



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR MAGNÉTICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

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

**SEBASTIAN MIGUELES GRANADOS**

**ROBERTO ALONSO MONROY MEDINA**

**ASESOR: M.I. RICARDO ALBERTO DELGADILLO TORRES**

**CUAUTILÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

J. N. A. M.  
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO  
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE



ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ  
Jefa del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos **LA TESIS:**

“Diseño y Construcción de un Motor Magnético”.

Que presenta el pasante: **ROBERTO ALONSO MONROY MEDINA**  
Con número de cuenta: **40808223-1** para obtener el Título de: **Ingeniero Mecánico Electricista**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**  
“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 26 de Junio de 2013.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Ing. Enrique Cortés González	
<b>VOCAL</b>	Ing. Jorge López Cruz	
<b>SECRETARIO</b>	M. I. Ricardo Alberto Delgadillo Torres	
<b>1er SUPLENTE</b>	M.I. Jaime Fuentes Sánchez	
<b>2do SUPLENTE</b>	Ing. Ángel Isaías Lima González	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

HHA/Vc



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO  
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ  
Jefa del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos LA TESIS:

“Diseño y Construcción de un Motor Magnético”.

Que presenta el pasante: SEBASTIAN MIGUELES GRANADOS

Con número de cuenta: 40806583-4 para obtener el Título de: Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 26 de Junio de 2013.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	<u>Ing. Enrique Cortés González</u>	
<b>VOCAL</b>	<u>Ing. Jorge López Cruz</u>	
<b>SECRETARIO</b>	<u>M. I. Ricardo Alberto Delgadillo Torres</u>	
<b>1er SUPLENTE</b>	<u>M.I. Jaime Fuentes Sánchez</u>	
<b>2do SUPLENTE</b>	<u>Ing. Ángel Isaías Lima González</u>	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

HHA/Vc

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad hasta ahora; en segundo lugar a cada uno de los que son parte de mi familia, A mis padres CIRILO Y FRANCISCA; quienes a lo largo de toda mi vida han apoyado y motivado mi formación académica, creyeron en mí en todo momento y no dudaron de mis habilidades,

A mis hermanos GUSTAVO, DIANA, ELVIA; por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora.

Por último a mi compañero de tesis, ROBERTO ALONSO, porque en esta armonía grupal lo hemos logrado y a mi asesor de tesis quién nos ayudó en todo momento, M.I. Ricardo Alberto Delgadillo Torres.

Este proyecto es el resultado del esfuerzo conjunto de todos los que formamos el grupo de trabajo. Por esto agradezco a, quienes a lo largo de este tiempo han puesto a prueba sus capacidades y conocimientos en el desarrollo de este proyecto de tesis el cual ha finalizado llenando todas nuestras expectativas. A mis profesores a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias a su paciencia y enseñanza y finalmente un eterno agradecimiento a esta prestigiosa universidad la cual abrió abre sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

**SEBASTIAN MIGUELES GRANADOS**

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad hasta ahora; en segundo lugar a cada uno de los que son parte de mi familia, A mis padres ANTONIO Y MARIA; quienes a lo largo de toda mi vida han apoyado y motivado mi formación académica, creyeron en mí en todo momento y no dudaron de mis habilidades,

A mis hermanos GUILLERMO Y LUIS; por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora.

Por último a mi compañero de tesis, SEBASTIAN, porque en esta armonía grupal lo hemos logrado y a mi asesor de tesis quién nos ayudó en todo momento, M.I. Ricardo Alberto Delgadillo Torres.

