



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

UNIDAD DE POSGRADOS

**MAESTRÍA EN MÉTODOS MATEMÁTICOS Y
SIMULACIÓN NUMÉRICA EN INGENIERÍA**

Proyecto de investigación y desarrollo
previo a la obtención del Grado de
Magister en Métodos Matemáticos y
Simulación Numérica en Ingeniería.

**ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MOTOR
ASÍNCRONO TRIFÁSICO, UTILIZANDO EL
MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

Autor:

Ing. Paul Adrian Gomez Espinoza.

Dirigido por:

Ing. José Manuel Aller Castro, PhD.

**ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN
MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO,
UTILIZANDO EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS FINITOS**

**ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN
MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO,
UTILIZANDO EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS FINITOS**

Autor:

ING. PAUL ADRIAN GOMEZ ESPINOZA

Ingeniero Electronico
Unidad de Posgrados
Universidad Politécnica Salesiana

Dirigido por:

ING. JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO, PHD

Doctor Ingeniero Industria(Programa Sistemas de Energia Eléctrica)
Docente de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca
Carrera de Ingeniería Electrica



Cuenca – Ecuador

DATOS DE CATALOGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

GOMEZ ESPINOZA PAUL ADRIAN

“ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO, UTILIZANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS”

Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca – Ecuador, 2018.

MAESTRIA EN MÉTODOS MATEMÁTICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA EN INGENIERÍA.

Formato 170x240mm

Páginas: 99

Breve reseña de los autores e información de contacto:



Realizado por:

PAUL ADRIAN GOMEZ ESPINOZA

Ingeniero Electrónico.

Maestría en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería.

Universidad Politécnica Salesiana.

edriel.fbi@hotmail.com



Dirigido por:

JOSE MANUEL ALLER CASTRO

Ingeniero Electricista.

Doctor Ingeniero Industrial (Programa Sistemas de Energía Eléctrica).

Docente de la Universidad Politécnica Salesiana

jaller@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización del titular de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación al autor.

DERECHOS RESERVADOS

©2018 Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR

GOMEZ ESPINOZA PAUL ADRIAN.

ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO, UTILIZANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

IMPRESO EN ECUADOR – PRINTED IN ECUADOR

INDICE DE CONTENIDO.

INDICE DE CONTENIDO.....	I
INDICE DE GRAFICAS.	IV
INDICE DE TABLAS.....	XI
DEDICATORIA	XIII
PREFACIO	XV
PRÓLOGO	XVII
AGRADECIMIENTO.....	XIX
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.	1
1.2 PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO.	2
1.4 METODOLOGÍA DEL PROYECTO.	3
CAPITULO 2: MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO	5
2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	5
2.2 CONSTITUCIÓN DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO.....	7
2.2.1 ESTATOR.....	8
2.2.2 ROTOR.....	8
2.2.3 CARCASA.....	9
2.2.4 PLACA.....	9
2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE.....	10
2.4 CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO.....	11

CAPÍTULO 3: PREPROCESO	13
3.1 PARTES DE UN MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO.....	13
3.1.1 CARCASA O BASTIDOR.....	14
3.1.2 ESTATOR.....	15
3.1.3 ROTOR.....	15
3.1.4 TAPA DELANTERA Y TRASERA.	16
3.1.5 PROTECTOR.....	17
3.1.6 RODAMIENTOS O COJINETES.	17
3.1.7 VENTILADOR.	18
3.1.8 SEGURO.....	18
3.1.9 TORNILLOS.....	19
3.1.10 TUERCA.....	19
3.1.11 ARANDELA.	20
3.2 DISEÑO DEL MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO A SER SIMULADO EN ANSYS WORKBECH.....	21
3.2.1 CARCASA.....	21
3.2.2 ESTATOR.....	27
3.2.3 ROTOR.....	30
3.2.4 TAPA DELANTERA Y TRASERA.....	36
3.2.5 PROTECTOR.....	41
3.2.6 VENTILADOR.....	45
3.2.7 RODAMIENTO.....	49
3.2.8 TORNILLOS.....	50

3.2.9 TUERCA.....	54
3.2.10 ENSAMBLE DEL MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO DISEÑADO.....	56
3.3 SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR ASINCRONO TRIFASICO EN ANSYS WORCKBENCH.	63
3.3.1 STATIC STRUCTURAL.....	66
3.3.2 MODAL.	69
3.3.3 RIGID DYNAMICS.....	72
CAPITULO 4: POSTPROCESO.....	75
4.1 STATIC STRUCTURAL.....	75
4.2 MODAL.	81
4.3 RIGID DYNAMICS.....	86
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
I. CONCLUSIONES	91
II. RECOMENDACIONES.....	93
BIBLIOGRAFIA.....	95
ANEXOS.....	97
ELEMENTOS DEL MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO.....	99

INDICE DE GRAFICAS.

<i>Figura 2.1 Tensión Trifásica Senoidales Desfasadas. (Potencia electromecánica, 2013).....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.2 Campo magnético giratorio creado por una corriente alterna trifásica. (Vandelvira, 2011)</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.3 Constitución de un motor asíncrono trifásico. (Vandelvira, 2011).....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.4 Estator. (Vandelvira, 2011).....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.5 Jaula de Ardilla. (Vandelvira, 2011)</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.6 Bobinado. (Vandelvira, 2011)</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.7 Placa. (teach, 2012).....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.8 Circuito equivalente por fase de un motor asíncrono trifásico. (Álvarez, 2009)</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.9 Circuito equivalente aproximado por fase de un motor asíncrono trifásico. (Álvarez, 2009).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.10 Circuito equivalente con Fuente Thevenin. (Álvarez, 2009)</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3.1 Motor Asíncrono Trifásico. (Weg, 2016).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.2 Partes de un Motor Asíncrono Trifásico. (Yrady, 2011).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3.3 Carcasa.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.4 Estator.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.5 Rotor.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3.6 Tapa Delantera parte Frontal y Tapa Trasera parte Posterior:</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3.7 Protector.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3.8 Rodamiento.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3.9 Ventilador.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.10 Seguro.</i>	<i>18</i>

<i>Figura 3.11 Tornillo para la carcasa.</i>	19
<i>Figura 3.12 Tornillo para el protector.</i>	19
<i>Figura 3.13 Tuerca</i>	19
<i>Figura 3.14 Arandela</i>	20
<i>Figura 3.15 Ensamble del Motor Asíncrono Trifásico</i>	20
<i>Figura 3.16 Boceto de la carcasa.</i>	21
<i>Figura 3.17 Extrusión del boceto anterior.</i>	22
<i>Figura 3.18 Boceto de una circunferencia.</i>	22
<i>Figura 3.19 Extrusión de la circunferencia.</i>	23
<i>Figura 3.20 Boceto de los soportes</i>	23
<i>Figura 3.21 Extrusión de los soportes.</i>	24
<i>Figura 3.22 Boceto de una circunferencia.</i>	24
<i>Figura 3.23 Extrusión de nuestro diseño anterior</i>	25
<i>Figura 3.24 Boceto para el agujero de la tuerca.</i>	25
<i>Figura 3.25 Boceto para el agujero de la tuerca.</i>	26
<i>Figura 3.26 Carcasa.</i>	26
<i>Figura 3.27 Boceto del estator.</i>	27
<i>Figura 3.28 Extrusión del boceto anterior.</i>	27
<i>Figura 3.29 Boceto del bobinado</i>	28
<i>Figura 3.30 Extrusión del boceto anterior.</i>	28
<i>Figura 3.31 Boceto sobre el diseño anterior.</i>	29
<i>Figura 3.32 Extrusión del boceto anterior.</i>	29
<i>Figura 3.33 Bobinado del estator</i>	29
<i>Figura 3.34 Boceto del rotor.</i>	30

<i>Figura 3.35 Extrusión del boceto anterior.</i>	30
<i>Figura 3.36 Boceto sobre el diseño.</i>	31
<i>Figura 3.37 Boceto sobre el diseño.</i>	31
<i>Figura 3.38 Boceto de la circunferencia de 17 mm.</i>	31
<i>Figura 3.39 Extrusión de la circunferencia de 17 mm.</i>	32
<i>Figura 3.40 Boceto de la circunferencia de 14 mm.</i>	32
<i>Figura 3.41 Extrusión de la circunferencia de 14 mm.</i>	32
<i>Figura 3.42 Boceto de la circunferencia de 17 mm.</i>	33
<i>Figura 3.43 Extrusión de la circunferencia de 17 mm.</i>	33
<i>Figura 3.44 Boceto sobre el diseño anterior.</i>	33
<i>Figura 3.45 Extrusión del boceto.</i>	34
<i>Figura 3.46 Rotor.</i>	34
<i>Figura 3.47 Boceto del Bobinado del rotor.</i>	34
<i>Figura 3.48 Extrusión del Bobinado del rotor.</i>	35
<i>Figura 3.49 Boceto sobre el diseño anterior.</i>	35
<i>Figura 3.50 Extrusión del boceto anterior.</i>	35
<i>Figura 3.51 Bobinado del rotor.</i>	36
<i>Figura 3.52 Boceto para la creación de la tapa.</i>	36
<i>Figura 3.53 Extrusión del boceto anterior.</i>	37
<i>Figura 3.54 Boceto sobre el diseño anterior.</i>	37
<i>Figura 3.55 Extrusión del boceto anterior.</i>	37
<i>Figura 3.56 Boceto parte posterior.</i>	38
<i>Figura 3.57 Extrusión del diseño anterior.</i>	38
<i>Figura 3.58 Extrusión parte posterior.</i>	38

<i>Figura 3.59 Boceto parte delantera.</i>	39
<i>Figura 3.60 Extrusión.</i>	39
<i>Figura 3.61 Boceto para crear agujero.</i>	39
<i>Figura 3.62 Extrusión de la parte posterior.</i>	40
<i>Figura 3.63 Boceto de las ranuras.</i>	40
<i>Figura 3.64 Extrusión de la parte posterior.</i>	40
<i>Figura 3.65 Tapa Delantera.</i>	41
<i>Figura 3.66 Boceto de un cuadrado.</i>	41
<i>Figura 3.67 Extrusión del boceto.</i>	42
<i>Figura 3.68 Boceto de una circunferencia.</i>	42
<i>Figura 3.69 Extrusión del boceto.</i>	42
<i>Figura 3.70 Boceto sobre el cubo.</i>	43
<i>Figura 3.71 Extrusión para crear el cilindro.</i>	43
<i>Figura 3.72 Boceto de la circunferencia.</i>	43
<i>Figura 3.73 Extrusión del corte del cilindro.</i>	44
<i>Figura 3.74 Boceto parte posterior del protector.</i>	44
<i>Figura 3.75 Protector.</i>	44
<i>Figura 3.76 Boceto circunferencia.</i>	45
<i>Figura 3.77 Extrusión del boceto anterior.</i>	45
<i>Figura 3.78 Boceto para crear las aspas.</i>	46
<i>Figura 3.79 Extrusión de las aspas.</i>	46
<i>Figura 3.80 Boceto agujero del eje.</i>	46
<i>Figura 3.81 Extrusión agujero del eje.</i>	47
<i>Figura 3.82 Boceto del centro del ventilador.</i>	47

<i>Figura 3.83 Extrusión del centro del ventilador.</i>	47
<i>Figura 3.84 Empalme de las aspas.</i>	48
<i>Figura 3.85 Empalme del centro del ventilador.</i>	48
<i>Figura 3.86 Ventilador.</i>	48
<i>Figura 3.87 Boceto para el rodamiento.</i>	49
<i>Figura 3.88 Extrusión del boceto.</i>	49
<i>Figura 3.89 Rodamiento.</i>	49
<i>Figura 3.90 Extrusión de una circunferencia.</i>	50
<i>Figura 3.91 Boceto sobre el diseño anterior.</i>	50
<i>Figura 3.92 Extrusión sobre el diseño anterior.</i>	51
<i>Figura 3.93 Boceto sobre el diseño anterior.</i>	51
<i>Figura 3.94 Extrusión sobre el diseño anterior.</i>	51
<i>Figura 3.95 Tornillo.</i>	52
<i>Figura 3.96 Boceto de la circunferencia.</i>	52
<i>Figura 3.97 Extrusión de la circunferencia.</i>	52
<i>Figura 3.98 Boceto sobre el diseño anterior.</i>	53
<i>Figura 3.99 Extrusión sobre el diseño anterior.</i>	53
<i>Figura 3.100 Boceto para la punta.</i>	53
<i>Figura 3.101 Extrusión para la punta.</i>	54
<i>Figura 3.102 Tornillo.</i>	54
<i>Figura 3.103 Boceto del Hexágono.</i>	55
<i>Figura 3.104 Extrusión del Hexágono.</i>	55
<i>Figura 3.105 Boceto sobre el diseño anterior.</i>	55
<i>Figura 3.106 Extrusión del boceto anterior.</i>	56

<i>Figura 3.107 Tuerca.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 3.108 Ensamble Estator-Bobinado.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.109 Ensamble Rotor-Estator.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.110 Ensamble Carcasa.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 3.111 Ensamble del Rodamiento.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 3.112 Ensamble Tapa Trasera.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.113 Ensamble Retén.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.114 Ensamble de la Hélice.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.115 Ensamble de las Tuercas.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.116 Ensamble del Tornillo.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 3.117 Ensamble del Protector.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 3.118 Ensamble de los Tornillos del Protector.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.119 Ensamble del motor asíncrono trifásico.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.120 Unidades.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 3.121 Materiales a usar en el análisis.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3.122 Importación de la geometría.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3.123 Mallado.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3.124 Detalles del mallado.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3.125 Convergencia.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 3.126 Contactos.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 3.127 Tabla de especificaciones técnicas del tornillo M6x25. (Tightening torque to preload a bolt, 2010).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3.128 Bolt Pretension de 13040N.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3.129 Cylindrical Support.....</i>	<i>69</i>

<i>Figura 3.130 Joints para Rigid Dinamic.</i>	73
<i>Figura 3.131 Rotacional Velocity de 250 rad/s.</i>	73
<i>Figura 4.1 Total deformación.</i>	75
<i>Figura 4.2 Equivalent stress de la carcasa.</i>	76
<i>Figura 4.3 Equivalent stress tapa frontal.</i>	76
<i>Figura 4.4 Equivalent stress tapa trasera.</i>	77
<i>Figura 4.5 Equivalent stress tornillo frontal.</i>	77
<i>Figura 4.6 Equivalent stress tornillo trasero.</i>	78
<i>Figura 4.7 Equivalent stress tuerca del tornillo frontal.</i>	78
<i>Figura 4.8 Equivalent stress tuerca del tornillo trasero.</i>	79
<i>Figura 4.9 Status.</i>	79
<i>Figura 4.10 Frictional stress.</i>	80
<i>Figura 4.11 Pressure.</i>	80
<i>Figura 4.12 Convergencia carcasa.</i>	81
<i>Figura 4.13 Deformación Total con frecuencia 544,07 Hz.</i>	82
<i>Figura 4.14 Deformación Total con frecuencia 749,27 Hz.</i>	82
<i>Figura 4.15 Deformación Total frecuencia 750,87 Hz.</i>	83
<i>Figura 4.16 Deformación Total frecuencia 889,23 Hz.</i>	83
<i>Figura 4.17 Deformación Total frecuencia 1009,6 Hz.</i>	84
<i>Figura 4.18 Deformación Total frecuencia 1011,2 Hz.</i>	84
<i>Figura 4.19 Directional Deformation.</i>	86
<i>Figura 4.20 Posición.</i>	88

INDICE DE TABLAS.

<i>Tabla 4.1 Velocidad del eje.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 4.2 Aceleración del eje.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 4.3 Velocidad angular de la hélice.</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 4.4 Diferentes energías presentes durante el funcionamiento del motor.</i>	<i>89</i>

DEDICATORIA

Dedico este trabajo fruto de mi esfuerzo y perseverancia:

- Primeramente, a Dios por darme la vida y guiarme durante el proceso de mi maestría y permitirme culminarla de la mejor manera en el cual han existido momentos buenos y malos.
- A mis padres Víctor y Ana, y a mis hermanos Hugo, Estefanía y Andrés, a mis Abuelitos Mercedes(+), Víctor(+) y Rosa quienes me han ayudado de la mejor forma posible para culminar esta etapa de mi vida con su apoyo incondicional.
- A toda mi familia en general, quienes con sus palabras de aliento han sido un estímulo para seguir adelante y cumplir con mis ideales.
- A mis amigos (Adrian, Boris, Daniel, Diego, Pablo y Paul) por ayudarme en todo lo que he necesitado y sobre todo por permitirme aprender más de la vida junto a su lado.

¡Esto es posible gracias a ustedes!

Paul Gomez

PREFACIO

En la actualidad el uso de CAD (Computer Aided Desing) y CAE (Computer Aided Engineering) son más comunes en los diferentes procesos industriales ya que estas simulaciones virtuales se asemejan a la realidad por lo cual permite evaluar con mayor precisión los procesos que se desarrollan durante el funcionamiento de un producto industrial.

Actualmente las investigaciones sobre este motor se enfocan más en la parte electromagnética antes que la parte mecánica usando el software Ansys Maxwell o FEMM usando el método de elementos finitos para su resolución.

Por lo cual el análisis por el método de los elementos finitos a un motor asíncrono trifásico en la actualidad es algo necesario para aprovechar un recurso el cual nos puede ayudar a mejorar eficiencia, reducir costos, acelerar el desarrollo de prototipos, determinar fallas que pueden existir en el diseño o en la operación, así como poder reforzar y corregir estos tipos de fallas que se suelen presentar para tener un producto más confiable. Además de ello el software CAE se puede usar con objetivos educativos teniendo una idea más clara del funcionamiento real de un motor asíncrono trifásico, así como conocer el preproceso y post proceso de estos modelos que en la actualidad tienen un sin número de aplicaciones industriales.

PRÓLOGO

En este proyecto de investigación se analiza el comportamiento mecánico de un motor asíncrono trifásico utilizando como herramienta el método de los elementos finitos para evaluar las sollicitaciones mecánicas a que está sometida la máquina en toda su estructura.

En primer lugar, se revisa el principio de funcionamiento, constitución y circuito equivalente de la máquina de inducción. Luego se introduce la descripción de la etapa denominada Preproceso, en la cual se realiza el diseño del modelo matemático del motor a ser simulado. Se crean las diferentes partes del mismo en el software INVENTOR, tratando de reproducir un motor real. Después de crear los diferentes elementos del motor y su respectivo ensamble, se procede a cargar la geometría en el Software ANSYS para realizar el análisis denominado Static Structural, Modal y Rigid Dynamic, en los cuales primero se definen los diferentes materiales para posteriormente generar el mallado de la geometría. Finalmente, en esta etapa de preproceso se crean las diferentes juntas y restricciones y se añaden las diferentes condiciones de frontera para cada análisis.

En la última etapa, el Postproceso, se analizan los diferentes resultados obtenidos en la simulación del motor en los diferentes análisis. En el caso del Static Structural se evalúa la deformación y los esfuerzos a que está sometido el motor. En el caso del análisis modal se estudia la deformación producida por las diferentes frecuencias naturales de cada elemento, y finalmente en el análisis denominado Rigid Dynamic se calcula la deformación, velocidad, aceleración, energía y posición del motor durante su operación.

AGRADECIMIENTO.

Durante la elaboración de la Tesis de grado mediante el compromiso, responsabilidad, disciplina e investigación se ha hecho posible la culminación del mismo, pero cabe recalcar que han existido personas que han hecho posible esto.

Mi agradecimiento a los docentes por impartir sus conocimientos durante el proceso de la maestría para poder alcanzar mi meta.

A la Universidad Politécnica Salesiana, que nos ha formado como profesionales y nos ha abierto las puertas para esta segunda fase del postgrado.

De manera especial también agradecer a mi director de tesis el Dr. José Manuel Aller Castro, al Ing. Jaime Bustamante y Msc. Freddy Narvárez quienes con su experiencia, conocimientos y cooperación hicieron posible culminar de la mejor manera posible este proyecto de tesis.

Finalmente, un agradecimiento muy especial merece también la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de nuestras familias y amigos, pues se dice que la gratitud es la memoria del alma.

A todos ellos, muchas gracias

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES.

El método de elementos finitos constituye en la actualidad una herramienta habitual para modelar diferentes tipos de sistemas físicos, con lo cual se ha logrado estudiar eficientemente un sin número de campos, no solo específicamente en la industria sino también en la medicina, en la ciencia y en la economía, entre otras.

Como antecedentes de la aplicación del Método de los Elementos Finitos en máquinas eléctricas, existe una serie de artículos en los que se aplicó esta técnica para modelar, analizar y diseñar diferentes máquinas eléctricas.

En lo que se refiere a un motor trifásico los autores Leopoldo Simón y José Miguel Monzón (L. Simón, J. Monzón, 2015) en su investigación titulada “El Método de los Elementos Finitos para la Identificación Paramétrica de una Máquina Trifásica de Inducción Magnética, con Algoritmos Genéticos”, utilizan el método de los elementos finitos de un motor trifásico de inducción, aplicando diferentes geometrías en el diseño del rotor. Daniel González García (González, 2011) en su proyecto de tesis, “Diseño de la estructura portante de un motor lineal síncrono de imanes permanentes”, realiza un análisis electromagnético, estructural y modal para el diseño de la estructura para el estudio del comportamiento mecánico de sus piezas para determinar los puntos vulnerables del mismo.

Así mismo Alejandro Parra *et al* (Alejandro Parra, José Oslinger y Jairo Palacios, 2014) presentan un modelo matemático para obtener el indicador de falla del estator. Dicho modelo es de gran aplicabilidad por ser poco invasivo y de bajo costo computacional. Helmer Carvajal *et al* (Helmer Carvajal, Iván Estupiñán, 2010) determinan las fallas en rodamientos, desbalanceo, barras rotas y cortocircuito en el devanado del estator, utilizando señales de vibración cuando el motor opera en condiciones de carga.

1.2 PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA.

Los motores eléctricos de inducción son pieza fundamental en todo proceso industrial; su robustez, bajo costo, fácil mantenimiento y versatilidad los han hecho populares con aplicaciones que van desde artefactos caseros hasta equipos más sofisticados de tipo industrial. Siendo una máquina eléctrica rotatoria y simple en su constitución física, la clasificación del tipo de fallas puede estar dividida en tres grupos fallas mecánicas, fallas eléctricas y de enlace de potencia.

Esta investigación se va enfocar en las fallas mecánicas que pueden suceder en este convertidor rotativo. El primer análisis que se va a realizar es el de “Static Structural”, para este análisis se modelan la carcasa, las tapas del motor y los respectivos tornillos omitiendo el resto de elementos. Creando los diferentes contactos y aplicando la presión generada por los tornillos se obtienen los diferentes esfuerzos con lo cual se obtienen los puntos más vulnerables con cual es posible mejorar el convertidor y reducir las posibles fallas.

El siguiente análisis es el “Modal”, el cual se aplica a los diferentes elementos para determinar las frecuencias naturales de los mismos, obteniendo las deformaciones producidas por dichas frecuencias, y de esta manera evaluar si durante el funcionamiento del motor, alguno de estos elementos oscila con sus frecuencias naturales, debido a que al ocurrir esto, los elementos constituyentes del motor serían afectados y el motor presentaría fallas durante su funcionamiento. Por último, se realiza un análisis “Rigid Dynamic”, en el cual se utiliza todos los elementos que conforman el motor, aplicando velocidad rotacional para generar el movimiento del motor y de esta obtener la deformación producida durante el funcionamiento, así como el análisis de las energías y velocidad para determinar si existe pérdidas durante el funcionamiento sin carga del motor.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO.

Como objetivo principal, este proyecto plantea analizar, diseñar y simular la estructura física y mecánica de un motor asíncrono trifásico de rotor de jaula de ardilla mediante la técnica de los elementos finitos.

Los objetivos secundarios son:

- Diseñar, crear y ensamblar las diferentes partes del motor con las restricciones correspondientes con el uso de un programa CAD.
- Realizar el análisis estructural estático del motor mediante el software ANSYS.
- Determinar las frecuencias modales del motor mediante el software ANSYS.
- Realizar el análisis dinámico del motor mediante el Software ANSYS.
- Analizar los diferentes resultados de las simulaciones en ANSYS.

1.4 METODOLOGÍA DEL PROYECTO.

La metodología empleada en este proyecto del motor asíncrono trifásico es el siguiente:

- Crear modelo CAD: Mediante el uso del Software Inventor se desarrollan los modelos matemáticos de los diferentes elementos que conforman el motor.
- Exportación del modelo: Luego de crear el ensamble del motor se procede a exportar el modelo matemático en formato .stp.
- Seleccionar material: En el software ANSYS se procede a escoger los diferentes materiales de cada uno de los elementos.
- Crear la malla de elementos finitos: Para cada uno de los diferentes análisis se procede a generar el mallado de los mismos, tratando de obtener un mallado superior al 80%.
- Definición del tipo de análisis: Se procede a escoger los diferentes módulos que requiere está investigación.
- Definición del tipo de contacto entre superficies: En este caso dependiendo del análisis se crean los diferentes tipos de contactos o juntas.
- Aplicación de cargas o fuerzas: De acuerdo al análisis se procede a aplicar las diferentes fuerzas, presiones, velocidades entre otras.
- Definir las condiciones de contorno. Imposición de restricciones de movimiento:
- Validación del modelo: Luego de obtener los diferentes resultados de cada uno de los análisis se procede a analizar los diferentes puntos vulnerables del modelo desarrollado.

CAPITULO 2: MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO

Los motores asíncronos o de inducción son un tipo de máquinas eléctricas de corriente alterna. Este convertidor electromecánico está formado por un rotor, que puede ser de dos tipos: a) de jaula de ardilla; b) bobinado, y un estator, en el que se encuentran las bobinas inductoras. Estas bobinas son trifásicas y están desfasadas entre sí 120° . Según el Teorema de Ferraris, cuando por estas bobinas circula un sistema de corrientes polifásicas y desfasadas en el tiempo, se produce un campo magnético rotatorio en el entrehierro de la máquina. Este campo magnético variable va a inducir una tensión en el rotor según la Ley de Faraday.

El motor asíncrono es la máquina eléctrica más utilizada en la industria, debido a que posee grandes ventajas en su operación, mantenimiento y costo. Por otra parte, este convertidor presenta algunas dificultades para obtener un control preciso de su posición, tiene un factor de potencia y rendimiento en operación algo bajo comparado con otras máquinas.

Otra ventaja del motor de inducción es que no requieren fuentes en el rotor como sucede en algunas máquinas sincrónicas, pero esto por otra parte les impide regular el factor de potencia que consumen.

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

El principio de funcionamiento de un motor trifásico asíncrono se basa en la producción de un campo magnético giratorio, el mismo que se produce al alimentar los devanados estatóricos con tensiones trifásicas senoidales que se encuentran desfasados 120° como se muestra en la Figura 2.1.

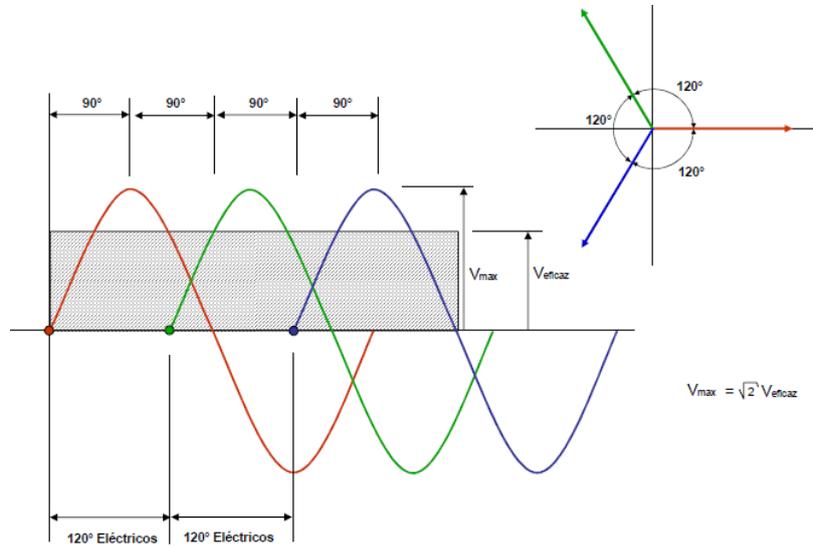


Figura 2.1 Tensión Trifásica Senoidales Desfasadas. (Potencia electromecánica, 2013)

Cuando circula una corriente eléctrica, las bobinas del estator producen tres campos magnéticos pulsantes, el campo magnético resultante proviene de la suma en el espacio y tiempo de los campos magnéticos pulsantes de cada fase, produciendo finalmente el campo magnético giratorio.

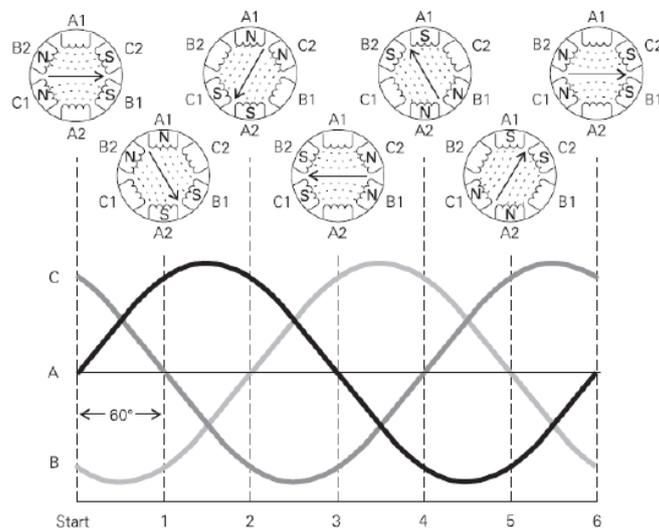


Figura 2.2 Campo magnético giratorio creado por una corriente alterna trifásica. (Vandelvira, 2011)

La velocidad del campo magnético del estator también llamada velocidad de sincronismo o síncrona (n) depende del número de polos (p) y la frecuencia de la tensión eléctrica (f), la misma que viene dada por la expresión:

$$n = \frac{60 * f}{p} \quad (1.1)$$

Este campo magnético giratorio originado en las bobinas estáticas, corta los conductores del rotor generando en ellos una fuerza electromotriz. Como los conductores del rotor están en cortocircuito, circulan corrientes que, a su vez generan un nuevo campo giratorio inducido, que junto con el campo magnético giratorio del estator producen el par electromagnético que pone en movimiento al rotor.

La velocidad mecánica del rotor es diferente a la velocidad del campo magnético rotatorio producido en el estator. La diferencia entre ambas velocidades se la conoce como deslizamiento (s). Este suele estar comprendido, para una máquina en operación, entre el 2% y el 8%, la misma que se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$S = \frac{n_{estator} - n_{rotor}}{n_{estator}} * 100\% \quad (1.2)$$

2.2 CONSTITUCIÓN DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO.

El motor asíncrono trifásico está constituido por el estator, rotor y la carcasa como se puede ver en la Figura 2.5.

