible para estos fines. Existen algunas herramientas basadas en estadística con la finalidad de mejorar la calidad. Estas herramientas pueden ir desde una simple aplicación de metodologías para alinear procesos (definir problemas causa-efecto, 5W 1H, Ishikawa, etc.), hasta el empleo de la metodología “Six Sigma”, la cual tiene como principal función la evaluación y el análisis de la variación de procesos. No obstante, su alcance es aplicable desde la concepción del proyecto, también conocida como “Design for six sigma”, la cual tiene como objetivo determinar las necesidades del cliente y traducirlas en un producto robusto para atenderlas, enfocado en evitar las variaciones del proceso desde el diseño.

Pues bien, existen muchas herramientas para desarrollo de proyectos, pero se debe mencionar que muchas de estas herramientas se encuentran en fase de implementación, o bien, con poco tiempo de uso dentro de la organización. Esto mantiene las puertas abiertas para nuevos retos y aprendizajes continuos.

### **2.4.3 Desarrollo de productos**

Las necesidades y herramientas disponibles para realizar mejoras, optimizaciones y desarrollos son diversas. Sin embargo, éstas son sólo parte de un flujo o procedimiento establecido, el cual se puede dividir de manera general en dos: Estándar y Especial.

El flujo de desarrollo de un producto comienza con la solicitud del cliente, el cual, expresa lo que requiere al departamento de ventas y aplicación; este departamento es responsable para definir si lo que se tiene como línea estándar y ya fabricada cumple los requisitos del cliente. Aquí se pueden presentar diferentes casos:

1. Motores con L.T<sup>13</sup> posible de fabricar.

---

<sup>13</sup> Nombre proporcionado a los conjuntos de materiales necesarios para la fabricación del motor eléctrico listado de manera estratégica para rutas de producción.

2. Motores sin L.T posible de fabricar.
3. Motores sin L.T con inversiones para fabricar.
4. Motor sin L.T con necesidades de validar desempeños.

El primer caso es el más sencillo de todos; en él solo se ve involucrado el departamento de ventas. Pero a partir del segundo caso, se requiere la intervención del departamento de Ingeniería del producto. Muchos proyectos inician su etapa de fabricación en el control de proyectos especiales, donde se clasifican como prototipo funcional (PF), lote piloto (LP) o muestra.

De manera general, para el desarrollo de productos se tiene el flujo mostrado en el siguiente esquema:

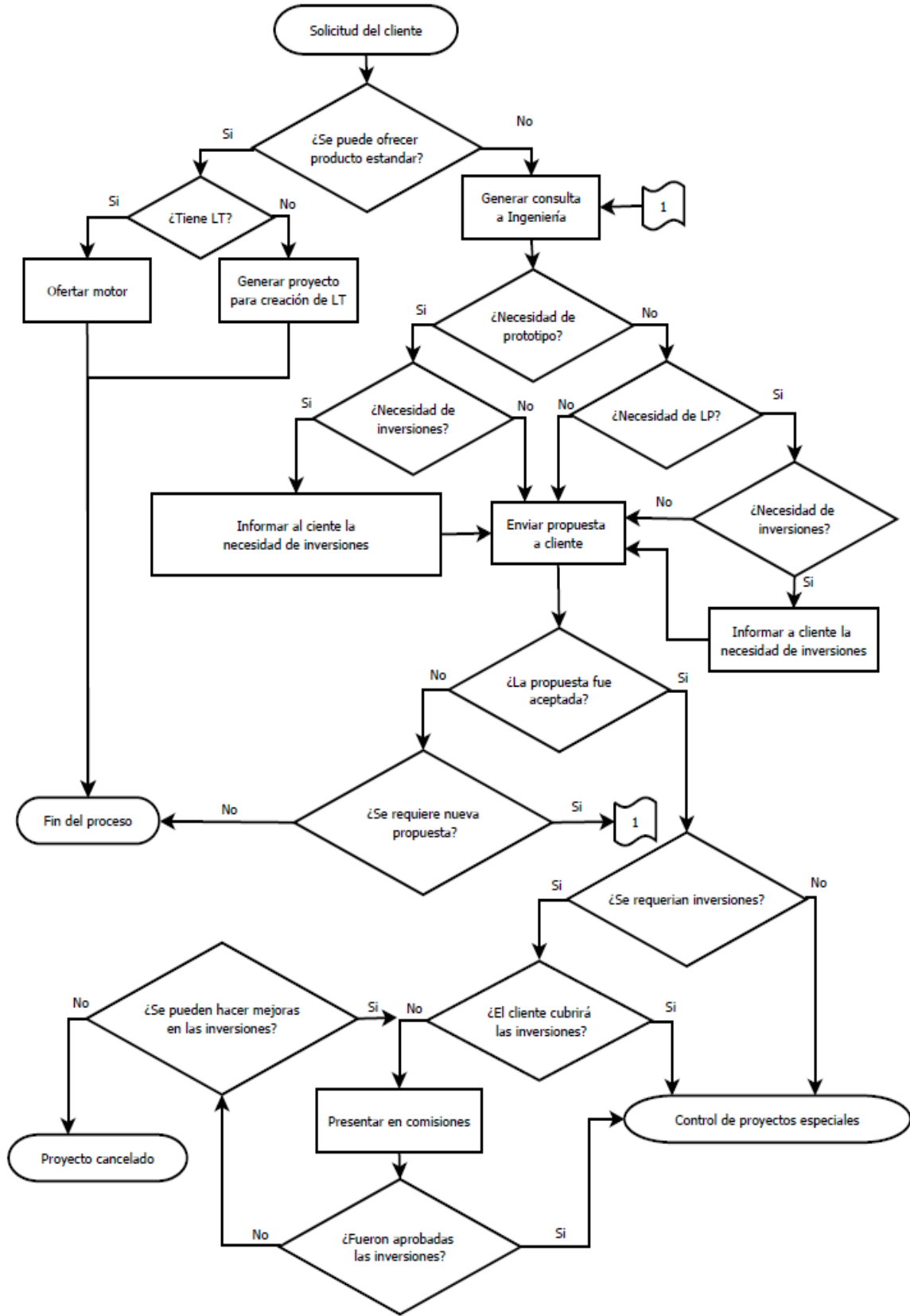


Figura 2.37 Diagrama de flujo de desarrollo de proyecto

Como se puede observar en la Figura 2.37, se tienen dos posibles salidas. La primera, finalizar el proceso por una venta exitosa o rechazo de proyecto; y la segunda, la entrada a un segundo proceso llamado control de proyectos especiales. Esta segunda etapa fue planeada para atender los tiempos de entrega, la calidad, funcionalidad y delimitar responsabilidades de cada área.

#### 2.4.4 Ensayos de laboratorio

Los ensayos en laboratorio son una herramienta indispensable en el desarrollo de cualquier proyecto, ya sea para comprobar las especificaciones del proyecto, cumplir alguna normativa, o bien, para verificar que el proceso de producción actual se tiene controlado y no se presentan errores o grandes variaciones de fabricación. Los principales ensayos realizados a máquinas eléctricas rotantes son de desempeños eléctricos, los cuales, de manera general, buscan comprobar y comparar los valores de diseño que son especificados por la norma que rige el motor o una necesidad externada por el cliente. Dentro de los ensayos más comunes se encuentran:

- Ensayo de tipo.
- Ensayo de rutina.
- Ensayos especiales.

Existen normas aplicables a ensayos de motores eléctricos:

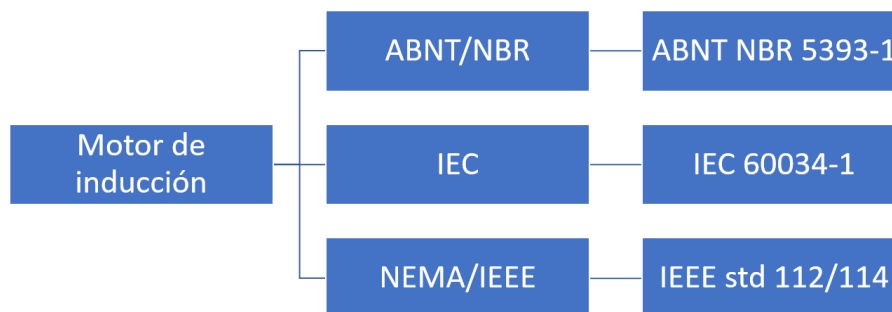


Figura 2.38 Normas aplicables a ensayos de motores de inducción.

Los tres tipos de ensayos mencionados arriba son un conjunto de sub-ensayos, los cuales conforman la prueba completa. A continuación, se muestran los ensayos que conforman cada uno y se describen aquellos que son más comunes:

Ensayo de rutina	Ensayo de tipo	Ensayos especiales
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayo de resistencia de aislamiento.</li> <li>• Resistencia de embobinado en frío.</li> <li>• Ensayo de rotor bloqueado.</li> <li>• Ensayo en vacío.</li> <li>• Ensayo de tensión aplicada (dieléctrico).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todos los ensayos de rutina.</li> <li>• Ensayo de elevación de temperatura.</li> <li>• Ensayo en carga.</li> <li>• Ensayo de torque máximo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayos dieléctricos especiales.</li> <li>• Ensayo de vibraciones.</li> <li>• Nivel de ruido.</li> <li>• Curva torque - rotación.</li> <li>• Sobre velocidad.</li> <li>• Tensión en el eje.</li> <li>• Resistencia de aislamiento en rodamientos.</li> <li>• Loop test.</li> <li>• Grado de protección.</li> <li>• Área clasificada.</li> </ul>

**Tabla 2.8 Ensayos realizados a motor de inducción (Rüncos F. , 2017).**

Ensayo de resistencia de aislamiento: la resistencia de aislamiento es medida a partir de la aplicación de una tensión continua entre la superficie de aislamiento y el interior, en dos rangos de tiempo (1 min y 10 min). Para evaluar esta prueba se define el índice de polarización, que es una relación entre la resistencia de aislamiento a 10 minutos y 1 minuto (Rüncos F. , 2017).

$$I_p = \frac{R_{10\text{minutos}}}{R_{1\text{minuto}}} \quad (2.13)$$

El criterio de aceptación es obtener una relación mayor a 2.

Resistencia de embobinado en frío: ésta es la resistencia medida mediante algún instrumento, generalmente multímetro u osciloscopio. La condición en frío hace referencia a que el bobinado debe estar a temperatura ambiente.

Ensayo de rotor bloqueado: este ensayo se emplea para determinar la corriente, potencia absorbida y el torque generado cuando el rotor está bloqueado. Simulando las condiciones de partida.

Ensayo en vacío: este ensayo está pensado para poder obtener los valores de corriente y potencia en vacío con la máquina desacoplada, calculando las pérdidas en el entrehierro y las mecánicas.

Ensayo de tensión aplicada: también conocida como Hi Pot Test, este ensayo tiene como función verificar la soportabilidad de tensión del aislamiento. El tiempo de duración del ensayo es de 60 s. Y para potencias de motores inferiores a 10 000kW, se debe de aplicar una tensión de  $1000 + (2 \times V_n)$ , donde  $V_n$  es el voltaje nominal de la máquina. Los criterios de aceptación son que la máquina debe operar después de la aplicación del ensayo y aprobar el ensayo de resistencia de aislamiento.

Ensayo de elevación de temperatura: el objetivo de este ensayo es determinar la elevación de temperatura en los embobinados del motor para una condición nominal de operación. El criterio de evaluación es que no exista un incremento de temperatura en la carcasa de más de 2 K/h. En este caso, se dice que el motor se estabilizó térmicamente. La elevación de temperatura en el embobinado es medida mediante el método de variación de resistencia, el cual se expresa de la siguiente manera (Rüncos F. , 2017):

$$\begin{aligned} \Delta T &= (T_{caliente} - T_{ambiente}) \\ &= (T_{frio} - T_{ambiente}) + \left( \frac{R_{caliente} - R_{frio}}{R_{frio}} \right) (T_{frio} + T_{\rho=0}) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Donde:

$$T_{\rho=0} = 234.5 \text{ (Cobre)} / 225 \text{ (Aluminio)}$$

Para poder aprobar un motor, éste se debe encontrar por debajo de los valores normalizados conforme a la clase térmica:

Condiciones de operación	Aislamiento		
	B	F	H
Motores operando a condiciones nominales (Potencia, tensión y frecuencia)	80K	105K	125K
Motores operando a factor de servicio mayor que 1 (a tensión y frecuencia nominales)	90K	115K	135K
Motores operando en condiciones de sobretensión y subtensión	90K	115K	135K

Tabla 2.9 Tipos de aislamientos y límites de elevación de temperatura (Rüncos F. , 2017)

Ensayo en carga: el objetivo de este ensayo es determinar el desempeño del motor en cuanto a rendimiento, factor de potencia, corriente y rotación para diferentes porcentajes de carga aplicada en el eje. Este ensayo debe ser realizado después del de elevación de temperatura, ya que se requiere que el motor esté estabilizado térmicamente. Los porcentajes de carga son distribuidos de la siguiente manera 25%, 50%, 75%, 100% y 125%.

Ensayo de torque máximo: este ensayo es realizado en acoplamiento con el dinamómetro, donde se aumenta gradualmente la carga en el dinamómetro hasta que ocurra una caída brusca en la velocidad. El criterio de aceptación es de -10% el valor especificado.

Dentro de los ensayos especiales, se describen los más comúnmente realizados a motores eléctricos comerciales:

Ensayo de vibración: este ensayo es realizado para verificar el nivel de vibración de la máquina eléctrica en diferentes puntos. El criterio para validar es mediante el valor de la velocidad r.m.s en mm/s. Para realizar este ensayo, el motor debe estar libre de esfuerzos en la salida de la flecha (desacoplado). Cuando existe ranura para chaveta, debe ser empleada una media chaveta para el ensayo. El ensayo debe ser realizado en la tensión y frecuencia nominal del motor.

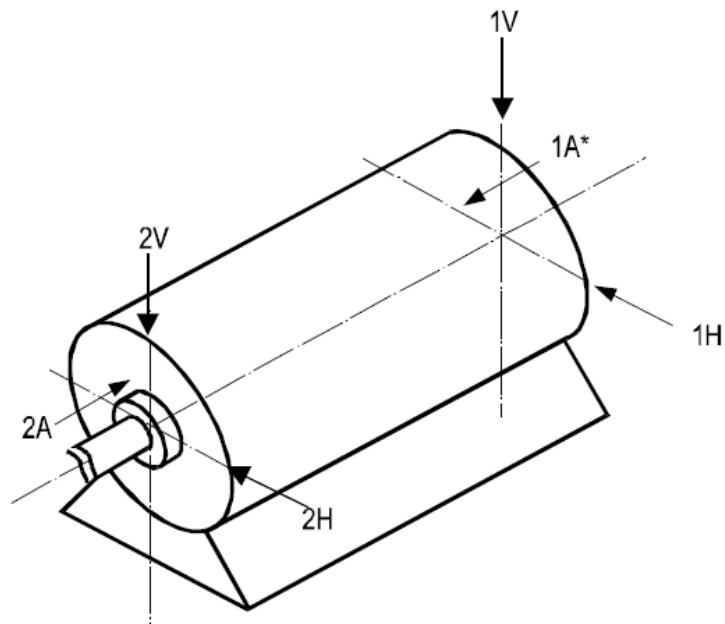


Figura 2.39 Puntos de medición de la vibración (NEMA, 2019)

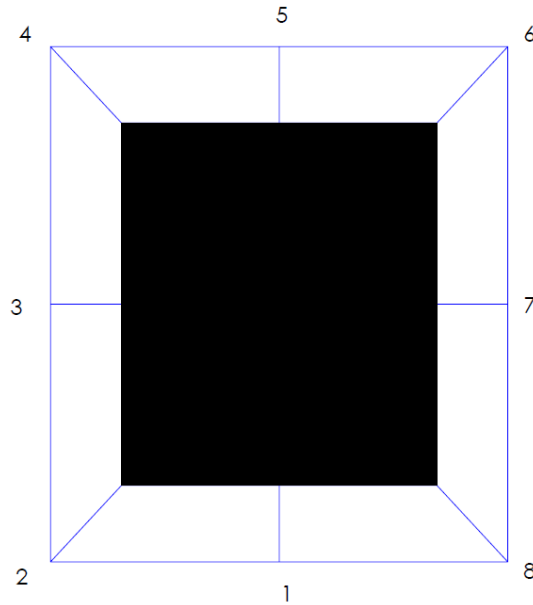
El criterio de aceptación de este ensayo es conforme a la siguiente tabla:

Grado de vibración	Montaje	$140 \leq$ Carcasa NEMA $\leq 210$	$210 <$ Carcasa NEMA $\leq 440$	Carcasa NEMA $> 440$
A	Elástico	2.70	2.70	2.70
	Rígido	2.16	2.16	2.16
B	Elástico	1.08	1.44	1.8
	Rígido	N/A	1.44	1.8

Tabla 2.10 Límites de vibración en mm/s r.m.s (NEMA, 2009)

Ensayo de nivel de ruido: este ensayo debe ser realizado con el motor desacoplado a tensión y frecuencia nominal. La máquina debe ser ensamblada con todos sus accesorios. La medición debe ser realizada en db desde ocho puntos (ver Figura 2.40).





**Figura 2.40 Puntos de medición de ruido en una máquina eléctrica.**

Los puntos 1, 3, 5 y 7 se deben de medir a 1 metro de distancia.

Los puntos 2, 4, 6, y 8 se deben de medir a 1.4 metros de distancia.

Ensayo de grado de protección: este ensayo busca validar la certificación de los envoltorios con grado de protección de las máquinas eléctricas, conforme a la especificación del proyecto. El grado de protección de una máquina está definido por las letras características IP, seguida de dos números conforme a las Tabla 2.5 (pág. 29 ) y Tabla 2.6 (pág. 29)

El criterio de aprobación depende del numeral que se esté ensayando; sin embargo, para aquellos que no son sumergibles, en general el agua que logre introducirse al interior de la máquina no debe interferir con su operación ni representar un riesgo para el usuario.