Este proyecto es el resultado del esfuerzo conjunto de todos los que formamos el grupo de trabajo. Por esto agradezco a, quienes a lo largo de este tiempo han puesto a prueba sus capacidades y conocimientos en el desarrollo de este proyecto de tesis el cual ha finalizado llenando todas nuestras expectativas. A mis profesores a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias a su paciencia y enseñanza y finalmente un eterno agradecimiento a esta prestigiosa universidad la cual abrió abre sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

**ROBERTO ALONSO MONROY MEDINA**

## INDICE

<b>OBJETIVO:</b> .....	<b>1</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>TEMA I ELECTROMAGNETISMO</b> .....	<b>4</b>
<b>1.1 CARGA ELÉCTRICA</b> .....	<b>4</b>
1.1.2 LEY DE COULOMB .....	5
<b>1.2 CAMPO ESTÁTICO</b> .....	<b>6</b>
<b>1.3 CAMPO DINÁMICO</b> .....	<b>7</b>
<b>1.4 FUERZA ELÉCTRICA</b> .....	<b>7</b>
<b>1.5 LEY DE LENZ</b> .....	<b>9</b>
<b>1.6 CAMPO ELÉCTRICO</b> .....	<b>9</b>
<b>1.7 INTENSIDAD DEL CAMPO</b> .....	<b>10</b>
<b>1.8 ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA</b> .....	<b>12</b>
<b>1.9 MOVIMIENTO DE CARGAS EN UN CAMPO ELÉCTRICO</b> .....	<b>13</b>
<b>TEMA II MAGNETISMO</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1 MAGNETISMO</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2 TEORÍA DEL MAGNETISMO</b> .....	<b>16</b>
<b>2.3 MAGNETISMO TERRESTRE</b> .....	<b>17</b>
<b>2.4 INCLINACIÓN MAGNÉTICA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.5 FUERZAS MAGNÉTICAS</b> .....	<b>19</b>
<b>2.6 FUERZA DE LORENTZ</b> .....	<b>20</b>
2.6.1 DIRECCIÓN Y SENTIDO DE LA FUERZA DE LORENTZ.....	21
<b>2.7 ESPECTROS MAGNÉTICOS</b> .....	<b>21</b>
<b>2.8 EL CAMPO MAGNÉTICO</b> .....	<b>22</b>
2.8.1 LÍNEAS DE FUERZA DEL CAMPO MAGNÉTICO .....	22
<b>2.9 LA INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO</b> .....	<b>22</b>
2.9.1 FUERZA SOBRE UNA CARGA.....	23
2.9.2 MOVIMIENTO DE UNA CARGA EN UN CAMPO MAGNÉTICO .....	23
<b>2.10 EL CIRCUITO MAGNETICO</b> .....	<b>25</b>
<b>2.11 UNIDADES</b> .....	<b>25</b>
2.11.1 UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL (SI) RELACIONADAS CON EL MAGNETISMO .....	26
2.11.2 UNIDADES DEL SISTEMA CEGESIMAL (C.G.S) RELACIONADAS CON EL MAGNETISMO .....	26
<b>2.12 LEY DE GAUSS PARA EL CAMPO MAGNÉTICO</b> .....	<b>26</b>