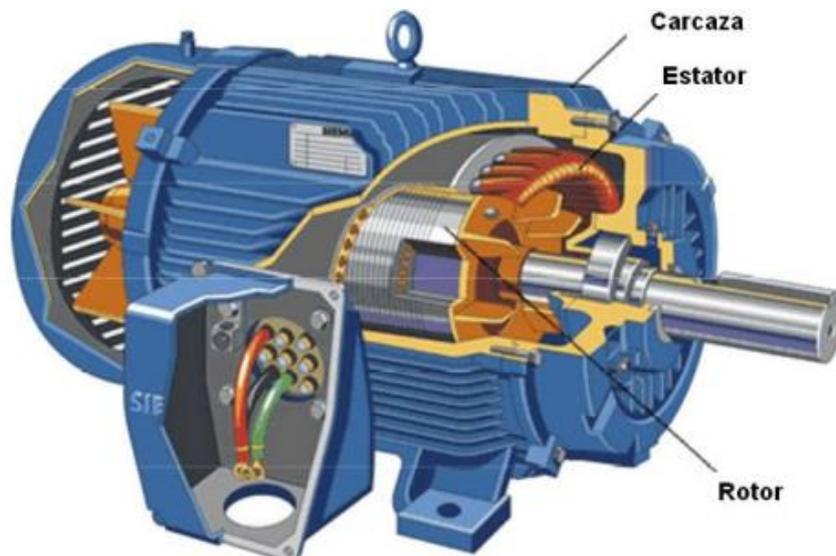


Figura 2.3 Constitución de un motor asíncrono trifásico. (Vandelvira, 2011)

2.2.1 ESTATOR.

Es la parte fija del motor que va unida a la carcasa del mismo, en la cual se encuentra apilado de chapas magnéticas y sobre las mismas el bobinado trifásico desfasadas 120° .



Figura 2.4 Estator. (Vandelvira, 2011)

2.2.2 ROTOR.

Es la parte móvil del motor, la cual gira durante el funcionamiento del mismo. Básicamente está constituido por el eje y un núcleo el cual al igual que el estator posee chapas magnéticas y un bobinado. Existen dos tipos de rotor: jaula de ardilla y bobinado.

- **Jaula de Ardilla:** “Los conductores del rotor están igualmente distribuido por la periferia del rotor. Los extremos de estos conductores están cortocircuitados, por tanto, no hay posibilidad de conexión del devanado del motor con el exterior. La posición inclinada de las ranuras mejora las propiedades de arranque y disminuyen el ruido” (Samsó, 2004)

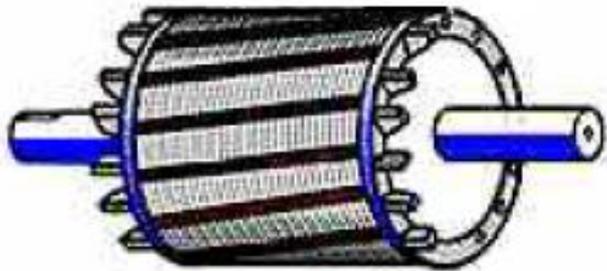


Figura 2.5 Jaula de Ardilla. (Vandelvira, 2011)

- **Bobinado:** “Los devanados del rotor son similares al estator con el que está asociado. El número de fases del rotor no tiene por qué ser el mismo que el del estator, lo que si tiene que ser igual es el número de polos. Los devanados del rotor están conectados a anillos colectores montados sobre el mismo eje.” (Samsó, 2004)

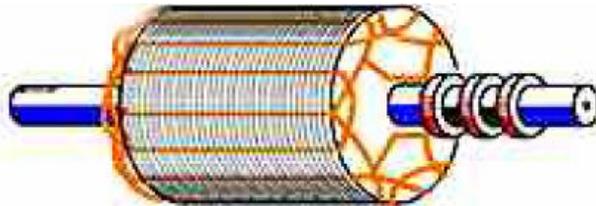


Figura 2.6 Bobinado. (Vandelvira, 2011)

2.2.3 CARCASA.

Es la parte visible del motor que va junto al estator, la función principal de la carcasa es la de proteger al bobinado y al rotor, además de eso sirve como un disipador debido a su forma. Sus ranuras permiten disipar el calor mientras el motor está en funcionamiento y mantener la temperatura de los bobinados y de las chapas dentro de los rangos de diseño. La carcasa también permite el centrado del rotor en el estator mediante el ajuste de las tapas y sus rodamientos.

2.2.4 PLACA.

Es una placa metálica en la cual lleva la información de las características principales del motor compuesta de códigos y números, en la placa se indica el tipo de motor, potencia, voltaje nominal, corriente nominal, frecuencia nominal, factor de potencia, velocidad nominal, entre otras. Cada fabricante tiene su modelo de placa incluyendo su logotipo o nombre.

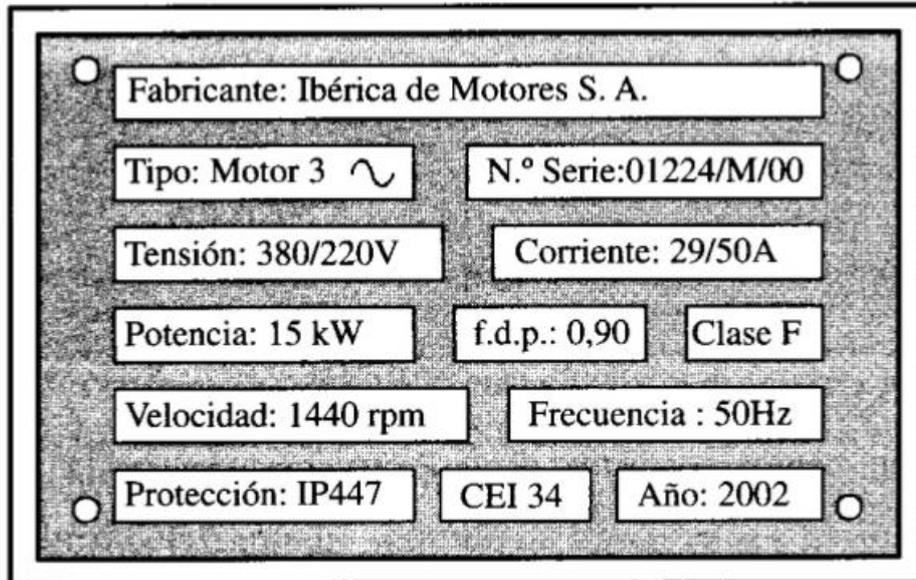


Figura 2.7 Placa. (teach, 2012)

2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE.

El principio de funcionamiento de un motor asíncrono trifásico se parece al de un transformador, por lo cual su circuito equivalente es similar al de un transformador, con la diferencia de que la frecuencia en el secundario dependerá de la velocidad relativa entre el motor y el estator. Los bobinados del estator constituyen el primario del transformador, el motor, el entrehierro y el estator constituyen el círculo magnético correspondiente, y la jaula de ardilla es equivalente a un secundario en cortocircuito. El circuito equivalente por fase de un motor trifásico asíncrono se presenta en la Figura 2.8.

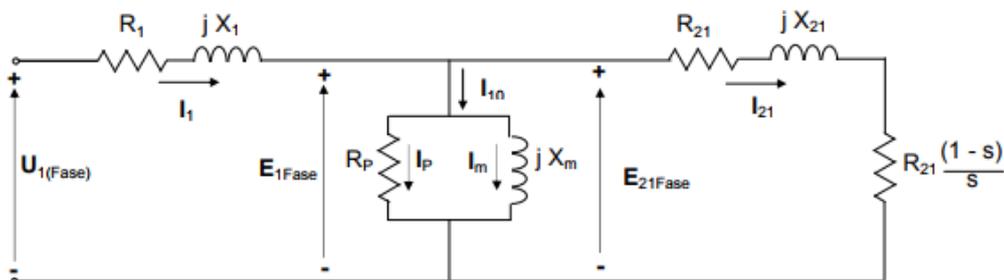


Figura 2.8 Circuito equivalente por fase de un motor asíncrono trifásico. (Álvarez, 2009)

Donde:

- R_1 : La resistencia óhmica de la bobina estática de una fase [Ω]
- X_1 : Reactancia de dispersión de la bobina estática de una fase [Ω]
- R_p : Resistencia que representa las pérdidas en el hierro por fases [Ω]
- X_m : Reactancia de magnetización por fase [Ω]
- U_1 : Tensión de fase de alimentación al motor [V]
- E_1 : Fuerzas electromotriz inducida de fase en bobina estática [V]
- I_1 : Corriente estática con carga [A]
- I_{10} : Corriente estática del motor en vacío [A]
- E_{21} : Fuerzas electromotriz inducida en el rotor por fase [V]
- R_{21} : La resistencia óhmica de la bobina del rotor de una fase [Ω]
- X_{21} : Reactancia de dispersión de la bobina del rotor de una fase [Ω]
- I_{21} : Corriente de fase del rotor [A]

2.4 CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO.

El circuito equivalente anterior se puede simplificar agrupando las pérdidas en el hierro con las mecánicas, las cuales no están incluidas en el circuito equivalente. Al agrupar estas pérdidas se obtienen las pérdidas perdidas rotacionales ($p_r = p_{fe} + p_m$), quedando el circuito equivalente como muestra la Figura 2.9.

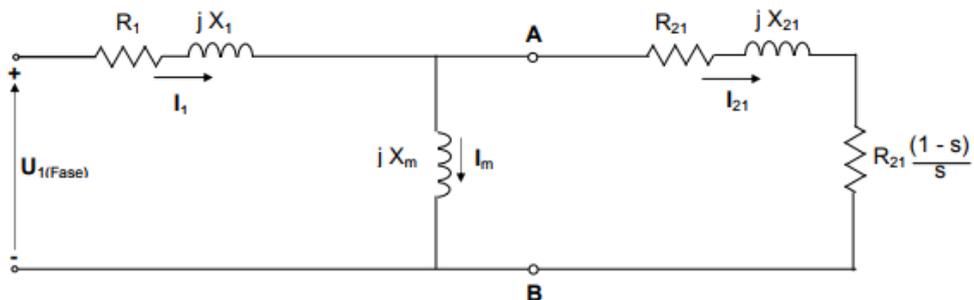


Figura 2.9 Circuito equivalente aproximado por fase de un motor asíncrono trifásico. (Álvarez, 2009)

Aplicando el circuito equivalente de Thévenin en A-B se puede simplificar más el circuito equivalente, donde la fuente Thevenin sería igual a:

$$E_{TH\text{Fase}} = U_{1\text{Fase}} \frac{jX_m}{R_1 + jX_1 + jX_m} \quad (1.3)$$

Cuya impedancia sería:

$$Z_{TH} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + jX_1 + jX_m} \quad (1.4)$$

Al separar la parte real e imaginaria de la expresión (1.4) queda:

$$R_{TH} = \frac{R_1 X_m^2}{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2} \quad (1.5)$$

$$X_{TH} = \frac{X_1^2 X_m + X_1 X_m^2 + R_1^2 X_m}{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2} \quad (1.6)$$

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} \quad (1.7)$$

Obteniendo como resultado el siguiente circuito equivalente:

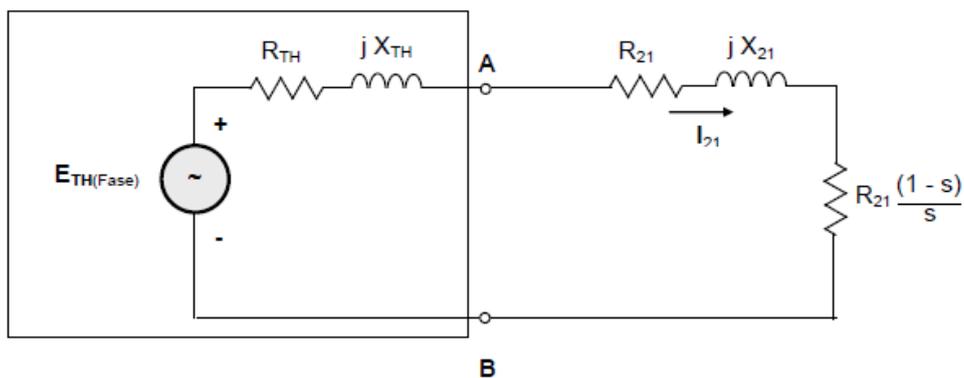


Figura 2.10 Circuito equivalente con Fuente Thevenin. (Álvarez, 2009)

CAPÍTULO 3: PREPROCESO

En este capítulo se define el motor asíncrono trifásico del caso de estudio. Se define la malla más apropiada dependiendo de la geometría, al igual que las condiciones de contorno, así como las condiciones iniciales a emplear para su análisis en los diferentes casos.

3.1 PARTES DE UN MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO.

Antes de realizar el análisis del motor asíncrono trifásico se debe describir las diferentes partes que se van a implementar para el diseño de los modelos matemáticos, tratando que el dicho diseño del modelo matemático se aproxime a uno real como el de la Figura 3.1 cuyas características son: 60Hz-5hp(3,7Kw)- 2400rpm -220/440 V.



Figura 3.1 Motor Asíncrono Trifásico. (Weg, 2016)

En la Figura 3.2 se muestran las diferentes partes en las cuales está constituido el mismo. Las partes que se van a diseñar y modelar son: carcasa, rotor, estator, rodamientos, tapa delantera y trasera, ventilador, tapa deflectora, anillo V'ring, tuercas, tornillos y arandela. Como análisis que se realiza en este trabajo es solo estructural y no electromagnético, no se consideran las bobinas, borneras y caja de conexiones. El software INVENTOR para diseñar las diferentes partes del motor anteriormente mencionadas.

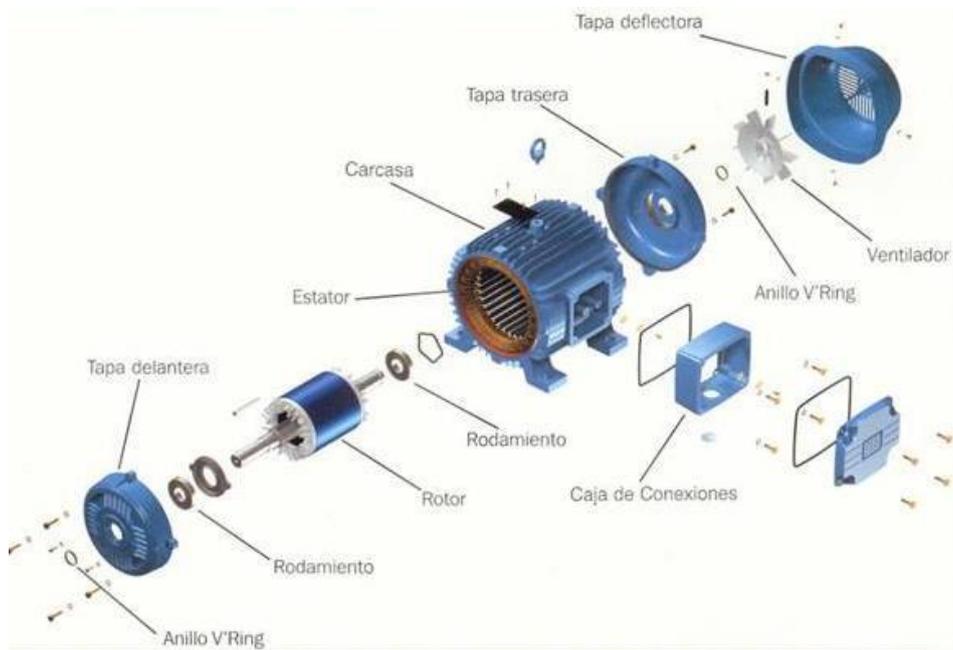


Figura 3.2 Partes de un Motor Asíncrono Trifásico. (Yrady, 2011)

3.1.1 CARCASA O BASTIDOR.

Una de las funciones de la carcasa es proteger el estator y el rotor del motor, así como la función de disipar el calor mediante sus ranuras. El material empleado para su fabricación depende del tipo de motor y su aplicación por lo cual una carcasa puede ser: totalmente cerrada, abierta, a prueba de goteo, a prueba de explosiones, sumergibles, entre otras. Pero por lo general su fabricación suele ser de hierro fundido o acero laminado. El tipo de carcasa a utilizarse depende del ambiente en el cual se va trabajar con el motor.

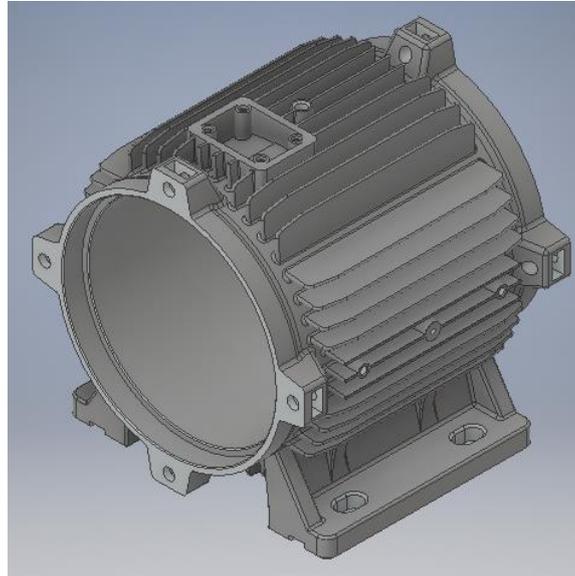


Figura 3.3 Carcasa.

3.1.2 ESTATOR

Es la parte fija del motor y está constituida por el núcleo y el devanado. Para el análisis se incluye solo el núcleo omitiendo el devanado como muestra la Figura 3.4. El estator generalmente suele estar construido de acero.

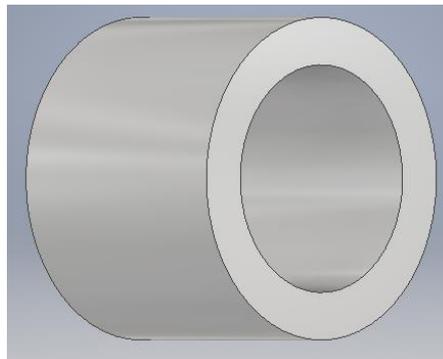


Figura 3.4 Estator.

3.1.3 ROTOR

El análisis se aplica a un rotor jaula de ardilla. Además, se incluye el eje y la cuña del motor como un solo cuerpo. Los rotores son un conjunto de láminas de acero al silicio que forman un paquete.

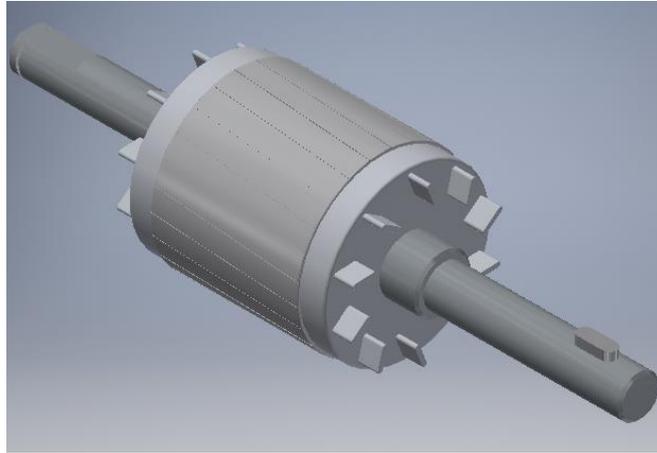


Figura 3.5 Rotor.

3.1.4 TAPA DELANTERA Y TRASERA.

La función principal de las tapas o escudos es el de sostener los cojinetes o rodamientos que junto a los mismos permiten centrar el eje. También cierran el motor mediante pernos o tornillos de fijación con la carcasa. En la Figura 3.6 se muestra la tapa delantera y trasera que son similares, lo único que cambia la segunda respecto a la primera es que existe unos agujeros adicionales para los tornillos que van entre el protector y la Tapa Trasera.

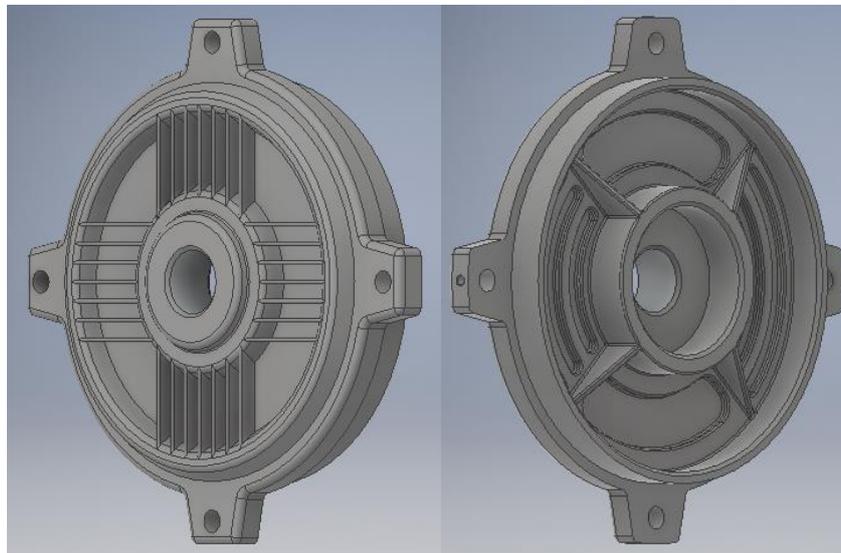


Figura 3.6 Tapa Delantera parte Frontal y Tapa Trasera parte Posterior.

3.1.5 PROTECTOR.

La función principal del protector o caperuza es la de proteger al ventilador cuando está en funcionamiento y evitar accidentes con personas que circulen cerca del equipo mientras esta en movimiento. Está fabricado generalmente mediante lámina de acero o aluminio.

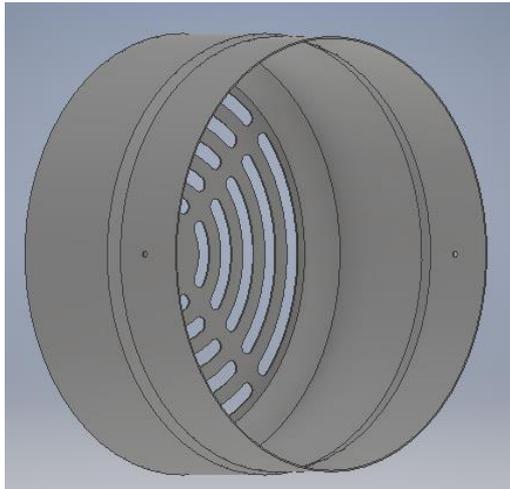


Figura 3.7 Protector.

3.1.6 RODAMIENTOS O COJINETES.

Los Rodamientos se utilizan para sostener y fijar el eje del motor, además de disminuir la fricción con lo cual se logra que se consuma menos potencia debido a que reduce las pérdidas por la fricción giratoria del motor. Los rodamientos suelen ser de dos tipos de desplazamiento o rodamiento Y generalmente son de acero.

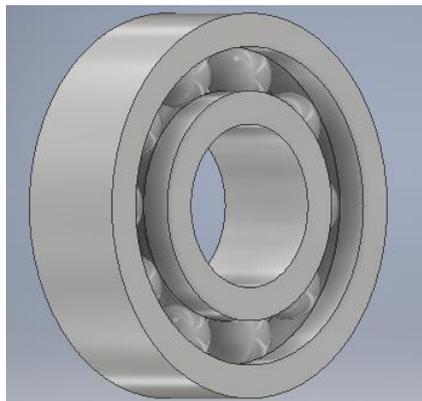


Figura 3.8 Rodamiento.

3.1.7 VENTILADOR.

El ventilador es un dispositivo que absorbe el aire exterior y lo fuerza a circular por las ranuras de la carcasa. Esto permite el intercambio de calor entre aire interior del motor y el exterior. De esta manera existe refrigeración del mismo. El material del cual suele estar hecho suele ser generalmente de algún tipo de polímero que tolere los esfuerzos mecánicos y la temperatura a que se encuentra sometido.

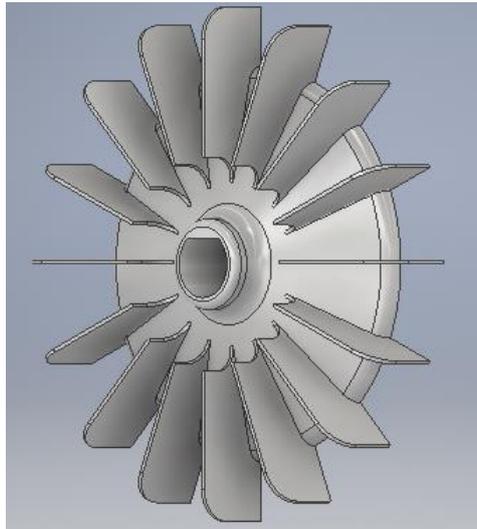


Figura 3.9 Ventilador.

3.1.8 SEGURO.

El Retén se utiliza para sujetar el ventilador con el eje para que no se salga de su posición cuando esté en movimiento.

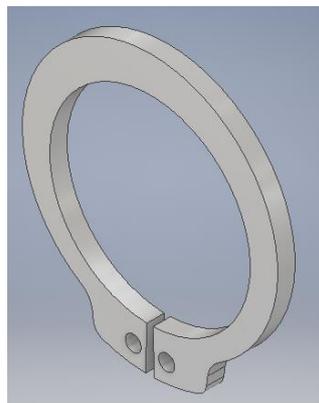


Figura 3.10 Seguro.

3.1.9 TORNILLOS.

La función principal del tornillo es sujetar la carcasa con la tapa delantera, trasera y el protector. El material del cual está fabricado depende del fabricante, aunque generalmente suele ser de acero.

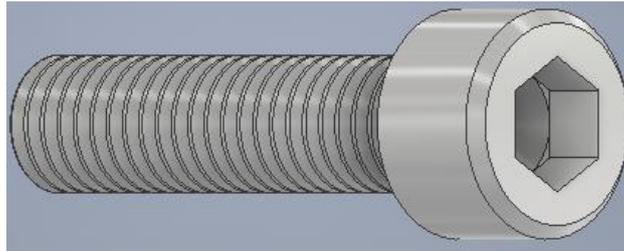


Figura 3.11 Tornillo para la carcasa.

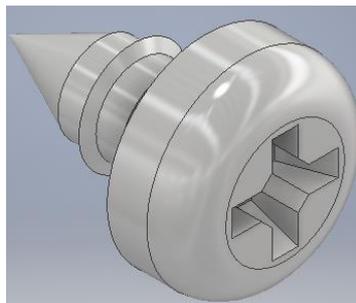


Figura 3.12 Tornillo para el protector.

3.1.10 TUERCA.

La tuerca posee un orificio central, el mismo que presenta una rosca para acoplarse a un tornillo ya sea de manera fija o deslizante, su función principal es de sujetar y fijar la carcasa con la tapa delantera y trasera junto con el tornillo.

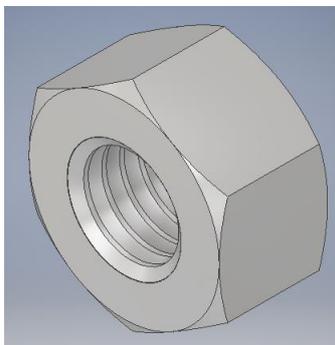


Figura 3.13 Tuerca.

3.1.11 ARANDELA.

La función que cumple la arandela es de impedir la pérdida de precarga entre el tornillo y las tapas.

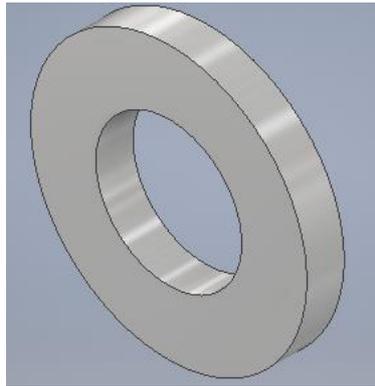


Figura 3.14 Arandela.

El motor final realizando el ensamble de las diferentes piezas antes expuestas se muestra en la Figura 3.15.

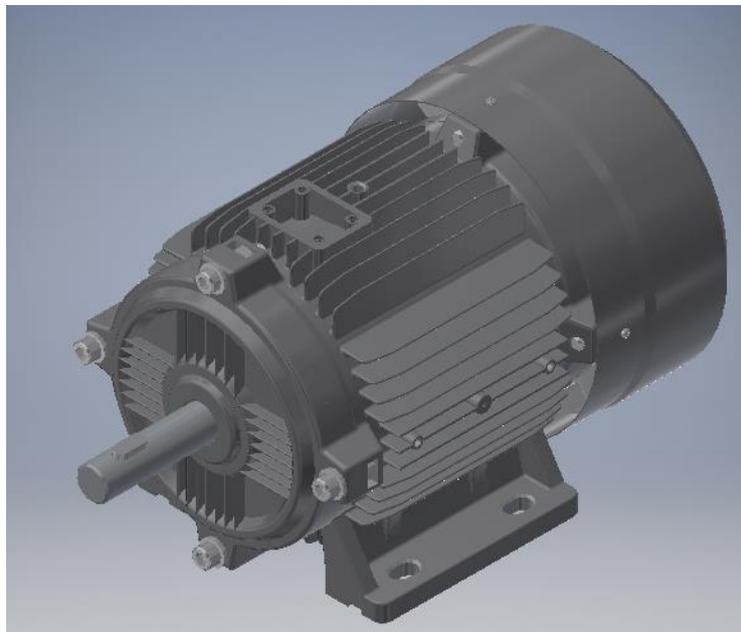


Figura 3.15 Ensamble del Motor Asíncrono Trifásico.

3.2 DISEÑO DEL MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO A SER SIMULADO EN ANSYS WORKBECH.

Antes de realizar la simulación del motor asíncrono trifásico se pueden realizar algunas simplificaciones con lo que respecta al diseño anterior. Estos detalles que es necesario omitir se debe a que no están contemplados en los análisis de esta investigación y sobre todo porque mejoran notablemente el mallado. A continuación, se presenta el proceso de la creación de los diferentes elementos del motor:

3.2.1 CARCASA.

Para la carcasa del motor lo primero que se realiza es un boceto en el cual esta traza la forma de la carcasa, después de ello realiza su extrusión.

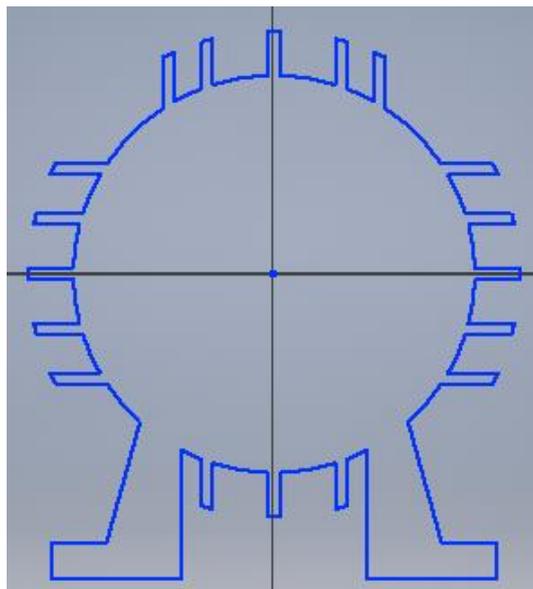


Figura 3.16 Boceto de la carcasa.