Rotor bloqueado 360°: este ensayo busca validar si existe algún defecto en los rotores inyectados, como barras interrumpidas o porosidad excesiva, que puedan alterar los resultados en ensayos completos. Es realizado mediante el bloqueo de eje en 360° y midiendo el torque generado por el motor. Los criterios de aprobación varían según el tipo de diseño; sin embargo, como regla general no se debe exceder un 10% de variación entre el torque máximo y mínimo reportado en el ensayo.

De manera general, los ensayos descritos en los párrafos anteriores son los comunes en cada desarrollo de una máquina eléctrica o bien solicitudes particulares del cliente. Por lo cual es importante tomar en cuenta todas las necesidades de un proyecto.



### 3 ACTIVIDADES DESARROLLADAS

En este capítulo se describirán las principales actividades desarrolladas durante la estancia laboral en la organización, así como la descripción en la participación de proyectos específicos, enfocando esa necesidad de la ingeniería práctica unida a la teórica. Se describirán actividades principales de actuación en desarrollo de prototipos.

#### 3.1 Control de proyectos especiales.

Una de las principales tareas que desempeñé dentro de la empresa fue pertenecer al grupo multidisciplinario, encargado de la puesta en marcha de un flujo de trabajo para el desarrollo de proyectos especiales. Si bien es necesario contar con productos “estándar” empleados en aplicaciones generales,<sup>14</sup> es común tener solicitudes de proyectos especiales. Esta etapa es la continuación del flujo mostrado en la Figura 2.37.

La necesidad de crear un flujo específico para desarrollo de proyectos especiales es para poder atender los tiempos de entrega, mejorar la calidad en los productos, contar con una retroalimentación, post-fabricación, incrementar facturación, definir responsabilidades de cada área, rastreabilidad de productos, desarrollo de ideas, etc. Para poder describir esta etapa es importante mencionar algunas definiciones básicas:

- Prototipo experimental (PE): proyecto con la finalidad de desarrollar un nuevo concepto de producto, validar mejoras, desarrollo de componentes o materiales nuevos, etc. No se requiere desarrollo de herramientas permanentes y su fabricación no debe implicar una inversión. Generalmente la solicitud nace de Ingeniería del producto. Este producto no puede ser enviado a cliente.
- Prototipo funcional (PF): producto con componentes nuevos comprados o fabricados que requieren validación. Para el desarrollo de este tipo de producto no se deben realizar inversiones en herramientas permanentes. Este producto se puede enviar con cliente y su necesidad se marca en la fase de consulta por parte de ingeniería del producto (ver Figura 2.37).

---

<sup>14</sup> Se consideran estas aplicaciones como todas aquellas que son comunes, se encuentran normados y no salen de los alcances especificados en catálogos.

- Lote Piloto (LP): este tipo de material es solicitado cuando ya se tiene certeza del desempeño del producto en la aplicación, además de ser la primera fabricación con los herramientas, rutas y líneas de producción definitivas, con la finalidad de detectar alguna otra necesidad de producción. Este producto se solicita durante la consulta por parte de ingeniería industrial (ver Figura 2.37), o bien, con la liberación de un prototipo funcional o experimental por parte de ingeniería del producto.
- Muestra: una muestra se define como un motor estándar, es decir, no requiere ninguna validación de desempeño ni herramientas, rutas o especialidades en línea de producción. El responsable de definir si se suministra un motor como muestra es el Departamento de Ventas.

Con estas definiciones se parte con lo que es el principio del flujo de proyectos especiales de los cuales dependerá el flujo en las diferentes áreas que conforman la empresa. A continuación, se muestran de manera esquemática los flujos según el tipo de producto a desarrollar:

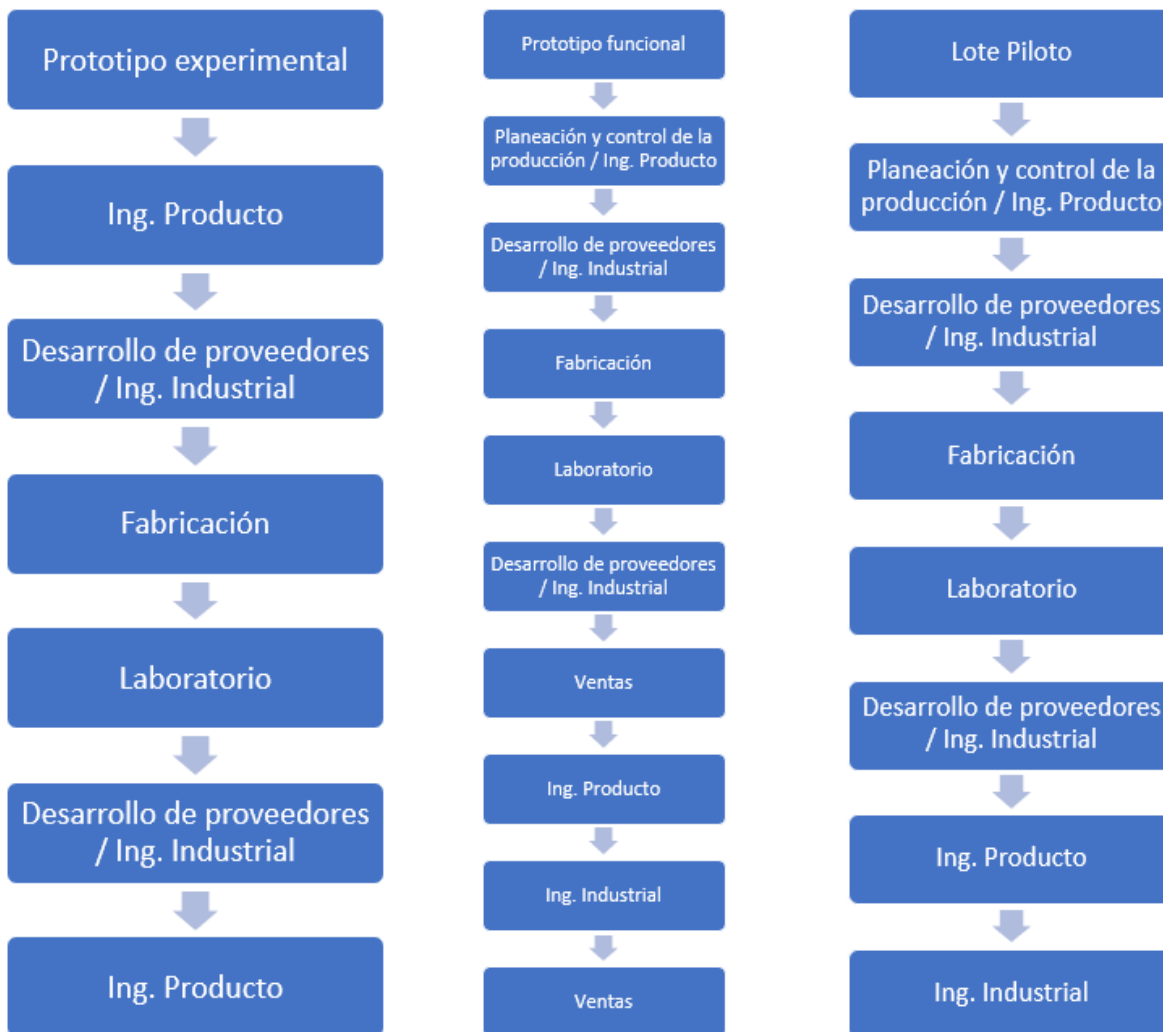


Figura 3.1 Flujo de proyectos especiales

En la Figura 3.1 se puede observar que existe una entrada a laboratorio; si los ensayos aquí son liberados<sup>15</sup>, prácticamente se está concluyendo la fabricación del motor y está listo para ser enviado a cliente. Las tareas posteriores son de seguimiento al proyecto para poder definir un siguiente estatus o tipo de producto (otro prototipo, lote piloto, o bien, fabricación normal), además de dar el seguimiento comercial al producto.

Durante la implementación de este flujo, se fijaron objetivos ambiciosos en cuanto a facturamiento y *lead time*. La principal razón de esta necesidad es la creación de nuevos negocios.

<sup>15</sup> Los ensayos de laboratorio son variados y dependen del tipo de producto especial y la necesidad indicada en consulta.

Esto ha permitido disminuir los tiempos de entrega en un 36.3% e incrementar los nuevos negocios en un 10% .<sup>16</sup> Como se mencionó en la introducción del presente escrito, la ingeniería es una mezcla de física y economía, demostrando en este apartado la segunda cualidad que debe poseer un ingeniero en cuanto a propuestas que supongan temas monetarios; sin embargo, el gran reto se encuentra al intentar mezclar ambas cualidades en un mismo proyecto.

Para poder desarrollar estos proyectos, es necesario conocer las variables a controlar dentro del desarrollo de un producto:

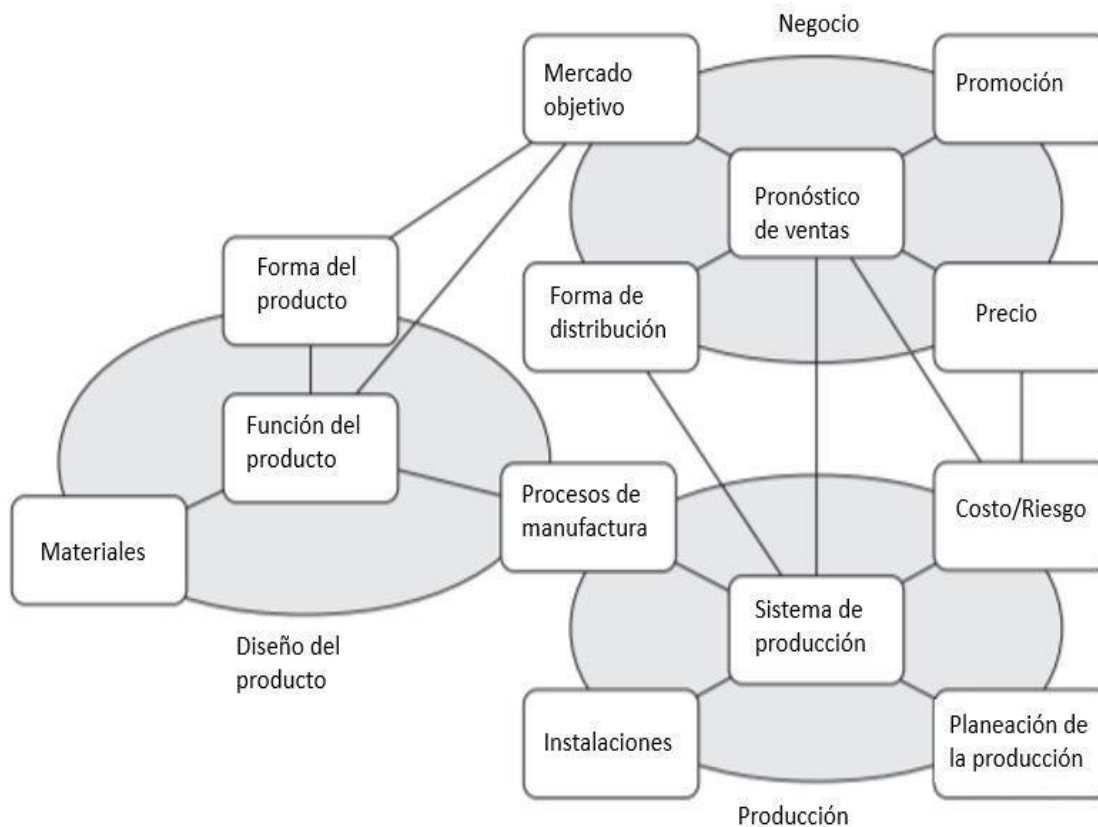


Figura 3.2 Variables en el desarrollo de un producto (Ullman, 2010).

En la figura anterior se puede observar que el desarrollo de un producto tiene tres pilares principales: negocio, diseño y producción. Esta integración genera dependencias entre los pilares: por ejemplo, la forma y función del producto depende del mercado objetivo, mientras que el proceso de manufactura está estrechamente relacionado al diseño del producto. Entonces, retomando el flujo de la Figura 2.37,

<sup>16</sup> Valores obtenidos de la comparación de indicadores de los años 2018 y 2019.

podemos observar que la entrada de un negocio se da mediante ventas; posteriormente conforma las necesidades del cliente o mercado y se atiende el proyecto decidiendo la necesidad de un prototipo (Diseño) o lote piloto (producción).

El costo del producto está estrechamente ligado al diseño y a los procesos de manufactura, en este punto es donde las actividades de la fase de prototipo permiten visualizar las necesidades futuras, tanto de diseño como de proceso.

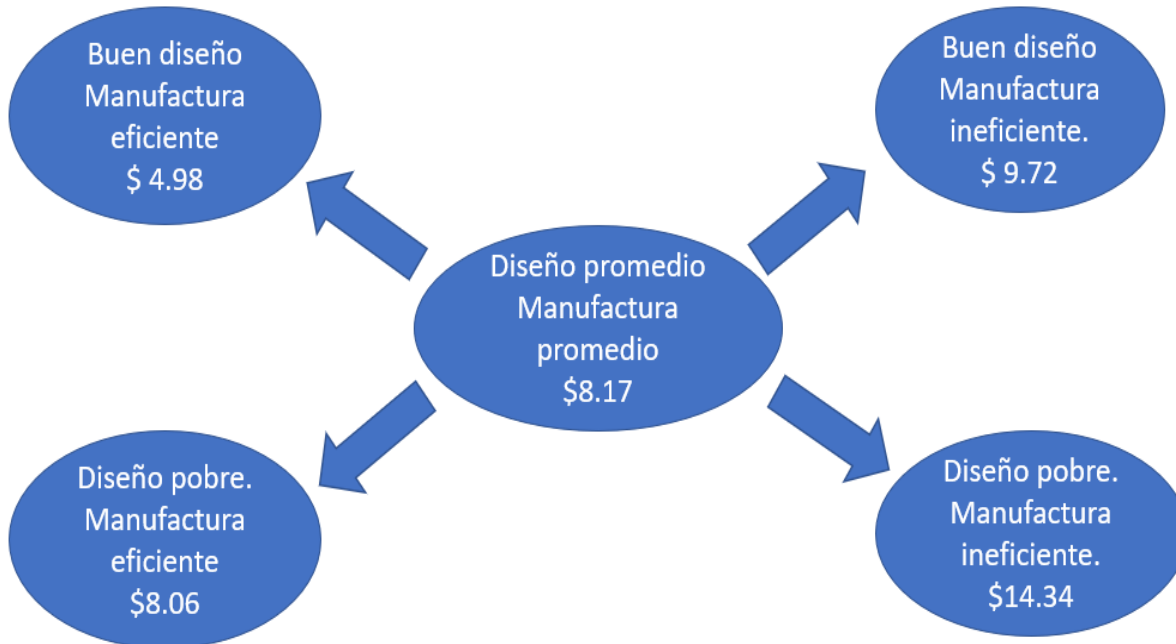


Figura 3.3 Relación costo- diseño- manufactura (Ullman, 2010).

Asimismo, esto determinará el precio del producto en el mercado, por lo cual es importante alcanzar el punto óptimo de diseño y manufactura, generando productos de calidad y con el mejor costo de fabricación. Para poder llegar a un buen diseño, se debe entender el tipo de problema de diseño que se tiene (Ullman, 2010):

- Diseño de selección: consiste en escoger la mejor solución a las necesidades conforme a una lista de ítems similares, generalmente se poseen catálogos. Como ejemplo, la selección de un rodamiento.
- Diseño de configuración: este tipo de diseño se presenta generalmente cuando todos los componentes están desarrollados, y el principal reto es ensamblarlos para lograr el producto final. Un ejemplo aplicado a motores, son las diferentes configuraciones solicitadas en cajas de conexión.

- Diseños paramétricos: son aquellos que involucran la búsqueda de valores para cumplir con las características específicas. Aunque puede parecer sencillo, este tipo de diseño presenta un desafío, debido a la infinidad de soluciones que se pueden generar, por ejemplo, durante la proyección eléctrica de un motor se puede solicitar un torque específico, y para lograrlo se pueden tener diferentes valores de espiras en el embobinado, áreas de anillos de corto en rotores, etc.
- Diseño original: este tipo de diseño involucra el desarrollo de un proceso o componente totalmente nuevo, sin alguna existencia anterior. Aquí se pueden mencionar principalmente la creación de nuevas líneas.
- Rediseños: este tipo de diseño suele ser el más común en la industria, el cual implica tomar diseños existentes y alterarlos conforme a las necesidades. Esto suelen ser salidas de ejes especiales, tapas, etc.

Con lo anterior se puede entender que el proceso de desarrollo de productos se enfoca en mercado, diseño y proceso. Como miembro del equipo de proyectos especiales, era necesario integrar estos tres pilares para cumplir con los objetivos mencionados al inicio. Como parte del departamento de ingeniería del producto, tenía una fuerte responsabilidad en la fase de prototipos para poder definir la funcionalidad del producto, justificar las necesidades del diseño e integrarlas lo más posible al proceso de manufactura.

### 3.1.1 El diseñador y el equipo de trabajo.

Desde el inicio de la humanidad el proceso de diseño ha sido desarrollado mediante el conocimiento y la perfección de las habilidades de un individuo; desarrolla prototipos que indican el funcionamiento, de tal manera que selecciona un camino hacia ello. Los productos han sido desarrollados durante largo tiempo de esta manera; sin embargo, con la madurez y exigencia de los mercados actuales, este método de diseño se convirtió en algo costoso y lento. De esta manera fue necesario generar equipos que pudieran dar soluciones más eficaces, pasando desde las concepciones del proyecto, las necesidades abstractas, procesos de manufactura y llegando hasta el producto final.