<b>2.13. LEY DE FARADAY-LENZ .....</b>	<b>27</b>
<b>2.14 LA TEORÍA DE LOS DOMINIOS MAGNÉTICOS .....</b>	<b>28</b>
2.14.1 CONCEPTO DE PERMEABILIDAD MAGNÉTICA .....	30
2.14.2 PERMEABILIDAD EN EL SISTEMA C.G.S.....	31
2.14.3 PERMEABILIDAD EN EL SISTEMA INTERNACIONAL .....	31
2.14.4 TABLA COMPARATIVA DE PERMEABILIDAD .....	32
2.14.5 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES MAGNÉTICOS.....	32
<b>TEMA III MATERIALES.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 HISTORIA DE LOS IMANES .....</b>	<b>33</b>
3.1.1 IMANES DE ACERO AL CARBONO .....	33
3.1.2 IMANES DE ALNICO .....	34
3.1.3 IMANES DE FERRITA .....	34
3.1.4 IMANES DE TIERRAS RARAS .....	34
<b>3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS IMANES SEGÚN SU ORIGEN .....</b>	<b>35</b>
<b>3.3 CONCEPTO DE IMÁN DE TIERRAS RARAS.....</b>	<b>35</b>
3.3.1 EXPLICACIÓN DE LA FUERZA.....	36
3.3.2 PROPIEDADES MAGNÉTICAS .....	37
<b>Tabla no.3.1 Comparación de diferentes tipos de imanes permanentes. ....</b>	<b>37</b>
3.3.3 TIPOS DE IMANES DE TIERRAS RARAS.....	37
3.3.4 SAMARIO-COBALTO.....	37
3.3.5 NEODIMIO .....	38
3.3.6 RIESGOS.....	38
3.3.7 APLICACIONES.....	39
3.3.8 APLICACIONES COMUNES .....	39
3.3.9 OTRAS APLICACIONES .....	39
<b>3.4 MATERIAL USADO PARA NUESTRO MOTOR .....</b>	<b>39</b>
3.4.1 IMANES NEODIMIO.....	39
3.4.1.2 DESCRIPION GENERAL .....	40
3.4.1.3 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS IMANES DE NEODIMIO Y SAMARIO-COBALTO SINTERIZADOS (SM-CO). ....	41
3.4.1.4 METODOS DE OBTENCION .....	41
<b>3.5 NAYLAMIND .....</b>	<b>42</b>
3.5.1 QUE ES EL NYLAMIND.....	42
3.5.2 CARACTERÍSTICAS .....	42
3.5.3 TIPO.....	43
3.5.4 FORMAS DE FABRICACIÓN .....	43
3.5.5 APLICACIÓN .....	43
3.5.6 BENEFICIOS .....	44
3.5.7 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL TIPO M TIPO 6 .....	44
<b>3.6 CLASIFICACIÓN DEL NYLAMIND .....</b>	<b>44</b>
3.6.1 NYLAMID M (M=MECÁNICO) .....	45
3.6.1.2 CARACTERÍSTICAS.....	45
3.6.1.3 APLICACIONES TÍPICAS.....	45
3.6.2 NYLAMID SL (SUPER LUBRICADO).....	45
3.6.2.1 CARACTERÍSTICAS.....	45

3.6.2.2 APLICACIONES TÍPICAS .....	46
3.6.3 NYLAMID XL (EXTRA LUBRICADO) .....	46
3.6.3.1 CARACTERÍSTICAS.....	46
3.6.3.2 APLICACIONES TÍPICAS .....	46
3.6.4 NYLAMID TS (TABLA DE SUAJE) .....	46
3.6.4.1 CARACTERÍSTICAS.....	46
3.6.4.2 APLICACIONES TÍPICAS .....	47
3.6.5 NYLAMID 6/6.....	47
3.6.5.1 CARACTERÍSTICAS.....	47
3.6.5.2 APLICACIONES TÍPICAS .....	47
<b>3.7 TABLA COMPARATIVA DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES DEL NYLAMID.....</b>	<b>47</b>
<b>3.8 MATERIAL USADO PARA NUESTRO MOTOR .....</b>	<b>49</b>
3.8.1 NYLAMID M – MECÁNICO – COLOR NATURAL HUESO .....	49
3.8.1.2 APLICACIONES TÍPICAS .....	49
3.8.1.3 TABLA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL NYLAMID M .....	49
3.8.1.4 TABLA DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE NYLAMID M .....	50
3.8.1.5 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL NYLAMID M .....	51
<b>3.9 ALUMINIO .....</b>	<b>51</b>
3.9.1 CLASIFICACIÓN DEL ALUMINIO.....	51
3.9.1.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU ESTADO .....	51
3.9.1.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL PROCESO UTILIZADO .....	52
<b>3.10 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ALUMINIO .....</b>	<b>52</b>
<b>3.11 PROPIEDADES MECÁNICAS .....</b>	<b>53</b>
3.11.1 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS .....	53
3.11.1.2 DUREZA .....	54
3.11.1.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, A LA FLEXIÓN, AL CORTE Y A LA TORSIÓN.....	54
3.11.1.4 RESISTENCIA A BAJAS TEMPERATURAS .....	55
<b>3.12. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....</b>	<b>55</b>
<b>3.13 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS .....</b>	<b>55</b>
<b>3.14 TABLA DE LAS CARACTERISTICAS DEL ALUMINIO.....</b>	<b>56</b>
<b><i>TEMA IV TIPOS DE CARCASA .....</i></b>	<b><i>57</i></b>
4.1 TIPOS DE CARCASAS EN MOTORES.....	57
4.2 NORMA NEMA PARA TIPOS DE CARCASAS DE MOTORES.....	58
4.3 MATERIALES PARA CONSTRUYR UNA CARCAZA.....	58
<b><i>TEMA V TIPOS DE ROTORES Y ESTADORES .....</i></b>	<b><i>60</i></b>
<b>5.1 TIPOS DE ROTORES .....</b>	<b>60</b>
5.1.1 ROTOR DE JAULA DE ARDILLA SIMPLE .....	60
<b>5.2 TIPOS DE ESTADORES.....</b>	<b>61</b>
<b>5.3 TIPOS DE BOBINADOS.....</b>	<b>62</b>
5.3.1 BOBINADO POR POLOS.....	62