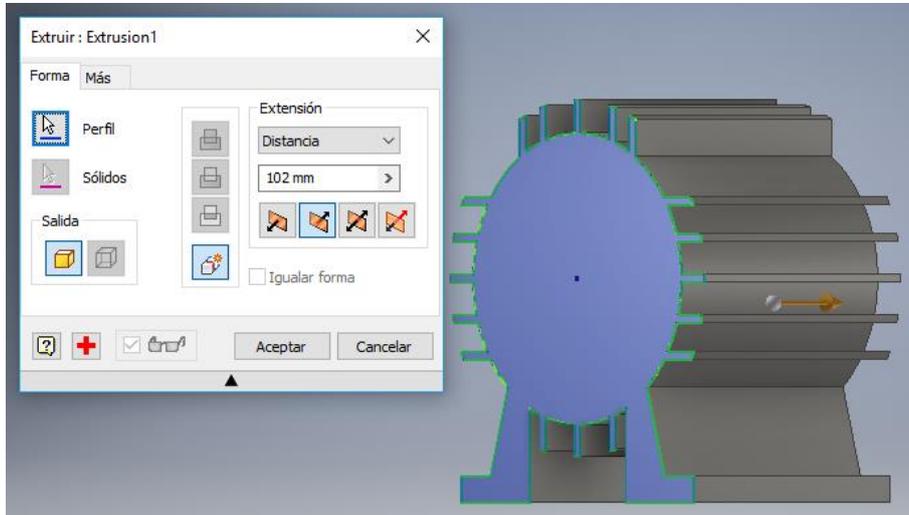


Figura 3.17 Extrusión del boceto anterior.

Sobre la extrusión anterior se procede a crear un boceto de una circunferencia para crear una extrusión de 4 mm para ubicar los soportes para los tornillos de la tapa.

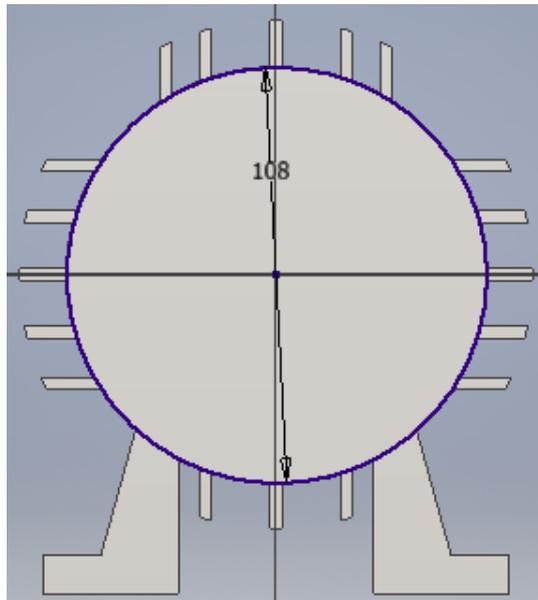


Figura 3.18 Boceto de una circunferencia.

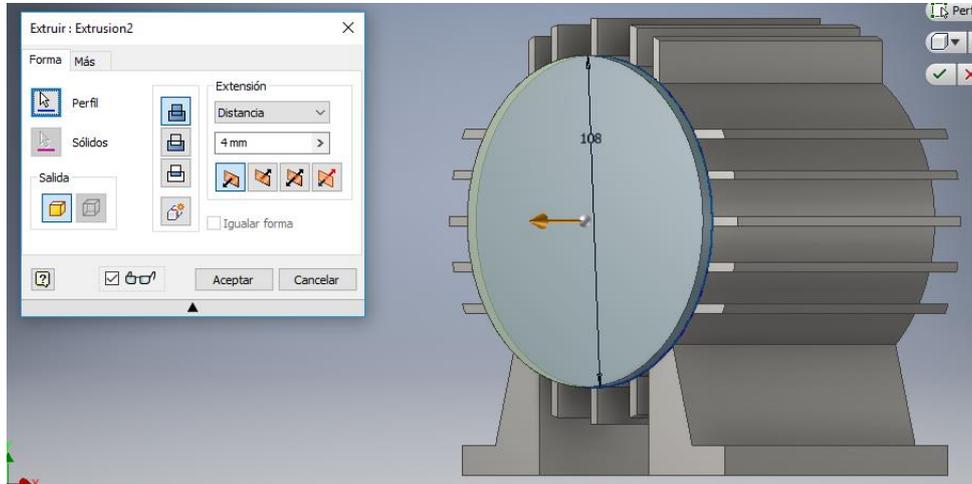


Figura 3.19 Extrusión de la circunferencia.

Sobre el diseño anterior se crea un boceto para incorporar los diferentes soportes para la tapa y tornillos. El proceso anterior se realiza también en la parte posterior.

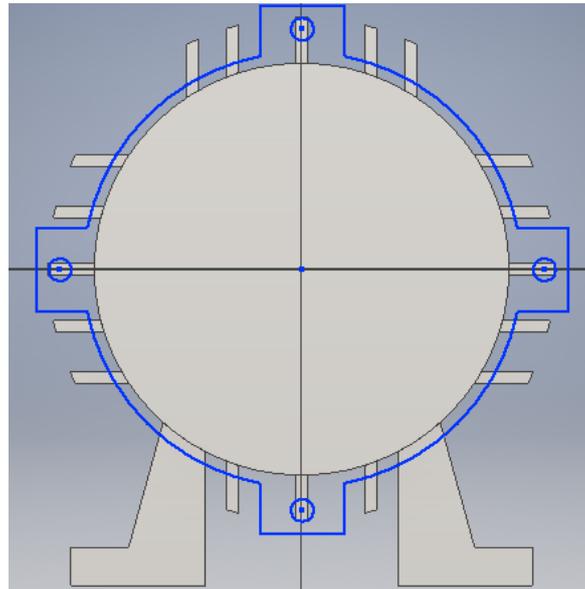


Figura 3.20 Boceto de los soportes.

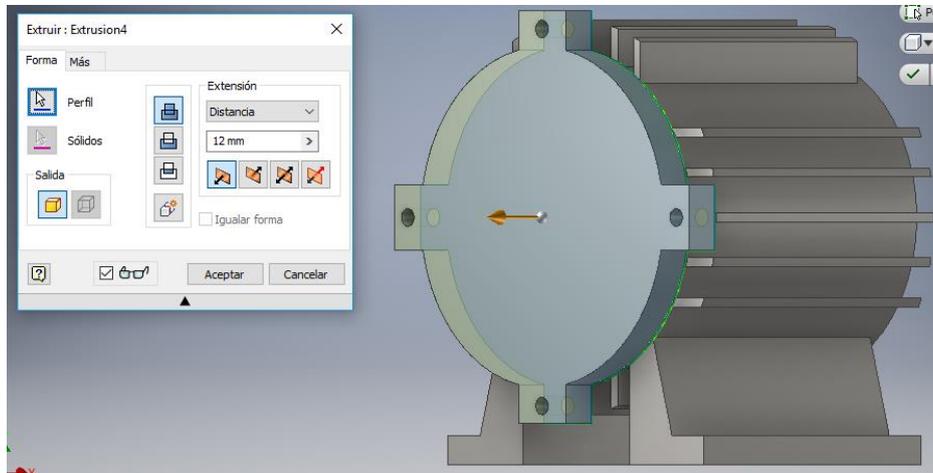


Figura 3.21 Extrusión de los soportes.

Sobre la extrusión anterior se procede a crear un boceto de una circunferencia para incluir una extrusión con el cual se obtiene el cilindro en el cual van a incorporarse el estator y el rotor entre otros.

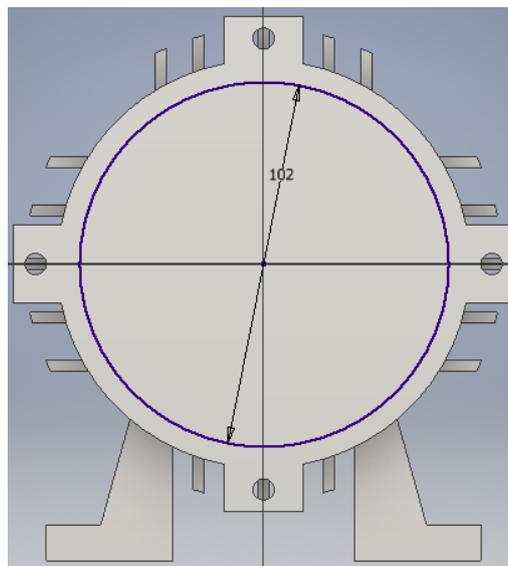


Figura 3.22 Boceto de una circunferencia.

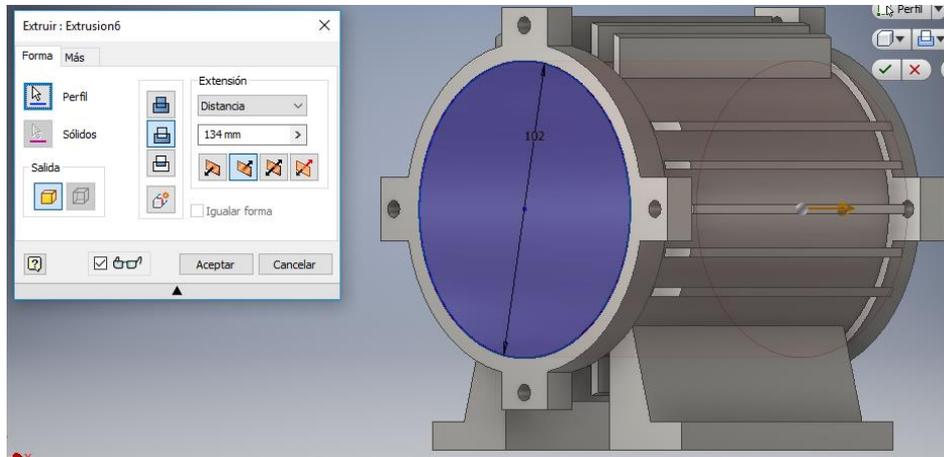


Figura 3.23 Extrusión de nuestro diseño anterior.

Por último, se procede a realizar un boceto para crear el hueco sobre las pestañas, en el cual van a ir ubicadas las tuercas. Este procedimiento se realiza en todas las pestañas.

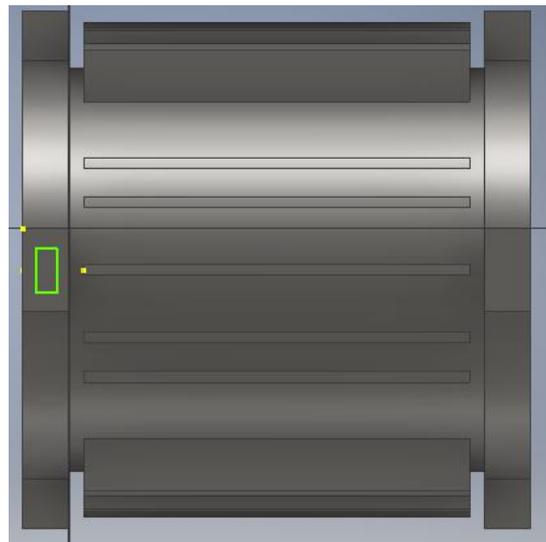


Figura 3.24 Boceto para el agujero de la tuerca.

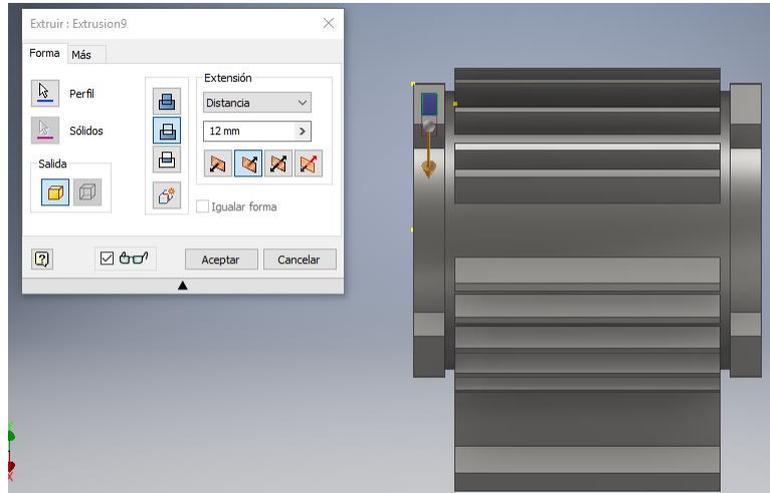


Figura 3.25 Boceto para el agujero de la tuerca.

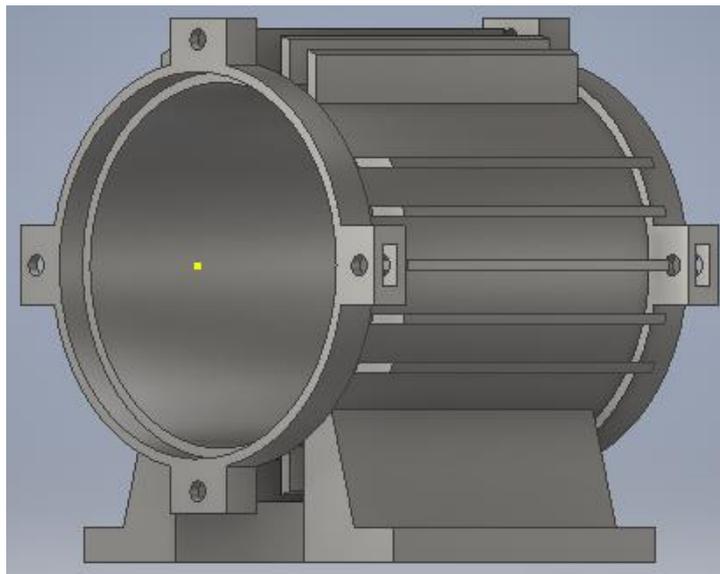


Figura 3.26 Carcasa.

La Figura 3.26 se muestra la carcasa final con respecto a la carcasa de la Figura 3.3. Las simplificaciones que se realizaron en este diseño omitieron varios detalles como la caja de bornes. También se simplificaron las ranuras y la base de la carcasa.

3.2.2 ESTATOR.

Con lo que respecta al estator se modelan dos partes, la primera con las chapas y la segunda viene a representar el bobinado del mismo.

Para la modelación de las diferentes chapas del estator se crea un boceto como se muestra en la Figura 3.27 para luego proceder a extruir la misma.

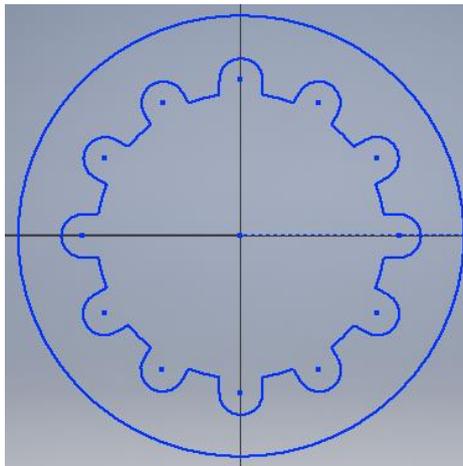


Figura 3.27 Boceto del estator.

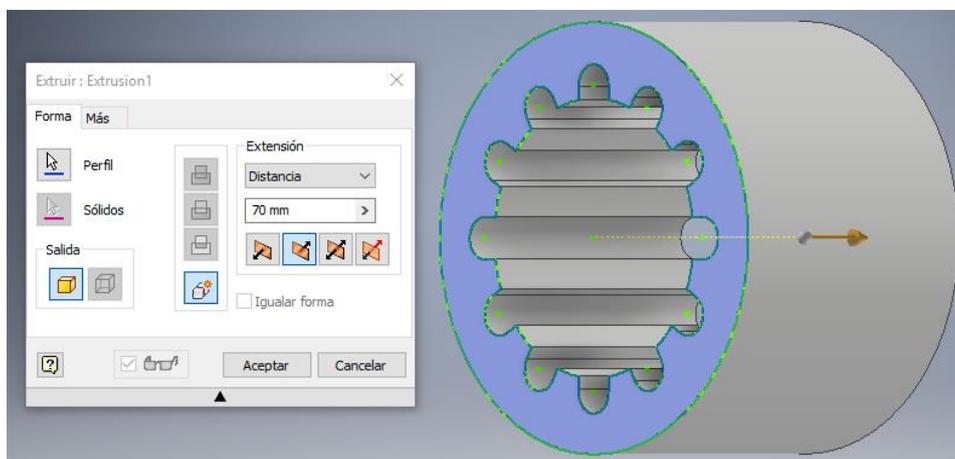


Figura 3.28 Extrusión del boceto anterior.

Con lo que respecta al bobinado se crea un boceto con semicircunferencias que van a ir dentro de las chapas del estator.

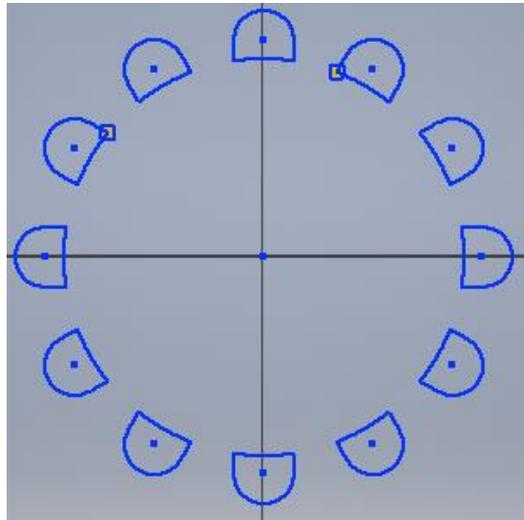


Figura 3.29 Boceto del bobinado.

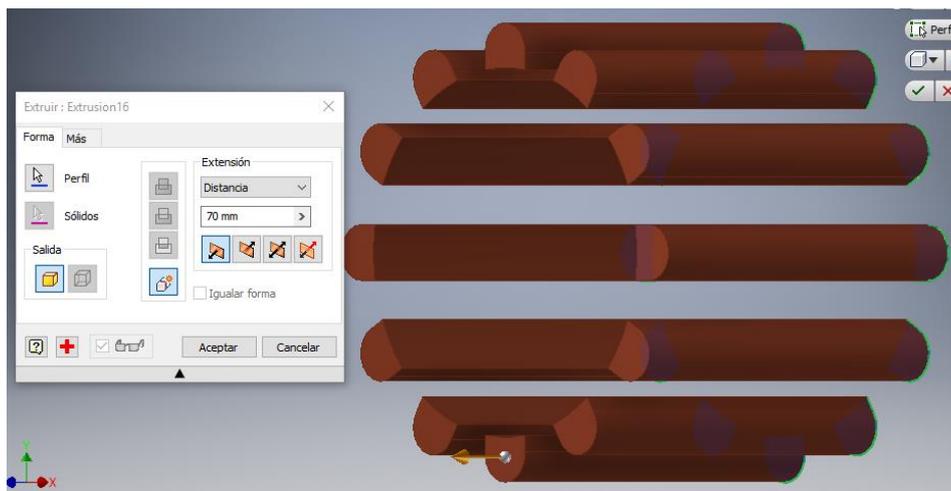


Figura 3.30 Extrusión del boceto anterior.

A continuación, se procede a trazar un boceto con dos circunferencias sobre el diseño anterior, para luego proceder a realizar su respectiva extrusión. El mismo procedimiento se realiza para la parte posterior.

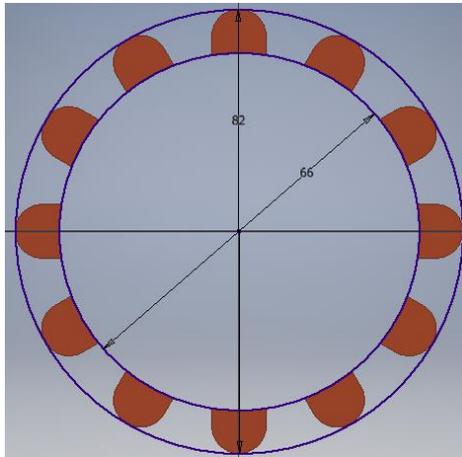


Figura 3.31 Boceto sobre el diseño anterior.

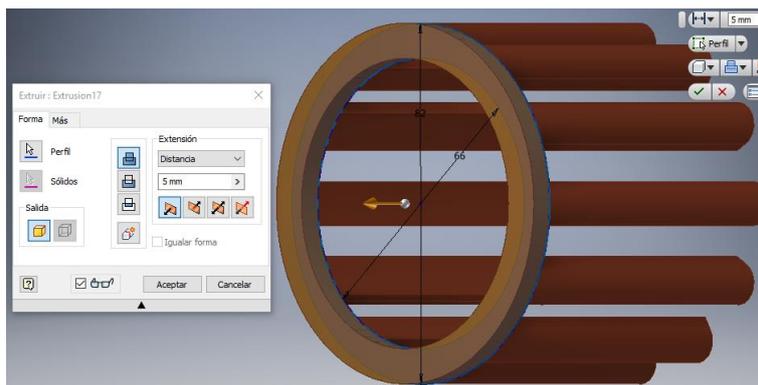


Figura 3.32 Extrusión del boceto anterior.

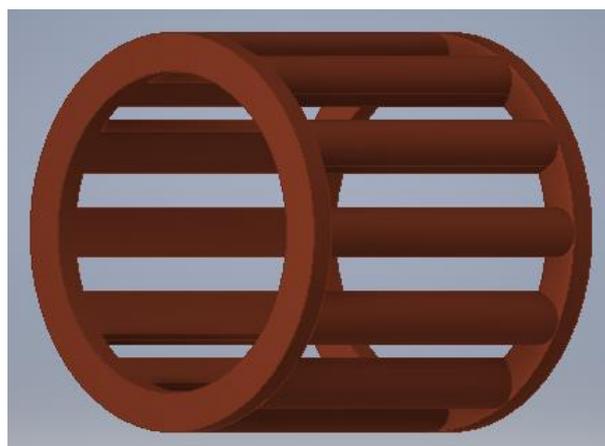


Figura 3.33 Bobinado del estator.

Con lo que respecta al estator se cambió la forma del mismo, no se diseñó como un solo elemento para asemejar más a uno real.

3.2.3 ROTOR

Al igual que el estator el rotor se divide en dos partes. Para el primer diseño se realiza un boceto como se muestra la Figura 3.34, y posteriormente se procede a su extrusión tal como se hizo anteriormente con el estator.

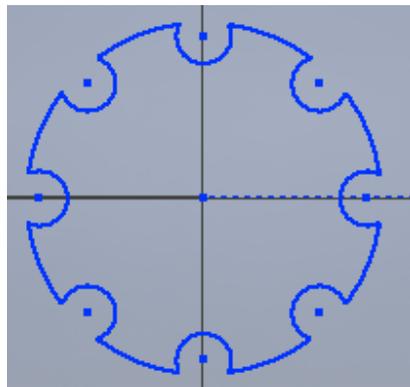


Figura 3.34 Boceto del rotor.

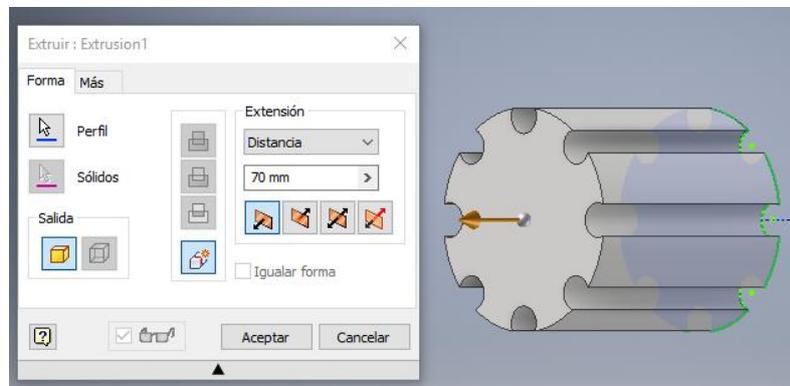


Figura 3.35 Extrusión del boceto anterior.

Se crea una circunferencia de 23 mm sobre el diseño anterior para extruirlo con una profundidad de 20 mm como se muestra en las Figuras 2.36 y 3.37. El mismo procedimiento se realiza en la parte posterior del diseño.

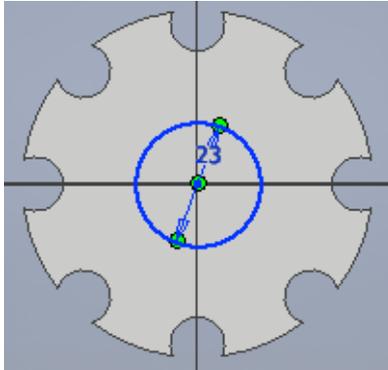


Figura 3.36 Boceto sobre el diseño.

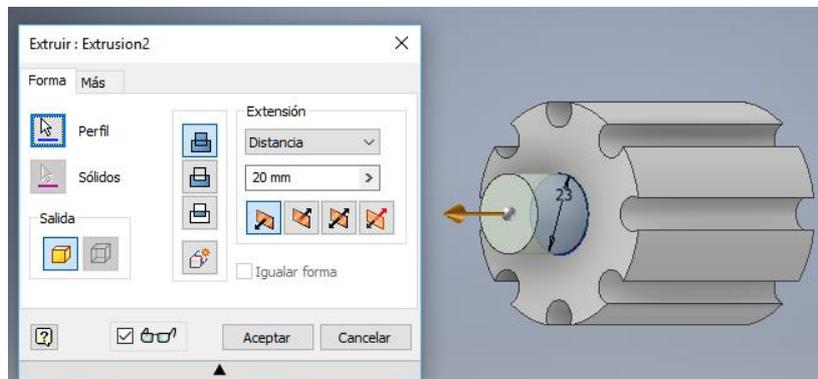


Figura 3.37 Boceto sobre el diseño.

Después se diseña una circunferencia de 17 mm para luego extruir con una profundidad de 80 mm. Con esto se culmina la parte delantera del eje del rotor. Se realiza el mismo proceso para la parte posterior, pero en la extrusión se realiza con una profundidad de 57 mm.

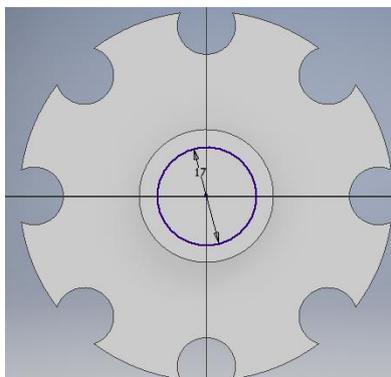


Figura 3.38 Boceto de la circunferencia de 17 mm.

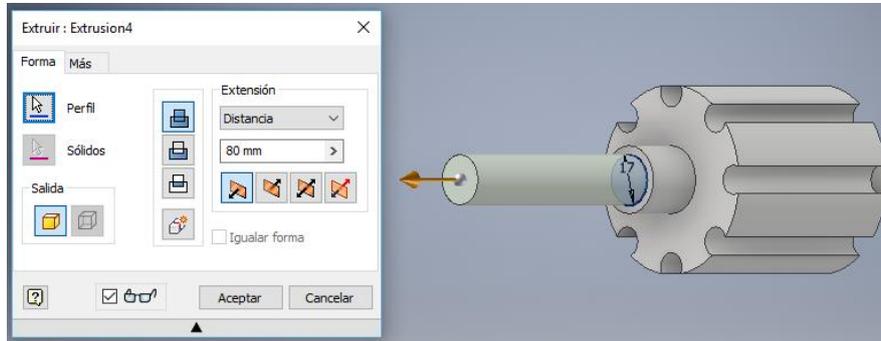


Figura 3.39 Extrusión de la circunferencia de 17 mm.

En la parte posterior se realiza un boceto con una circunferencia de 14 mm, para luego extruir con una profundidad de 1,3 mm.

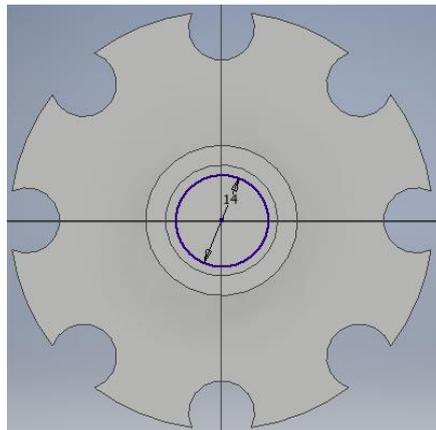


Figura 3.40 Boceto de la circunferencia de 14 mm.

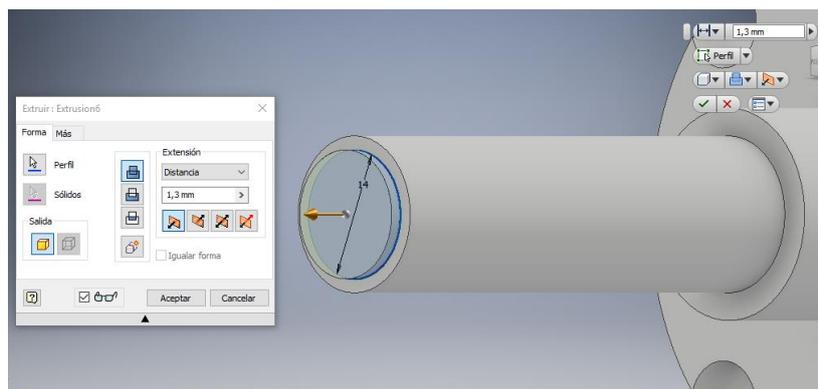


Figura 3.41 Extrusión de la circunferencia de 14 mm.

Sobre el diseño anterior se traza una circunferencia de 17 mm con una extrusión de 3,2 mm.

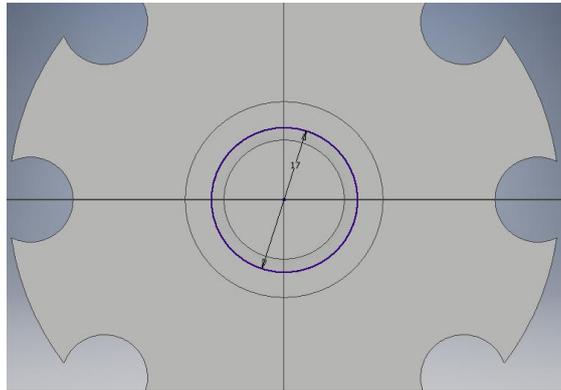


Figura 3.42 Boceto de la circunferencia de 17 mm.

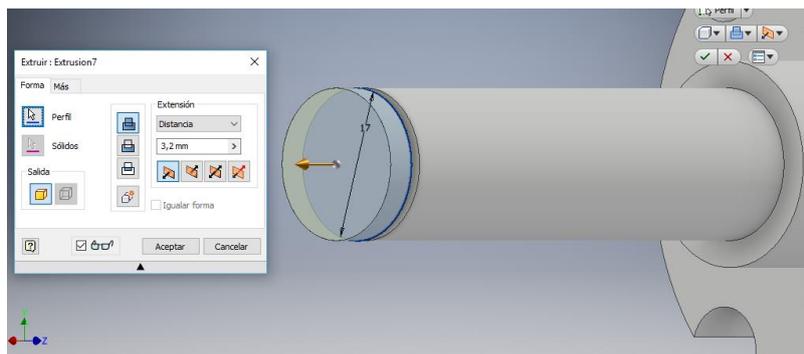


Figura 3.43 Extrusión de la circunferencia de 17 mm.