Un equipo de trabajo para el desarrollo de productos debe estar integrado al menos por una persona con las siguientes características (Ullman, 2010):



- Ingeniero del producto: este posee la mayor responsabilidad de diseño, ya que de él depende cumplir las necesidades del producto, así como la claridad en las especificaciones. Puede ser diseñador no licenciado con amplia experiencia en el área, además de poseer un amplio conocimiento en el proceso de diseño.
- Gerente de producto: este individuo representa el enlace entre el producto y el cliente, asegurando el éxito del producto.
- Ingeniero de manufactura: los ingenieros de producto generalmente no tienen los conocimientos profundizados en el área de procesos de fabricación. Para complementar un proyecto es necesario disponer de un ingeniero industrial con conocimientos de las capacidades fabriles.
- Diseñadores: los diseñadores suelen ser los responsables por los proyectos conceptuales y las primeras etapas del producto. Posteriormente, entregan el proyecto al ingeniero del producto para su detallamiento, creación de documentación y lista de materiales.
- Técnicos: apoyan al ingeniero del producto en desarrollo de pruebas, obtención de datos, etc.
- Especialistas en control de calidad: esta persona debe poseer los conocimientos para medir estadísticamente una muestra y determinar el cumplimiento de las especificaciones.
- Analistas: los analistas suelen desarrollar estudios matemáticos complejos del rendimiento del producto. Son generalmente especialistas que se centran en un tipo de sistema o método.
- Gerente de ensamble: al ser un producto conformado de diferentes piezas, éste debe ser ensamblado, por lo cual es necesario asignar un responsable para esta actividad.
- Proveedores: muy pocos productos son fabricados totalmente en una fábrica por lo cual se tienen necesidades de realizar subcontrataciones.



Figura 3.4 El equipo de diseño (Ullman, 2010).

Respecto a las necesidades anteriores, para nuestro equipo de trabajo, fue definido el flujo presentado en la Figura 3.1., donde se pueden apreciar los departamentos involucrados: Planeación y control de la fabricación (Gerente de ensamble), Ingeniería del producto (Diseñadores y analistas), Desarrollo de proveedores (Proveedores), Ingeniería industrial (Ingeniero de manufactura), laboratorio (Control de calidad) y Ventas (Gerente del producto).

Una vez definidas las personas responsables se debe construir y mantener un equipo exitoso; para ello es necesario tener en cuentas las siguientes características:

- Claridad en las metas.
- Plan de acción.
- Roles claramente definidos.
- Comunicación clara y efectiva.

- Procesos de decisión bien definidos.
- Participación balanceada.
- Establecimiento de reglas básicas.
- Conciencia del proceso del equipo.
- Evaluación.

Es evidente que el trabajo de desarrollo de un producto debe contener muchas personas involucradas, así como lineamientos esenciales para cumplimiento de los objetivos. De manera resumida, se pueden destacar los siguientes puntos en el proceso de integración de un equipo:

1. Establecer una necesidad.
2. Crear un plan.
3. Entender.
4. Generar.
5. Evaluar.
6. Decidir.
7. Documentar.

Entonces, el flujo descrito al inicio del capítulo (Figura 3.1) y el flujo de desarrollo de la Figura 2.37, comprenden que del punto uno al punto tres del listado anterior, se desarrolla en la fase de consulta; se establece la necesidad por parte de ventas y las áreas de ingeniería del producto. Ingeniería industrial y desarrollo de proveedores, por su parte, entienden y desarrollan un plan para poder cumplir con esas necesidades.

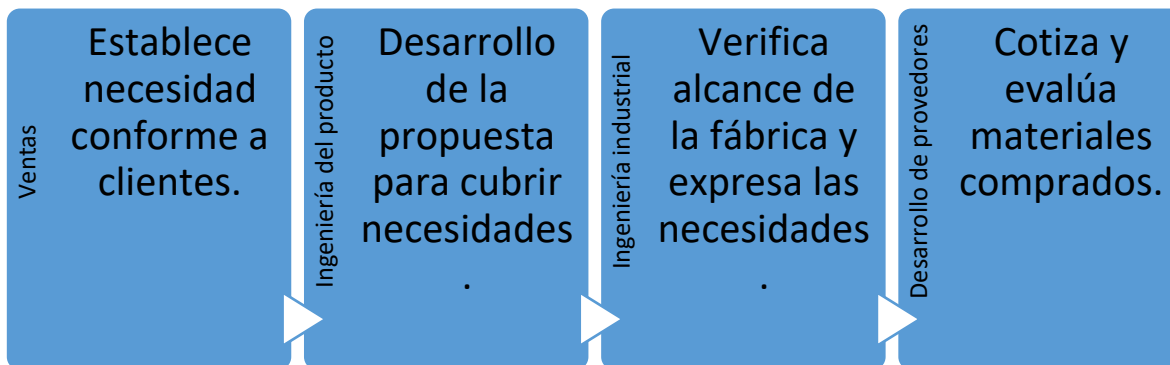


Figura 3.5 Flujo de integración de un equipo.

Una vez planteadas las necesidades, al establecer el plan de acción, continúa a la parte de generar, evaluar, decidir y documentar. En esta etapa se prepara todo para la fabricación de un modelo físico, con la finalidad de validar el producto o proceso.

### 3.1.2 Modelos físicos.

Los modelos físicos, que son a menudo llamados *prototipos*, tienen diferentes finalidades. La importancia de estos modelos físicos radica en saber identificar cuándo usarlos, además de identificar su finalidad, así como sus pruebas de concepto, producto, proceso, producción, etc. (ver Figura 2.37). En la Figura 3.5 se mencionó un flujo de integración de equipo; es en esta etapa donde se identifica la necesidad de una validación. En este punto es importante recordar las definiciones dadas al inicio del título **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en el cual se detallan las definiciones de prototipo experimental, prototipo funcional, lote piloto y muestras; de éstas se advierte por qué debe ser realizado el prototipo.

Así pues, podemos identificar que un prototipo experimental está relacionado con una validación de concepto, mientras que un funcional con una de producto. Asimismo, se puede asociar el lote piloto con una validación de proceso y producción. Por tanto, es importante retomar el flujo mencionado en la Figura 3.1 ya que aquí comienza la aventura de los prototipos.

La siguiente etapa del proceso se designa por la preparación, generación y documentación del proyecto. En esta etapa es necesario conocer y retomar el flujo de la Figura 3.1, y explicar las actividades de cada área, así como la necesidad de construcción de un plan de acción para cumplimiento de las metas. Una vez definidas las necesidades planteadas en la etapa previa para el proyecto, comienza la fase de análisis; para ello tomaremos como referencia el flujo más completo de la Figura 3.1, un prototipo funcional. Como parte del planeamiento de proyecto, se definieron tiempos límites de cada área y actividades de seguimiento del proyecto, así como tiempos de entrega y retroalimentación sobre el proyecto.

Días útiles	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	2				
Ventas	■																																										
Planación y control de la producción		■																																									
Embalaje			■																																								
Eléctrica			■	■																																							
Mecánica				■	■	■																																					
Desarrollo de proveedores							■	■																																			
Ing. Industrial							■	■																																			
Planación y control de la producción								■																																			
Fabricación de herramientas								■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Fabricación de componentes y ensamble																																											
Acompañamiento de calidad																																											
Laboratorio																																											
Reunión de cierre																																											
Expedición																																											
Revisión de proceso																																											
Revisión de embalaje																																											
Revisión de proyecto																																											
Actualización de rutas																																											
Seguimiento de mercado																																											
Total de días																																											

Tabla 3.1 Identificación de tareas y secuencia de desarrollo

Como se ha mencionado, este proceso involucra a muchas personas, y por ello es esencial entender el problema y las necesidades de desarrollo de ingeniería. Como se observa en la Tabla 3.1, existe un proceso después de la facturación del producto, que es precisamente para validar si el producto cubre las necesidades del cliente.

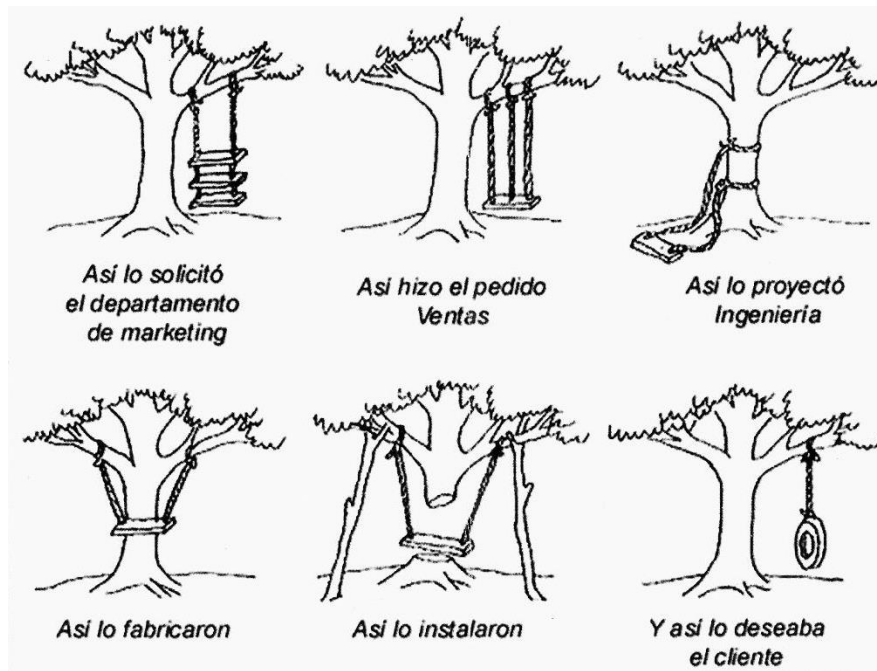


Figura 3.6 Entendiendo la necesidad del producto (Ullman, 2010).

En esta evaluación es esencial realizar los refinamientos del diseño, o bien, un rediseño total para atender las necesidades del cliente. Hasta este punto se ha desarrollado un modelo físico, y se ha mencionado la importancia de los flujos y las necesidades de comprensión de los requerimientos del cliente. El resultado de este proceso es un modelo del producto capaz de ser entregado al cliente.

Las responsabilidades de cada área para poder cumplir con la fabricación del modelo físico son:

Ventas → Crear Material en sistema y Solicitud de generación de BOM,<sup>17</sup> basado en la aceptación de la propuesta realizada en la etapa pasada (etapa de consulta).

Planeación y control de la producción (PCP) → Bloqueo de material para evitar fabricaciones a grandes volúmenes hasta liberación del producto final.

Embalaje → Especificar el embalaje para el producto.

Eléctrica → Detallar proyecto eléctrico conforme a la propuesta inicial y generar materiales necesarios (BOM).

Mecánica → Detallar proyecto mecánico conforme a la propuesta inicial y generar lista de materiales (BOM).

Desarrollo de proveedores (DCP) → Analizar componentes críticos comprados y especificar fecha de llegada.

Ing. Industrial → Asignar rutas y procesos alternativos para fabricación de componentes y especificación de tiempos de desarrollo de nuevos herramientas.

Planeación y control de la producción → Generar órdenes de fabricación de ensamble y de componentes, y dar seguimiento al cumplimiento de las órdenes.

Laboratorio → Realizar ensayos solicitados para validación de performance.

Posteriormente se realiza una reunión de cierre para comentar los problemas de diseño y proceso encontrados durante el desarrollo, además de sugerir mejoras. Aquí comienza el análisis post proyecto, en el cual se deben resolver las no conformidades generadas a cada proyecto y documentar el proyecto, atendiendo los puntos 4, 5 ,6 y 7 del proceso de integración de un equipo. Paralelo a este flujo de desarrollo, desde el comienzo de la fabricación, existe un técnico de control de calidad encargado de dimensionar e inspeccionar los componentes asociados a las órdenes de producción de motores especiales.

---

<sup>17</sup> Bill Of Materials

### 3.1.3 Ingeniería del producto

El departamento de ingeniería del producto posee tres de las actividades mostradas en el flujo de la Tabla 3.1: embalaje, eléctrica y mecánica. Como se describió en el apartado pasado, cada subárea de ingeniería del producto tiene actividades y tiempos que cumplir; en este apartado me centraré en describir las actividades relacionadas a la parte mecánica.

Una vez generada la solicitud por parte de ventas para la fabricación del producto, es necesario especificar un embalaje para su transporte y asegurar que este motor llegue en óptimas condiciones al cliente. Debido a que el concepto del flujo de proyectos especiales está relacionado a la ganancia de nuevos negocios, es necesario definir el uso de embalajes especiales en esta etapa, como acción para proteger estos primeros acercamientos con el cliente y tener mayor impacto en las decisiones de compra del mismo.

La parte eléctrica se encarga de desarrollar el diseño del estator bobinado, selección de protectores térmicos, etc. Aquí se tiene como principal foco las necesidades del cliente, torques a desarrollar, eficiencias (según norma) que cumplir, velocidad de rotación y la especificación de los ensayos de laboratorio necesarios para asegurar el correcto desempeño del producto, así como certificaciones y desarrollos de protector térmico.

En la parte mecánica se generan planos mediante uso de software CAD. Se especifican tolerancias y rugosidades; se calculan vidas de rodamientos; se especifican grasas necesarias para la operación óptima del motor, y, en caso de flechas especiales, se realizan los cálculos para asegurar factores de seguridad.

Existe una cuarta actividad de ingeniería del producto para el caso de desarrollo de proyectos especiales, de la cual yo era responsable. Ésta, básicamente, consiste en hacer que todo lo descrito desde el inicio del título **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se cumpla; es decir, desempeñarse cual coordinador de proyectos. De tal modo, la importancia de esta actividad tiene dos variantes: el cumplimiento de tiempos de entrega y la toma de decisiones enfocadas al proyecto. Ya que estamos hablando de un producto nuevo, el cual debe ser validado y es de esperarse que se presenten riegos en su desarrollo, como tolerancias que no se pueden alcanzar por proceso, problemas variados con componentes comprados, desempeños eléctricos fuera de especificaciones, selecciones erróneas de componentes, errores en planos, procesos no analizados, etc. Por lo tanto, es indispensable contar con un conocimiento firme en el producto para poder generar opciones; sin embargo, se debe conjuntar con la parte comercial al realizar preguntas como: ¿A qué cliente está dirigido? ¿Cuál es el objetivo del cliente con el producto? ¿Cuál es la aplicación? ¿Las normativas lo permiten?

Entonces, se habrá notado que las actividades desarrolladas no pertenecen a una actividad de diseño puro, sino de una validación de diseño y soluciones. Para poder entender a profundidad estas actividades, es necesario describir un proyecto desarrollado.

### 3.1.4 Caso de éxito.

Aunque las actividades desempeñadas no estén relacionadas directamente con el diseño, la generación de conocimiento y retroalimentación hacia las áreas de diseño son constantes, lo que permite generar criterios empíricos en el diseño de un producto.

#### 3.1.4.1 Motores para industria alimenticia y farmacéutica.

Estos motores pertenecieron a una solicitud de diversas potencias desde 5 HP hasta 20 HP. A continuación, se describen las características similares entre ellos:

1. Rodamiento delantero: 2RS - C3
2. Rodamiento trasero: 2RS - C3
3. Sello de rodamiento delantero: retén con resorte de acero.
4. Sello rodamiento trasero: retén con resorte de acero.
5. Permatex en juntas.
6. Drenos múltiples. 0, 90, 180 y 270 grados en tapas.
7. Uso de media chaveta y eje en acero inoxidable.
8. Slinger.<sup>18</sup>
9. Tornillería en acero inoxidable.
10. Placas de datos de identificación de producto en acero inoxidable.

---

<sup>18</sup> Componente rotativo alojado mediante interferencia en la salida de flecha encargado de rebotar los chorros de agua direccionados a los sellos mecánicos.





Figura 3.7 Motor especial lavable.

Todas estas características se encontraban limitadas por una fuerza axial requerida, que debería ser cubierta sin comprometer la vida del rodamiento (fuerza axial variable dependiendo la potencia). Éste fue el principal reto del diseño de estos motores, ya que se debía desarrollar una brida especial para poder alojar el rodamiento sobredimensionado que cumpliera las necesidades de la aplicación y vida útil. El segundo reto fue la pintura especial. Como se mencionó en el Capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la finalidad de este proceso es poseer un modelo físico, por lo cual se debe realizar una fabricación del producto, etapa de mayor complejidad en los prototipos, pues se encuentra la mayoría de deficiencias, áreas de oportunidad y de mejora en los proyectos y procesos.

Una vez realizado el proceso de consulta, fue definido el rodamiento a emplear para los diseños preliminares de bridas; es decir, el proceso descrito en la Figura 2.37. Esto determina la necesidad de realizar prototipos y comienza un nuevo reto: la fabricación.

A pesar de que este proyecto fue definido como eléctricamente estándar y las principales especialidades pertenecían a un desarrollo mecánico (retenes, rodamientos, bridas y pintura), los principales retos se encontraron con desempeños eléctricos y procesos de fabricación.

Asimismo, a pesar de poseer flujos, herramientas de cálculo, modelado en 3D, reuniones y aprobaciones previas de productos, siempre existe incertidumbre acerca del desempeño de los productos finales. Estas incertidumbres pueden estar asociadas a los mismos alcances de fabricación, control de la producción, o bien, a todas las variables nuevas que se introducen en el producto. Por ello, es común tener que tomar decisiones o generar criterios basados en las experiencias presentadas durante el desarrollo de un producto.

Como se mencionó en párrafos anteriores, a pesar de tener el 100% de especialidades mecánicas, los mayores retos se presentaron en desempeños eléctricos. Por ello, es importante comprender que la división en dos áreas de diseño de este producto es únicamente administrativa, ya

que al final, al diseñar un mismo producto, tendremos una interacción entre ambos diseños y las variables menos pensadas podrían afectar el diseño de la otra área. Esto nos da apertura para poder mencionar uno de los primeros retos: la corriente en vacío.

Como en toda actividad que ofrece productos, existen diversas actividades, algunas que ofrecen valor y otras que no, pero son necesarias. Dentro de las actividades que no agregan valor, pero son necesarias, se encuentran los controles de calidad. Uno de los últimos controles de calidad es el ensayo del motor sin carga (con todos sus componentes ya ensamblados); los valores de corriente en vacío (sin acoplamiento) se verifican, junto con la dirección de rotación (horario – antihorario), ruido y hi-pot (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Cuando fueron ensayadas las diferentes potencias de este proyecto, se detectó que la corriente en vacío se encontraba por arriba de las tolerancias especificadas en el proyecto. Como éste es un prototipo, los valores deben ser informados a ingeniería de producto, quien deberá tomar una decisión justificada para decidir si se sigue adelante o no.