<b>TEMA VI APLICACIONES DEL MOTOR.....</b>	<b>63</b>
<b>6.1 COMO MOTOR PARA VENTILADORES .....</b>	<b>63</b>
6.1.1 TIPOS DE VENTILADORES .....	63
<b>6.2 COMO GENERADOR DE IMANES PERMANENTES.....</b>	<b>63</b>
6.2.1 TIPOS DE GENERADORES .....	64
<b>6.3 COMO BATIDORA MEZCLADORA .....</b>	<b>64</b>
6.3.1 FUNCIONAMIENTO .....	65
<b>TEMA VII DISEÑO.....</b>	<b>66</b>
<b>7.1 CÁLCULOS .....</b>	<b>66</b>
7.1.2 CÁLCULOS PARA LA FUERZA MAGNÉTICA .....	66
7.1.3 FORMULAS Y DESPEJES PARA LA INDUCTANCIA MAGNÉTICA.....	67
7.1.4 CALCULOS PARA LA CORRIENTE .....	68
7.1.5 CALCULOS PARA LA INDUCTANCIA MAGNETICA .....	69
7.1.6 CALCULOS PARA LOS RADIOS .....	71
<b>7.2 DIBUJOS .....</b>	<b>72</b>
<b>7.3 ESTRUCTURAS.....</b>	<b>83</b>
7.3.1 PROCEDIMIENTO DE ELABORACION DE PIEZAS .....	83
7.3.2 PIEZAS DEL MOTOR .....	86
7.3.3 ARMADO DEL MOTOR .....	87
<b>7.4 PRUEBAS .....</b>	<b>88</b>
7.4.1 PRUEBAS DEL COMPORTAMIENTO DEL CAMPO MAGNETICO .....	88
7.4.2 PRUEBAS DE VELOCIDAD.....	89
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>90</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>91</b>

## OBJETIVO:

Diseño y construcción de un motor magnético para realizar las pruebas y generar un movimiento con campo magnético.

## RESUMEN.

Un motor magnético es un dispositivo que genera energía en base a un sistema de imanes permanentes dispuestos de manera conveniente, para producir un movimiento continuo, mientras que dure la energía magnética encerrada dentro de los imanes debido a la estructura del material.

## INTRODUCCIÓN.

El fenómeno del magnetismo es una propiedad que se manifiesta en forma natural en ciertas sustancias como el hierro, cobalto y níquel, principalmente, y que se caracteriza por la aparición de fuerzas de atracción o de repulsión entre imanes. Esto sugiere que existen dos zonas magnéticas llamadas polo norte y sur; concepto que introdujo en 1600, el físico **William Gilbert**. El primer imán utilizado fue un mineral de hierro de color negro que recibió el nombre de magnetita, pues provenía de la región de Magnesia, en Asia, y ya era conocida hace más de 2500 años por las culturas china y griega.