Para finalizar se dibuja un boceto como muestra la Figura 3.44 con el cual se suprime esa parte del eje para colocar la hélice.

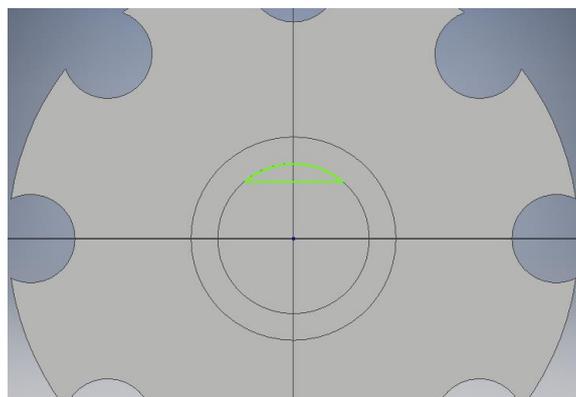


Figura 3.44 Boceto sobre el diseño anterior.

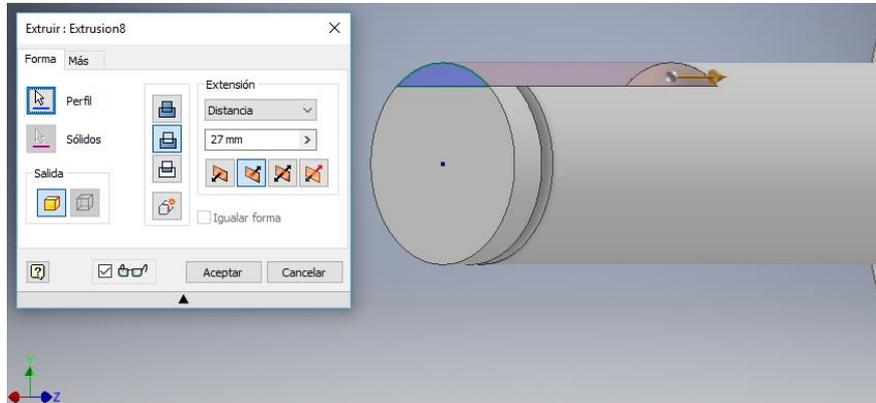


Figura 3.45 Extrusión del boceto.

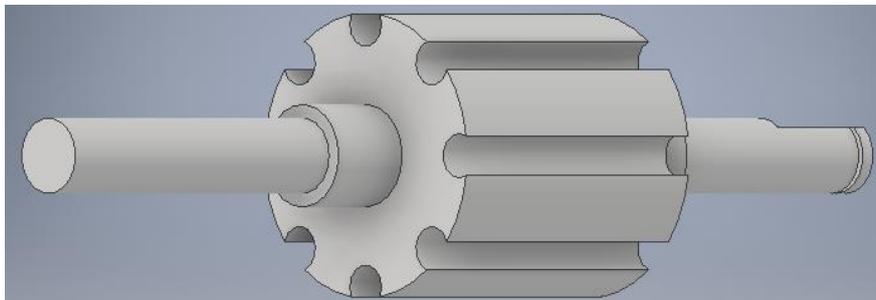


Figura 3.46 Rotor.

Para el bobinado del rotor se realizó un procedimiento similar al del estator.

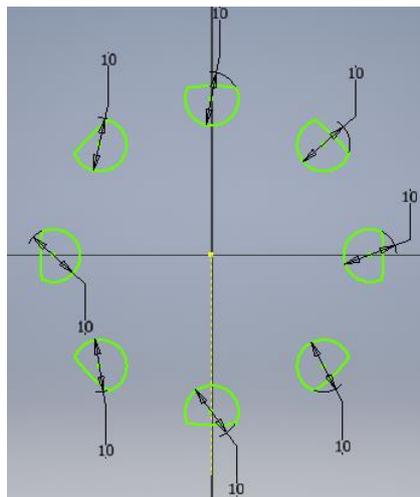


Figura 3.47 Boceto del Bobinado del rotor.

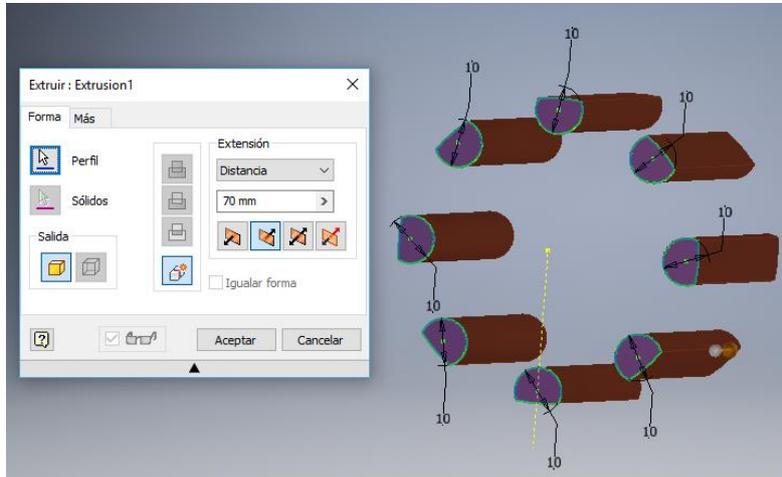


Figura 3.48 Extrusión del Bobinado del rotor.

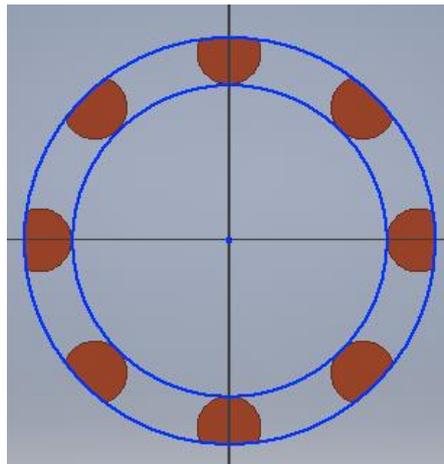


Figura 3.49 Boceto sobre el diseño anterior.

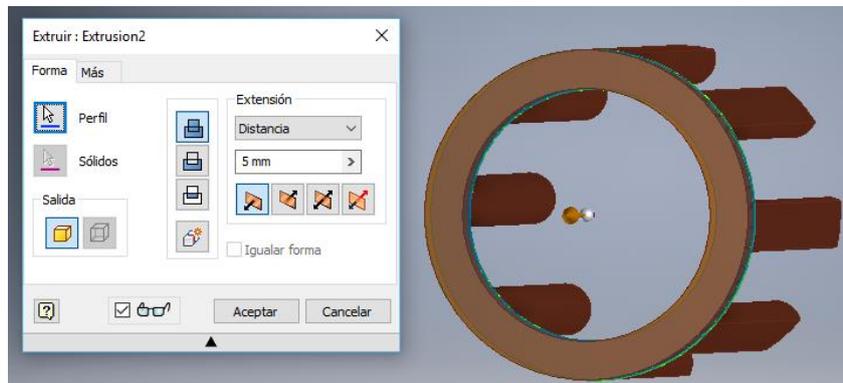


Figura 3.50 Extrusión del boceto anterior.

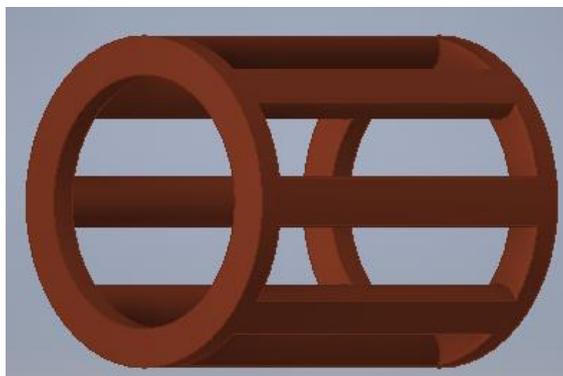


Figura 3.51 Bobinado del rotor.

Con lo que respecta al rotor de la Figura 3.5 para este análisis se omiten las diferentes ranuras que posee el cuerpo realizando. De esta forma el diseño es más sencillo que el anterior. Además, se creó el bobinado del rotor.

3.2.4 TAPA DELANTERA Y TRASERA.

Para la creación de la tapa del motor trifásico asíncrono se realiza un boceto como se muestra en la figura, en la cual se define la forma que va a tener esta pieza, junto con las pestañas en las cuales van a ir las tuercas. Después de eso se procede a realizar la extrusión del mismo a una profundidad de 8 mm.

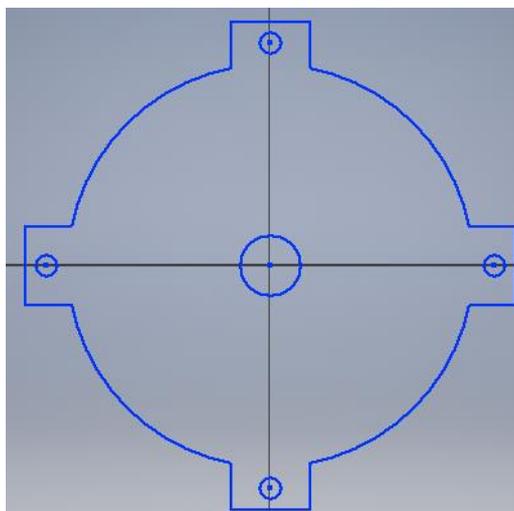


Figura 3.52 Boceto para la creación de la tapa.

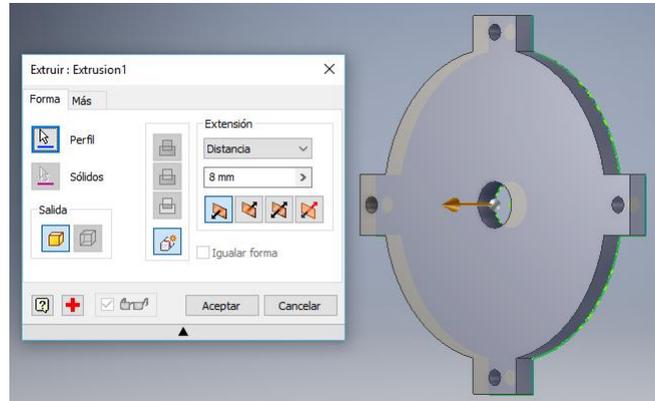


Figura 3.53 Extrusión del boceto anterior.

Se dibuja un boceto sobre la extrusión anterior dos circunferencias las mismas y se proceder a su extrusión.

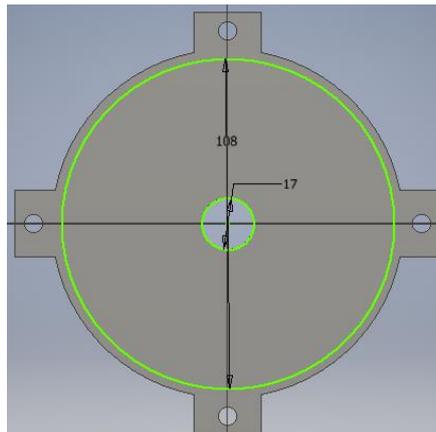


Figura 3.54 Boceto sobre el diseño anterior.

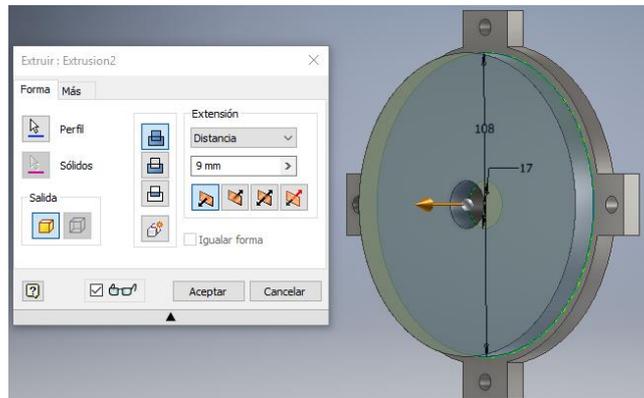


Figura 3.55 Extrusión del boceto anterior.

Se añaden los detalles en la parte posterior del boceto y se realiza la extrusión del mismo.

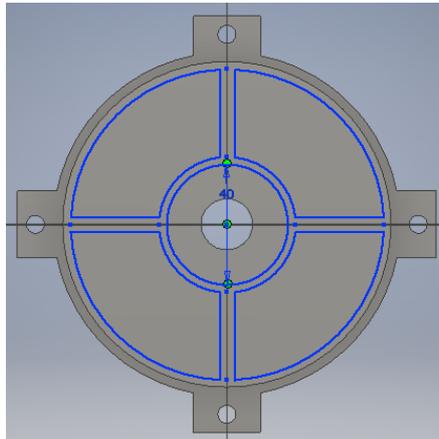


Figura 3.56 Boceto parte posterior.

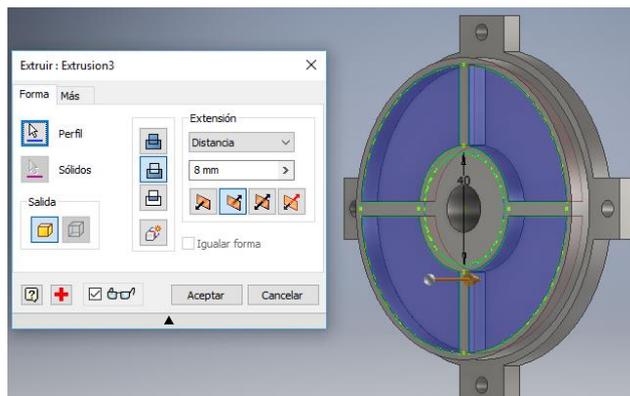


Figura 3.57 Extrusión del diseño anterior.

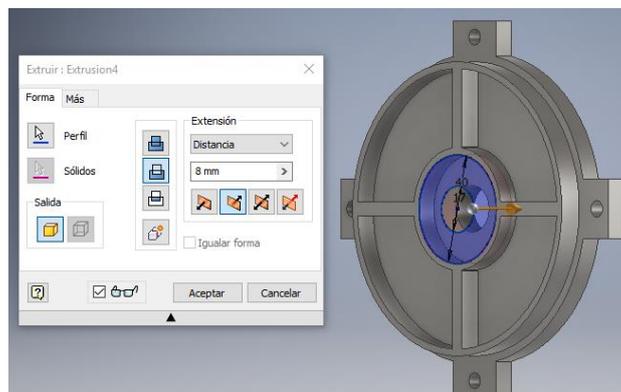


Figura 3.58 Extrusión parte posterior.

A continuación, se procede a realizar los diferentes detalles de la parte frontal de la tapa.

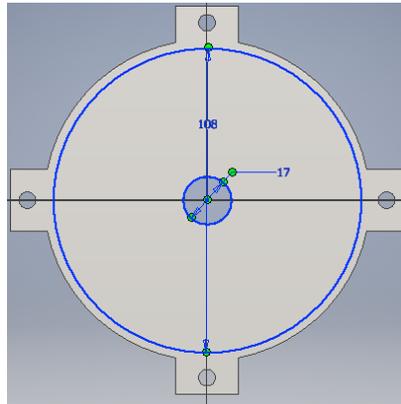


Figura 3.59 Boceto parte delantera.

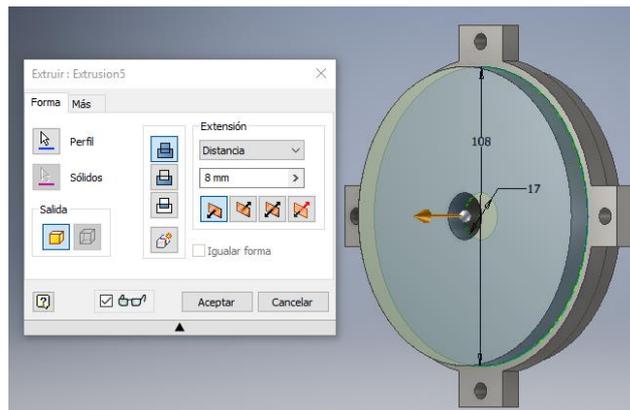


Figura 3.60 Extrusión.

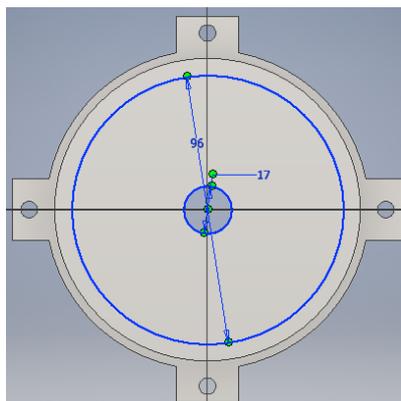


Figura 3.61 Boceto para crear agujero.

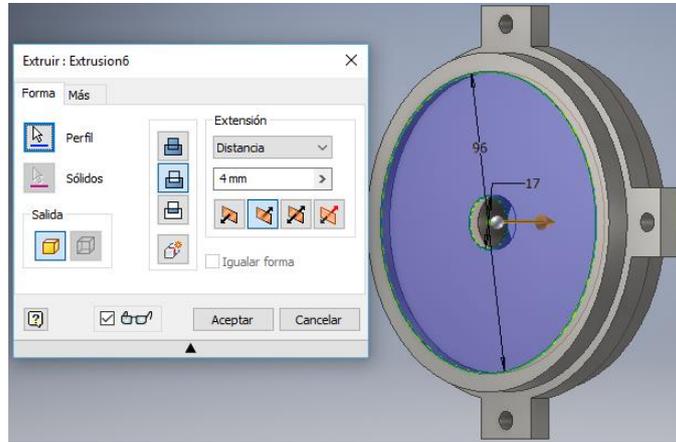


Figura 3.62 Extrusión de la parte posterior.

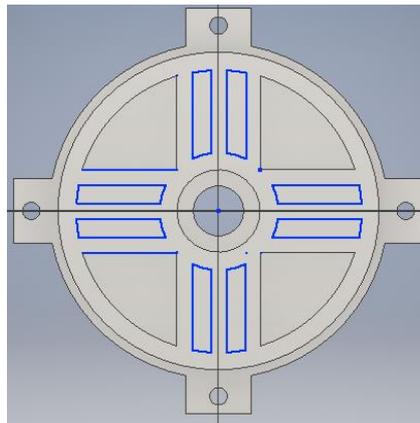


Figura 3.63 Boceto de las ranuras.

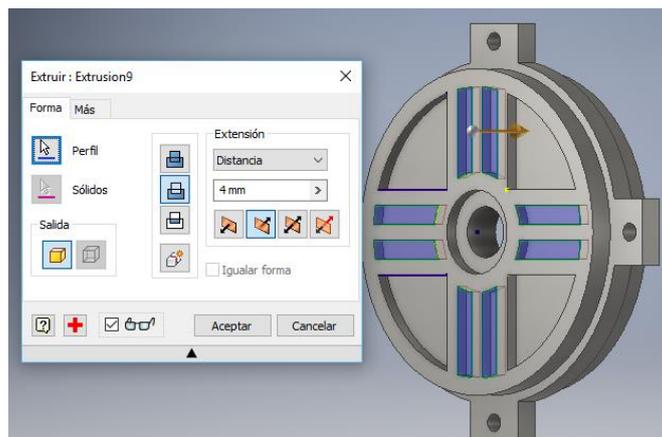


Figura 3.64 Extrusión de la parte posterior.

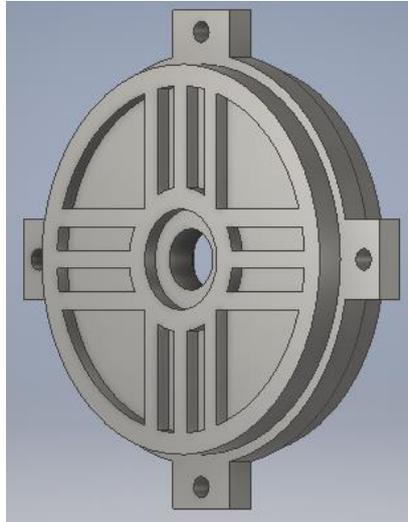


Figura 3.65 Tapa Delantera.

Para la modelación de la tapa trasera, el procedimiento es similar, pero es necesario incluir los agujeros donde van a colocarse los tornillos del protector. Con lo que respecta a la Figura 3.6, en las tapas se omitieron algunas ranuras, así como algunos detalles menores posteriores de la tapa y de las pestañas.

3.2.5 PROTECTOR.

Para el protector se crea un boceto de un cuadrado y posteriormente se procede a extruir con una profundidad de 75 mm.

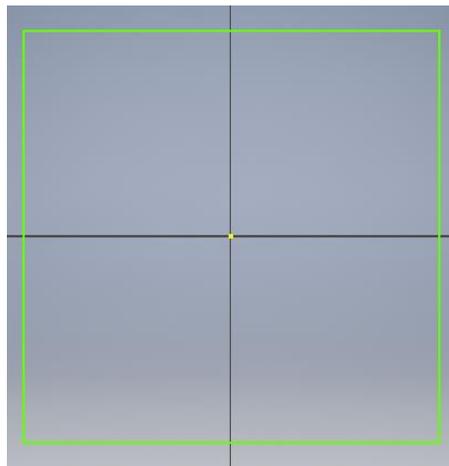


Figura 3.66 Boceto de un cuadrado.

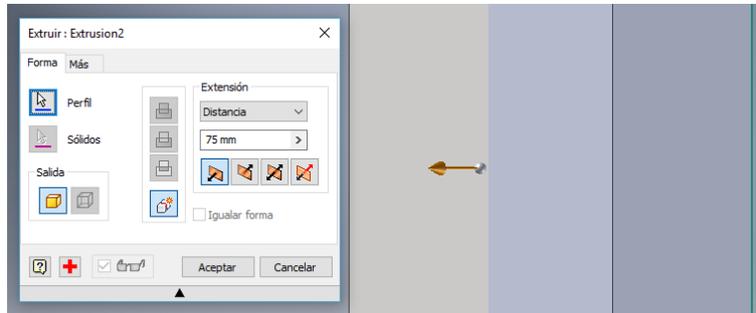


Figura 3.67 Extrusión del boceto.

Sobre el diseño anterior se realiza un boceto de una circunferencia para crear una extrusión, creando un agujero para el tornillo del protector.

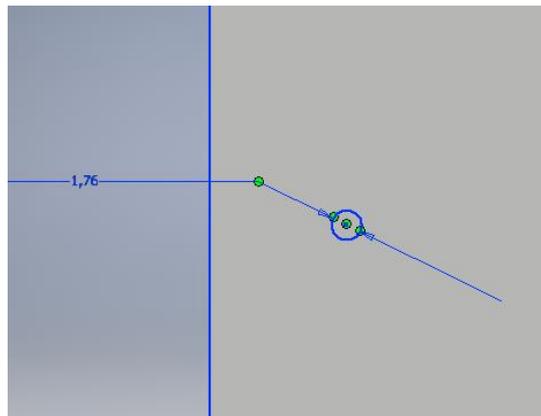


Figura 3.68 Boceto de una circunferencia.

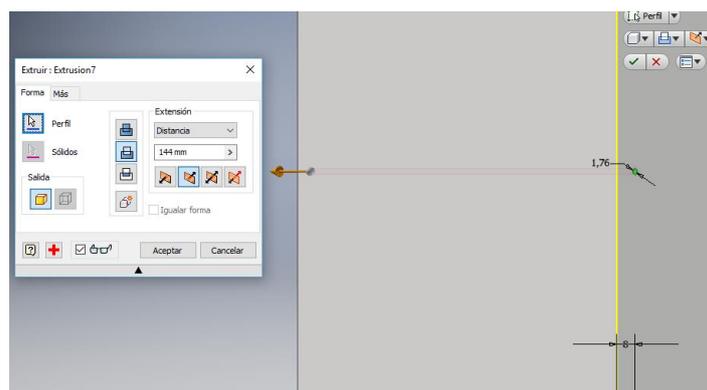


Figura 3.69 Extrusión del boceto.

Se diseña un boceto sobre el cubo trazando una circunferencia con la cual al momento de extruir se le da la forma cilíndrica al protector.

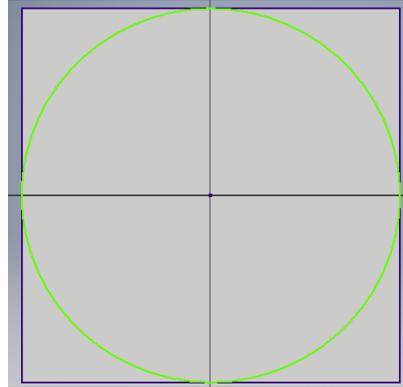


Figura 3.70 Boceto sobre el cubo.

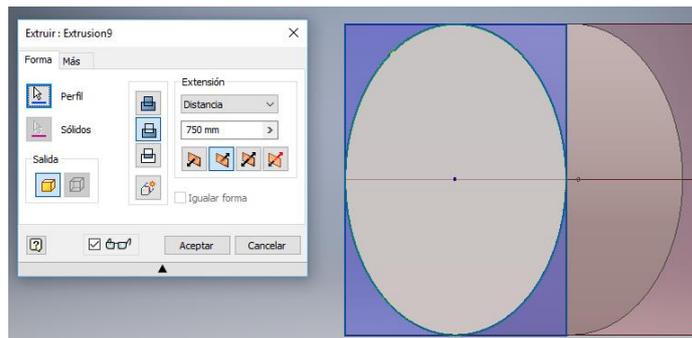


Figura 3.71 Extrusión para crear el cilindro.

Sobre este cilindro se realiza un boceto con una circunferencia con la cual al momento de extruir crea un corte.

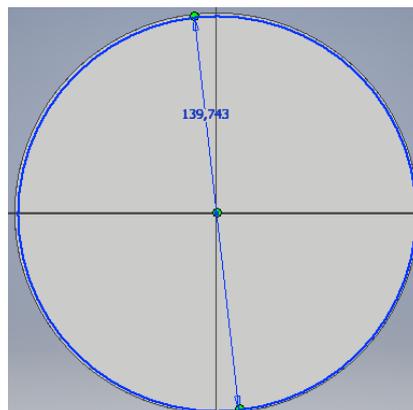


Figura 3.72 Boceto de la circunferencia.

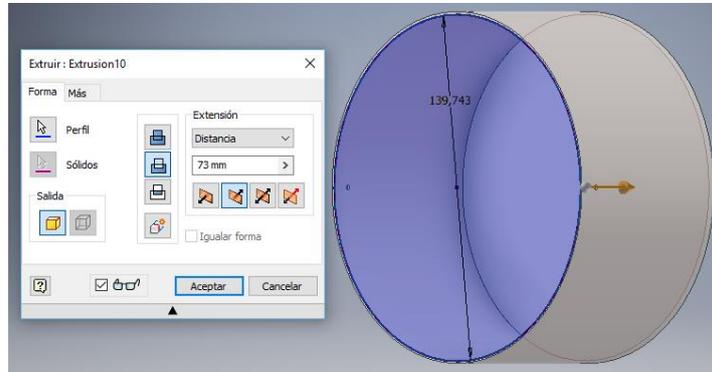


Figura 3.73 Extrusión del corte del cilindro.

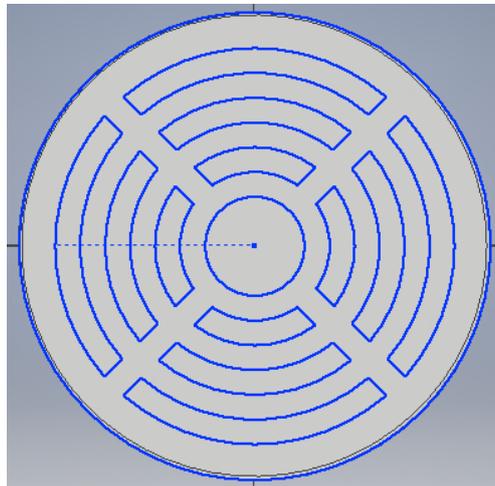


Figura 3.74 Boceto parte posterior del protector.

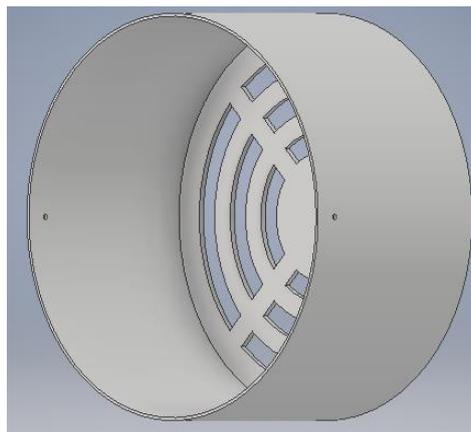


Figura 3.75 Protector.

3.2.6 VENTILADOR.

Para el ventilador del motor, primero se realiza un boceto de una circunferencia, para luego proceder a extruir creando un cilindro.

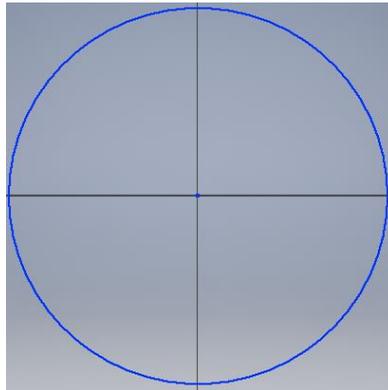


Figura 3.76 Boceto circunferencia.

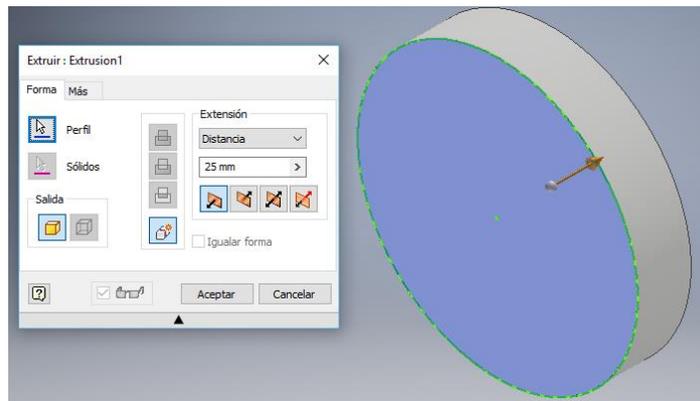


Figura 3.77 Extrusión del boceto anterior.

Sobre el cilindro anterior se realiza un boceto como se puede observar en la Figura 3.78, el mismo que se va a extruir para cortar al cilindro y con esto proceder a modelar las aspas.