Las primeras preguntas que surgen de este proyecto son: ¿por qué la corriente en vacío está elevada en un proyecto eléctricamente estándar? ¿es importante este valor si el cliente no ocupa el motor desacoplado? La respuesta es fácil: debemos validar, ya que el hecho de ser un proyecto eléctrico estándar, puede indicar que algo está mal en la fabricación o concepción del proyecto, además de tener que ajustar valores de los criterios de liberación en pruebas. En estos proyectos es crítico el tiempo de respuesta y la calidad de la misma para evitar retrasos en los tiempos de entrega; para ello es necesario plantear las posibles causas, con base en las experiencias previas:

Fallo	Posible causa	Verificación
Corriente en vacío elevada	Medida de prensado de rotor y estator errada o desalineada	Medición de componentes
	Entrehierro por arriba de lo especificado	Medición de componentes
	Burbujas en la inyección del rotor	Ensayo de rotor bloqueado 360
	Resistencia de estator embobinado fuera de los especificado	Medición de resistencias
	Diseño eléctrico saturado	Revisión de proyecto
	Acero eléctrico mal tratado o errado	Ensayos de laboratorio

Tabla 3.2 Fallo y causas posibles de corriente en vacío elevada.

Cada una de estas posibles causas implican un tiempo de verificación y solución; algunas un retrabajo de cuestión de minutos, otras la fabricación de componentes completos, pudiendo tomar hasta más de tres días. Sin embargo, ¿qué sucede si ninguna de estas posibles causas resulta positiva? Éste fue el caso de estos productos, y aunque una de las premisas para llevarlo a laboratorio a pruebas completas con carga fue que los motores en aplicación se encontraban con carga y debería ser probado así, los resultados de estos ensayos presentaron aún más variación respecto a lo proyectado eléctricamente, siendo un factor fundamental la eficiencia (valor normado). Con esto se concluye que existía un problema en el proyecto, pero la gran incógnita es encontrar el factor o los factores que afectaban, debido a que el cálculo eléctrico indicaba otros valores.

Para ello fue necesario comparar proyectos anteriores contra el actual, y revisar sus ensayos de laboratorio y segregar las diferencias entre ambos proyectos, tanto eléctricas como mecánicas. Es importante recordar que todo lo anterior llevó un aproximado de diez días laborales, días que impactaron al tiempo de entrega del proyecto.

Las principales diferencias encontradas con proyectos similares y con resultados acorde a cálculos fueron:

	Proyecto 1	Proyecto 2	Prototipo
<b>Rodamientos</b>	ZZ	ZZ	2RS-C3 (Rodamientos más grandes)
<b>Sellos</b>	Retén	V´ring	Retén con resorte

Tabla 3.3 Diferencia entre proyectos

Estas diferencias encontradas en rodamiento indican principalmente una variación en cuanto a la holgura radial presente en el rodamiento (C3 mayor que normal) y los tipos de blindaje en los rodamientos:

- ZZ → Blindaje de acero
- 2RS → Blindaje con neopreno de contacto (genera mayores pérdidas mecánicas por la fricción)

Una vez determinadas y eliminadas las diferencias (se retiraron los rodamientos especiales y los retenes con resorte), las pruebas de laboratorio resultaron dentro de lo esperado por el proyectista eléctrico. Ya identificadas las causas raíces de las variaciones, surge una nueva interrogante. ¿Debemos alterar el proyecto eléctrico para cumplir con los desempeños deseados y los componentes

solicitados? La respuesta, aunque no es muy evidente, se encuentra contemplada dentro de la normativa de ensayos NEMA MG1 Part 12 / IEEE std 112 Parte 4.3. La última describe que las pérdidas por rodamientos deben ser compensadas, si es que se mide directamente en un dinamómetro (caso de nuestro laboratorio). Por lo cual, solo fue necesario compensar las pérdidas generadas por los rodamientos (sobredimensionados y con sellos de contacto) para obtener valores dentro de tolerancias.

Aquí surge un nuevo desafío, pues no se pueden probar los motores sin sellos y rodamientos estándar para después colocarlos; los tiempos de ensamble se elevarían considerablemente. Por ello, se decidió realizar ensayos con y sin sellos para determinar el incremento, y ajustar solo valores en sistema para la liberación de caseta de pruebas finales (ensayos en vacío), ya que estos representan el último filtro en una fabricación estándar.

El siguiente desafío se presentó durante la aplicación y validación de los motores por parte del cliente. Fue reportado al departamento de control de calidad que los motores estaban presentando fallas en los retenes del rodamiento trasero. La falla descrita por el cliente, apelaba a que el retén trasero se rompía después de unas horas de uso continuo del motor. Nuevamente, tenemos que pensar en todas las posibles fallas:

Fallo	Posible causa	Verificación
<b>Rompimiento de retén trasero</b>	Dimensiones de alojamiento en tapa de rodamiento fuera de especificación	Medición de componentes
	Dimensiones de eje fuera de especificación	Medición de componentes
	Rugosidad de eje fuera de especificación	Medición de componentes
	Ambiente agresivo para el retén	Comprobación de ambiente en aplicación
	Selección errada de retén	Verificación de condiciones de operación y especificaciones de retén y proyecto
	Retén fuera de especificaciones.	Dimensionamiento de componente

Tabla 3.4 Fallo y posible causa de rompimiento de retén.

Para verificar aquellos puntos que son inherentes a la proyección por parte de ingeniería, es necesario recordar los criterios para la selección de un retén especificados en el titulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

- Fluido/Ambiente: lavado ocasional cloro. Recomendado: Fluoroelastómero. Seleccionado: Vitón. ✓
- Temperatura: temperatura indicada por el cliente 40°C. ✓
- Rotación: motor 2 polos (3600 RPM) Conforme a Figura 2.33. Diámetro del eje 25 mm. ✓

Conforme a los datos de selección, el retén era correcto. Ahora bien, las tolerancias y rugosidades necesarias para poder albergar y asegurar su correcto funcionamiento estaban en duda, ya que el proyecto había sido dimensionado nuevamente y todas las cotas se encontraban dentro de especificación.

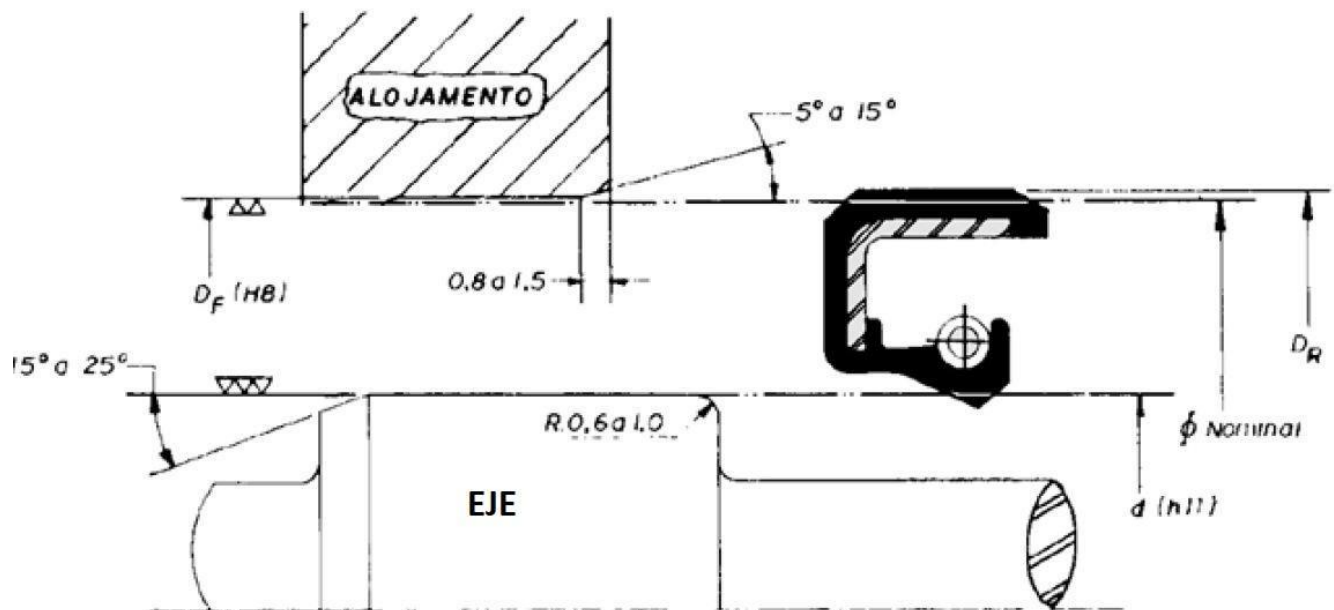


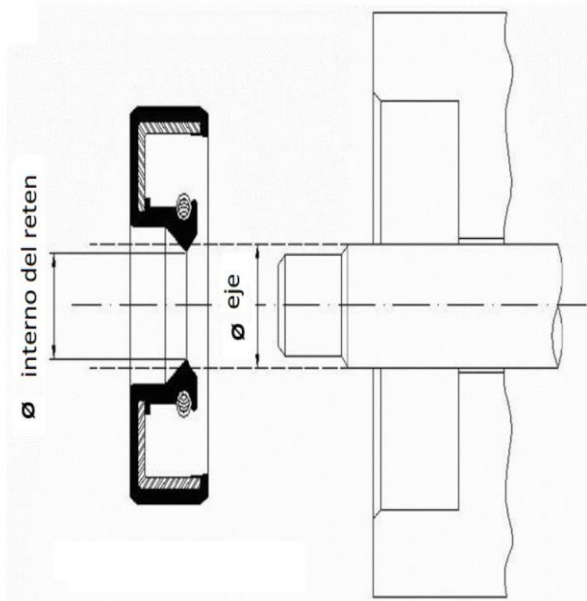
Figura 3.8 Cotas críticas para montaje y funcionamiento de retenes. (WEG - Retenes)<sup>19</sup>

Las cotas pertenecientes al proyecto:

<sup>19</sup> Norma interna

- Df (Cota de tapa) → Ok
- d (Diámetro de eje) → Ok
- Rugosidad (0.2 a 0.8 Ra) → Ok

Una vez descartadas las variables pertenecientes a procesos y proyectos, el retén, al ser un componente comprado, parecía ser la única posibilidad de explicar la falla, por lo cual, al ser dimensionado, se detectaron variaciones en los diámetros internos del retén. Además de ser observable una gran resequedad en la zona del labio.



Diámetro del eje (mm)	Interferencia (mm)
Hasta 10	0.6 a 1.5
10 a 18	0.7 a 1.7
18 a 30	0.8 a 2.0
30 a 40	1.0 a 2.2
40 a 45	1.0 a 2.4
45 a 70	1.2 a 2.7
70 a 80	1.4 a 3.1

Tabla 3.5 Interferencias entre retén y eje. (WEG - Retenes)

Figura 3.9 Diámetro interno de retén vs eje. (WEG - Retenes)

Con esto se pudo determinar un problema causado por un componente comprado. En esta etapa del proyecto es importante solucionar todos los problemas presentados, ya que, como se ha mencionado a lo largo del escrito, la principal función del flujo de trabajo y el equipo es ganar nuevos negocios, y, por consecuencia, procurar que la fabricación del producto fuera óptima. Por lo cual, el área responsable de cada defecto es responsable de generar un plan de acción para mitigar o disminuir la probabilidad de reincidencia de este problema.

Éste es sólo un caso puntual de todos los motores desarrollados; en general, se presentan casos similares con diferentes proyectos. En ocasiones se suelen especificar tolerancias que no se

pueden alcanzar en el proceso de producción, y se debe realizar el análisis de impacto de esta tolerancia, ya sea mediante un apilamiento de tolerancias, o bien, verificando y conociendo la aplicación o la validación que realizará el cliente en el motor prototipo. Esto permite tener gran acierto en la entrega de proyectos.

No obstante, se mencionó que se han desarrollado más de 600 proyectos, de los cuales se han tenido fracasos y victorias, presentando grandes aprendizajes para futuros desarrollos. De manera general, podemos hablar de un 85% de acierto en el producto, es decir, el cliente recibe lo que espera. No obstante, sólo existe aproximadamente un 10 % de negocios concretados.<sup>20</sup> Aún existen grandes retos y mejoras para poder alcanzar las metas deseadas, y para ello es necesario tener datos de por qué a pesar de acertar en el producto no se convierte en una venta final.

#### **3.1.4.1.1 Impacto económico.**

Hasta este punto se ha descrito uno de los principales desafíos de un proyecto. De éstos existen casi 600 registros, pero, ¿de qué nos sirve desarrollar este flujo y poner especial atención y fuerzas en estos proyectos? La respuesta se encuentra en la facturación. Como se mencionó al inicio del capítulo, la idea de estos desarrollos y de dedicar un equipo exclusivo para ello, es ganar nuevos negocios; el proyecto en cuestión representa un 25 % de utilidad total del proyecto, de los cuales se desarrollaron 15 motores diferentes descritos a continuación.

<b>Descripción</b>
1HP 2P 143/5TC
1.5HP 2P 143/5TC
2HP 2P 143/5TC
3HP 2P 182/4TC
5HP 2P 182/4TC
7.5HP 2P 213/5T
10HP 2P 213/5TC
15HP 2P 254/6TC

---

<sup>20</sup> Valores obtenidos de indicadores del 2019.

20HP 2P 254/6TC
1HP 4P 143/5TC
1.5HP 4P 143/5TC
2HP 4P 143/5TC
3HP 4P 182/4TC
5HP 4P 182/4TC
7.5HP 4P 213/5T

**Tabla 3.6 Proyecto de motores lavables.**

Como este proyecto existen muchos más; sin embargo, como en todo negocio, existen éxitos y fracasos, los cuales nos han permitido aprender acerca de las necesidades críticas.

### 3.1.5 Nuevas líneas de producto

Para poder abordar este tema, primero se tiene que responder la pregunta *¿qué es una línea de producto?* Para ello debemos retomar conceptos descritos en el capítulo anterior (antecedentes), los cuales hacen referencia a las normas que gobiernan los motores eléctricos; es decir, comparten características. Con esto retomamos los conceptos de eficiencia energética y cumplimiento de dimensiones específicas de montaje. Partimos de una definición general de línea de producto, para, posteriormente, aterrizar dicha idea en motores eléctricos.

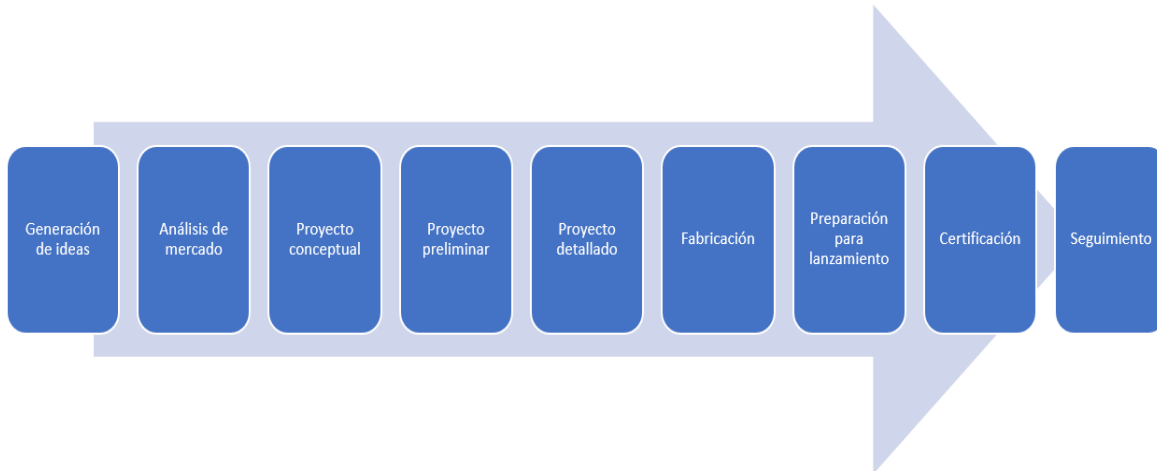
“Son aquellos productos que se encuentran en una misma clase y que están muy relacionados entre sí porque desempeñan una función parecida, se venden a los mismos consumidores, se comercializan con los mismos procedimientos, tienen el mismo nivel de precios, etc.” (Pérez, 2006).

Desmenuzando esta definición, podemos destacar los siguientes dos conceptos: pertenencia a una misma clase y desempeño de funciones parecidas. Si se trasladan estas ideas al ámbito de motores eléctricos, la pertenencia a una misma clase se asocia a las necesidades de alimentación (voltaje/frecuencia), montaje (formas constructivas) y normativas requeridas para su comercialización. Entonces, la similitud en las funciones se atribuye principalmente a la aplicación y condiciones ambientales, es decir, se pueden tener productos dirigidos principalmente para compresores, ventiladores, bombas, uso agrícola, etc., hasta condiciones ambientales, debido a que



pueden existir necesidades de atender zonas con altas temperaturas, ambientes salinos o explosivos, etc.

Por tanto, entendiendo de manera general lo que es una línea de producto, se describe el proceso mediante el cual surgen éstas:



**Figura 3.10 Flujo de desarrollo de nuevas líneas de productos.**

Dentro del diagrama, cada proceso es tan importante como el anterior, ya que esto permite un mayor acierto en el desarrollo del producto y el objetivo del mercado. Como ingeniero del producto, entiendo que las actividades más fuertes se presentan en la parte de proyecto conceptual, preliminar y detallado, ya que aquí se deben realizar todos los análisis pertinentes para su desarrollo; sin embargo, no son todas las actividades pertenecientes a Ingeniería del producto, pues, como parte de fabricación, se deben generar los prototipos necesarios para validar las propuestas de proyecto, y es aquí donde se vuelve a presentar la parte de control de proyectos especiales.

Proyecto conceptual	Proyecto preliminar	Proyecto detallado
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crear soluciones con prototipos virtuales y experimentos.</li> <li>• Análisis de inversiones y capacitación fabril.</li> <li>• Mapeo de cadena de proveedores.</li> <li>• Alternativas de proyecto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prototipos físicos y validaciones técnicas.</li> <li>• Evaluación de necesidad de herramientas.</li> <li>• Actualización de riesgos del producto.</li> <li>• Ciclo de vida del producto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Refinamiento de proyecto basado en resultados de prototipo.</li> <li>• Aprobación de inversiones.</li> <li>• Proyectos eléctricos y mecánicos para toda la línea.</li> <li>• Creación de materiales técnicos.</li> <li>• Reevaluación del retorno de inversión.</li> </ul>

Figura 3.11 Actividades correspondientes a las tres fases de proyecto.