En 1820, el profesor de Física Danés **Hans Christian Oersted** descubrió en forma casual durante una clase, que cerca de un cable por el que circulaba corriente eléctrica la aguja de una brújula se desviaba de la dirección norte-sur. A partir de esta experiencia, concluyó que el magnetismo no solo es causado por los imanes sino que también puede ser producido por la corriente eléctrica. Este hecho se conoce como el **efecto Oersted** y fue el primer paso que conectaba la electricidad y el magnetismo, en un área que posteriormente se llamó **electromagnetismo**.

Además de los imanes, los campos magnéticos también pueden ser generados por las cargas eléctricas en movimiento. De acuerdo con la ley de **Biot y Savart**, aproximadamente en 1820 y nos dice que la intensidad del campo magnético inducido por una carga eléctrica en movimiento es proporcional al valor de la carga eléctrica y su velocidad, e inversamente proporcional a la distancia que separa a la carga del punto donde estamos haciendo la medida. Como la corriente eléctrica es un desplazamiento de carga eléctrica (electrones), una carga eléctrica producirá un campo magnético. Una aplicación de este fenómeno son los electroimanes. Al hacer circular una corriente eléctrica por una bobina enrollada sobre un núcleo magnético, obtenemos un campo magnético.

Poco tiempo después, el Francés **André-Marie Ampère** descubrió que, así como dos imanes pueden atraerse o repelerse entre sí, dos corrientes eléctricas también interactúan magnéticamente. Planteó además que el magnetismo

natural era producido por pequeñas corrientes eléctricas que actuaban a nivel molecular.

Al igual que una carga crea un campo eléctrico en su entorno y una masa crea un campo gravitatorio, un imán crea un **campo magnético** a su alrededor, que se detecta por la aparición de fuerzas magnéticas, y que se puede representar mediante **líneas de campo magnético** o **de fuerza magnética**; concepto acuñado en 1831 por **Michael Faraday** que empezó a desarrollar ideas sobre la teoría de campos, concluyendo que se pueden generar corrientes eléctricas a partir de campos magnéticos variables.

La Ley de Lenz llamada así en honor del físico Germano-Báltico **Heinrich Lenz**, quien la formuló en el año 1834, plantea que las tensiones inducidas serán de un sentido tal que se opongan a la variación del flujo magnético que las produjo; no obstante esta ley es una consecuencia del principio de conservación de la energía.

La polaridad de una tensión inducida es tal, que tiende a producir una corriente, cuyo campo magnético se opone siempre a las variaciones del campo existente producido por la corriente original.

El campo magnético se mide en cada punto mediante el vector **intensidad de campo magnético** ( $\vec{B}$ ), que es tangente a las líneas de campo magnético. Estas tienen las siguientes propiedades:

- En el exterior del imán, cada línea se orienta desde el polo norte al polo sur.
- A diferencia de las líneas de campo eléctrico, las líneas de campo magnético son cerradas y no se interrumpen en la superficie del imán.
- El vector de campo magnético en cada punto del espacio es tangente a la línea de campo que pasa por ese punto.
- La cantidad de líneas por unidad de área en la vecindad de un punto, es proporcional a la intensidad del campo en dicho punto.
- Las líneas nunca se interceptan ni se cruzan en ningún punto del espacio.

El aporte hecho por **James Clerk Maxwell**, quien en la década de 1860 descubrió que era posible generar campos magnéticos a partir de campos eléctricos variables y nos menciona en el prefacio de su obra *Treatise on Electricity and Magnetism* (1873) que su principal tarea consistía en justificar matemáticamente conceptos físicos descritos hasta ese momento de forma únicamente cualitativa, como las leyes de la inducción electromagnética y de los campos de fuerza, enunciadas por **Michael Faraday**. Con este objeto, Maxwell introdujo el concepto de onda electromagnética, que permite una descripción matemática adecuada de la interacción entre electricidad y magnetismo mediante sus célebres ecuaciones que describen y cuantifican los campos de fuerzas. Su teoría sugirió la posibilidad de generar ondas electromagnéticas en el laboratorio, hecho que corroboró **Heinrich Hertz** en 1887, ocho años después de la muerte de Maxwell, y que posteriormente supuso el inicio de la era de la comunicación rápida a distancia.