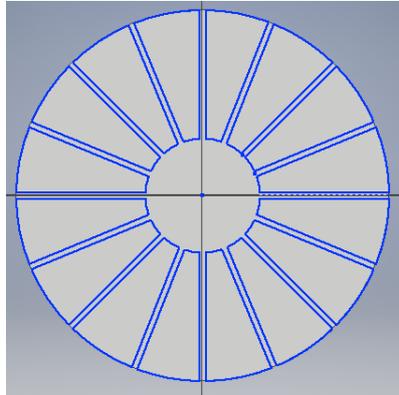


Figura 3.78 Boceto para crear las aspas.

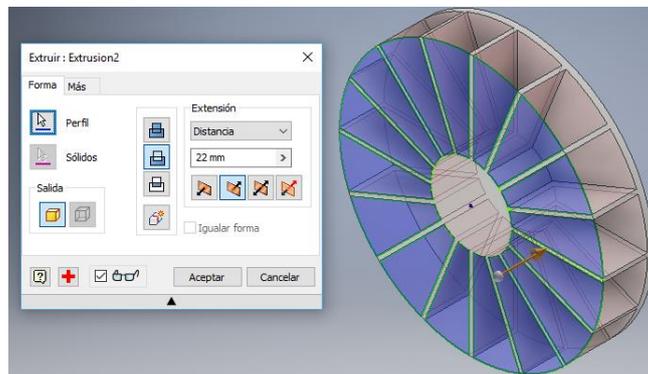


Figura 3.79 Extrusión de las aspas.

En el centro del cilindro se procede a realizar un boceto para generar una extrusión para incluir un agujero para el eje del rotor.

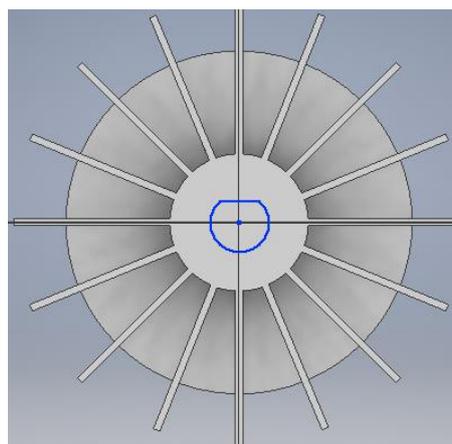


Figura 3.80 Boceto agujero del eje.

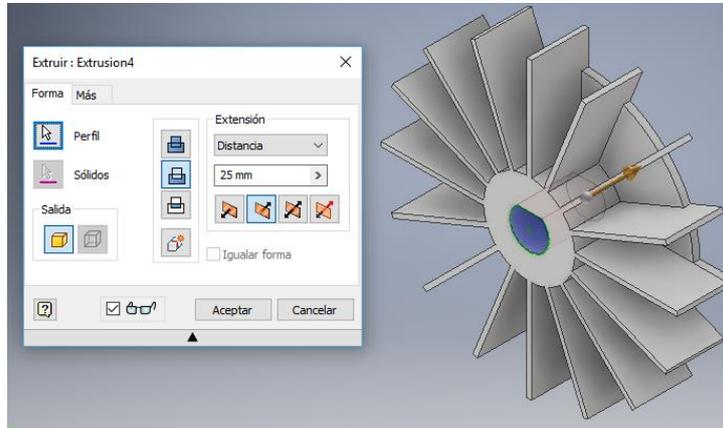


Figura 3.81 Extrusión agujero del eje.

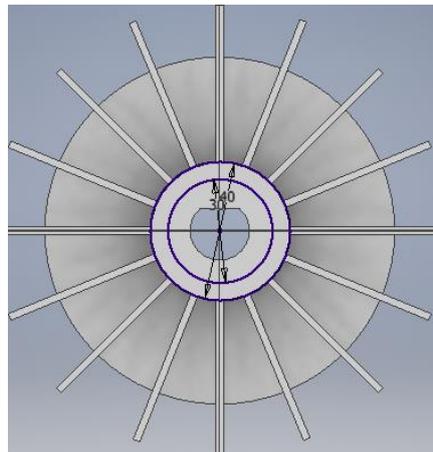


Figura 3.82 Boceto del centro del ventilador.

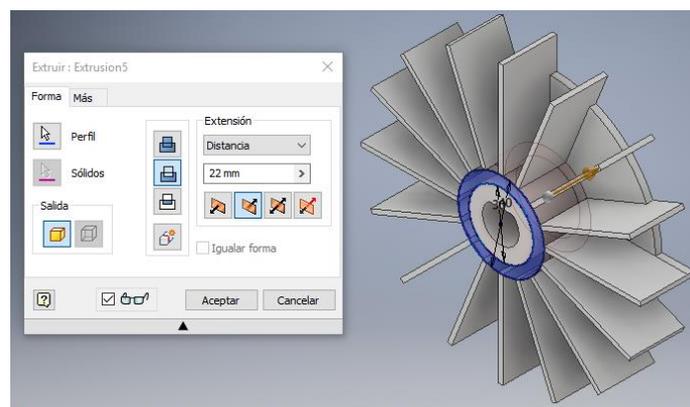


Figura 3.83 Extrusión del centro del ventilador.

Mediante la opción de empalme se procede a dar la forma a las aspas del ventilador, realizando el procedimiento tanto en la parte superior como en la inferior de las aspas.

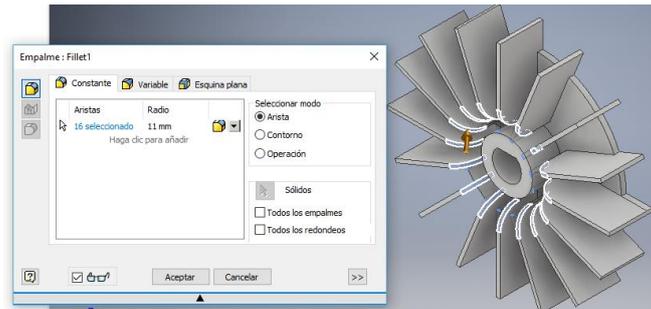


Figura 3.84 Empalme de las aspas.

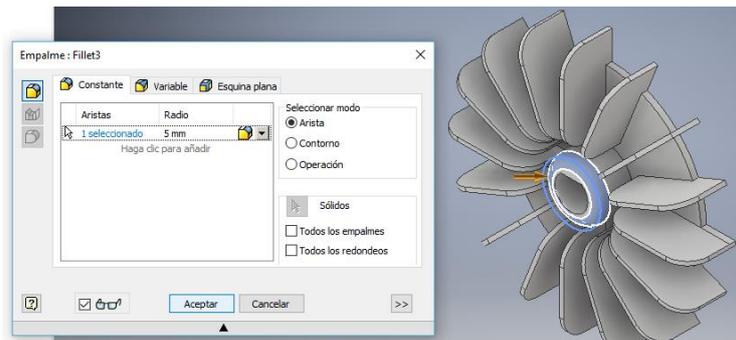


Figura 3.85 Empalme del centro del ventilador.

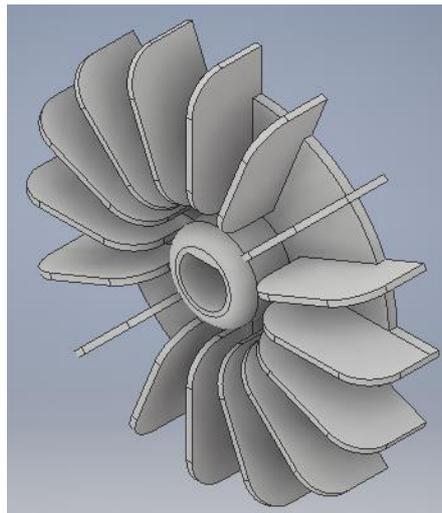


Figura 3.86 Ventilador.

3.2.7 RODAMIENTO.

Para el diseño del rodamiento, primero se realiza el boceto como se muestra en la Figura 3.87. Posteriormente a diferencia de los diseños anteriores, en este caso se realiza una revolución con lo cual se obtiene el modelo del rodamiento.

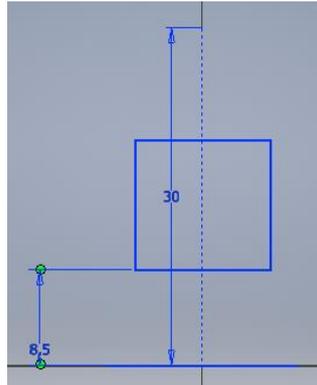


Figura 3.87 Boceto para el rodamiento.

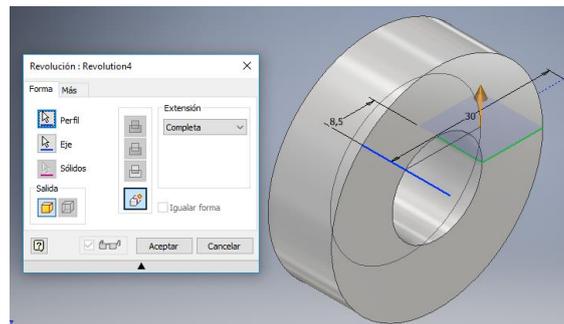


Figura 3.88 Extrusión del boceto.

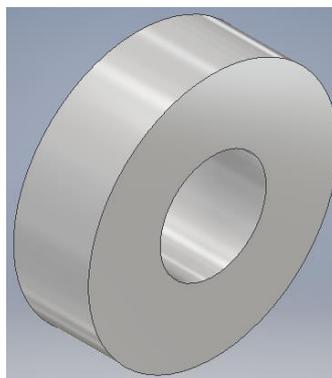


Figura 3.89 Rodamiento.

En el caso del rodamiento se define como un sólido, omitiendo las diferentes esferas que se encuentran en el interior del rodamiento, debido a que en el análisis solo nos interesa lo que sucede entre el rodamiento y el rotor.

3.2.8 TORNILLOS.

Para la modelación del tornillo para la tapa del motor, primero se dibuja un boceto con una circunferencia de 10 mm, al mismo que luego se realiza la extrusión con una profundidad de 6 mm.

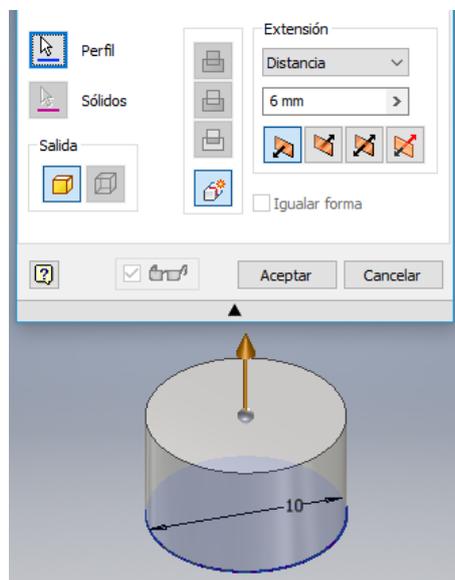


Figura 3.90 Extrusión de una circunferencia.

En este diseño también se va a crear la arandela y después de la cabeza del tornillo para lo cual se dibuja una circunferencia de 13 mm y luego se extrae con una profundidad de 1.75mm.

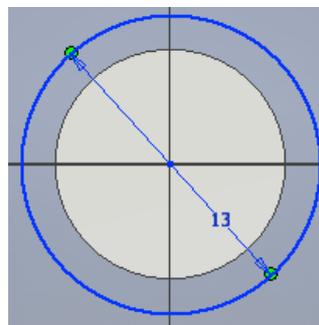


Figura 3.91 Boceto sobre el diseño anterior.

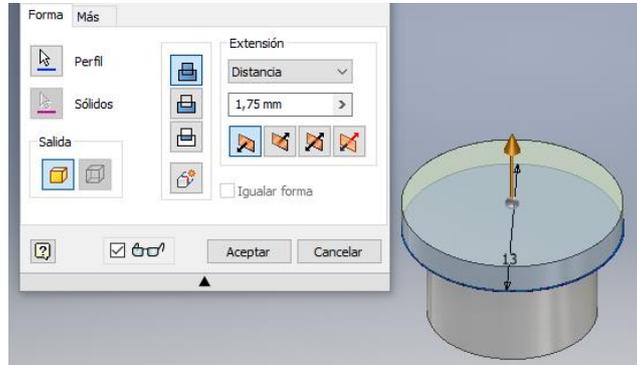


Figura 3.92 Extrusión sobre el diseño anterior.

Sobre este diseño se dibuja otro boceto de una circunferencia de 6 mm y luego se realiza su extrusión para obtener el diseño final.

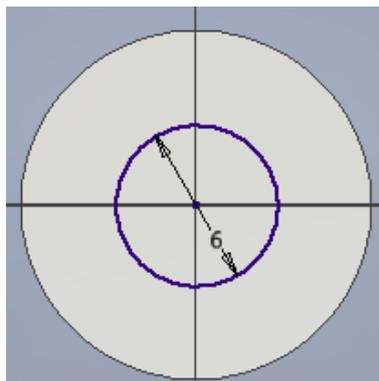


Figura 3.93 Boceto sobre el diseño anterior.

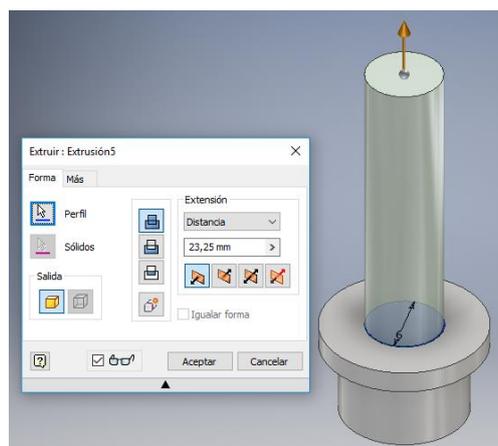


Figura 3.94 Extrusión sobre el diseño anterior.

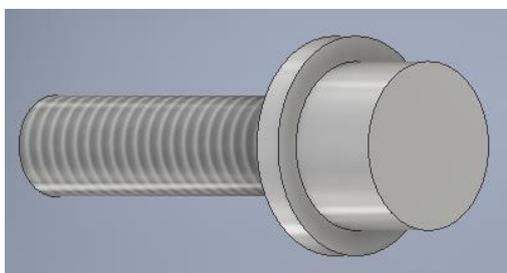


Figura 3.95 Tornillo.

Para los tornillos que van a sujetar la tapa trasera con el protector se realiza un procedimiento muy similar al tornillo de la carcasa y la tapa.

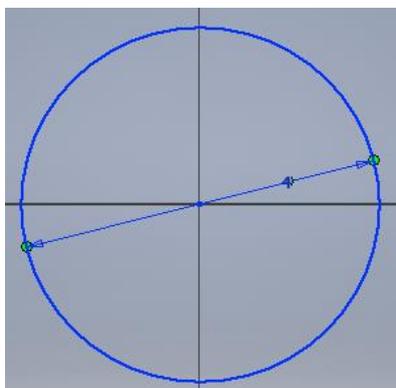


Figura 3.96 Boceto de la circunferencia.

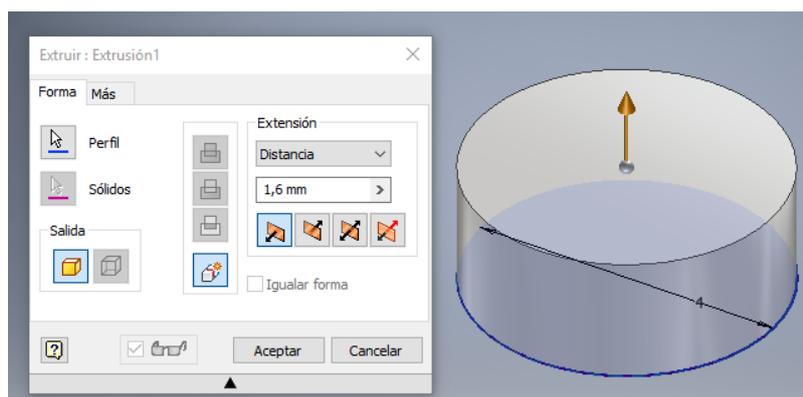


Figura 3.97 Extrusión de la circunferencia.

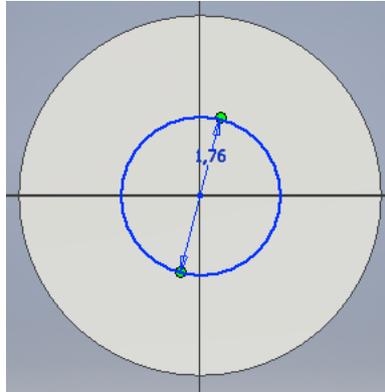


Figura 3.98 Boceto sobre el diseño anterior.

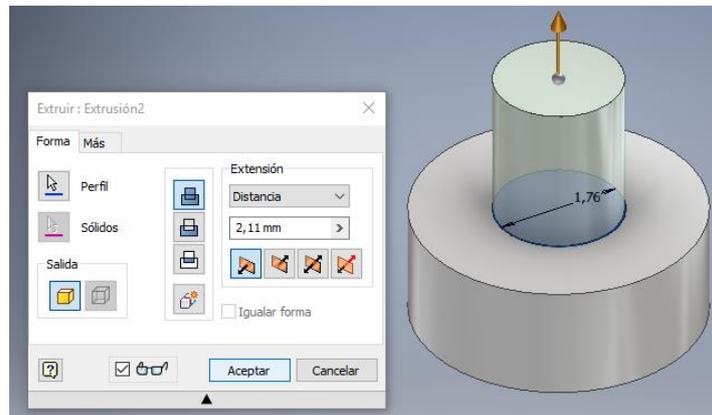


Figura 3.99 Extrusión sobre el diseño anterior.

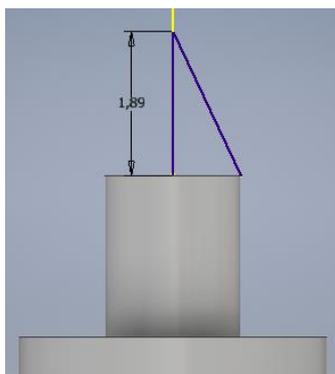


Figura 3.100 Boceto para la punta.

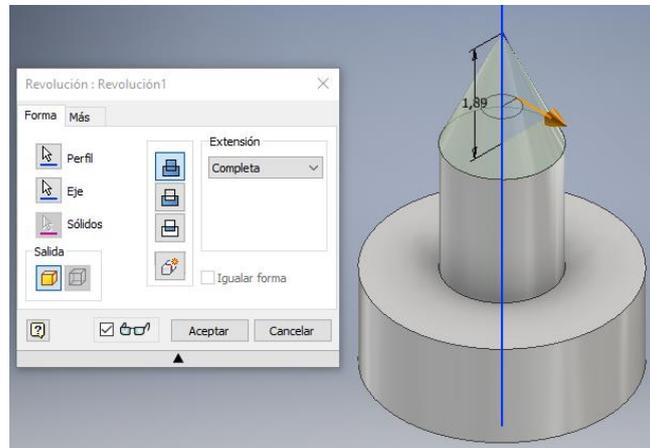


Figura 3.101 Extrusión para la punta.

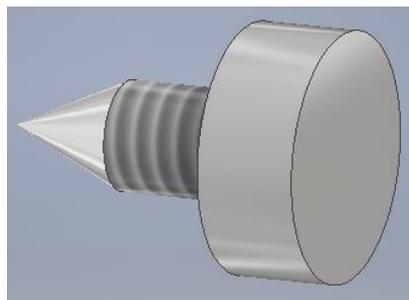


Figura 3.102 Tornillo.

Con lo que respecta a los diferentes tornillos para este diseño se pueden omitir detalles como la cabeza de los tornillos ya que en este análisis no contempla la presión que va ejercer el destornillador sobre los tornillos durante su ajuste.

3.2.9 TUERCA.

Para la tuerca se realiza un boceto en el cual se dibuja un hexágono que posteriormente se extruye con una profundidad de 5.7mm.

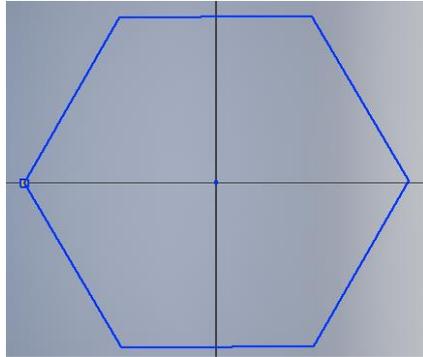


Figura 3.103 Boceto del Hexágono.

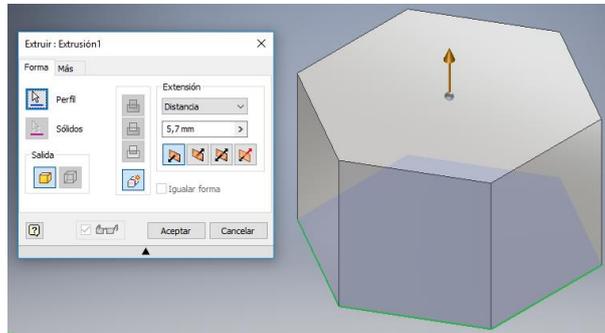


Figura 3.104 Extrusión del Hexágono.

A continuación, se incluye un agujero con un diámetro de 6mm dibujando un boceto sobre el hexágono para luego extruir el mismo.

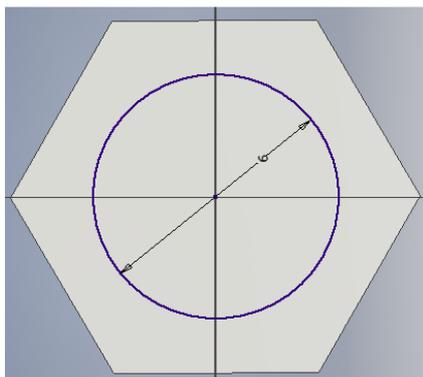


Figura 3.105 Boceto sobre el diseño anterior.

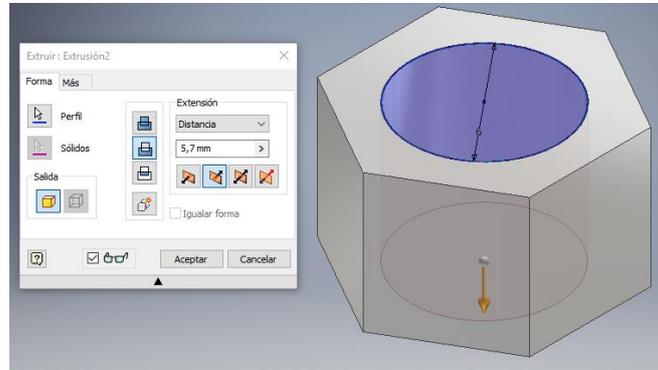


Figura 3.106 Extrusión del boceto anterior.

En la tuerca se realiza un solo cuerpo hexagonal con un diseño más sencillo con respecto al anterior.

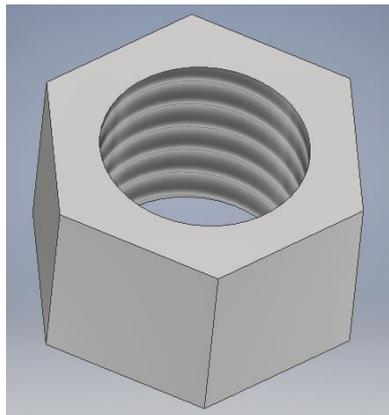


Figura 3.107 Tuerca.

3.2.10 ENSAMBLE DEL MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO DISEÑADO.

Para el ensamble se introducen las restricciones (insertar, tangencial y coincidencia) y las condiciones (rotacional, rígido) para que las diferentes partes del motor formen un solo conjunto para su posterior análisis en ANSYS. Primero se deben unir el estator con el bobinado del motor.

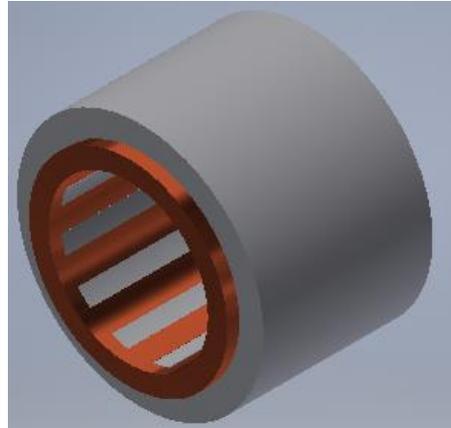


Figura 3.108 Ensamble Estator-Bobinado.

Luego se procede a unir el estator con el rotor y su respectivo bobinado.

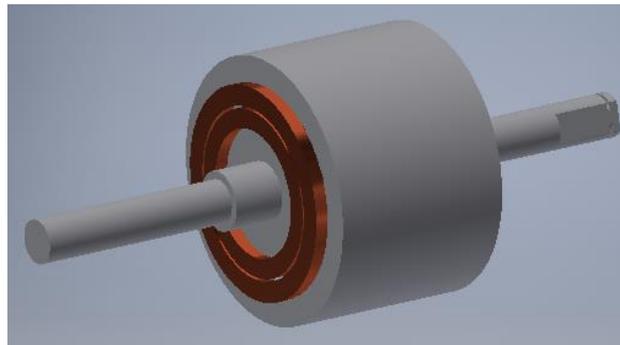


Figura 3.109 Ensamble Rotor-Estator.

Después se añaden las piezas anteriores con la carcasa del motor.

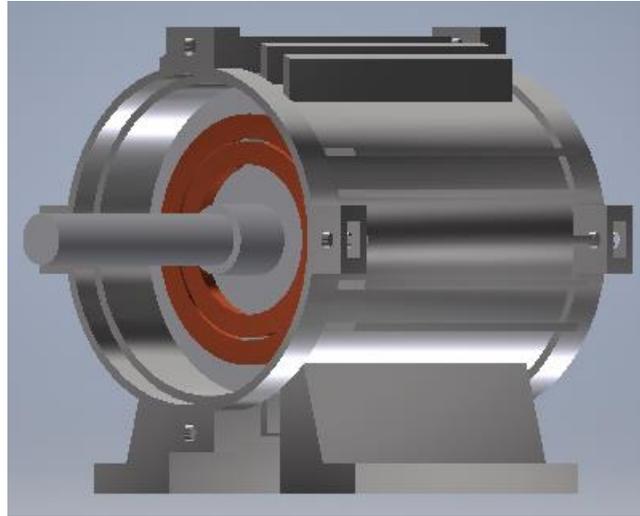


Figura 3.110 Ensamble Carcasa.

Se procede a montar los rodamientos con el eje del rotor.

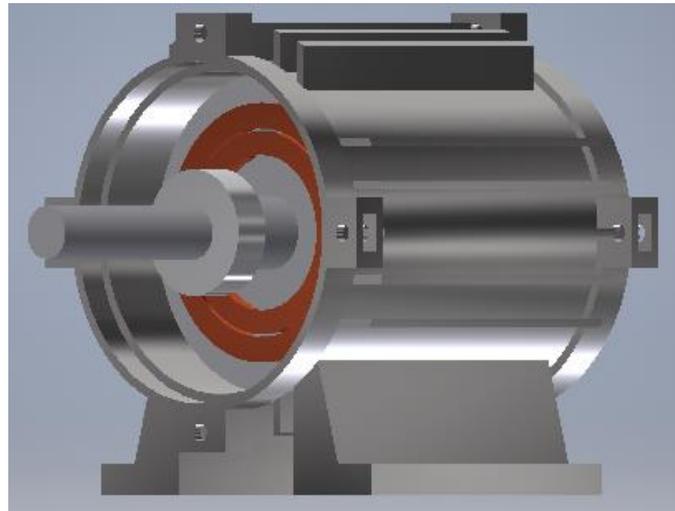


Figura 3.111 Ensamble del Rodamiento.

Se procede a colocar las tapas en la carcasa del motor.

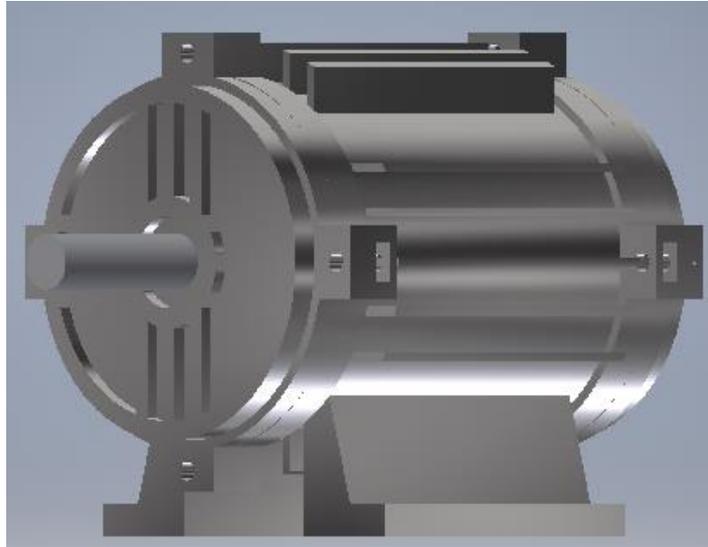


Figura 3.112 Ensamble Tapa Trasera.

En la parte posterior del rotor se inserta el retén.

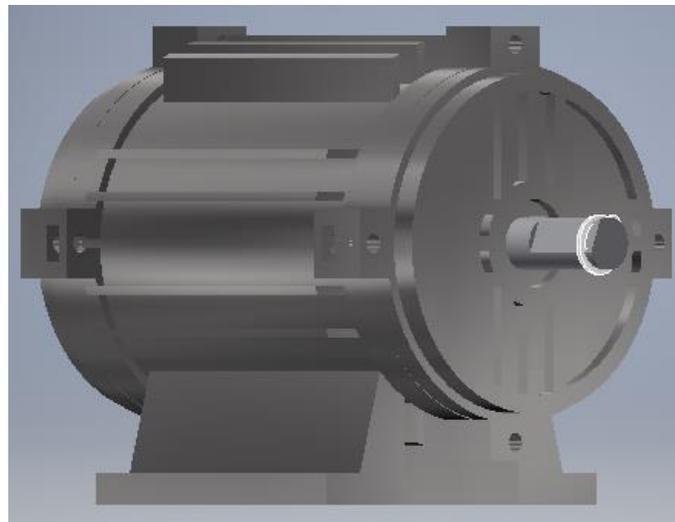


Figura 3.113 Ensamble Retén.

La siguiente pieza que se ensambla es la hélice con el eje del rotor.

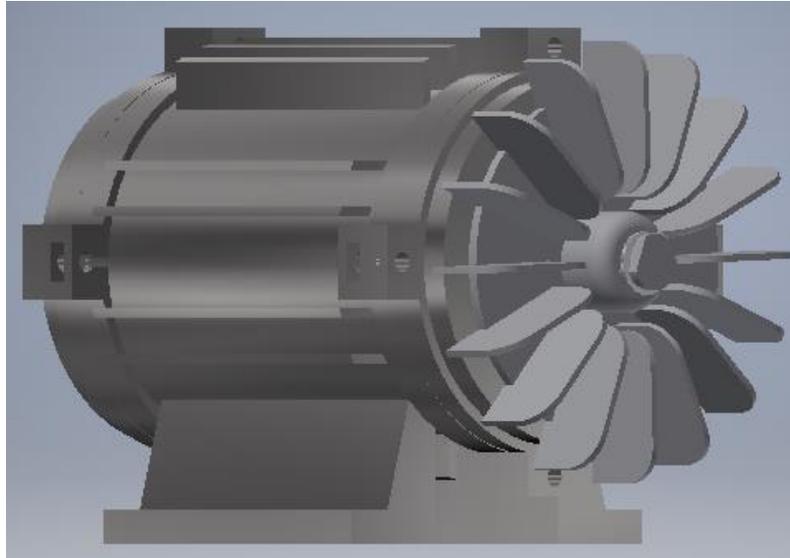


Figura 3.114 Ensamble de la Hélice.