Como es evidente, es un proceso multidisciplinario, donde no sólo depende de un área en particular y las actividades de cada departamento específico involucran a más de una persona. Por ello es entendible que las actividades se encuentren bien definidas. En mi estancia dentro de la empresa, he tenido participación en la liberación de varias líneas de producto importantes, desde mis actividades desarrolladas como responsable del área de prototipos con retos similares a los descritos en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** A continuación, se describen las características generales:

Motores para uso agrícola: estos motores presentan un alto torque, debido al trabajo pesado que puede representar una granja; además están previstos con un grado de protección IP 55 para poder ser instalados en interiores o exteriores, cubriendo así una amplia gama de posibilidades de montaje. También están provistos con protección térmica manual.

Motores para secadores de grano: esta línea está pensada para mantener los cultivos en temperatura, humedad y limpieza adecuada para aumentar el tiempo de almacenamiento. La línea fue desarrollada para acoplarse directamente al ventilador axial de secado, y fue pensado para ambientes llenos de polvo de grano. En su variante de motor abierto, presenta rejillas que protegen su interior contra el acceso de animales como víboras y roedores.

Motores lavables: esta línea está pensada para aplicaciones donde se requiere alto grado de limpieza, es decir, para industria farmacéutica, alimenticia, o bien, aplicaciones donde el motor estará sujeto a constantes lavados de las áreas y/o zonas de trabajo. Dentro de sus principales características se encuentran sus componentes en acero inoxidable y su pintura antibacteriana. Además de su capacidad para soportar grandes ciclos de trabajo sujeto a chorros de agua constantes.



**Figura 3.12 Motor para uso agrícola (Propiedad WEG).**



**Figura 3.13 Motor para secado de granos (WEG, 2019).**



**Figura 3.14 Motor lavable (Propiedad WEG).**

Las contribuciones principales a estos desarrollos desde mis funciones en control de proyectos especiales, se basaron en determinar si las especificaciones emitidas por ingeniería eran suficientes para poder realizar el ensamble, atención a planta, revisión de ensayos preliminares<sup>21</sup>, análisis de falla, coordinación del equipo que conforma el flujo, propuestas de mejoras al proyecto detectadas en las fabricaciones iniciales, atención a no conformidades<sup>22</sup> generadas por el departamento de ingeniería, modificaciones de planos conforme a las mejoras detectadas y liberaciones de proyectos. Todas estas actividades son realizadas con el objetivo de finalizar con un producto robusto y minimizar los posibles modos de falla que se puedan presentar en una producción normal, es decir, sin la supervisión de las áreas de ingeniería del producto e industrial.

Además de las actividades relacionadas directamente con la fabricación del producto, también estaba involucrado en la parte administrativa de registro de la información. Esta actividad consta de generar los reportes adecuados, donde se especifica la liberación, los parámetros en los

---

<sup>21</sup> Los ensayos preliminares constan de medición de resistencia en frío, corriente en vacío, análisis de rotor bloqueado 360° y curvas de par vs velocidad.

<sup>22</sup> Una no conformidad consta de algún error generado por un área en específico que retrasa el cronograma planteado inicialmente.

cuales fue liberado, así como el registro de todos los errores encontrados por los departamentos. Este reporte resume todo el proceso de fabricación del producto, y genera un registro para rastreabilidad y consulta para futuras fabricaciones. En una segunda etapa, se generan los indicadores con *lead times* objetivo y el tiempo que cada departamento tomó para realizar su actividad.

En estos párrafos se mencionaron los desarrollos de líneas dentro del flujo de control de proyectos especiales (correspondientes a la etapa de proyecto preliminar y fabricación). No todos los proyectos siguen este flujo, ya que se pueden tener proyectos que solamente se cataloguen como especiales<sup>23</sup>, teniendo registro de más de 600 proyectos de este tipo a la fecha del 20/01/2020. En todos estos proyectos se realizan las mismas actividades descritas en párrafos anteriores.

## 3.2 Prototipos virtuales.

Una actividad con mucha importancia dentro de la empresa, son los proyectos de reducción de costos, y, como se menciona en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se comenzó una inversión en el año 2014 para instalar una planta fundidora, la cual abrió muchas posibilidades para desarrollo y mejora de productos. Entonces, retornando a la definición de reducción de costos, podemos entenderla como un proceso en el cual se intentan maximizar las ganancias de un producto o servicio. Existen diferentes formas de reducir los costos entre los cuales los más relacionados a las actividades de ingeniería se encuentran en diseño y estandarización de componentes.

### 3.2.1 Desarrollo de tapas en hierro fundido

Como se describió en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, las principales funciones de una tapa son brindar soporte al rodamiento, además de proveer la rigidez estructural adecuada para evitar vibraciones. Éstas pueden estar fabricadas de diferentes materiales; principalmente, en la línea de motores en la que me he desempeñado, son de aluminio. Conforme a las necesidades actuales para mercado interno mexicano, se requieren algunas mejoras en cuanto a costos, por lo cual se propone el uso de tapas y bridas en hierro fundido; sin embargo, se debe

---

<sup>23</sup> Se considera un proyecto especial aquel que comparte la mayoría de las características con una línea liberada, pudiendo presentar variaciones de montaje, diseño eléctrico o características mecánicas.

mantener la intercambiabilidad de ambas (hierro–aluminio) para intentar estandarizar este cambio y poder ofrecer los diferentes productos sin la necesidad de tener requisitos especiales en cada proyecto.



**Figura 3.15 Propuesta de tapas de aluminio para hierro fundido**

Con ello se realizan propuestas de tapas en hierro fundido, manteniendo los criterios de proyecto especificados en la norma WPS-28321<sup>24</sup> para garantizar la intercambiabilidad con las tapas actuales. Posteriormente, se valida en Diseño, mediante simulaciones en software ANSYS, para poder garantizar que éstas muestran características estructurales suficientes para asegurar que en el proceso de maquinado no sufran deformaciones que afecten las dimensiones finales, realizando las optimizaciones necesarias, como reducir masa o adicionar refuerzos (nervaduras).

Un punto importante en el diseño de tapas de motores es poder mantener la circularidad<sup>25</sup> del encaje de la tapa y cubo de rodamiento durante el maquinado, ya que, si estos valores se encuentran fuera de las tolerancias, puede provocar defectos de ensamble, problemas de arrastre, e incluso afectar el performance eléctrico; por ello, es sumamente importante proveer un diseño robusto que pueda ser capaz de cumplir con las necesidades de las tolerancias y aplicación.

<sup>24</sup> Norma interna para desarrollo de proyectos de tapas, donde se especifican las dimensiones críticas y tolerancias necesarias para asegurar el correcto funcionamiento del motor.

<sup>25</sup> Distancia radial entre el contorno de la sección normal al eje del cilindro y el círculo ideal.

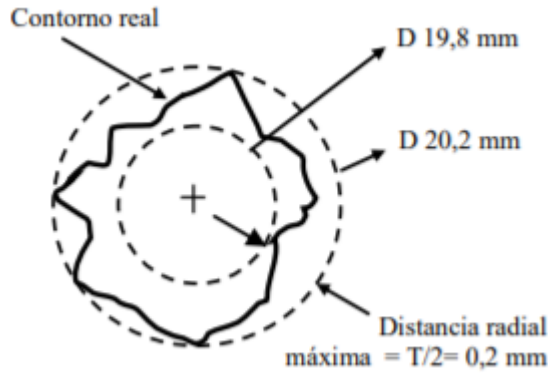


Figura 3.16 Esquema de circularidad. (GRUPO TECNOLOGÍA MECÁNICA, 2020)

Durante el maquinado de las tapas y bridas, éstas son sujetadas por mordazas en 3 o 6 puntos, según sea el caso, las cuales ejercerán una fuerza sobre la tapa, deformándola previamente al maquinado. Una vez maquinadas, las mordazas soltarán la tapa y la deformación inicial ya no existirá; sin embargo, el maquinado previamente realizado ya no mantendrá la circularidad, ya que esta circularidad dada en el maquinado fue obtenida en el estado deformado de la pieza, debido a las fuerzas ejercidas por las mordazas. Al ser retirada la presión de las mordazas sobre la tapa, la deformación generada por ellas tenderá a regresar a su estado inicial (antes de aplicar la fuerza de las mordazas), generando un perfil inverso de deformación al generado durante el maquinado, que provoca errores de circularidad críticos para ensamble y performance del motor completo. Para poder entender este fenómeno, se pueden observar las siguientes imágenes:

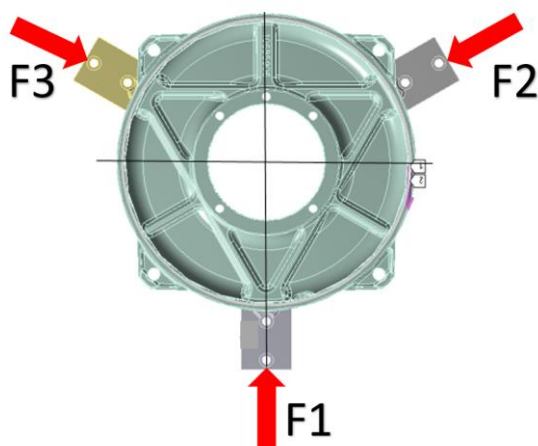


Figura 3.17 Esquema de aplicación de fuerza por las mordazas

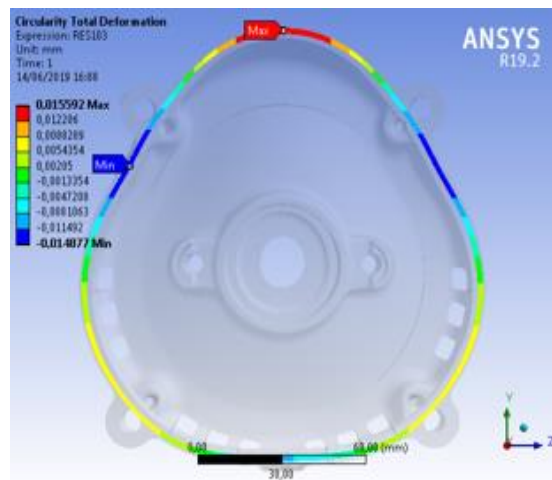


Figura 3.18 Perfil de deformación generado por las mordazas

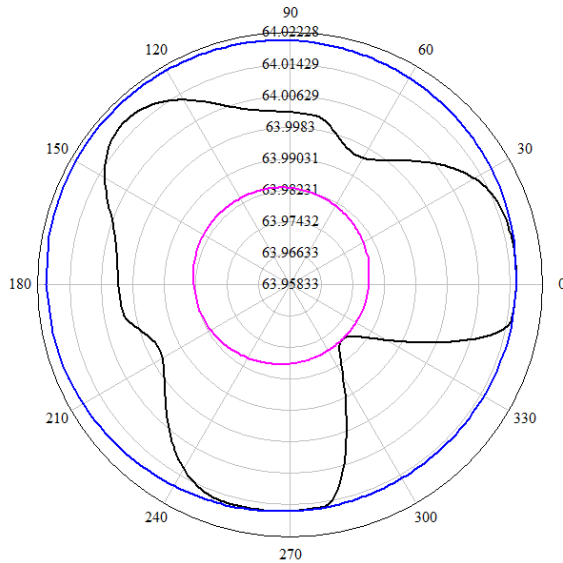


Figura 3.19 Perfil de deformación generado después de retirar las fuerzas aplicadas por las mordazas.

Para poder desarrollar este proyecto, es necesario realizar la propuesta inicial del diseño de la tapa, de la cual, se deben considerar los criterios establecidos por el área de ingeniería industrial, que asegura la factibilidad de fabricación con los procesos actuales. Entre estos criterios, se incluyen ángulos de extracción, espesores mínimos de pared, radios y sobre-metales en zonas que serán maquinadas.

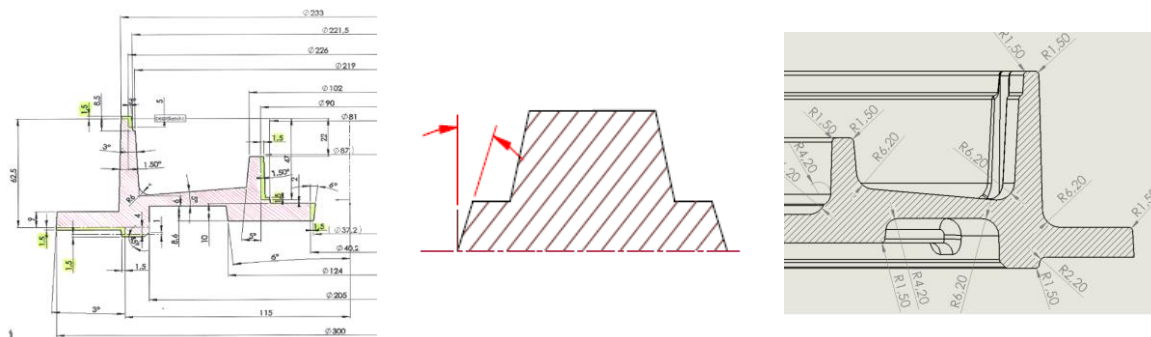


Figura 3.20 Sobre-metal, ángulo de extracción y radios en piezas fundidas (WPS-6517<sup>26</sup>)

<sup>26</sup> Norma técnica interna para desarrollo de proyectos en hierro fundido con estandarizaciones en sobre-metales de maquinados, radios, espesores mínimos de pared, contracciones, etc.

Se requería desarrollar un total de 6 tapas y 2 bridas, las cuales se listan en la Tabla 3.7 así como algunas propiedades<sup>27</sup> del material, del cual serían hechas:

Parte	Material	E [GPa]	G [GPa]	Poisson [-]
Brida propuesta N48	Hierro fundido FC200 - TBG-1447	90	36.29	0.24
Tapa delantera propuesta N48	Hierro fundido FC200 - TBG-1447	90	36.29	0.24
Tapa tras. Propuesta N48 (Sin caja)	Hierro fundido FC200 - TBG-1447	90	36.29	0.24
Tapa tras. Propuesta N48 (Con caja)	Hierro fundido FC200 - TBG-1447	90	36.29	0.24
Brida propuesta N56	Hierro fundido FC200 - TBG-1447	90	36.29	0.24
Tapa delantera propuesta N56	Hierro fundido FC200 - TBG-1447	90	36.29	0.24
Tapa tras. Propuesta N56 (Sin caja)	Hierro fundido FC200 - TBG-1447	90	36.29	0.24
Tapa tras. Propuesta N56 (Con caja)	Hierro fundido FC200 - TBG-1447	90	36.29	0.24

Tabla 3.7 Tapas y bridas propuestas

Para realizar la simulación, fue necesario verificar los modelos de las mordazas empleadas en el maquinado de cada tapa, y las fuerzas que éstas ejercían sobre la tapa. A continuación, se muestra una tabla con los materiales definidos para las mordazas y los insertos empleados:

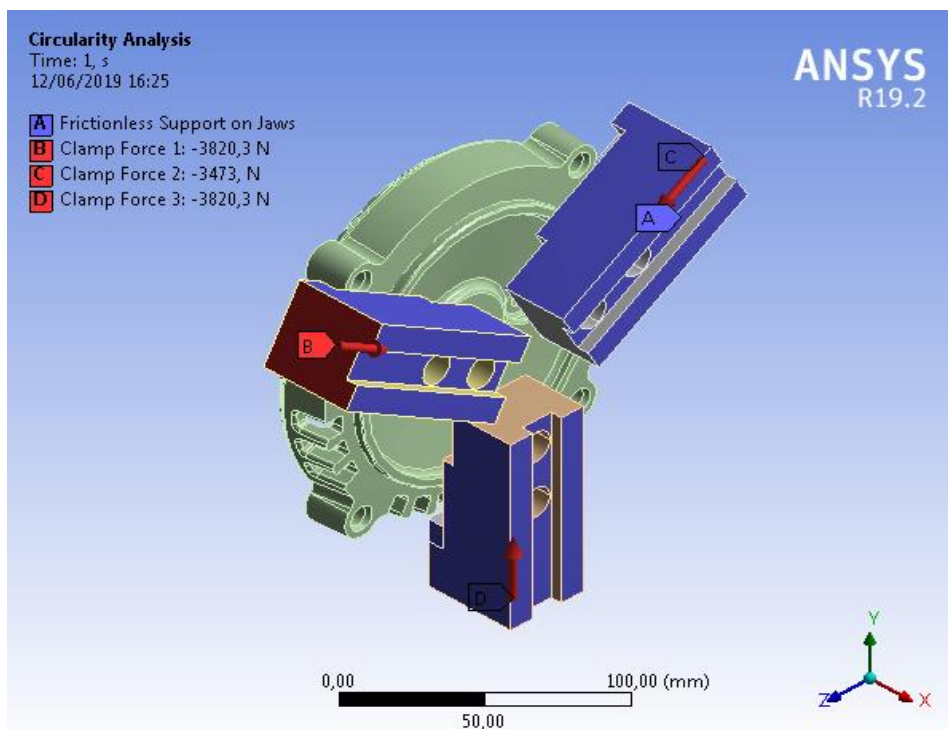
Parte	Material	E [GPa]	G [GPa]	Poisson [-]
SCHUNK KM WB-88	Acero estructural	200	76.92	0.3
inserto (Apoyo para simulación)	Acero estructural	200	76.92	0.3

Tabla 3.8 Herramientales empleados en maquinado y sus propiedades mecánicas.

<sup>27</sup> La caracterización del hierro fundido FC200, está basada en datos de ensayos de probetas sometidas a tensión provenientes de las plantas de fundición de la misma empresa y valores registrados en norma interna TBG-1447.