Dado que una carga eléctrica en movimiento induce un campo magnético, podemos considerar a esta carga como un imán. Pues bien, al igual que cuando

aproximamos dos imanes comprobamos que entre ellos existe una fuerza (de repulsión si aproximamos polos homólogos y de atracción si los polos son opuestos), una carga eléctrica que se desplaza en las proximidades de un imán (en el seno de un campo magnético) también experimentará ese tipo de fuerzas. El valor de esta fuerza depende del valor de la carga eléctrica en movimiento, la intensidad del campo magnético y de la velocidad a la que se desplaza la carga. Para determinar su valor podemos aplicar la ley de Lorentz aporte dado aproximadamente en 1890 por **Hendrik Antoon Lorentz**. Para conocer su dirección y sentido se puede aplicar la regla de la mano derecha

Todos estos estudios permitieron establecer que la electricidad y el magnetismo son fenómenos íntimamente relacionados, siendo, en realidad, dos aspectos diferentes derivados de una misma propiedad de la materia: la **carga eléctrica**.

# TEMA I ELECTROMAGNETISMO

## 1.1 CARGA ELÉCTRICA

Los átomos están constituidos por un núcleo y una corteza (órbitas) En el núcleo se encuentra muy firmemente unidos los protones y los neutrones. Los protones tienen carga positiva y los neutrones no tienen carga. Alrededor del núcleo se encuentran las órbitas donde se encuentran girando sobre ellas los electrones. Los electrones tienen carga negativa.

Ambas cargas la de los protones (positivos) y la de los electrones (negativa) son iguales, aunque de signo contrario.

La carga eléctrica elemental es la del electrón. El electrón es la partícula elemental que lleva la menor carga eléctrica negativa que se puede aislar. Como la carga de un electrón resulta extremadamente pequeña se toma en el S.I. (Sistema Internacional) para la unidad de Carga eléctrica el Culombio que equivale a  $6.24 \times 10^{18}$  electrones.

Para denominar la carga se utiliza la letra  $q$  y para su unidad la  $C$ .

Ejemplo:  $q = 5 C$ .

En la tabla No.1.1 Muestra la masa y la carga de las partículas elementales.

Partícula	Masa	Carga eléctrica
Protón	$1.6725 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$+1.6725 \times 10^{-27} C$
Neutrón	$1.6750 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$0 C$
Electrón	$9.1091 \times 10^{-31} \text{ kg}$	$-1.6725 \times 10^{-27} C$

La tabla No.1.1 Muestra la masa y la carga de las partículas elementales.

Para el estudio de la electricidad nos basta con este modelo aproximado del átomo, con sus partículas elementales (electrón, protón y neutrón). Los protones son de carga eléctrica positiva y se repelen entre sí. Los electrones son de carga eléctrica negativa y se repelen entre sí. Los neutrones no tienen carga eléctrica.

Entre los electrones y los protones se ejercen fuerzas de atracción. Puesto que los electrones giran a gran velocidad alrededor del núcleo, existe también una fuerza centrípeta que tiende a alejar del núcleo a los electrones. Entre dichas fuerzas se establece un equilibrio, de tal manera que los electrones giran en las órbitas y no son atraídos por los protones del núcleo y tampoco se salen de sus órbitas.

Los protones son de carga eléctrica positiva y se repelen entre sí.  
Los electrones son de carga eléctrica negativa y se repelen entre sí.  
Los neutrones no tienen carga eléctrica.  
Cargas del mismo signo se repelen y cargas de signo contrario se atraen.

### 1.1.2 LEY DE COULOMB

Como ya se ha dicho cargas del mismo signo se repelen y cargas de signo contrario se atraen.