Seguidamente se colocan las tuercas en las tapas del motor.

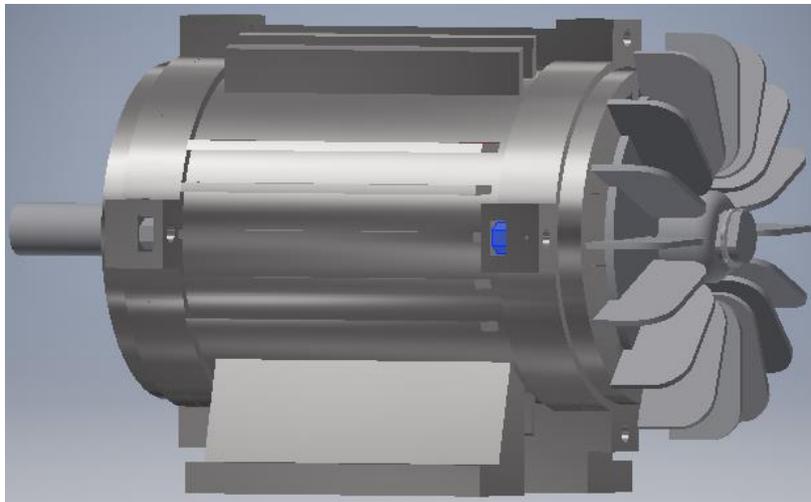


Figura 3.115 Ensamble de las Tuercas.

Se colocan los tornillos en las tapas del motor.

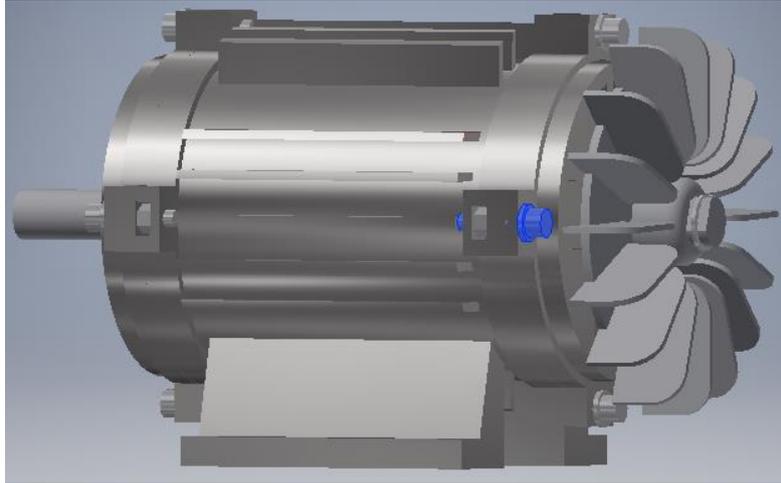


Figura 3.116 Ensamble del Tornillo.

Se añade el protector a la tapa trasera.

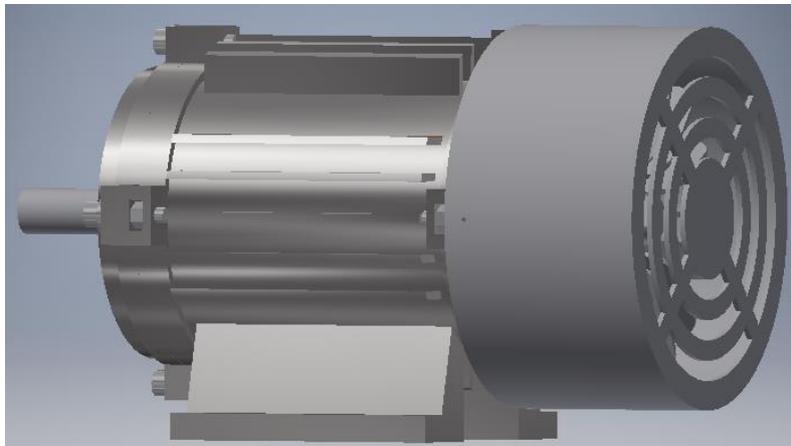


Figura 3.117 Ensamble del Protector.

Por último, se incluyen los tornillos para ajustar el protector con la tapa trasera.

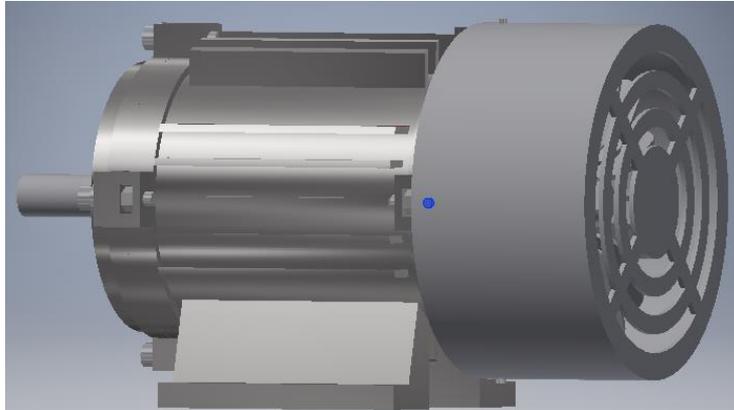


Figura 3.118 Ensamble de los Tornillos del Protector.

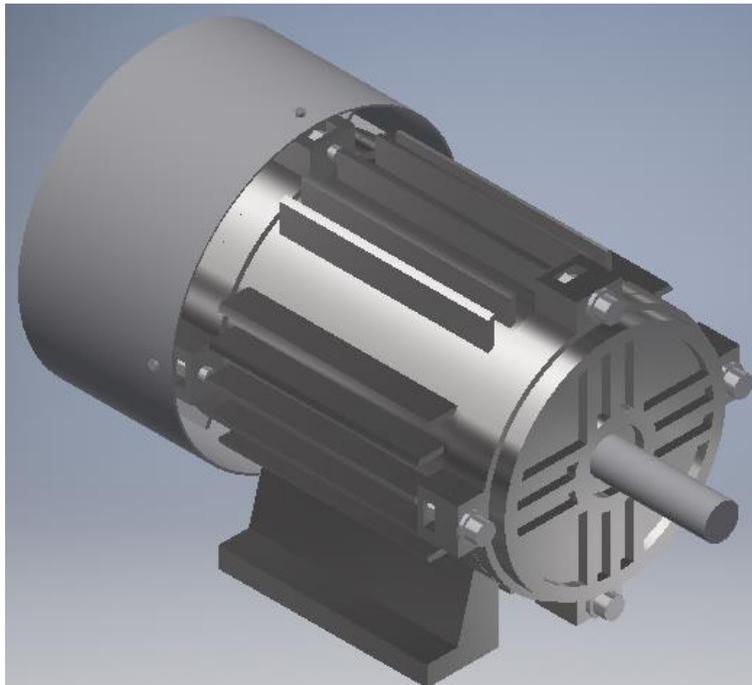


Figura 3.119 Ensamble del motor asíncrono trifásico.

3.3 SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR ASINCRONO TRIFASICO EN ANSYS WORCKBENCH.

Con lo que respecta a la simulación en ANSYS WORKBENCH se realiza el análisis: Rigid Dynamics, Static Structural y Modal. Primero escogemos las unidades a la cual vamos a realizar nuestros análisis. Ahora se procede añadir los materiales de los diferentes elementos del motor en la opción de Engineering Data los mismos que son: Aluminum Alloy, Copper Alloy, Gray Cast Iron, Stainless Steel.

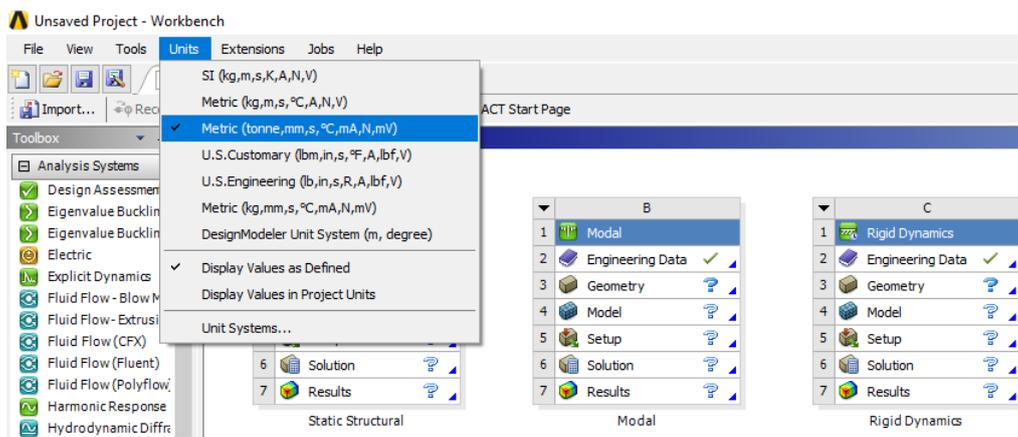


Figura 3.120 Unidades.

Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	E
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
3	Aluminum Alloy		General	General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK -5H, page 3-277.
4	Copper Alloy		General	
5	Gray Cast Iron		General	
6	Stainless Steel		General	
7	Structural Steel		General	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Properties of Outline Row 7: Structural Steel				
	A	B	C	E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
16	Strain-Life Parameters			
24	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Figura 3.121 Materiales a usar en el análisis.

Lo siguiente que se va realizar es añadir la geometría que fue creada en Inventor que para lo cual se guardó el ensamble como .stp

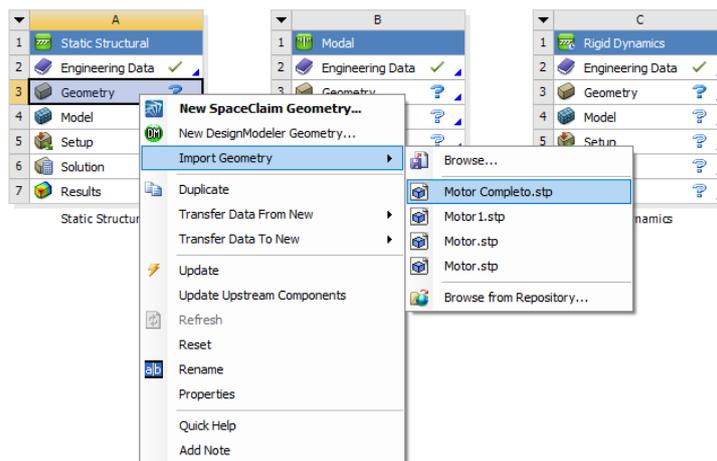


Figura 3.122 Importación de la geometría.

Luego de ingresar en Model procedemos a generar el mallado de la geometría, el mismo que se va ser utilizado en el análisis Static Structural, el Modal y Rigid Dynamics. En el mallado se utilizó una relevancia del 100%, en el caso de size function se utilizó la opción de Curvature debido a que el diseño del motor está compuesto principalmente por curvas y cilindros, en relevance center y span angle center se usó la opción de fine, con lo que respecta a mesh metric se usó element quality obteniendo un mallado de un 85% con 1.437.406 nodos y 348.623 elementos.

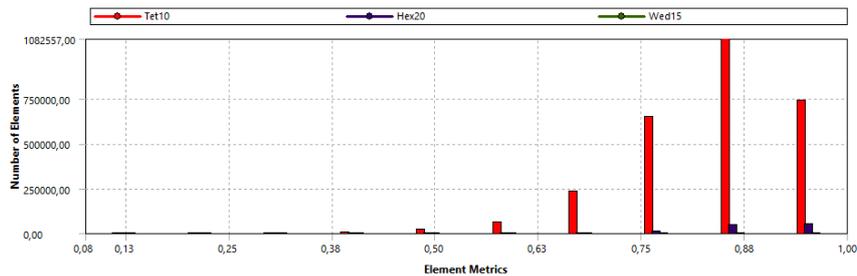


Figura 3.123 Mallado.

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	100
Element Order	Program Controlled
Sizing	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Fine
Transition	Fast
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Nor...	Default (12,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (2,6475e-002 mm)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (2,64750 mm)
<input type="checkbox"/> Max Tet Size	Default (5,2950 mm)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,50)
Automatic Mesh ...	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (1,3237e-002 mm)
Minimum Edge L...	4,9993e-002 mm
Quality	
Check Mesh Qua...	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	2,3531e-003
<input type="checkbox"/> Max	0,99996
<input type="checkbox"/> Average	0,85522
<input type="checkbox"/> Standard Devi...	0,21514
Inflation	
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1437406
<input type="checkbox"/> Elements	348623

Figura 3.124 Detalles del mallado.

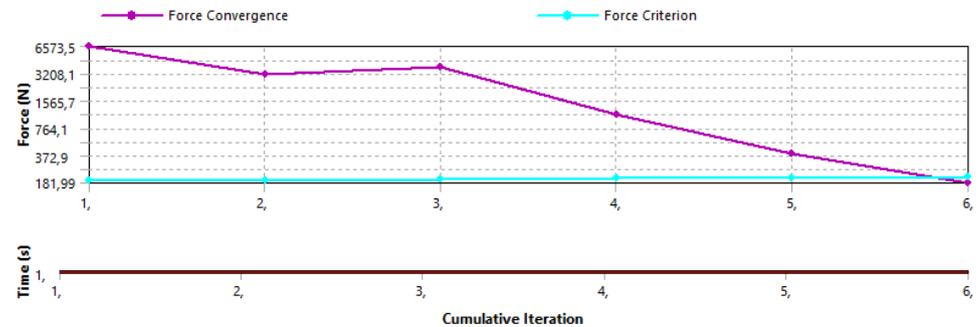


Figura 3.125 Convergencia.

3.3.1 Static Structural.

El análisis estático realizado en el programa Ansys, permite el estudio de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y fuerzas axiales y de corte como resultado de la aplicación de cargas estáticas. Este tipo de análisis es adecuado cuando las cargas son bien conocidas y el máximo esfuerzo es evidente.

En el caso del Static Structural se va analizar solamente la carcasa del motor conjuntamente con los tornillos y sus respectivas tuercas, por lo cual el resto de elementos del motor trifásico se omiten, primero se procede a crear los diferentes contactos utilizando para este caso Frictional y Bonded, para el primer caso se utilizó un coeficiente de fricción de 0,2, behavior symmetric, formulation augmented lagrange y en detection method on gauss point, para el segundo caso behavior symmetric, formulation pure penalty y en detection method on gauss point.

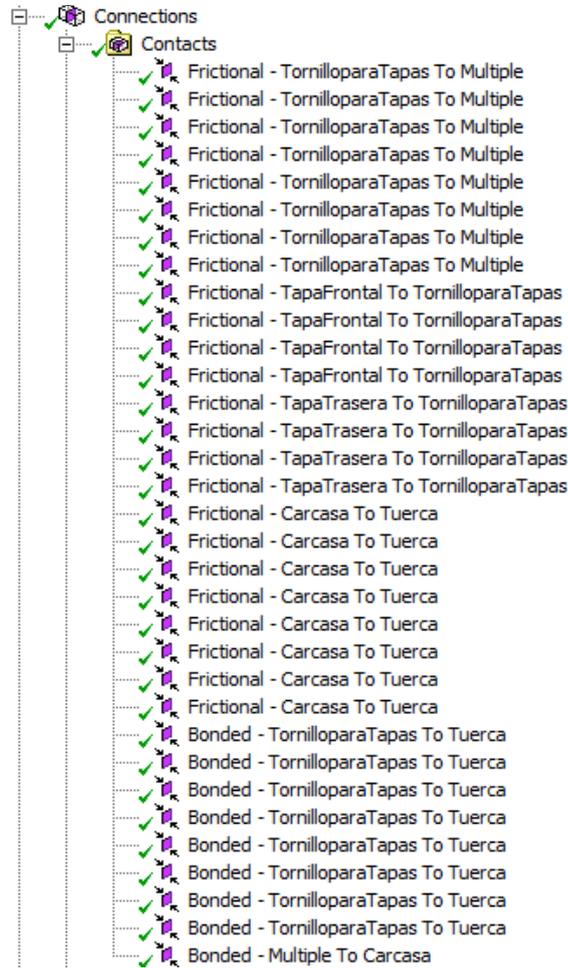


Figura 3.126 Contactos.

A continuación, se va configurar las diferentes condiciones de frontera para el análisis Static Structural, de las opciones Supports se utiliza Fixed Support el mismo que va ser sometido en la base de la carcasa del motor, de las opciones de Loads se escoge la opción de Bolt Pretensión el cual se aplicará una fuerza de 13040Nm el mismo que se obtuvo de una Tabla ingresando el modelo del tornillo el mismo que es M6x25.

Metric thread :	M6	12.9
Initial tensile stress : $\sigma_t =$	0.6	$\cdot R_{p0.2}$
Thread coeff. of friction : $\mu_{thread} =$	0.15	
Head - face coeff. of friction : $\mu_{head} =$	0.15	
<input type="button" value="Solve"/> <input type="button" value="Reset"/> <input type="button" value="Print"/>		
pitch P	1	mm
pitch diameter d_2	5.35	mm
root diameter d_3	4.773	mm
tensile stress area $A_t = \pi/4 d_0^2$; $d_0 = (d_2 + d_3)/2$	20.12	mm ²
ultimate tensile strength R_m	1200	MPa
yield strength $R_{p0.2}$	1080	MPa
tensile stress $\sigma_t = \sigma'_t \times R_{p0.2}$	648	MPa
torsional stress $\tau = M_G / (\pi/16 d_3^3)$	384.1	MPa
equivalent stress $\sigma_e = (\sigma_t^2 + 3\tau^2)^{1/2}$	928.71	MPa
thread friction M_G	8.2	Nm
thread friction M_G	-3.93	Nm
head face friction $M_{WD} = F_i \mu_{head} 1.3 d/2$	7.63	Nm
Total tightening torque $M_A = M_G + M_{WD}$	15.83	Nm
Initial preload $F_i = \sigma_t \cdot A_t$	13.04	kN
Load at Yield $F_{0.2} = R_{p0.2} \cdot A_t$	21.73	kN
Load reserve $P_b = F_{0.2} - F_i$	8.69	kN

1) stress by torsion is relaxed after tightening.
2) equivalent stress should remain below the yield strength (linear elastic).

www.tribology-abc.com

Figura 3.127 Tabla de especificaciones técnicas del tornillo M6x25. (Tightening torque to preload a bolt, 2010)

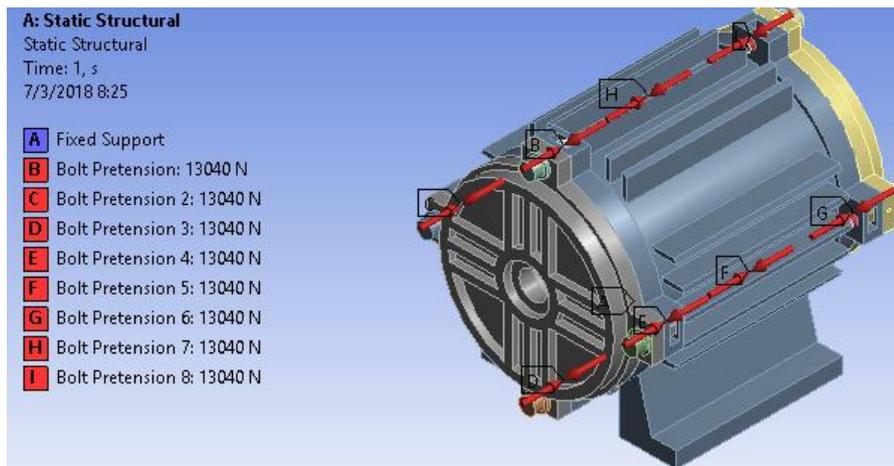


Figura 3.128 Bolt Pretension de 13040N.

3.3.2 Modal.

El análisis modal es el proceso para determinar las características dinámicas del sistema en forma de frecuencias naturales, factores de amortiguamiento y forma de los modos, y así usándolos para formular un modelo de comportamiento dinámico. El modelo obtenido es el llamado modelo modal de un sistema y su información es referida como su información modal.

Para el análisis modal se realizó el análisis de cada uno de los diferentes elementos que componen al motor, para obtener las frecuencias naturales de cada una de ellas.

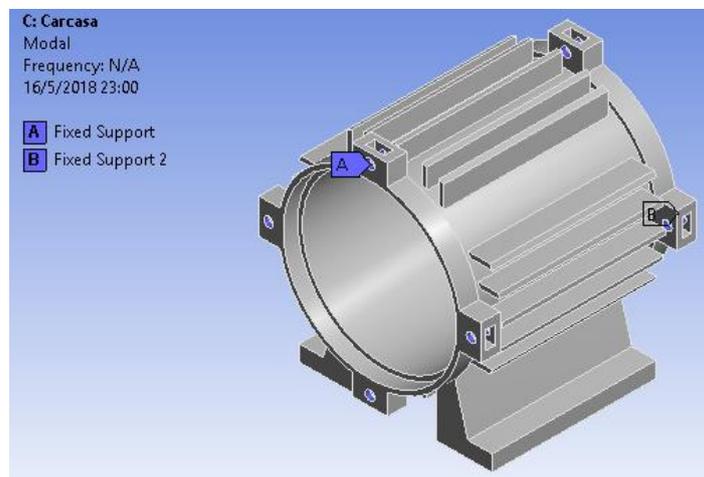


Figura 3.129 Análisis modal de la carcasa.

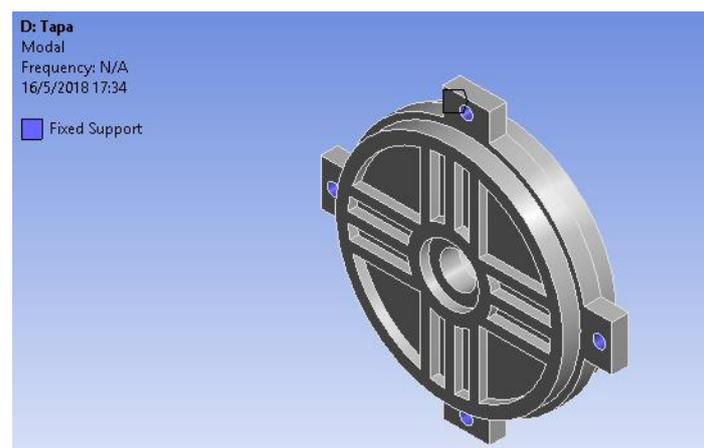


Figura 3.130 Análisis modal de la tapa.

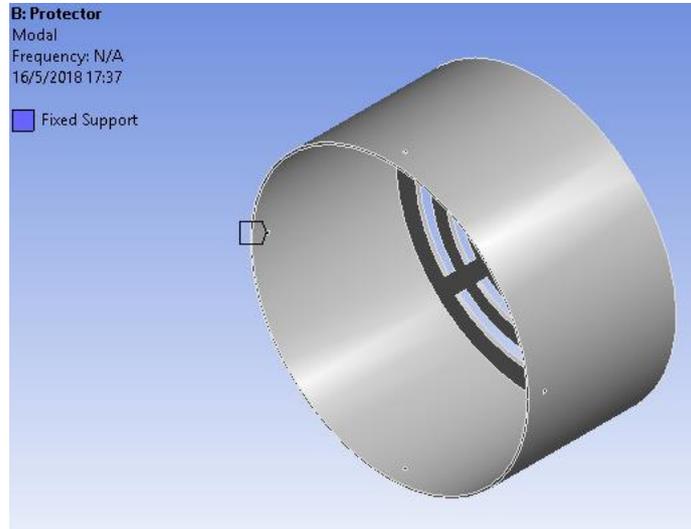


Figura 3.131 Análisis modal del protector.

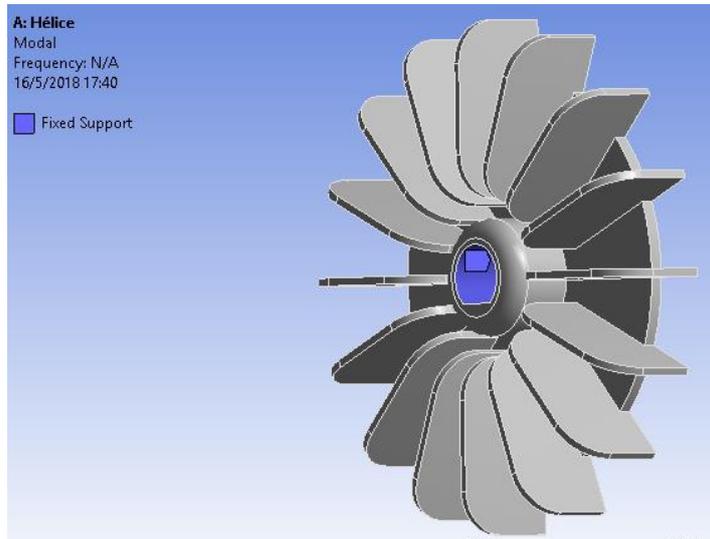


Figura 3.132 Análisis modal de la hélice.

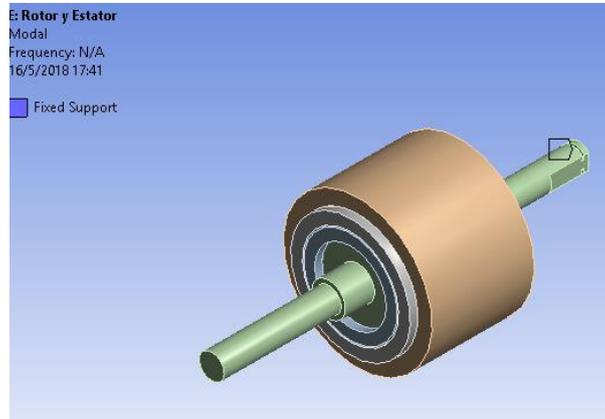


Figura 3.133 Análisis modal del rotor y estator.

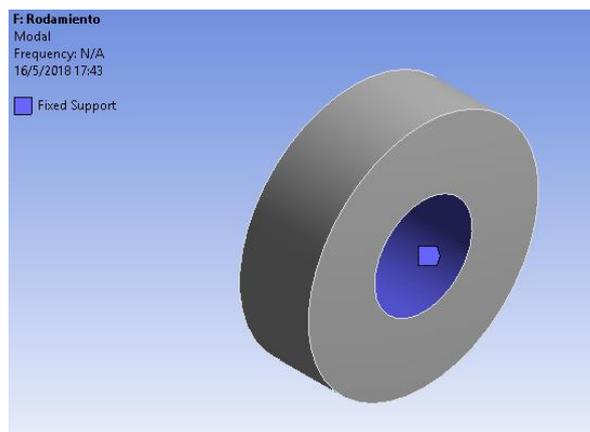


Figura 3.134 Análisis modal del rodamiento.

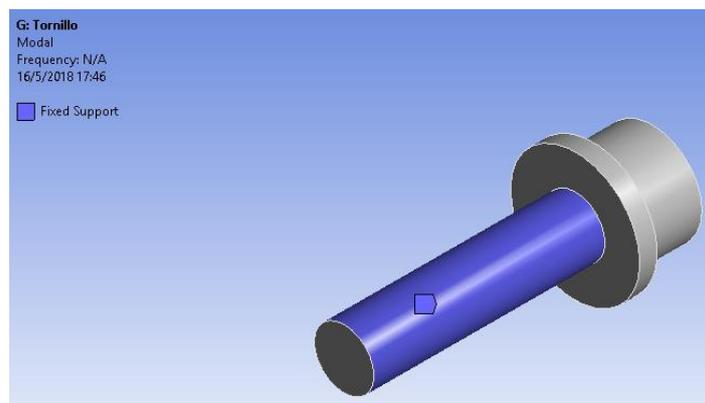


Figura 3.135 Análisis modal del tornillo.

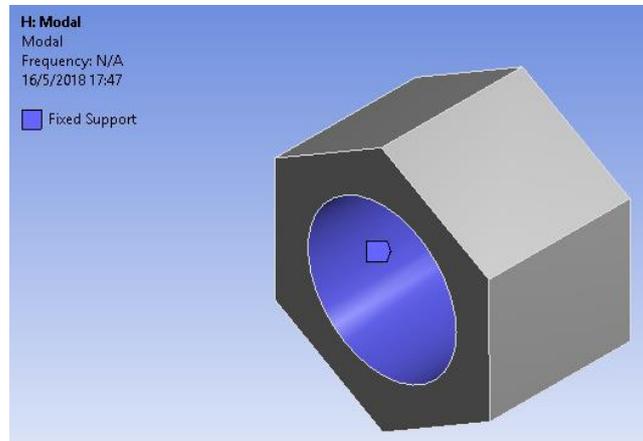


Figura 3.136 Análisis modal de la tuerca.

3.3.3 Rigid Dynamics.

Para realizar el análisis de Rigid Dynamics, se utiliza el mismo procedimiento del análisis del Static Structural y Modal con lo que respecta al mallado de la geometría. Para este análisis se va omitir el protector del motor.

Dentro del modelo, lo primero que se realiza en el Rigid Dynamics consiste en crear las diferentes juntas, las mismas que son: Joints de Fixed para que los diferentes elementos no se separen durante la simulación, Cylindrical y Revolute para poder generar el movimiento que es producido por la fuerza electromotriz en el motor.

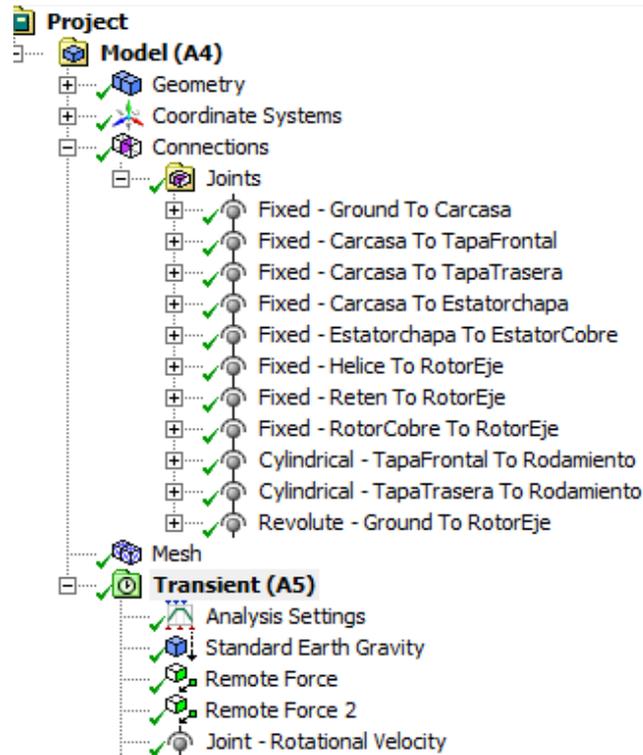


Figura 3.137 Joints para Rigid Dinamic.