Para evaluar la deformación durante el proceso de maquinado, se aplicaron fuerzas en cada mordaza. Las fuerzas de sujeción fueron calculadas, de tal forma que se empleó la presión hidráulica de 0.4 [MPa] junto con un área de pistón de 10300 [mm<sup>2</sup>]<sup>28</sup>. Estas deformaciones comprenden que, durante el proceso de maquinado en estado deformado, se provoque un error de circularidad cuando la fuerzas que realizan la deformación sean retiradas. Sin embargo, el perfil presentado en el análisis se puede percibir en el sentido opuesto al de la pieza real. Las condiciones de frontera empleadas en las simulaciones se muestran en la siguiente figura:



**Figura 3.21 Condiciones de frontera para las simulaciones.**

El método empleado en este análisis para determinar el error de circularidad, se realiza mediante mínimos cuadrados, también conocidos como LSC (Least Squares Circle). Éste es el método usado en las mediciones experimentales por el departamento de control de calidad y la mayoría de los equipos destinados a la medición de errores de forma referenciados a una circunferencia. Este método toma, pues, como referencia el centro del círculo deformado, generado mediante el método de

<sup>28</sup> Datos provenientes del modelo de torno CNC empelado para el maquinado.

mínimos cuadrados; después, del centro de la circunferencia deformada, se generan una circunferencia circunscrita y una inscrita al perfil deformado, siendo el error de circularidad el valor de la separación radial entre estas dos circunferencias. (Sui, 2012)

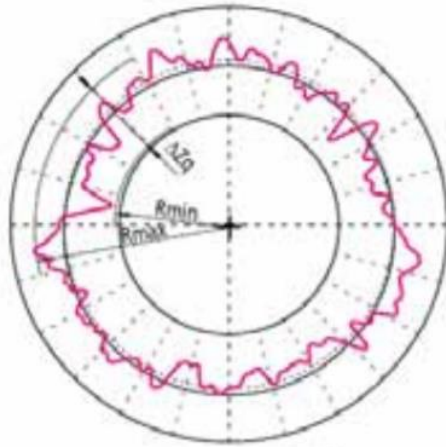


Figura 3.21 Circunferencias generadas en el método LSC. (Sui, 2012)

La Figura 3.22 muestra el perfil deformado de la guía y cubo de rodamiento, por las fuerzas de sujeción. Los valores en la escala representan la desviación. La amplitud en los valores de la escala es igual a la circularidad del error.

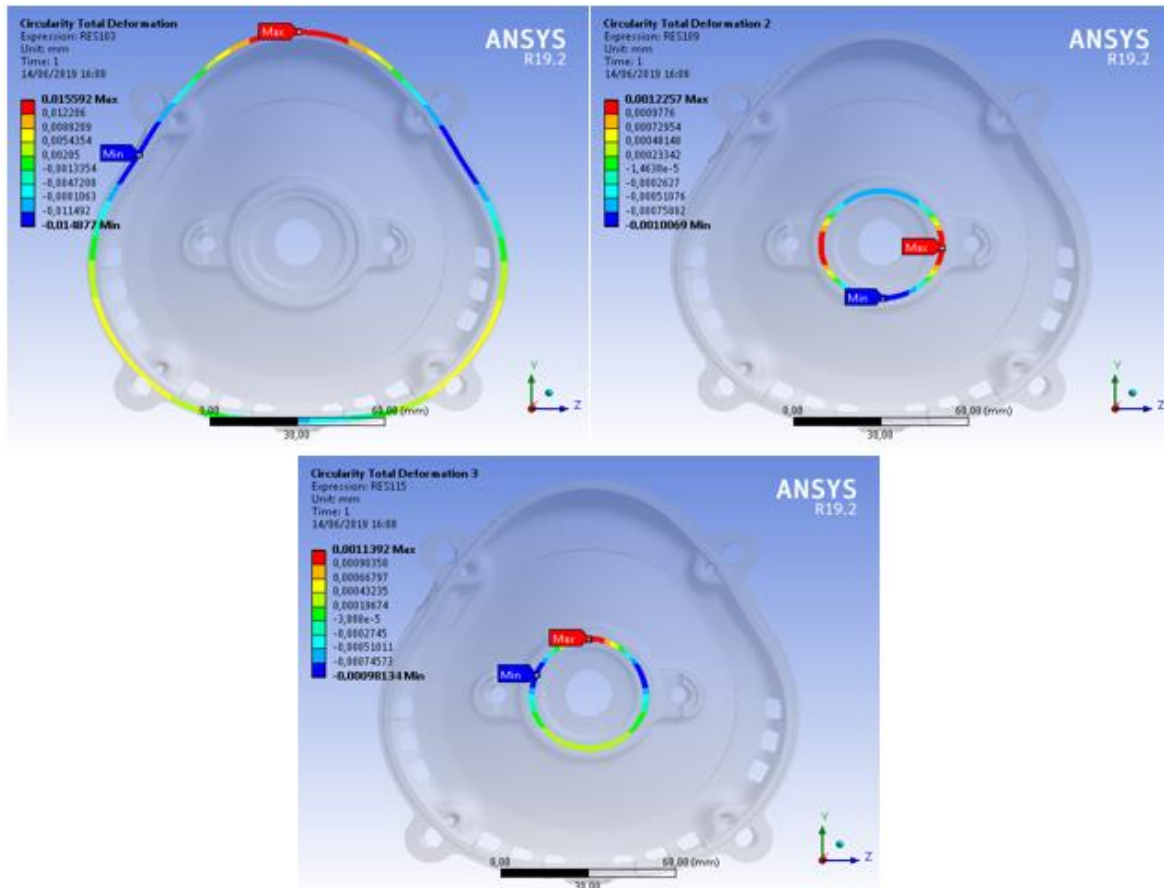


Figura 3.22 Resultados de simulación.

Durante el análisis, tres combinaciones de fuerzas son evaluadas<sup>29</sup>, aplicando la menor fuerza a cada mordaza. Esto, en consideración del posible desbalance de fuerzas que se puedan presentar durante el proceso de sujeción, lo que deriva en el error máximo de circularidad.

Un resumen de los tres análisis es presentado en la Tabla 3.9 y Tabla 3.10. Por su parte, la Tabla 3.11 y Tabla 3.12 muestran los resultados estadísticos<sup>30</sup> del análisis completo de cada configuración de fuerzas, desviación estándar y las curvas de dispersión. La tapa fue diseñada para cumplir con las deformaciones de acuerdo con las fuerzas máximas, descritas en la Tabla 3.10. Los límites de error de circularidad están especificados en la norma técnica interna WPS-28321.

<sup>29</sup> Conforme a estudios previos realizados con herramientas Six sigma en 2018, la variación de la fuerza entre las mordazas alcanza un máximo de 10%.

<sup>30</sup> La formulación para datos estadísticos está basada en una rutina de cálculo validada por el departamento de “Investigación e innovación tecnológica”, rutina sólo disponible para uso interno identificada como “RC0072”. En ella se emplean datos de entrada de mordazas (presiones y áreas), considera la eficiencia del Chuck, correcciones de fuerzas de apriete basados en datos experimentales obtenidos en el 2016. Posteriormente, en la rutina, se ingresan los tres errores de circularidad obtenidos en la simulación para generar la distribución normal, considerando ajustes de datos estadísticos mediante factores experimentales.

ID	Mordaza 1 Fuerza [N]	Mordaza 2 Fuerza [N]	Mordaza 3 Fuerza [N]	Circularidad en encaje de guías [mm]	Circularidad superior en el cubo de rodamiento [mm]	Circularidad en el fondo del cubo de rodamiento [mm]
DP0	3473.02	3820.32	3820.32	0.0299186	0.00215683	0.00208487
DP1	3820.32	3473.02	3820.32	0.03023617	0.00214709	0.00210109
DP2	3820.32	3820.32	3473.02	0.03046882	0.00223253	0.00212054

Tabla 3.9 Tabla de resultados (Referencia)

ID	Mordaza 1 Fuerza [N]	Mordaza 2 Fuerza [N]	Mordaza 3 Fuerza [N]	Circularidad en encaje de guías [mm]	Circularidad superior en el cubo de rodamiento [mm]	Circularidad en el fondo del cubo de rodamiento [mm]
DP0	3473.02	3820.32	3820.32	0.10575813	0.00780436	0.00295105
DP1	3820.32	3473.02	3820.32	0.10498876	0.00779381	0.00295001
DP2	3820.32	3820.32	3473.02	0.0946716	0.0077909	0.00235468

Tabla 3.10 Tabla de resultados (Propuesta)<sup>31</sup>

Resultados estadísticos	Encaje	Cubo de rodamiento superior	Fondo de cubo de rodamiento
Promedio [mm]	0.0837843	0.0064455	0.0022442
Desviación estándar [mm]	0.0073246	0.000453	0.0002356

Tabla 3.11 Promedio y desviación estándar de los errores de circularidad obtenidos (Referencia)

<sup>31</sup> Resultados de sólo una propuesta, tomar en cuenta que fueron propuestas 8 tapas diferentes.

Resultados estadísticos	Encaje	Cubo de rodamiento superior	Fondo de cubo de rodamiento
Promedio [mm]	0.0250012	0.0018172	0.0017409
Desviación estándar [mm]	0.0018225	0.0001385	0.0001266

Tabla 3.12 Promedio y desviación estándar de los errores de circularidad obtenidos (Propuesta)

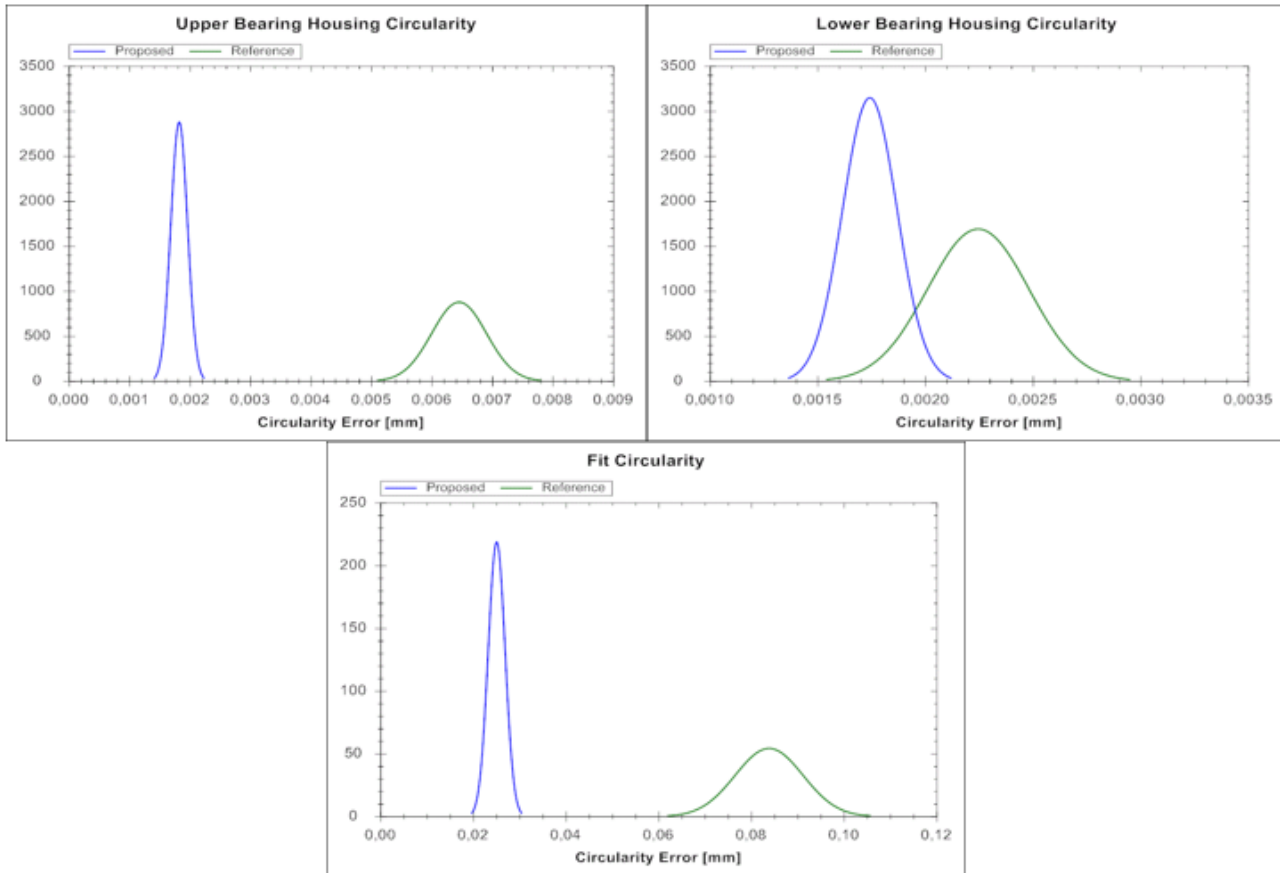


Figura 3.23 Comparativa de distribución normal de tapa referencia (Verde) vs Propuesta (Azul).

El alcance especificado para este proyecto está representado en la siguiente tabla:

Montaje	Armazón	Caja de conexión incorporada	Rodamiento	Protector térmico	Anillo de fijación	Tornillo a tierra
Delantera	N48	N/A	6203	N/A	Sí	N/A
	N56					
Trasera	N48	Con caja de conexión	6202	PT fenólico 3/4" y 1" con anillo de fijación posiciones 6 horas interno a la tapa	N/A	Sí
		Sin caja de conexión				Sí
	N56	Con caja de conexión				Sí
		Sin caja de conexión				N/A
Brida	N48	N/A	6203	N/A	Sí	N/A
	N56					

Tabla 3.13 Alcance del proyecto.

Un análisis posterior al diseño, es realizar el análisis de viabilidad económica. Éste consta principalmente de revisar las inversiones necesarias, tiempos de máquina y costos de materia prima. En la siguiente tabla se puede observar parte del análisis realizado.<sup>32</sup>

<sup>32</sup> El análisis realizado implica inversiones en moldes, análisis de tiempos y movimientos, compra de herramientas, etc.

Montaje	Armazón	Peso bruto (kg) (Propuesta)	Reducción en materia prima (%)	Diferencia en costo de transformación (%)
Delantera	N48	0.743	38	60.0
	N56	0.928	39%	
Trasera	N48	0.738	40%	50.2
	N56	0.989	42%	
Brida	N48	1.132	40%	70.3
	N56	1.532	41%	

Tabla 3.14 Resultados de análisis económico.

La conclusión del proyecto presentó viabilidad técnica y económica de desarrollo a un plazo futuro, debido a que la reciente inversión en el parque de fundición se refleja en los altos costos de transformación de la materia, además de existir bajo volumen de producción actualmente, condición que afecta directamente el costo de los herramientas y maquinarias empleados en el proceso.

### 3.2.2 Reducción de calibre en carcasas.

Como se mencionó al inicio del capítulo, existen diversas formas de generar ideas y análisis para mejora de producto y reducción de costo. En la empresa, actualmente, se están desarrollando proyectos que emplean la metodología Six Sigma. Una de las principales labores como parte del equipo de desarrollo y mejora continua, es brindar apoyo técnico a las áreas que requieran un análisis técnico en cuanto a sus propuestas. Así, una de las labores con mayor impacto en cuanto a la reducción de costo, fue la propuesta de cambiar la lámina empleada en la fabricación de carcasas de 1.9 mm para 1.5 mm realizada por un colaborador de ingeniería.

Los impactos inmediatos por realizar este cambio son disminución en materia prima en cada motor y mayor producción de motores con el mismo rollo de acero. Una propuesta que surgió a partir de los análisis fue eliminar un proceso de maquinado en las carcasas.



Figura 3.24 Maquinado de guías (Propiedad de WEG)

Teniendo detectadas las oportunidades de mejora, se procedió con el análisis. Mi participación consistió en verificar el impacto de la inserción del estator en las dimensiones finales de la carcasa, las cuales no presentan el maquinado. Por lo tanto, también fue necesario definir nuevas tolerancias en el maquinado de guías de las tapas, tomando en cuenta los efectos en otras dimensiones, además de la posible modificación del performance del motor, principalmente las cotas radiales al rotor que podrían afectar el ensamble o causar interferencia entre estator y rotor.

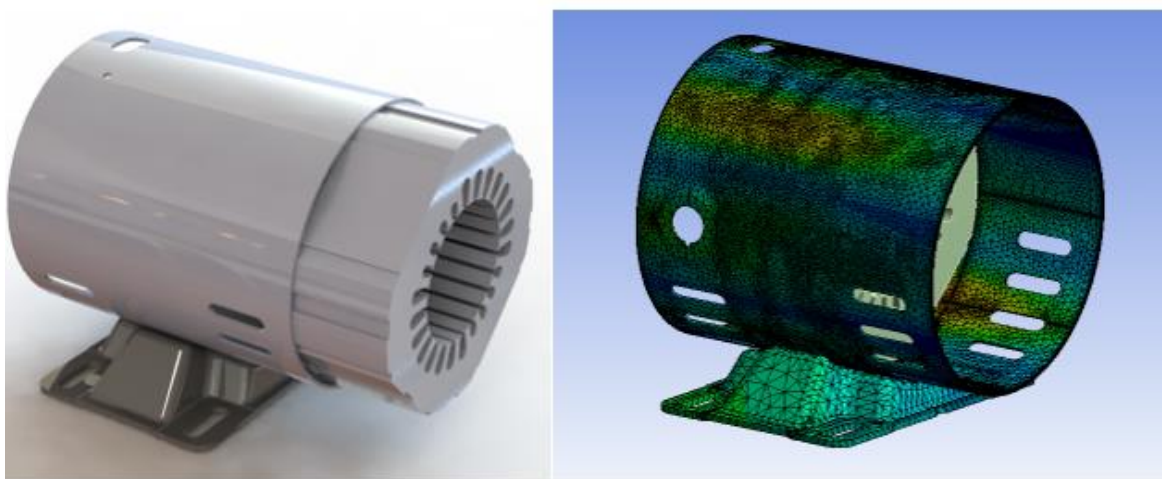


Figura 3.25 Deformación de carcasas con propuesta de chapa de 1.5 mm



**Características del producto:**

Línea de Motores: Mercado interno mexicano.

Materiales: se emplean los diseños para un motor de 1 HP capacitor permanente. Item 14924350 MOTOR 1HP 2P W56J WCA2.