Coulomb en 1777 enunció la ley de la Electrostática (electricidad estática) que lleva su nombre (Ley de Coulomb):

La intensidad de la fuerza ( $F$ ) con la cual dos cargas eléctricas puntuales se atraen o se repelen, es directamente proporcional al producto de sus cargas ( $q_1$  y  $q_2$ ) e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia ( $r$ ) que las separan.

$$F = K \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Donde:

$F$ : Fuerza expresada en Newtons [N]

$q_1$  y  $q_2$ : Cargas expresadas en Culombios [C]

$r$ : Distancia de separación entre las cargas expresada en metros[m]

$K$ : Constante:  $9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$  para el aire o vacío.

La intensidad de la fuerza con la cual dos cargas eléctricas puntuales se atraen o se repelen, es directamente proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separan.

## 1.2 CAMPO ESTÁTICO

Los campos eléctricos y magnéticos son líneas de fuerza invisibles generadas por fenómenos como el magnetismo terrestre, las tormentas eléctricas y el uso de la electricidad. Por ejemplo la brújula que señala el campo magnético terrestre.

Cuando dichos campos no varían con el tiempo reciben el nombre de **estáticos**.

Un campo eléctrico estático es el campo de fuerza que se crea por la atracción y repulsión de cargas eléctricas que están fijas en el espacio ("electricidad estática").

Un campo magnético estático es un campo de fuerza producido por un imán o por un flujo constante de electricidad, por ejemplo en los aparatos que utilizan corriente continua (CC).

Estos campos estáticos son diferentes a los que proceden de campos que cambian con el tiempo, como los generados por aparatos que utilizan corriente alterna (CA), teléfonos móviles, etc.

Los campos eléctricos estáticos se producen de forma natural en la atmósfera, especialmente bajo las nubes de tormenta, y pueden provocar la caída de rayos.

La fricción, por ejemplo la producida al caminar sobre una alfombra, puede generar intensos campos eléctricos estáticos y provocar chispas.

El empleo de corriente continua (CC), por ejemplo en determinados sistemas ferroviarios, puede generar también campos eléctricos estáticos. Lo mismo ocurre en el caso de televisores y pantallas de ordenador.

Algunos animales perciben el campo magnético terrestre y lo utilizan para orientarse. Los campos magnéticos estáticos artificiales aparecen cuando se utiliza corriente directa, por ejemplo en los trenes eléctricos o en procesos industriales como la producción de aluminio. Estos campos pueden llegar a ser más de 1.000 veces superiores al campo magnético terrestre.

Los últimos avances tecnológicos permiten generar campos magnéticos hasta 100.000 veces más intensos que el campo magnético terrestre.

Se utilizan en investigación y en equipos médicos de obtención de imágenes de resonancia magnética (IRM), que proporcionan imágenes en tres dimensiones del cerebro y de otros tejidos blandos. Los pacientes sometidos al escáner y el personal que maneja el equipo pueden verse expuestos a campos magnéticos de gran intensidad.

Un campo eléctrico estático puede ser representado geoméricamente con líneas tales que en cada punto el campo vectorial sea tangente a dichas líneas, a estas líneas se las conoce como "líneas de campo". Matemáticamente las líneas de campo son las curvas integrales del campo vectorial. Las líneas de campo se

utilizan para crear una representación gráfica del campo, y pueden ser tantas como sea necesario visualizar, tal como se muestra en la figura No. 1.1.

Las líneas de campo son líneas perpendiculares a la superficie del cuerpo, de manera que su tangente geométrica en un punto coincide con la dirección del campo en ese punto. Esto es una consecuencia directa de la ley de Gauss, es decir encontramos que la mayor variación direccional en el campo se dirige perpendicularmente a la carga. Al unir los puntos en los que el campo eléctrico es de igual magnitud, se obtiene lo que se conoce como superficies equipotenciales, son aquellas donde el potencial tiene el mismo valor numérico. En el caso estático al ser el campo eléctrico un campo irrotacional las líneas de campo nunca serán cerradas (cosa que sí puede suceder en el caso dinámico, donde el rotacional del campo eléctrico es igual a la variación temporal del campo magnético cambiada de signo, por tanto una línea de campo eléctrico cerrado requiere un campo magnético variable, cosa imposible en el caso estático).