Ahora se colocan las diferentes condiciones para el análisis no lineal. Primero se utiliza Joint Rotacional Velocity de 250rad/s (aproximadamente 2400rpm), aplicando al rotor del motor para simular el movimiento del mismo. También se utilizarán dos Remote Force de -4000 N que se aplican a las tapas del motor.

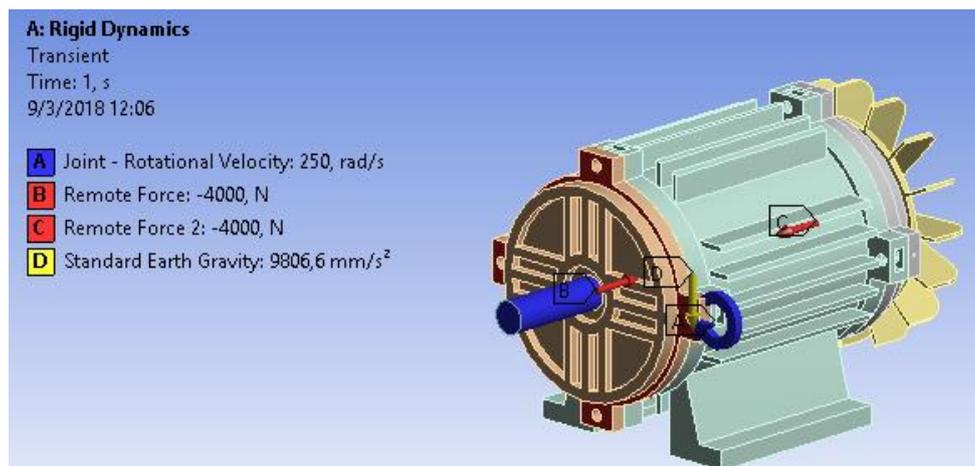


Figura 3.138 Rotacional Velocity de 250 rad/s.

CAPITULO 4: POSTPROCESO

4.1 STATIC STRUCTURAL.

La primera solución evaluada es la deformación total obteniendo una deformación máxima de 0,026095mm del elemento, donde la parte que más va a ser afectada es en las pestañas de la carcasa y tapas del motor sobre todo la parte donde van los tornillos del mismo, debido a que cuando el motor está en funcionamiento existe una contra presión que se genera en las mismas tratando de que se separe la carcasa a sus respectivas tapas. Pero cabe mencionar que a pesar que la deformación máxima ocurre en un minino porcentaje con respecto al elemento, ya que la mayor deformación que se presenta en el motor es entre 0,014497mm y 0,017397mm como se puede observar en la Figura 4.1. Ahora se procederá a analizar los esfuerzos de los diferentes elementos que intervinieron en el análisis como es la Carcasa, Tapa Frontal, Tapa Trasera, Tornillos y la Tuerca.

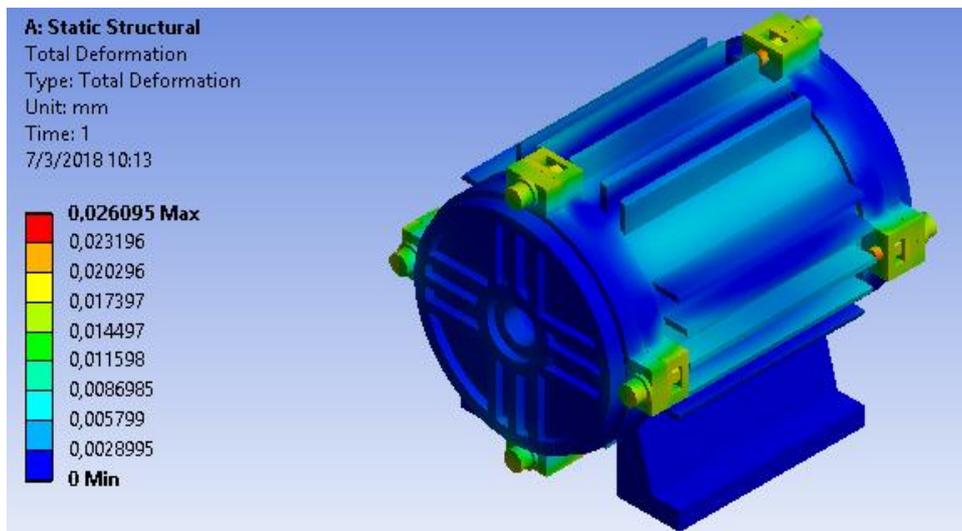


Figura 4.1 Total deformación.

La siguiente grafica muestra equivalent stress de la carcasa el mismo que produce un máximo esfuerzo de 149,2MPa, como el material de la carcasa es de hierro fundido entonces soporta un esfuerzo máximo de 240MPa, como se puede observar el mayor esfuerzo se produce en las pestañas de la carcasa con un valor aproximado de esfuerzo de 49,735MPa.

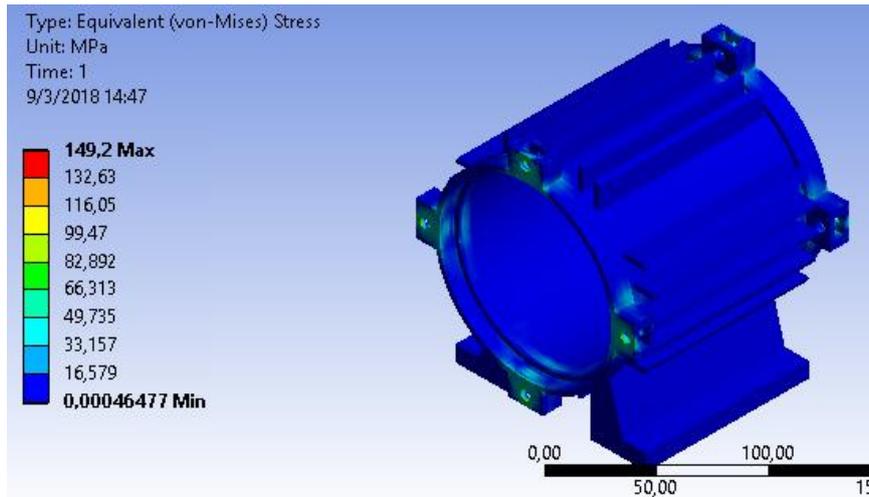


Figura 4.2 Equivalent stress de la carcasa.

En la siguiente se presentan tanto la tapa frontal como la trasera, en el caso de la primera se obtienen un esfuerzo máximo de 83,275MPa, pero cabe recalcar que el mayor esfuerzo presente es en el rango de 27,783MPa y 37,032MPa las mismas que se presentan en las pestañas de la tapa. Con lo que respecta a la tapa trasera presenta un esfuerzo máximo de 54,347MPa, pero el valor que mayor se presenta es un esfuerzo entre 18,122MPa y 24,16MPa.

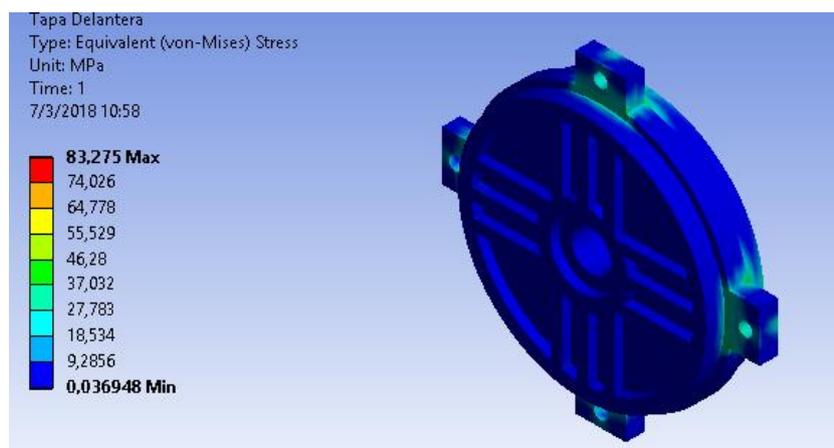


Figura 4.3 Equivalent stress tapa frontal.

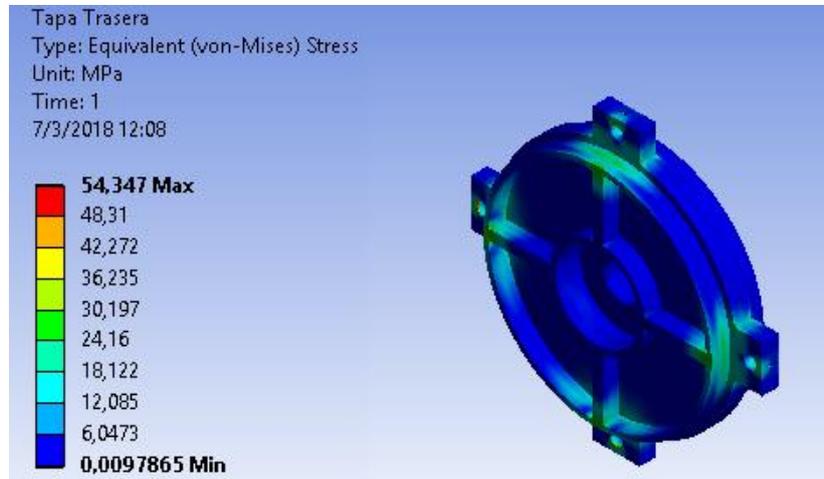


Figura 4.4 Equivalent stress tapa trasera.

Ahora se van analizar los tornillos que sujetan la tapa frontal como la trasera, para los tornillos de la parte frontal del motor se obtienen un esfuerzo máximo de 325,57MPa, pero el mayor esfuerzo presente es de 108,54MPa. Con lo que respecta a los tornillos de la tapa trasera presenta un esfuerzo máximo de 172,9MPa, pero el valor que mayor se presenta es un esfuerzo entre 96,07MPa y 115,28MPa.

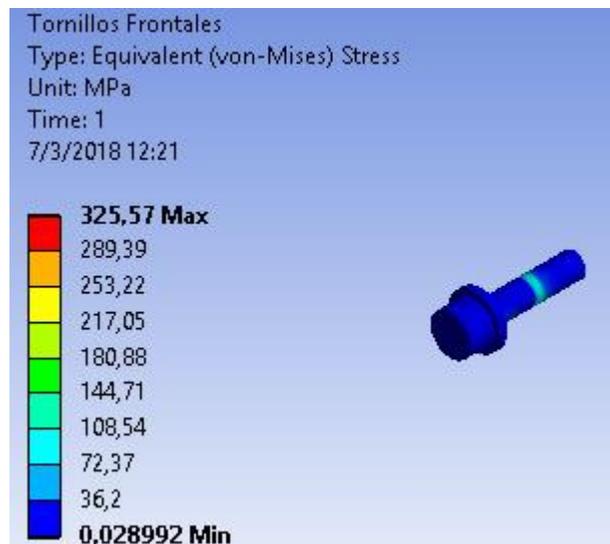


Figura 4.5 Equivalent stress tornillo frontal.

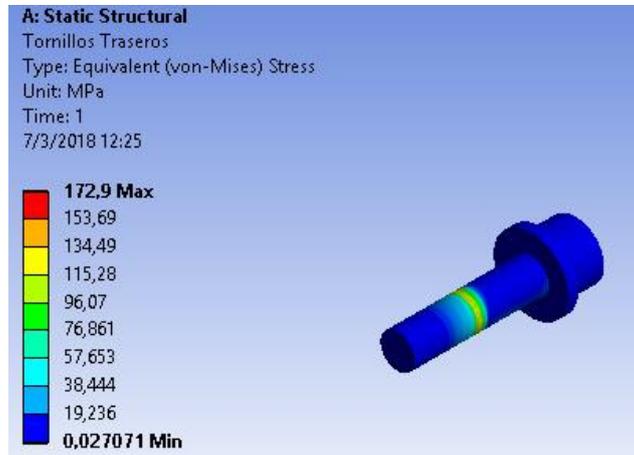


Figura 4.6 Equivalent stress tornillo trasero.

Con lo que respecta a las tuercas para los tornillos frontales se obtienen un esfuerzo máximo de 776,76MPa, pero el mayor esfuerzo presente es en el rango de 259,23MPa y 345,48MPa.

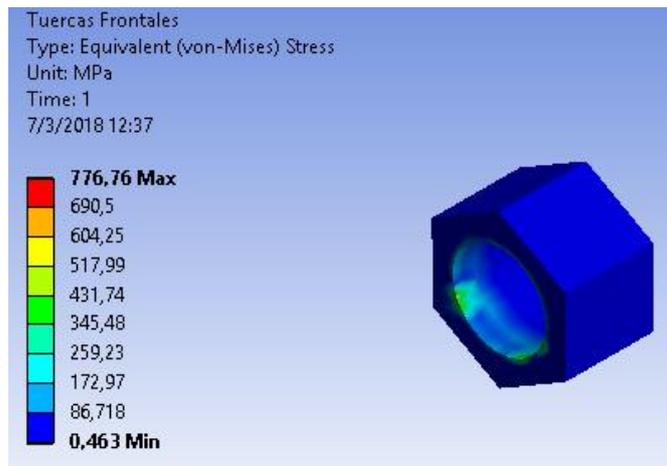


Figura 4.7 Equivalent stress tuerca del tornillo frontal.

Con lo que respecta a las tuercas de los tornillos de la tapa trasera presenta un esfuerzo máximo de 286,29MPa, pero el valor que mayor se presenta es un esfuerzo entre 95,749MPa y 159,26MPa.

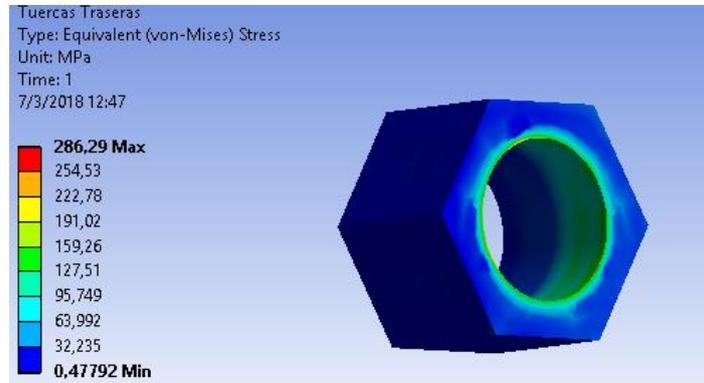


Figura 4.8 Equivalent stress tuerca del tornillo trasero.

Con la herramienta contact tool vamos a realizar el análisis de Status, Frictional Stress y Pressure. Con lo que respecta al Status este nos indica si está cercano, deslizándose o está justo entre el estado de reposo o el corte que puede soportar el coeficiente de fricción, el cual se puede observar que se encuentra sticking(pegado) con respecto a las tapas con la carcasa, en el caso de los tornillos esta entre sliding(deslizamiento) y near(cercano) con respecto al coeficiente de fricción. En el caso de Frictional Stress se muestra la tensión producida por el rose en ciertas partes del motor con un máximo de 361,36MPa, pero cabe mencionar que no existe una gran tensión producida con lo que respecta a todo el elemento ya que solo se da en las pestañas de la carcasa y las tapas con un valor promedio de 80,302MPa.

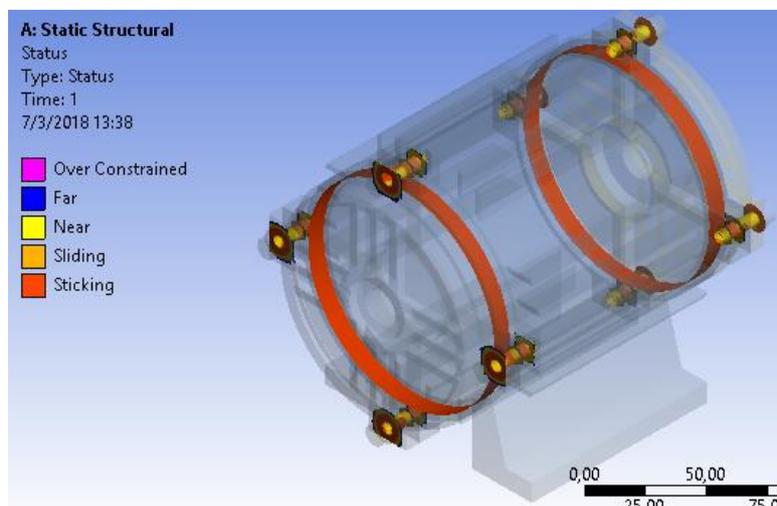


Figura 4.9 Status.

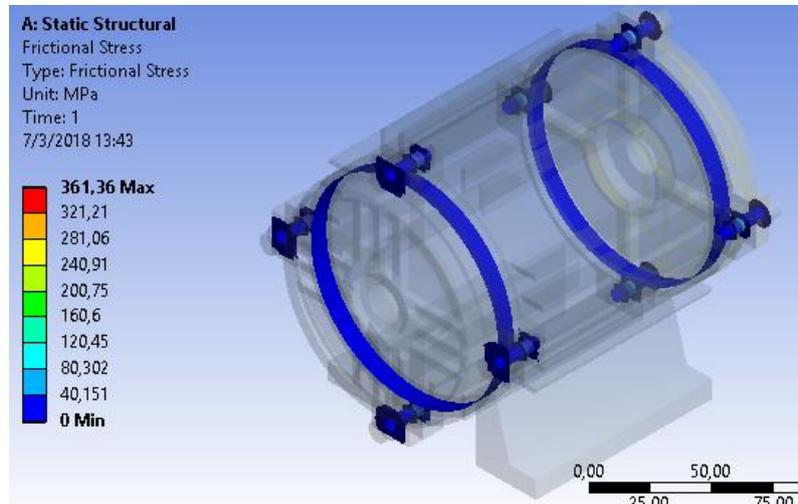


Figura 4.10 Frictional stress.

Para el caso de Pressure se puede observar una presión con lo que respecta al contacto entre la carcasa y las tapas conjuntamente con los tornillos y tuercas es donde existe la mayor presión teniendo como promedio una tensión de

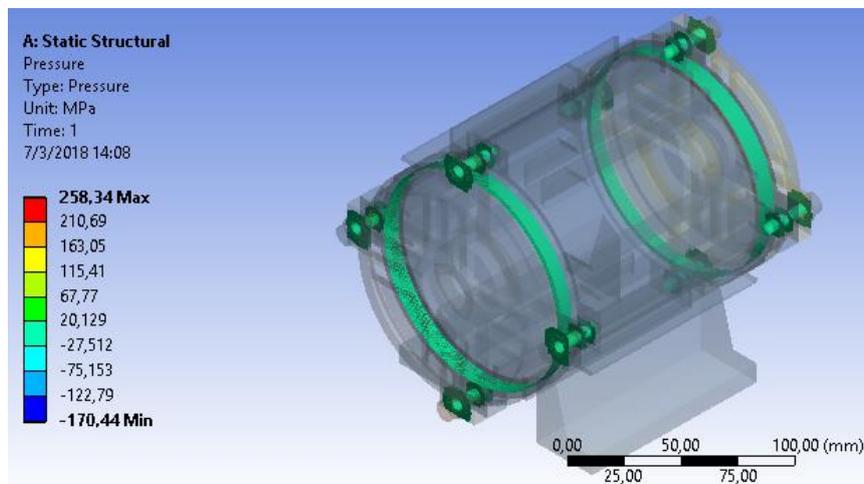


Figura 4.11 Pressure.

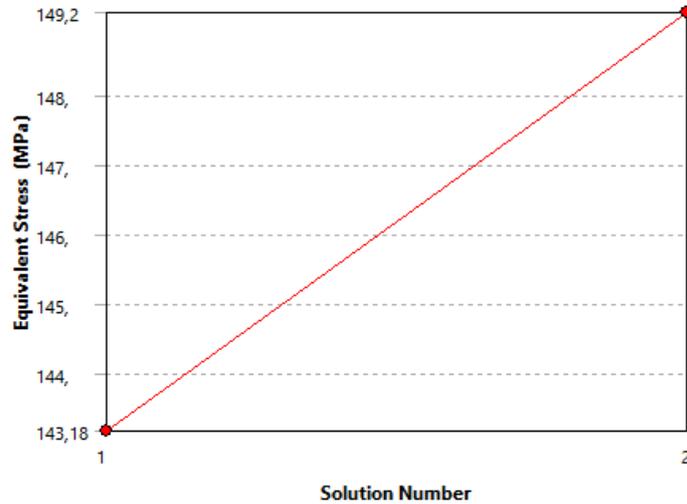


Figura 4.12 Convergencia carcasa.

4.2 MODAL.

A continuación, se mostrarán las diferentes deformaciones de cada uno de los elementos del motor con sus respectivas frecuencias naturales. Con lo que respecta a la carcasa se trabajó con frecuencias entre 817Hz hasta 1800Hz aproximadamente, donde la mayor deformación se presenta en la frecuencia de 907Hz con 51mm. En la Tapa del motor se presentan frecuencias desde 4000Hz hasta 6500Hz siendo la deformación máxima en la última con 79mm, en el caso del protector se presentan frecuencias desde 500Hz a 900Hz siendo en este caso la mayor deformación se presenta en los 835Hz con 276mm, en el caso de la hélice se presentan frecuencias desde 870Hz hasta 1050Hz siendo en los 878Hz la mayor deformación con 221mm.

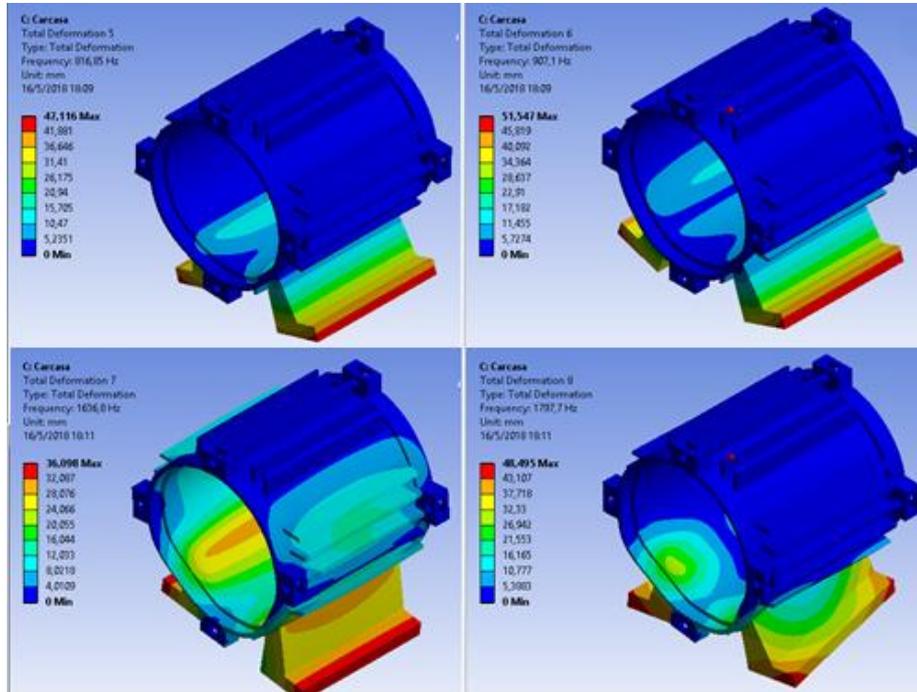


Figura 4.13 Deformación de la carcasa.

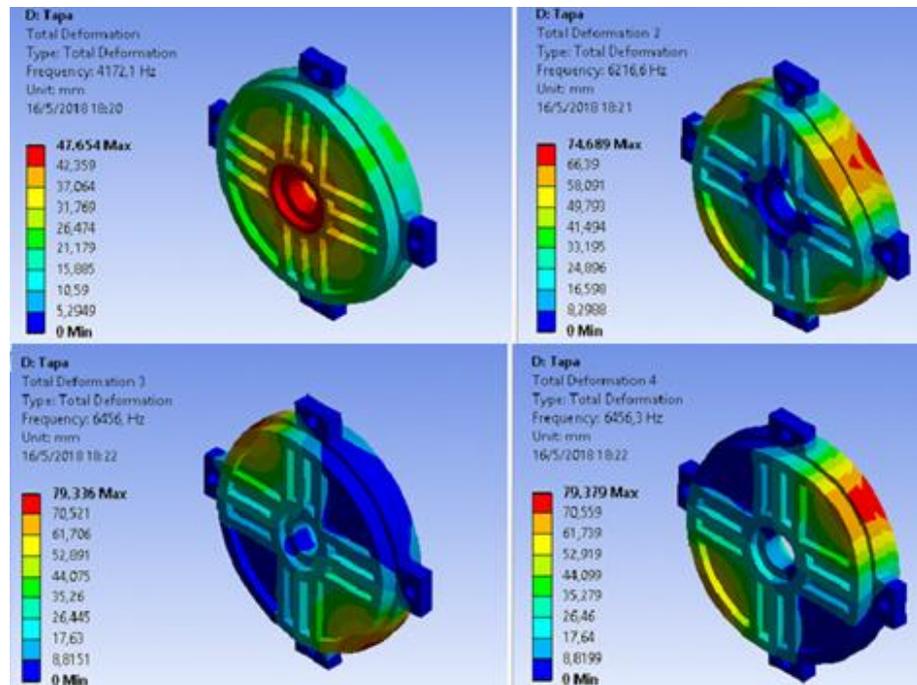


Figura 4.14 Deformación de la tapa.

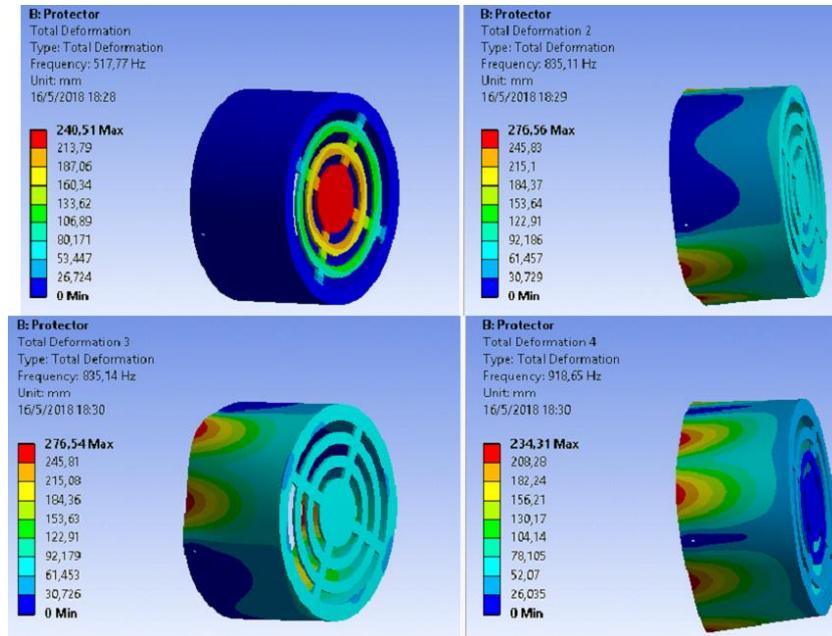


Figura 4.15 Deformación del protector.

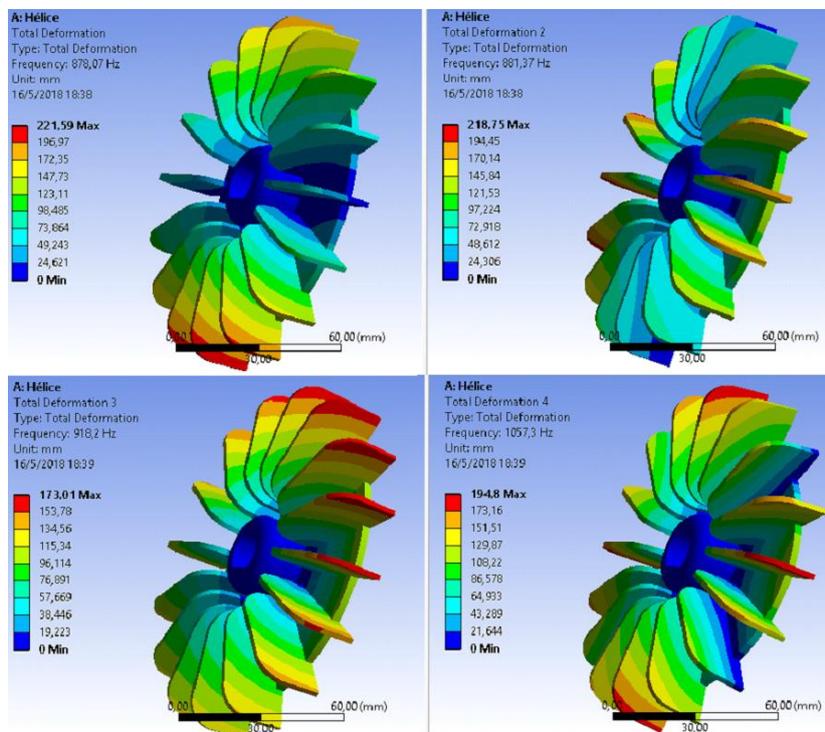


Figura 4.16 Deformación de la hélice.

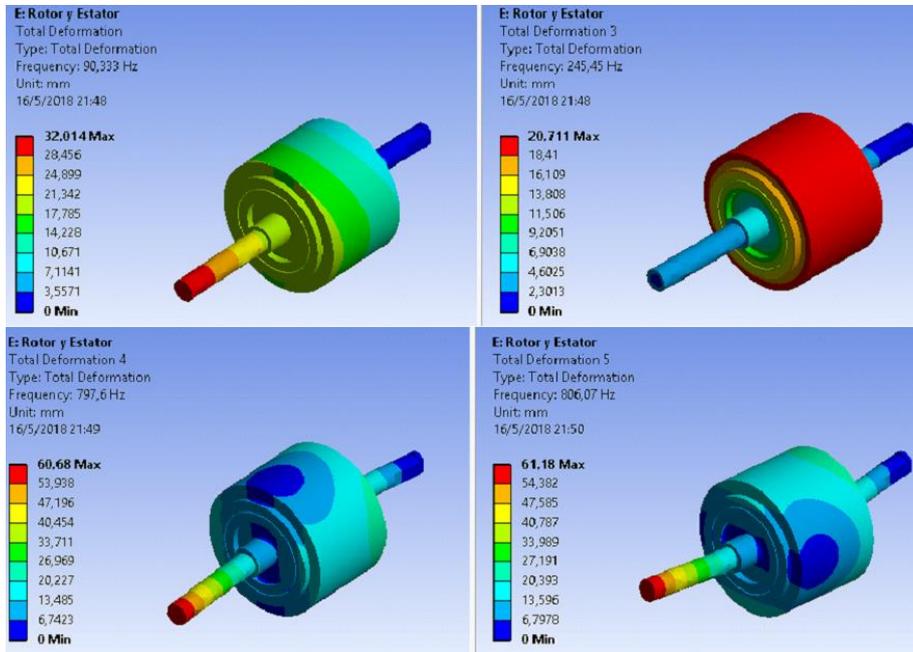


Figura 4.17 Deformación del rotor y estator.