Partes: para los diseños propuestos aún no se cuentan con materiales desarrollados en SAP, los diseños base se listan en la siguiente tabla:

<b>Carcasa</b>	<b>1.9 mm</b>	<b>Con pie</b>	14927162
----------------	---------------	----------------	----------

**Tabla 3.15 Materiales base para simulación.**

Geometría: la geometría de cada propuesta está basada en el código arriba descrito con las alteraciones del espesor de carcasa

Los materiales y sus características son descritos a continuación:

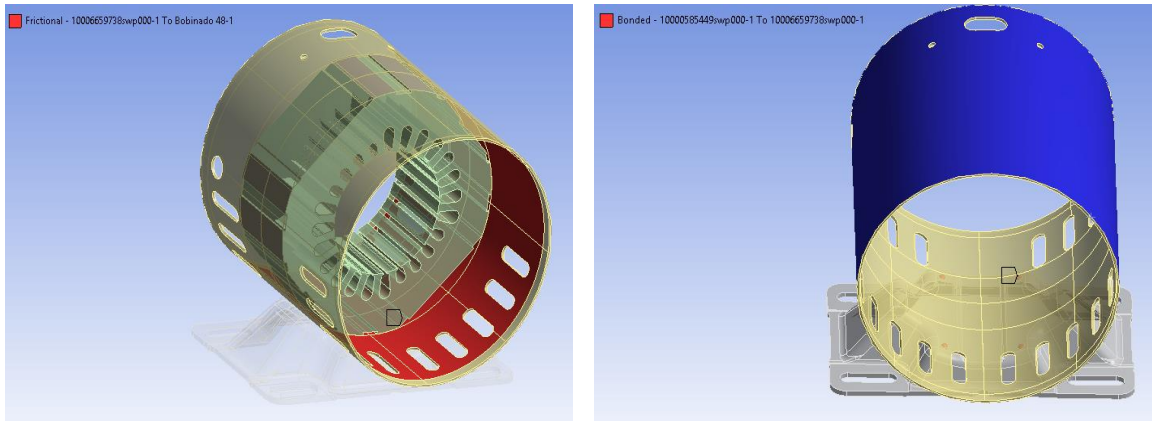
<b>Parte</b>	<b>Material</b>	<b>E [GPa]</b>	<b>G [GPa]</b>	<b>Poisson [-]</b>
Carcasa	Acero 1010	200	76.92	0.3
Estator	Acero estructural	200	76.92	0.3
Pie	Acero 1010 <sup>33</sup>	200	76.92	0.3

**Tabla 3.16 Propiedades mecánicas de los materiales empleados.**

---

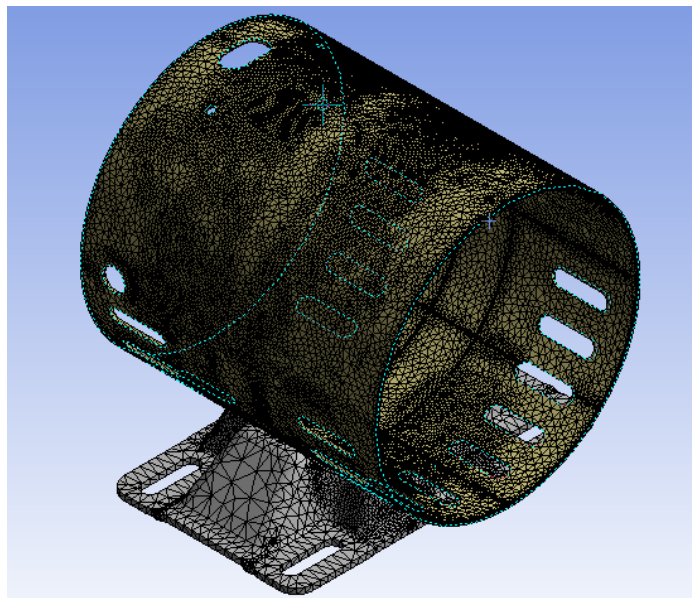
<sup>33</sup> La caracterización del acero 1010 para análisis está basado en datos bibliográficos.

Los pares de contactos para todos los casos fueron definidos como se muestra en las siguientes figuras. Los pares de contacto entre Carcasa y estator están definidos como Frictional, mientras que los pares de contacto en el pie y la carcasa como Bonded.



**Figura 3.26 Pares de contacto empleados (Carcasa – Estator – Pie)**

La malla para todos los casos es gráficamente representada en la Figura 3.27. Los controles de malla empleados se encuentran resumidos en la Tabla 3.17. El número de elementos y la información de la calidad de la malla están representados en la Tabla 3.18.



**Figura 3.27 Malla empleada.**

Nombre	Método	Valor
Bonded	Element Size	1.5 mm
Face Sizing	Element Size	0.5 mm
Edge Sizing	Element Size	0.5 mm

Tabla 3.17 Controles de malla.

Número de elementos	419993
Número de nodos	226596
Calidad de elementos - Promedio	0.674
Calidad de elemento – Desviación estándar	0.16

Tabla 3.18 Calidad de malla.

Para evaluar la carcasa, en cada caso, y en la deformación durante el proceso de inserción, se fijó el estator mediante “remote displacement”, el cual ya se encuentra en su posición final<sup>34</sup>.

El objetivo de la simulación fue obtener los errores de circularidad esperados por diseño, tras la inserción del estator, y con ellos poder definir tolerancias de maquinado de tapa que puedan asegurar robustez al diseño y evitar efectos dañinos al performance del motor.

El método empleado en este análisis para determinar el error de circularidad es llamado LSC (Least Squares Circle), descrito en el título **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** La Figura 3.28 muestra el perfil de deformación del cuerpo debido a la inserción. Los valores en la escala representan la desviación. La amplitud en los valores de la escala es igual al error de circularidad.

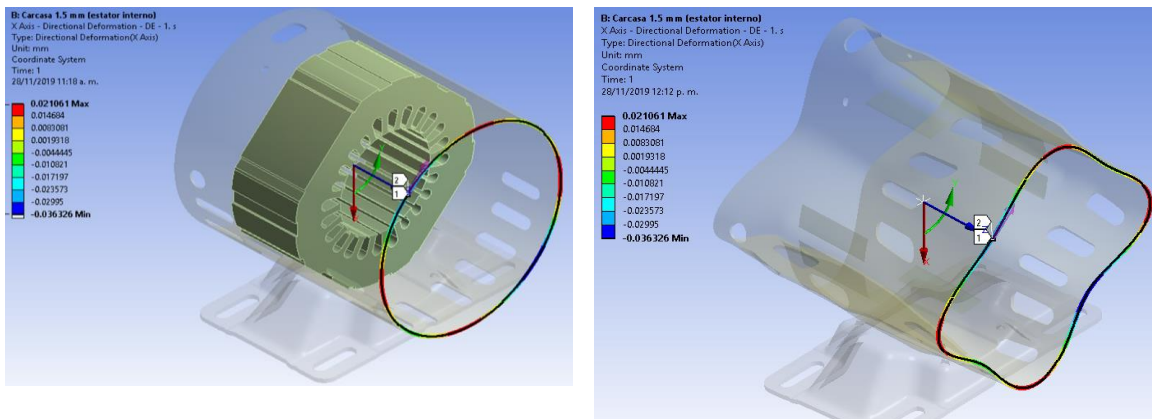


Figura 3.28 Resultados de simulación (Deformaciones).

<sup>34</sup> Esta posición final está definida mediante la medida de prensado, que es la distancia a la que se encuentra la cara del estator respecto a la cara de la carcasa (Maquinado de guías).

El mismo análisis y las mismas condiciones fueron empleados para la carcasa de 1.5 mm de espesor y 1.9 mm.

El error de circularidad permisible en la carcasa se puede deducir tomando la tolerancia máxima y restándole la mínima y posteriormente dividir entre dos; esa será la variación máxima permisible en la circularidad.

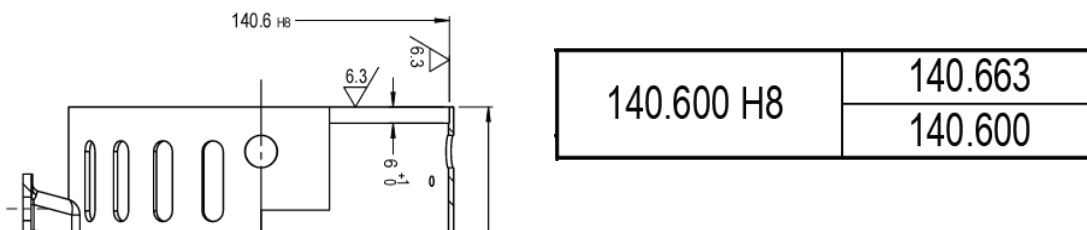


Figura 3.29 Tolerancias de maquinado de guías en carcasa.

También se puede hacer referencia a la norma WPS-28321 PT<sup>35</sup> apartado 5.2.3 para el desvío de circularidad en el encaje de la tapa.

Con lo anterior, se deduce que el error de circularidad máximo permisible es de 0.03. Los valores obtenidos en la simulación indican que no es factible eliminar los maquinados de guías sin afectar alguna otra especificación, como entre hierro.

#	Espesor	Pie	Ventila delantera	Ventila trasera	Error de circularidad delantera	Error de circularidad trasera	Error de circularidad centro estator	Error de circularidad delantera del estator	Error de circularidad trasera del estator
1	1.5mm	*	*	*	0.056	0.099	0.103	0.094	0.107
2	1.9mm	*	*	*	0.050	0.090	0.100	0.092	0.104

Tabla 3.19 Comparativa de errores de circularidad en carcasas de 1.5 mm y 1.9 mm sin maquinado de guías.

<sup>35</sup> Norma interna de diseño y tolerancias permisibles de tapas.

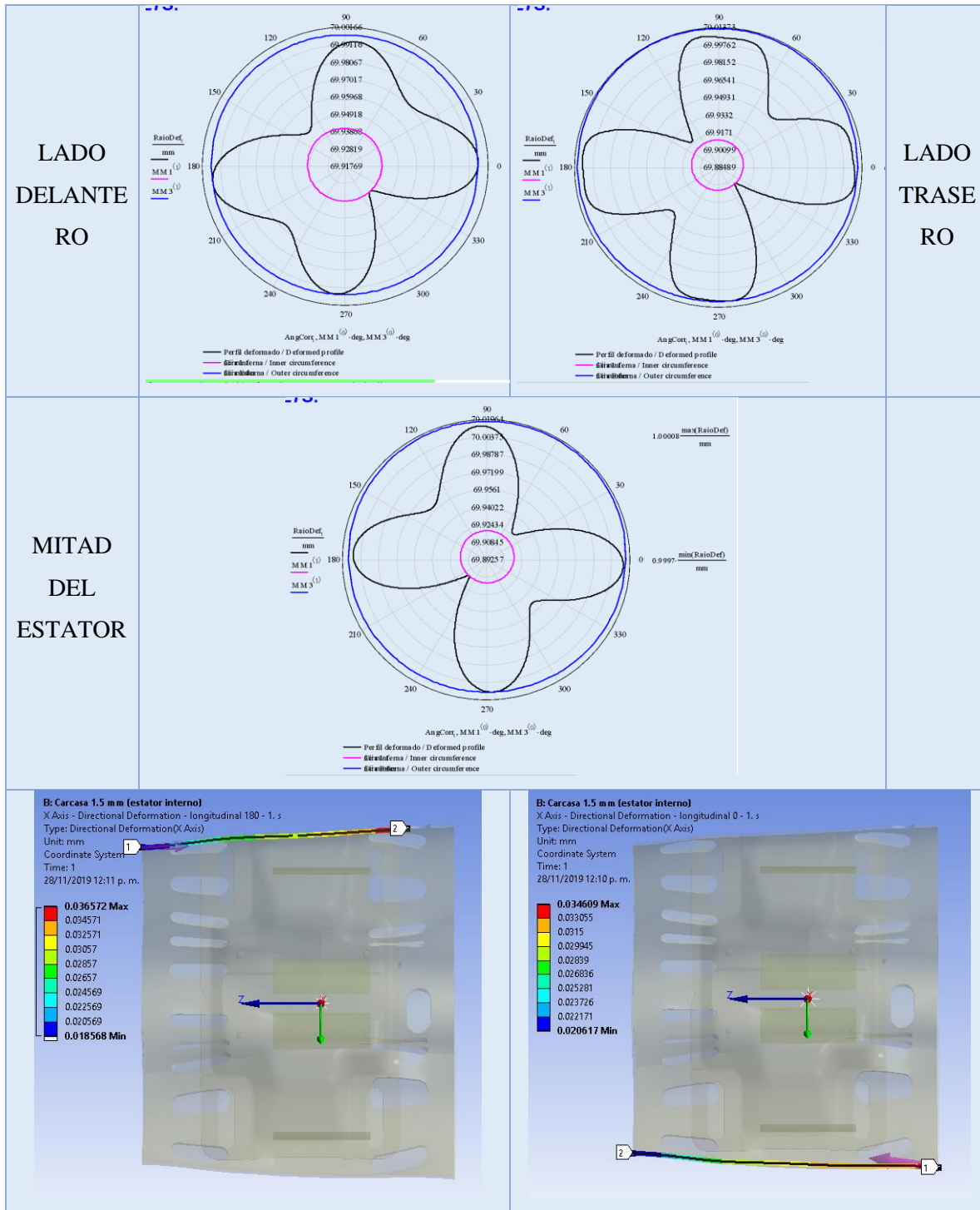


Figura 3.30 Representación gráfica de deformaciones.

Los resultados anteriores indican que, desde la perspectiva de los criterios de diseño de la norma WPS-28321, no se podrían eliminar los maquinados de guías. La principal propuesta, como se mencionó con anterioridad, fue realizar un cálculo mediante el apilamiento de tolerancias de todas

las cotas radiales al motor e intentar redefinir nuevos valores que nos permitieran, con estos errores de circularidad obtenidos en simulación<sup>36</sup>, mantener un entrehierro (parámetro de diseño con gran importancia eléctrica y mecánica) aceptable y posteriormente verificar físicamente el performance del motor.

Entonces, para realizar el análisis de apilamiento de tolerancias, es indispensable definir el objetivo a analizar, en este caso el entrehierro, por lo cual se debe plantear una ecuación que permita visualizar el comportamiento de esta cota con la variación de las demás. De esta manera, existen diversas maneras de analizar esta “holgura radial” y diversas referencias internas de la empresa que ayudan a definir un camino. Se hace, pues, referencia a la norma WPR-6344 “Cálculo de juego axial y radial de un motor eléctrico” para este análisis.

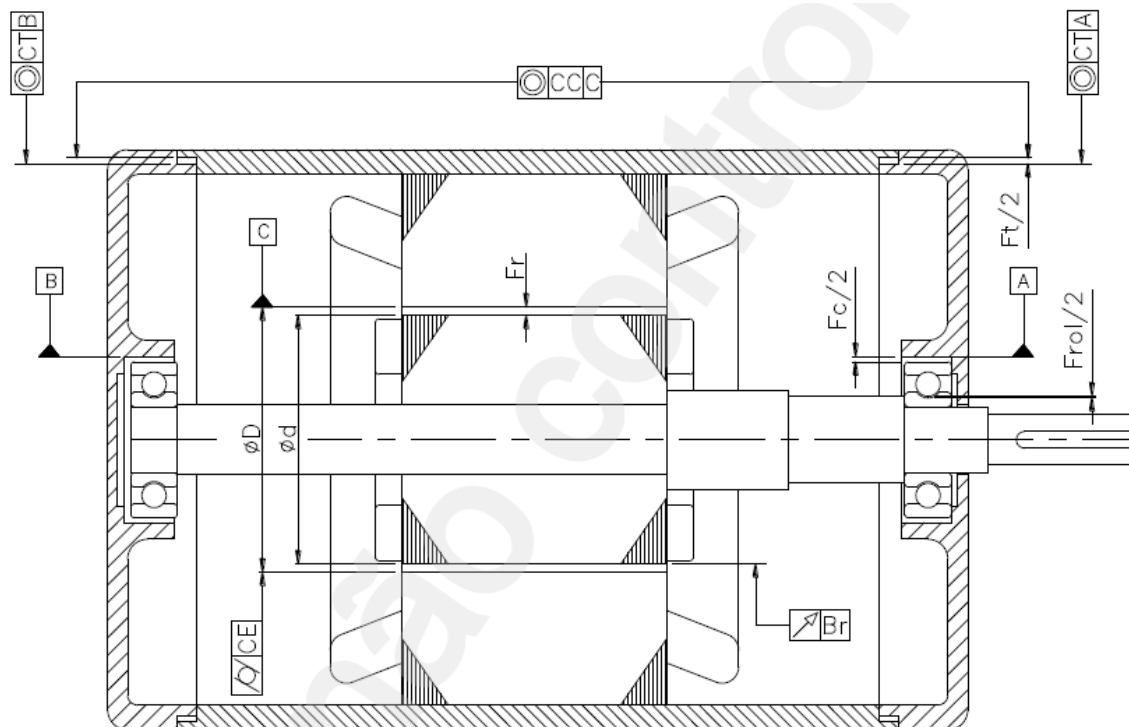
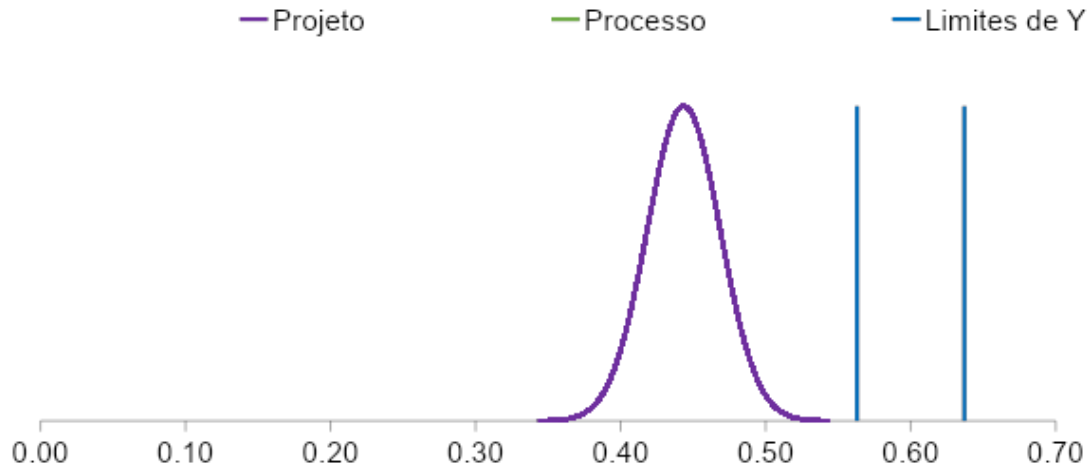


Figura 3.31 Principales cotas con influencia en el juego radial de un motor (WPS-6344, propiedad de WEG).