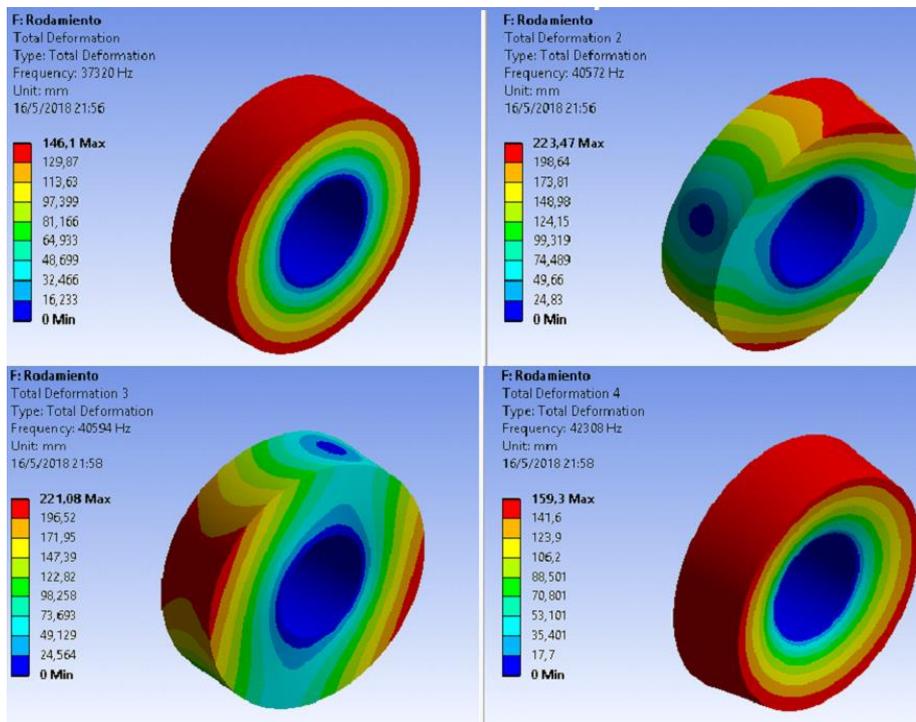


Figura 4.18 Deformación del rodamiento.

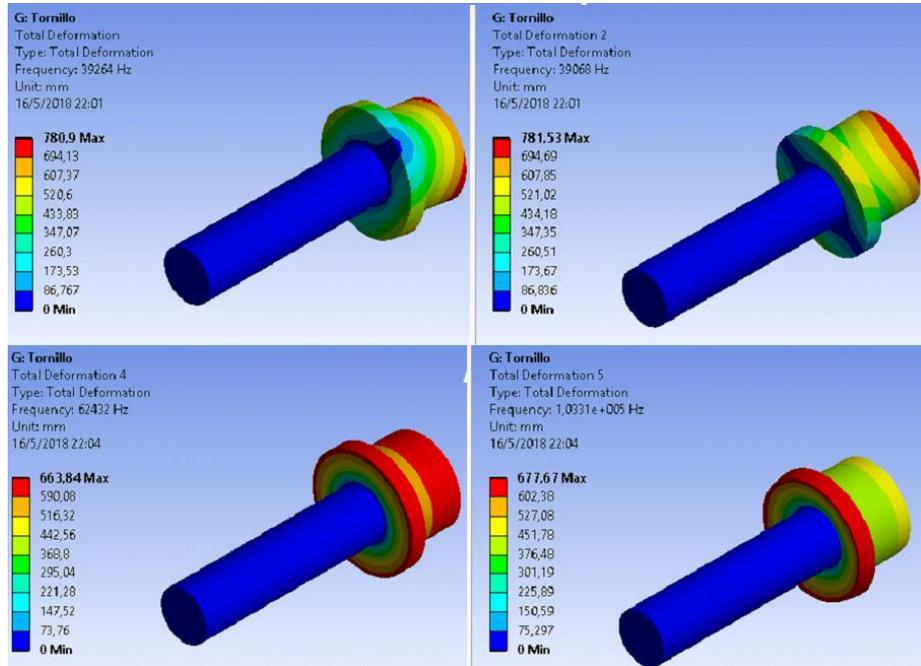


Figura 4.19 Deformación del tornillo.

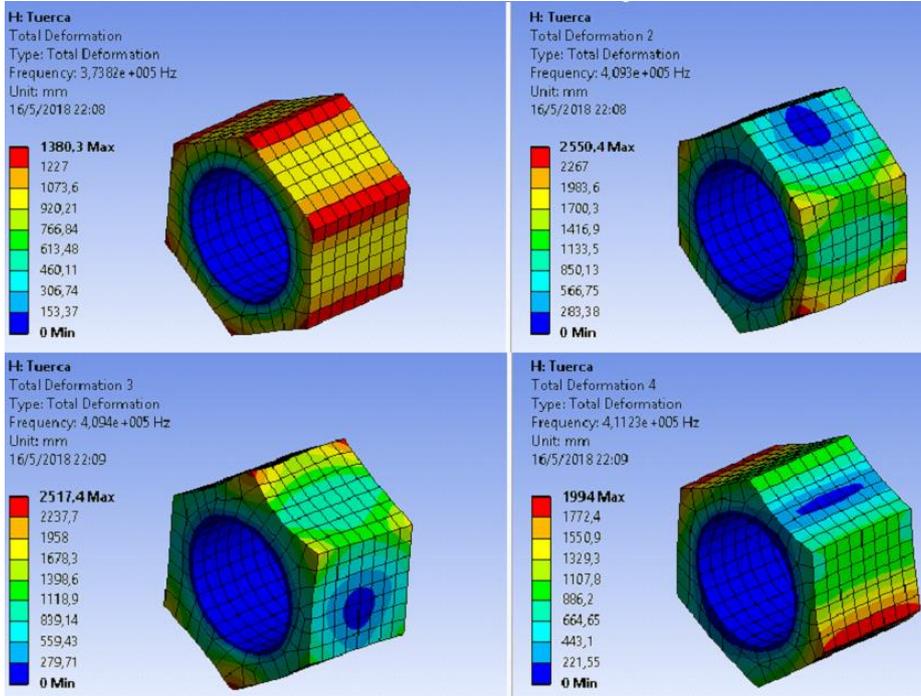


Figura 4.20 Deformación Total frecuencia 1011,2 Hz.

4.3 RIGID DYNAMICS.

La primera solución que se analiza en este análisis es la de Directional Deformation, obteniendo primero una deformación de 0,20657mm, el mismo que representa un valor despreciable que para el ojo humano no es posible detectar.

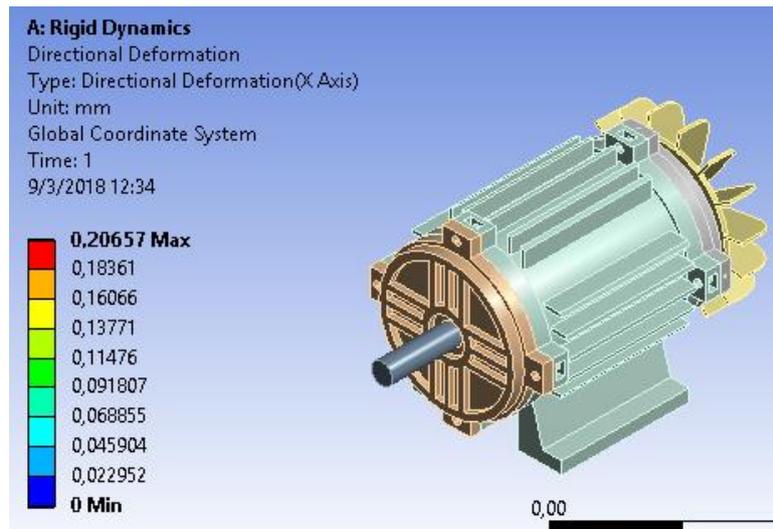


Figura 4.21 Directional Deformation.

Con lo que respecta a la Velocity Probe y Acceleration Probe se estudia el comportamiento del rotor con respecto a la velocidad rotacional que se está aplicando el mismo que es de 250rad/s, donde en las siguientes tablas se muestra lo que ocurre con la velocidad y aceleración con respecto a cada componente del plano cartesiano y el total. Debido a que el motor está funcionando sin carga, la velocidad y aceleración total no varían, siguen siendo el mismo valor con lo cual se puede decir que el motor está funcionando correctamente y no existe ninguna disminución de su velocidad durante la operación sin carga.

Tabular Data					
Time [s]	Velocity Probe (X) [mm/s]	Velocity Probe (Y) [mm/s]	Velocity Probe (Z) [mm/s]	Velocity Probe (Total) [mm/s]	
1	0,	-51,692	-1,5926	-4,4965e-013	51,717
2	1,e-002	40,46	32,212	3,6777e-013	51,717
3	3,e-002	-19,412	47,935	-1,4406e-013	51,717
4	7,e-002	-9,7895	-50,782	-1,1095e-013	51,717
5	0,12	-6,4	-51,319	-8,1794e-014	51,717
6	0,17	-2,9823	-51,631	-5,2278e-014	51,717
7	0,22	0,44845	-51,715	-2,2532e-014	51,717
8	0,27	3,8773	-51,571	7,3137e-015	51,717
9	0,32	7,289	-51,2	3,7127e-014	51,717
10	0,37	10,669	-50,604	6,6777e-014	51,717
11	0,42	14,001	-49,785	9,6132e-014	51,717
12	0,47	17,272	-48,747	1,2506e-013	51,717
13	0,52	20,467	-47,494	1,5345e-013	51,717
14	0,57	23,572	-46,032	1,8115e-013	51,717
15	0,62	26,573	-44,367	2,0806e-013	51,717
16	0,67	29,457	-42,507	2,3405e-013	51,717
17	0,72	32,212	-40,46	2,5901e-013	51,717
18	0,77	34,824	-38,235	2,8283e-013	51,717
19	0,82	37,283	-35,841	3,0541e-013	51,717
20	0,87	39,578	-33,289	3,2664e-013	51,717
21	0,92	41,699	-30,591	3,4643e-013	51,717
22	0,97	43,636	-27,758	3,647e-013	51,717
23	1,	-10,911	-50,552	-1,2057e-013	51,717

Tabla 4.1 Velocidad del eje.

Tabular Data					
Time [s]	Acceleration Probe (X) [mm/s ²]	Acceleration Probe (Y) [mm/s ²]	Acceleration Probe (Z) [mm/s ²]	Acceleration Probe (Total) [mm/s ²]	
1	0,	-398,16	12923	3,1464e-012	12929
2	1,e-002	8053,	-10115	6,4755e-011	12929
3	3,e-002	11984	4853,	1,0653e-010	12929
4	7,e-002	-12695	2447,4	-1,0898e-010	12929
5	0,12	-12830	1600,	-1,1058e-010	12929
6	0,17	-12908	745,59	-1,1169e-010	12929
7	0,22	-12929	-112,11	-1,1232e-010	12929
8	0,27	-12893	-969,32	-1,1244e-010	12929
9	0,32	-12800	-1822,3	-1,1207e-010	12929
10	0,37	-12651	-2667,2	-1,1121e-010	12929
11	0,42	-12446	-3500,3	-1,0986e-010	12929
12	0,47	-12187	-4318,1	-1,0802e-010	12929
13	0,52	-11874	-5116,8	-1,0571e-010	12929
14	0,57	-11508	-5893,	-1,0293e-010	12929
15	0,62	-11092	-6643,3	-9,9704e-011	12929
16	0,67	-10627	-7364,3	-9,6034e-011	12929
17	0,72	-10115	-8052,9	-9,1942e-011	12929
18	0,77	-9558,7	-8706,	-8,7445e-011	12929
19	0,82	-8960,2	-9320,8	-8,2563e-011	12929
20	0,87	-8322,3	-9894,5	-7,7318e-011	12929
21	0,92	-7647,8	-10425	-7,1732e-011	12929
22	0,97	-6939,6	-10909	-6,583e-011	12929
23	1,	-12638	2727,9	-1,0834e-010	12929

Tabla 4.2 Aceleración del eje.

Con lo que respecta a la velocidad angular, esta se determina con respecto a la hélice del motor y se puede observar que es 250 rad/s, igual que la determinada en el análisis Rotacional, con lo cual se verifica que el sistema está en equilibrio.

Tabular Data					
	Time [s]	Angular Velocity (X) [rad/s]	Angular Velocity (Y) [rad/s]	Angular Velocity (Z) [rad/s]	Angular Velocity (Total) [rad/s]
1	0,	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
2	1,e-002	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
3	3,e-002	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
4	7,e-002	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
5	0,12	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
6	0,17	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
7	0,22	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
8	0,27	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
9	0,32	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
10	0,37	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
11	0,42	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
12	0,47	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
13	0,52	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
14	0,57	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
15	0,62	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
16	0,67	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
17	0,72	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
18	0,77	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
19	0,82	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
20	0,87	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
21	0,92	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
22	0,97	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,
23	1,	2,1707e-012	1,2775e-013	-250,	250,

Tabla 4.3 Velocidad angular de la hélice.

Con la solución de posición se obtienen las diferentes coordenadas en las cuales se está produciendo el movimiento rotacional del motor. Como se puede observar en la figura 3.16, el movimiento se centra en el rotor.

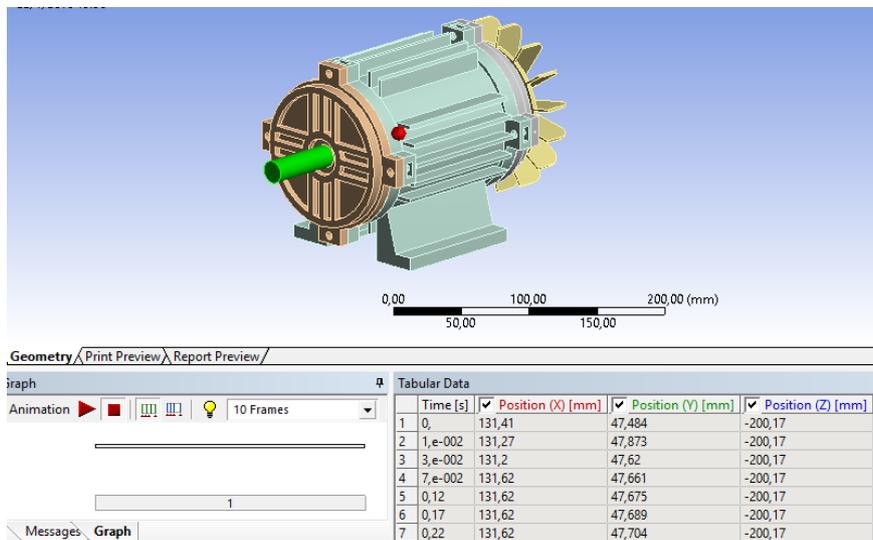


Figura 4.22 Posición.

Otro análisis que se realiza en el caso del Rigid Dynamics es la determinación de las diferentes energías que se presentan durante el funcionamiento del motor, entre los que se destacan la energía potencial, la energía cinética, la energía total y externa del sistema en los diferentes instantes de tiempo. Estos resultados se presentan en la tabla 4.5.

Tabular Data					
	Time [s]	Energy Probe (Potential) [mJ]	Energy Probe (Kinetic) [mJ]	Energy Probe (Total) [mJ]	Energy Probe (External) [mJ]
1	0,	4176,8	39497	43674	0,
2	1,e-002	4185,9	39497	43673	-9,2166
3	3,e-002	4179,9	39497	43677	0,71499
4	7,e-002	4181,1	39497	43683	5,108
5	0,12	4181,4	39497	43747	68,438
6	0,17	4181,7	39497	43811	132,23
7	0,22	4182,1	39497	43875	196,19
8	0,27	4182,4	39497	43939	260,06
9	0,32	4182,7	39497	44003	323,53
10	0,37	4183,1	39497	44066	386,35
11	0,42	4183,4	39497	44128	448,22
12	0,47	4183,7	39497	44189	508,88
13	0,52	4184,	39497	44249	568,05
14	0,57	4184,4	39497	44307	625,49
15	0,62	4184,6	39497	44362	680,93
16	0,67	4184,9	39497	44416	734,13
17	0,72	4185,2	39497	44467	784,86
18	0,77	4185,5	39497	44515	832,9
19	0,82	4185,7	39497	44561	878,02
20	0,87	4185,9	39497	44603	920,04
21	0,92	4186,1	39497	44642	958,77
22	0,97	4186,3	39497	44677	994,04
23	1,	4180,9	39497	44691	1013,5

Tabla 4.4 Diferentes energías presentes durante el funcionamiento del motor.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

I. CONCLUSIONES

Con lo que respecta al mallado del motor trifásico asíncrono, entre más se pueda simplificar o eliminar detalles que no afectan el análisis respectivo se obtendrán un mejor mallado, cuando se llega a un mallado superior al 75% el sistema va tener solución y sobre todo los resultados obtenidos en los diferentes análisis se asemejan a la realidad, para los diferentes análisis se trabajó con un mallado del 85% con 1.437.406 nodos y 348.623 elementos, aunque lo ideal fuera obtener un mallado superior del 95% pero lo inconveniente es que se va tener un gasto computacional mucho mayor e incluso el tiempo de solución va aumentar de manera considerable, aunque para ello depende las características de la portátil o pc de escritorio.

Al realizar el análisis estructural el mismo que se solo se utilizó la carcasa, las tapas, tornillos y tuercas, se comprobó que el motor al ser expuesto a una carga(load) que va simular la pretensión del tornillo el mismo que es de 13,04KN produjo una deformación total muy pequeña, aproximadamente 0,026mm como máxima. Además, esta deformación no sucede en todo el motor, sino que se observa que se da principalmente en las pestañas de la carcasa y tapas del mismo.

Con lo que respecta a los diferentes esfuerzos se puede decir que todos los elementos van a soportar dicha carga. En el caso de la Carcasa se presenta un esfuerzo promedio 49,735MPa, pero su máximo esfuerzo es de 149,2MPa, en el caso de las Tapa Frontal se presentan un máximo de 83,275MPa, pero el mayor esfuerzo está en el rango de 27,783MPa y 37,032MPa, para la Tapa Trasera se presentan un máximo de 54,347MPa, pero el mayor esfuerzo está en el rango de 18,122MPa y 24,16MPa con lo cual se puede concluir que estos elementos que están hechos de hierro fundido no van alcanzar el esfuerzo máximo del material que es de 240MPa. También cabe mencionar que los esfuerzos entre las tapas no son simétricos debido a que en la parte frontal es donde se va producir el torque en el momento del funcionamiento del motor por lo cual va existir mayor esfuerzo en ese punto.

En el caso de los tornillos se presentan unos esfuerzos máximos de 325,57MPa y 172,9MPa, mientras que en el caso de las tuercas se presentan 776,76MPa y 286,29MPa como máximo, en el caso de estos elementos que están hechos de acero

inoxidable soportan un esfuerzo máximo de 586MPa, pero cabe mencionar que los esfuerzos máximos no son en la totalidad del elemento sino en una parte muy pequeña por lo que así las tuercas frontales lleguen a un valor de 776,76MPa ya que para este caso el esfuerzo promedio es de 259,23MPa aproximadamente debajo del esfuerzo máximo del material.

Con lo que respecta al análisis modal se puede concluir que la mayoría de elementos que conforman al motor no van a trabajar a una frecuencias mayores a 120Hz, es decir el doble de la frecuencia de funcionamiento del mismo, no se verán afectados durante el funcionamiento, ya que si alguna de las fuentes de vibración presenta alguna frecuencia que coincida con una de las frecuencias naturales del elemento estructural, dicho elemento entraría en resonancia, la cual se caracteriza por una amplitud de vibración excesiva, que puede dañar o incluso destruir la estructura.

Con la ayuda del programa ANSYS WORKBENCH, especificando adecuadamente las restricciones, conexiones y fuerzas, entre otras, evalúa el comportamiento que puede tener el motor por la aplicación de una fuerza, momento o presión, entre otras, obteniendo su deformación, los esfuerzos y el factor de seguridad entre otros. Por estas razones, este software es de gran ayuda para el análisis de cualquier tipo de elemento, no solamente para un motor sino para realizar diversos análisis en diferentes campos de estudios tanto en ingeniería, como en odontología al realizar un análisis de un implante, o en medicina para el análisis de una prótesis.

Una de las principales dificultades durante este trabajo investigativo reside en el preproceso. Específicamente en el diseño del motor, debido a que, si no se realiza un diseño correcto y un buen ensamble del mismo, sobre todo las distintas restricciones y uniones al momento de trabajar en Ansys, esto genera importantes errores. Incluso en la geometría pueden existir elementos repetidos o sobre montados.

Cabe mencionar que ANSYS es un programa con gran demanda computacional, por lo cual para el desarrollo de esta investigación se trató de simplificar u omitir algunos detalles de los diferentes elementos para que el mallado y la simulación del mismo no presenten tiempos demasiado largos. Si la simulación demora demasiado tiempo se puede presentar un mensaje de advertencia debido a las especificaciones del computador con *“During this solution, the elapsed time exceeded the CPU time by an excessive margin. Often this indicates either a lack of physical memory (RAM) required to efficiently handle this simulation or it indicates a particularly slow hard drive configuration. This simulation can be expected to run faster on identical hardware if additional RAM or a faster hard drive configuration is made available. For more details, please see the ANSYS Performance Guide which is part of the ANSYS Help system.”*

II. RECOMENDACIONES

Para futuros trabajos se recomienda usar en un mallado que llegue al menos 95% de calidad enfocando en las piezas del motor complejas para la obtención de resultados más cercanos a la realidad ya que entre mejor es el mallado los resultados son más reales, pero para ello se requiere una computadora con una mejor RAM e incluso con disco de estado sólido o también trabajar con un servidor.

Se recomienda para futuras investigaciones realizar simulaciones con el módulo Ansys Maxwell conjuntamente con los diferentes módulos usados en esta investigación para complementar con el análisis electromagnético del mismo. A más de eso también es necesario realizar las pruebas con diferentes materiales para ver su deformación y puntos de ruptura de acuerdo al trabajo que vaya a emplear el motor.

También se debe tomar en cuenta para los diferentes análisis que se pueden realizar en el ANSYS WORKBENCH de un motor cualquiera sería ideal conocer en qué ambiente de trabajo y para que vas ser usado dicho motor para que de esta manera usando el módulo de fluido ver lo que ocurre con la transferencia de calor de acuerdo al ambiente y ver qué sucede con el motor durante su funcionamiento en ese espacio de trabajo.

BIBLIOGRAFIA

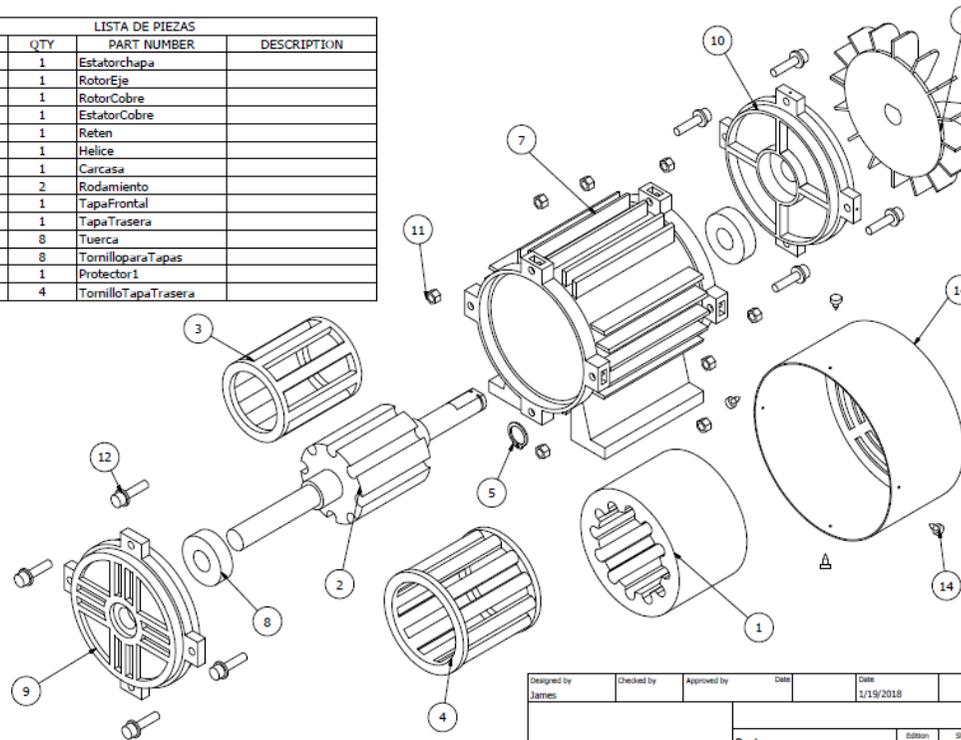
- A. Ramírez, T. Asiaín, D. Ruiz. (2015). Validación Experimental del Modelo Matemático del Motor de Inducción Trifásico. *Instituto Politécnico Nacional*, México D.F.
- Aldo Pardo y MSc. Jorge Díaz. (2006). Modelación del Motor de Inducción Trifásico. *Tecnologías de Avanzada*, 8.
- Alejandro Parra, José Oslinger y Jairo Palacios. (2014). Diagnóstico de fallas estatísticas en motores de inducción de jaula de ardilla por medio de la corriente de secuencia negativa. (pág. 18). Cali: Universidad del Valle.
- Álvarez, I. J. (12 de 2009). *Universidad Técnica del Norte*. Obtenido de http://frq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/6817/mod_resource/content/1/motores_de_induccion.pdf
- Champman, S. (2012). *Maquinas Eléctricas*. México D.F.: Iteramericana.
- Gabaldón, F. (2007.). Método de los elementos finitos. *Universidad Politécnica de Madrid*, (pág. 17). MAdrid.
- Garcia, A. (2014). *Análisis Transitorio de un Motor de Inducción Utilizando el Método del Elemento Finito*. Mexico D.F.
- González, D. (2011). Diseño, Cálculo y Análisis de la aplicación de un motor lineal síncrono con imanes permanentes. Laganés.
- Helmer Carvajal, Iván Estupiñán. (2010). Detección de fallas en un motor de inducción usando análisis de vibraciones mecánicas bajo distintos escenarios de carga . (pág. 106). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Ing. José M. Aller, P. (2008). *Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la Teoría General*. Caracas: Equinoccio.

- L. Simón, J. Monzón. (2015). *El Método de los Elementos Finitos para la Identificación Paramétrica de una Máquina Trifásica de Inducción Magnética, con Algoritmos Genéricos.*, (pág. 5). Las Palmas.
- Mariscal, R. (29 de 03 de 2013). *ISSUU*. Obtenido de ISSUU:
https://issuu.com/mariscalchuscano/docs/partes_motores_trifasicos_tipo_jaula_de_ardilla
- Oviedo, U. d. (10 de 2013). *Universidad de Oviedo*. Obtenido de
http://dfs.uib.es/GTE/education/industrial/con_maq_electricas/teoria/Teoria%20Oviedo/Segundo%20Parcial/Presentaciones%20en%20formato%20PDF/Tema7.pdf
- Pernía, I. M. (2013). *Motores de Inducción o Asíncronos*. Táchira: Universidad Nacional Experimental del Táchira.
- Potenciaelectromecanica. (5 de 2013). *Potenciaelectromecanica*. Obtenido de
<http://www.potenciaelectromecanica.com/wp-content/uploads/2013/04/1-CAMPO-GIRATORIO-EN-MOTORES-TRIFASICOS.pdf>
- Samsó, I. F. (2004). *Maquinas e Instalaciones Eléctricas*. Mendoza.
- Sons, J. W. (2014). *Advanced Electric Drives*. New Jersey: Ned Mohan.
- teach, T. (7 de 2012). *Test teach*. Obtenido de
<https://www.tes.com/lessons/uK5zEXCp1aEfqg/unidad-ii-motores-electricos>
- Tightening torque to preload a bolt*. (8 de 2010). Obtenido de http://www.tribology-abc.com/calculators/e3_6a.htm
- Vandelvira, I. A. (2011). *Motores de Corriente Alterna*. Departamento de SAP.
- Vargas., F. (1990). *Maquinas Electricas Rotativas*. Lima: MagaprInt Ediciones s.a.
- Weg. (20 de 10 de 2016). *www.weg.net*. Obtenido de [www.weg.net](http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-induccion-trifasicos-linea-master-50020704-catalogo-espanol.pdf):
<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-induccion-trifasicos-linea-master-50020704-catalogo-espanol.pdf>
- Wildi, T. (2006). *Electrical Machines, Drives and Power System*. New Jersey: Pearson.
- Yrady, H. (8 de 2011). *Motores y Controles Eléctricos*. Obtenido de
<http://apoyoelectrico.blogspot.com/2016/03/motores-trifasicos.html>

ANEXOS

ELEMENTOS DEL MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO.

LISTA DE PIEZAS			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1		Estatorchapa
2	1		RotorEje
3	1		RotorCobre
4	1		EstatorCobre
5	1		Reten
6	1		Helice
7	1		Carcasa
8	2		Rodamiento
9	1		TapaFrontal
10	1		TapaTrasera
11	8		Tuerca
12	8		TornilloparaTapas
13	1		Protector1
14	4		TornilloTapaTrasera



Designed by James	Checked by	Approved by	Date	Date 2/19/2018	
				Partes	Sheet 1 / 1

**UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
UNIDAD DE POSGRADOS**

**MAESTRÍA EN MÉTODOS MATEMÁTICOS Y
SIMULACIÓN NUMÉRICA EN INGENIERÍA**

Autor:

Dirigido por:

Ing. Paul Adrian Gomez Espinoza Ing. José Manuel Aller Castro, PhD

**ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MOTOR
ASÍNCRONO TRIFÁSICO, UTILIZANDO EL MÉTODO DE
LOS ELEMENTOS FINITOS**

En este proyecto de investigación se analiza el comportamiento mecánico de un motor asíncrono trifásico utilizando como herramienta el método de los elementos finitos para evaluar las solicitaciones mecánicas a que está sometida la máquina en toda su estructura.

En primer lugar, se revisa el principio de funcionamiento, constitución y circuito equivalente de la máquina de inducción. Luego se introduce la descripción de la etapa denominada Preproceso, en la cual se realiza el diseño del motor a ser simulado. Se crean las diferentes partes del mismo en el software INVENTOR, tratando de reproducir un motor real. Después de crear los diferentes elementos del motor y su respectivo ensamble, se procede a cargar la geometría en el Software ANSYS para realizar el análisis denominado Static Structural, Modal y Rigid Dynamic, en los cuales primero se definen los diferentes materiales para posteriormente generar el mallado de la geometría. Finalmente, en esta etapa de preproceso se crean las diferentes juntas y restricciones y se añaden las diferentes condiciones de frontera para cada análisis.

En la última etapa, el Postproceso, se analizan los diferentes resultados obtenidos en la simulación del motor en los diferentes análisis. En el caso del Static Structural se evalúa la deformación y los esfuerzos a que está sometido el motor. En el caso del análisis modal se estudia la deformación producida por las diferentes frecuencias naturales de cada elemento, y finalmente en el análisis denominado Rigid Dynamic se calcula la deformación, velocidad, aceleración, energía y posición del motor durante su operación.