Una vez definidas las dimensiones relevantes para el análisis, es empleado un método estandarizado por la empresa mediante una hoja de cálculo. Con esto se propuso un nuevo valor nominal y tolerancias en los maquinados de los encajes de las tapas que permitieran mantener un entrehierro

<sup>36</sup> Como se mencionó al inicio del título, este trabajo es sólo una pequeña parte de uno más extenso el cual incluye validaciones de mediciones (MSE), diseño de experimento (DOE), por lo cual las simulaciones fueron validadas mediante estas herramientas.

aceptable. Se tuvo que considerar la parte de proceso, porque, para tolerancias muy cerradas, se incrementan tiempos de maquinado y el control de las mismas se complica.<sup>37</sup> Con ello se determinó una media de entrehierro de 0.44 mm., valor menor al del diseño original.



**Figura 3.32 Resultado de análisis de tolerancias de juego radial con las tolerancias propuestas en el maquinado de guías de tapas (propiedad de WEG).**

Como puede observarse en la figura, se obtuvieron valores fuera de los límites del proyecto actual, aunque ciertamente los límites están basados en cotas nominales de maquinado y algún efecto negativo debido al entrehierro se presentaría si esta cota estuviera cercana al cero (interferencia entre componentes), no obstante, fue necesario validar el performance eléctrico mediante prototipos experimentales con resultados exitosos, alterando únicamente la cota nominal de maquinado de guías y sus tolerancias.

Así, los análisis realizados presentan una amplia toma de decisiones y cambios imprevistos durante el proyecto, además de la necesidad de muchas validaciones. Por ello es indispensable contar con un equipo multidisciplinario que permita una integración mayor de los proyectos.

<sup>37</sup> Para los análisis de procesos es consultada el área de Ingeniería industrial.

## 4 CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del presente escrito fueron descritas algunas actividades que he desarrollado como parte del Departamento de Ingeniería del Producto, mencionando los impactos económicos de dichas actividades. El trabajo se ha enfocado en la necesidad de prototipado de productos; además, se han mostrado las ventajas de realizar prototipos, que se resumen a continuación:

- Validar diseño ante cliente.
- Validar componentes nuevos fabricados o comprados.
- Prevenir futuros rechazos de productos de fabricaciones en masa.
- Mejorar y optimizar productos.
- Mayor acierto en los productos.
- Disminución de costos en fase de prototipado.

Estas ventajas representan una gran importancia en la industria actual. Debido a la gran globalización existente, la entrega de productos de calidad se da con tiempos de entrega cada vez más cortos; el desarrollo de productos y la competencia en costo, también, hacen de estas fases de diseño una punta de lanza para mantenerse vigente en el mercado. Si bien se plantearon dos perspectivas diferentes de desarrollo de producto, ambas tienen contribución en los rubros mencionados anteriormente.

Estas contribuciones las podemos distribuir en los dos enfoques de actividades mostrados, aunque se atacaron como dos partes separadas. Sabemos que los prototipos virtuales son una fase previa a la fabricación de uno físico, y que no todo desarrollo virtual se convierte en uno físico. La secuencia expuesta en el presente reporte fue hecho cronológicamente conforme a las actividades desarrolladas dentro de la empresa. Entonces, un prototipo virtual nos permite optimizar y tener mayor certeza del diseño o propuesta que se está generando, lo cual da un mayor grado de certidumbre al diseño final en menor tiempo; es decir, se reducen el tiempo de entrega y los costos por proyectos optimizados, mientras el



prototipo físico nos permite validar la aplicación final, así como verificar el alcance de los procesos de manufactura.

En los prototipos físicos se abordó un caso de éxito, en el cual se explicaron los principales retos afrontados como ingeniero del producto. Se expuso también el impacto que las actividades desarrolladas en esta etapa tuvieron en el crecimiento de la empresa. Este crecimiento es, pues, enfocado a ganancias monetarias, porque fue un proyecto que presentó un 25% de utilidad promedio. En esta etapa fue importante poseer habilidades críticas y analíticas, obtenidas principalmente en la formación académica, para poder identificar y solucionar los problemas presentados. Por otro lado, es importante recordar que éste es un solo proyecto de entre más de 600 en los que he tenido participación directa, cada uno con diferentes objetivos, áreas de oportunidad y especialidades. Además de variar en las ganancias monetarias y dificultades presentadas en su liberación final.

Ahora bien, para los prototipos virtuales, identificados principalmente como simulaciones numéricas, hay una herramienta que en la empresa tiene más de 10 años de empleo. Sin embargo, en la filial de México, es una herramienta reciente que ha comenzado a cobrar mucha importancia, debido a que permite reducir tiempo de desarrollo, realizar diseños optimizados y más acertados; con una simulación numérica se puede reducir la necesidad de realizar prototipos físicos en mayor número de veces. Esto, además de ampliar conocimientos de otras filiales, genera conocimiento propio y experiencia en esta área. Los casos mencionados dentro de este reporte son aquellas simulaciones que ya poseen una validación física.

Actualmente, en México se han desarrollado más de 15 simulaciones estructurales enfocadas a proyectos especiales o reducción de costos, desde julio del 2019 que se comenzó a emplear dicha herramienta. El impacto monetario obtenido se encuentra estimado, pero aún está pendiente la implementación para poder concluir y medir el ahorro final de estas propuestas. No obstante, se muestra la utilidad de las simulaciones y prototipado virtual para mejorar productos o desarrollarlos.

De esta manera, podemos entender que, dentro del desarrollo profesional de un ingeniero, éste se ve inmerso en un mundo donde tiene que hacer uso de las habilidades adquiridas en su formación académica, así como adquirir nuevas habilidades técnicas, principalmente enfocadas al proceso o producto en el cual se encuentra inmerso. Esto permite

---

generar mejores criterios a futuro, cuando sea requerido un diseño de detalle o bien el desarrollo de nuevos productos como aplicar conocimientos teóricos de la manera más acertada.

Asimismo, puedo destacar que, durante mi estancia laborando en la empresa, el pensamiento crítico, lógico y analítico impulsado a desarrollarse durante la formación académica, ha resultado la herramienta más importante para cumplir con metas y objetivos. Los conocimientos básicos y el entendimiento de los fenómenos que gobiernan cada problema es el día a día para solucionar problemas de ingeniería, y siempre se debe tener en cuenta que un ingeniero, a pesar de estar formado en un área específica, mecánica en mi caso, siempre debe estar abierto y con hambre de ampliar sus horizontes y conocimientos para poder desarrollarse plenamente, ya que, profesionalmente, se tiene que laborar con diferentes ingenierías, incluso profesionales de otras áreas (contadores, administradores, etc.), y el tener noción del impacto que tienen nuestros diseños y decisiones, aunque parezcan insignificantes, influyen en el trabajo de los demás. Esto lo puedo definir como un profesional integral, especializado en su área y con conocimiento o nociones de las demás.

Es indispensable conocer las normas que nos delimitan o nos obligan a cumplir criterios mínimos y máximos, o dimensiones para estandarización; en muchas ocasiones, también fungen como guías de diseño, pero, al poseer productos especiales únicos que nos obligan a salir de algunas estandarizaciones, nos permite poseer conocimientos detallados de la especialidad. Un claro ejemplo son las flechas especiales, para las cuales se debe ser capaz de dimensionar la flecha, asegurando que ésta no presentará falla en la aplicación.

En resumen, el desarrollo del presente reporte esta enfocado a describir dos de mis etapas laborando en el departamento de ingeniería del producto, una primera etapa en coordinación de muestras y prototipos, donde los conocimientos básicos descritos en los antecedentes son la principal herramienta debido a que permiten la toma de decisiones, resolver problemas variados, modificación de planos, identificación de causas de falla y seguimiento de múltiples proyectos. En el capítulo 3 se realiza una relación entre lo que describe la teoría y lo que sucede en la industria. La segunda etapa, también descrita en el capítulo 3, está enfocada en la optimización y análisis estructurales, sin embargo, existen varias propuestas en fase de desarrollo o en búsqueda de patentes, por lo cual, no es posible incluir estos proyectos en el presente reporte. Dentro de los proyectos con búsqueda de

protección intelectual se puede mencionar una nueva línea de motores de bajo costo, la cual, busca una reducción de maquinados, ensamble sin tornillería y haciendo uso de snap-fit y componentes plásticos.

Para finalizar, sabemos que existen diversas definiciones de la ingeniería, y, desde mi experiencia, laborando en un departamento de ingeniería, puedo definirla de la siguiente manera: la ingeniería es física aplicada enfocada en dar soluciones prácticas manteniendo en mente los recursos monetarios. Esto es en lo que se resume el presente informe de trabajo profesional.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

- ANCE. (2019). *Soluciones Globales Disponibles Localmente*. Recuperado el 13 de 08 de 2019, de <https://www.ance.org.mx/ance/es/ance/antecedentes/>
- ANSYS. (2019). *Simulation Templates Promote Consistent Simulation Methods and Accuracy*. Recuperado el 22 de 10 de 2019, de <https://www.ansys.com/blog/simulation-template-promotes-consistent-simulation-method>
- Anyseals. (2019). *Retenes radiales*. Recuperado el 22 de 10 de 2019, de [www.anyseals.eu](http://www.anyseals.eu)
- Arteaga Noguera, L. E. (s.f.). *Normas aplicables a la electrotecnia de motores*. Nariño, Colombia: Corporación Universitaria Autónoma de Nariño.
- CablesRCT. (13 de 08 de 2019). *¿En qué consiste la certificación UL?* Recuperado el 13 de 08 de 2019, de <https://www.cablesrct.com/blog-cables-rct-es/2437-en-que-consiste-la-norma-ul>
- Cassiano A. Cezario, B. C. (2014). ROBUST ELECTRIC MACHINE DESIGN THROUGH MULTIPHYSICS. *ADVANTAGE*. Recuperado el 22 de 10 de 2019
- CSA. (2019). *About us*. Recuperado el 13 de 08 de 2019, de <https://www.csagroup.org/about-csa-group/>
- DocPlayer. (22 de Junio de 2019). Obtenido de <https://docplayer.es/41115311-Deteccion-de-barras-rotas-en-motores-de-induccion-tipo-jaula-de-ardilla-por-medio-de-mcsa-y-emd.html>
- Eficiencia WEG. (s.f.). *Regulamentações Globais de Eficiência*. Recuperado el 26 de Mayo de 2019, de <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h62/hb8/WEG-regulamenta-es-globais-de-eficiencia-para-motores-eletricos-de-baixa-tensao-50065222-brochure-portuguese-web.pdf>
- Figueroa. (2019). *ESPOL*. Recuperado el 15 de 10 de 2019, de ESPOL: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/17106/1/ProyectoFigueroa.pdf>
- G. Budynas, R., & Keith Nisbett, J. (2008). *Diseño en ingeniería Mecánica de Shigley*. En R. G. Budynas, & J. Keith Nisbett, *Diseño en ingeniería Mecánica de Shigley*. México: McGraw-Hill.
- Glowny Mechanik. (2016). *Glowny Mechanik*. Recuperado el 15 de 10 de 2019, de <https://glowny-mechanik.pl/2019/03/11/uszczelnienia-przemyslowe/>
- Gobierno de México. (2019). *Normas Oficiales Mexicanas en Eficiencia Energética Vigentes*. Recuperado el 30 de Julio de 2019, de <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/normas-oficiales-mexicanas-en-eficiencia-energetica-vigentes>
- IEC. (24 de Julio de 2019). *International*. Recuperado el 29 de Julio de 2019, de [https://www.iec.ch/perspectives/government/sectors/electric\\_motors.htm](https://www.iec.ch/perspectives/government/sectors/electric_motors.htm)

- Miranda Systems. (1 de Agosto de 2019). *Demystifying Metric: NEMA vs. IEC Motors*. Obtenido de [http://www.mirandasystems.com/uploads/1/9/9/0/19907503/nema\\_vs\\_iec\\_jim\\_clark\\_ab\\_b.pdf](http://www.mirandasystems.com/uploads/1/9/9/0/19907503/nema_vs_iec_jim_clark_ab_b.pdf)
- Mora, J. F. (2003). *Máquinas eléctricas*. McGraw Hill.
- Motores Eléctricos. (20 de Abril de 2019). Obtenido de <http://fleridamotores.blogspot.com/2014/11/motores-electricos-un-motor-electrico.html>
- NEMA. (2009). *NEMA MG1*.
- NEMA. (23 de Julio de 2019). *The Association of Electrical Equipment and Medical Imaging Manufacturers*. Recuperado el 29 de Julio de 2019, de <https://www.nema.org/pages/default.aspx>
- NEMA Water energy toolkit. (25 de Julio de 2019). *NEMA Water energy toolkit*. Obtenido de <https://waterenergytoolkit.org/wp-content/uploads/2017/04/8-NEMA-Motor-Standards-vs-IEC-Motor-Standards-v2.pdf>
- NSK. (2019). *Vida del rodamiento - El cálculo de la esperanza de vida*. Recuperado el 10 de 10 de 2019, de [https://www.nskeurope.es/content/dam/nskcmsr/downloads/literature\\_bearing/SP-TI-0102-FINAL.pdf](https://www.nskeurope.es/content/dam/nskcmsr/downloads/literature_bearing/SP-TI-0102-FINAL.pdf)
- Pérez, D. (2006). *EOI escuela de negocios*. Recuperado el 07 de 11 de 2019, de [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45113/componente45111.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45113/componente45111.pdf)
- Roydisa. (13 de 08 de 2019). *ipos de formas constructivas del motor eléctrico, normalizadas*. Obtenido de <https://www.roydisa.es/archivos/3183>
- Rüncos, F. (09 de 2017). Aspectos constructivos de las máquinas eléctricas. *Aspectos constructivos de las máquinas eléctricas*. Jaraguá do sul, Brasil.
- Rüncos, F. (2017). *Ensayos a motores eléctricos*. Recuperado el 12 de 11 de 2019
- Salvador Escoda S.A. (01 de 10 de 2019). *Manual practico de Ventilación*. Recuperado el 2019, de <http://www.salvadorescoda.com/tecnico/VE/Manual-Ventilacion.pdf>
- Secretaría de Economía. (2019). *Organismos de Certificación*. Recuperado el 31 de Julio de 2019, de <http://www.2006-2012.economia.gob.mx/comunidad-negocios/normalizacion/nacional/evaluacion-de-conformidad/programa-nacional-de-normalizacion-y-suplemento>
- SKF. (2019). *Retenes y soluciones en sellado SKF*. Recuperado el 15 de 10 de 2019, de [https://www.skf.com/binary/87-133001/31.6373%2001-21%20es%20\\_tcm\\_87-133001.pdf](https://www.skf.com/binary/87-133001/31.6373%2001-21%20es%20_tcm_87-133001.pdf)
- SKF. (2019). *SKF Taconite Seal*. Recuperado el 15 de 10 de 2019, de <https://www.skf.com/co/products/bearings-units-housings/bearing-housings/skf-taconite-seal/index.html>

- SKF. (2019). *V-ring seals*. Recuperado el 15 de 10 de 2019, de [skf.com/mena/industry-solutions/metals/Processes/upstream-steel-making/cranes/v-ring-seals.html](http://skf.com/mena/industry-solutions/metals/Processes/upstream-steel-making/cranes/v-ring-seals.html)
- Tesla, B. (05 de 08 de 2019). *Biblioteca Tesla*. Obtenido de <http://teslaelectric.blogspot.com/2015/10/frames-o-carcasas-de-motores-iec-y-nema.html>
- Topbagsui. (15 de Junio de 2019). Obtenido de <http://topbagsui.com/koper-magnetisch.html>
- Ullman, D. G. (2010). *The Mechanical Design Process*. Oregon: Mc Graw hill.
- Umans, S. D. (2014). *Máquina eléctricas*. McGraw Hill.
- VELÁZQUEZ, H. A. (03 de 2011). *Amazon S3*. Recuperado el 15 de 10 de 2019, de Amazon S3: [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/34796845/CadenaVelazquez.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DDESCRIPCION\\_Y\\_ANALISIS\\_DE\\_FALLAS\\_PRESEN.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20191016%2F20191016%2Faws4\\_request](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/34796845/CadenaVelazquez.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DDESCRIPCION_Y_ANALISIS_DE_FALLAS_PRESEN.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20191016%2F20191016%2Faws4_request)
- WEG - Retenes. (s.f.). Retenes, especificación, dimensiones y utilización.
- WEG. (2017). *Manual de motores eléctricos*. Recuperado el 22 de Mayo de 2019, de <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h6e/h82/WEG-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>
- WEG. (31 de Diciembre de 2018). *Weg en Números*. Recuperado el 6 de Mayo de 2019, de <https://www.weg.net/institucional/BR/es/weg-in-numbers>
- WEG. (2018). *WEG, historia*. Recuperado el 7 de Mayo de 2019, de <https://www.weg.net/institucional/BR/es/history>
- WEG. (2019). *WEG, Fundadores*. Recuperado el 7 de Mayo de 2019, de <http://www.weg.net/institucional/MX/es/history/founders>
- WEG. (08 de 08 de 2019). *WEGnology*. Obtenido de <https://www.weg.net/institucional/BR/es/wegnology>
- WEG CAD Library. (30 de 09 de 2019). *WEG CAD Library - Electric Motors*. Recuperado el 2019, de WEG CAD Library - Electric Motors: [http://ecatalog.weg.net/drawings\\_2d\\_3d/index.asp?empresa=WMO&language=EN](http://ecatalog.weg.net/drawings_2d_3d/index.asp?empresa=WMO&language=EN)