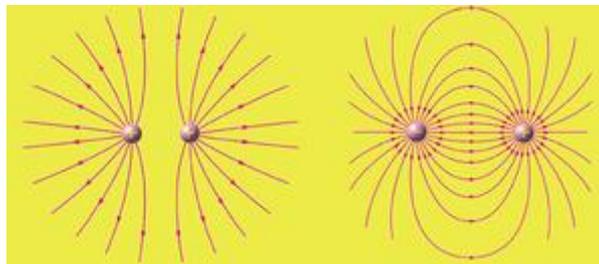


Figura No.1.1 Líneas de campo eléctrico correspondiente a cargas iguales y opuestas, respectivamente.

### 1.3 CAMPO DINÁMICO

En el caso dinámico pueden definirse igualmente las líneas sólo que el patrón de líneas variará de un instante a otro del tiempo, es decir, las líneas de campo al igual que las cargas serán móviles.

### 1.4 FUERZA ELÉCTRICA

Entre dos o más cargas aparece una fuerza denominada fuerza eléctrica cuyo módulo depende del valor de las cargas y de la distancia que las separa, mientras que su signo depende del signo de cada carga. Las cargas del mismo signo se repelen entre sí, mientras que las de distinto signo se atraen, esto se muestra a continuación en la figura No. 1.2.

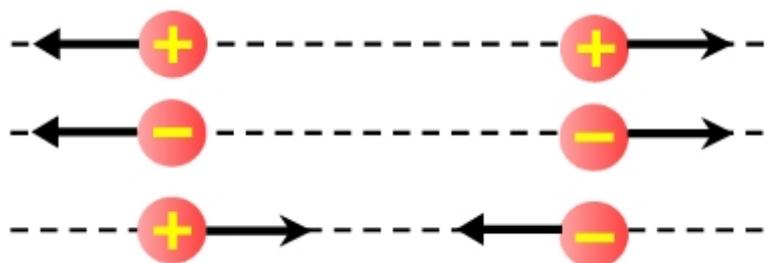


Figura No.1.2 Las cargas del mismo signo se repelen entre sí, mientras que las de distinto signo se atraen.

La fuerza entre dos cargas se calcula como:

$$F_e = \frac{K q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

$$k = 9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$$

Donde:

$q_1, q_2$  = Valor de las cargas 1 y 2.

$d$  = Distancia de separación entre las cargas.

$F_e$  = Fuerza eléctrica.

$k$  = Constante para el aire o vacío.

La fuerza es una magnitud vectorial, por lo tanto además de determinar el módulo se deben determinar dirección y sentido.

Es la fuerza electrostática que se produce cuando un cuerpo se carga, esta fuerza se puede detectar por los efectos que causa sobre cuerpos livianos como polvo o pedacitos de papel.

Seguramente alguna vez frotaste un peine o una regla plástica en tu pelo o tu ropa y habrás notado que cuando se acerca a papelitos, éstos son atraídos.

Bien, lo que ocurrió es que cargaste el cuerpo (regla o peine) y por lo tanto generó un campo electrostático, cuando este campo se acerca a los papelitos los atrae a raíz de la fuerza eléctrica que genera.

También se puede encontrar un campo eléctrico en la pantalla del televisor, si cuando lo apagas acercas el brazo o tu cabeza verás que los pelos son atraídos.

También se carga el vidrio cuando lo frotas con un paño y atrae el polvo del ambiente, es por eso que existe un limpiador de vidrios anti electrostático. Lo mismo pasa con los CD.

## 1.5 LEY DE LENZ

El sentido de la corriente inducida se puede obtener de la ley de Lenz que establece que,

El sentido de la corriente inducida sería tal que su flujo se opone a la causa que la produce.

En las figuras se puede observar que cuando el imán se acerca a las espiras, el flujo magnético a través de las espiras aumenta. De acuerdo con la Ley de Lenz, las corrientes inducidas deben crear flujos, que se deben oponer al aumento del flujo inicial, y los sentidos de las corrientes serán los indicados, mostradas en la figura No.1.3.

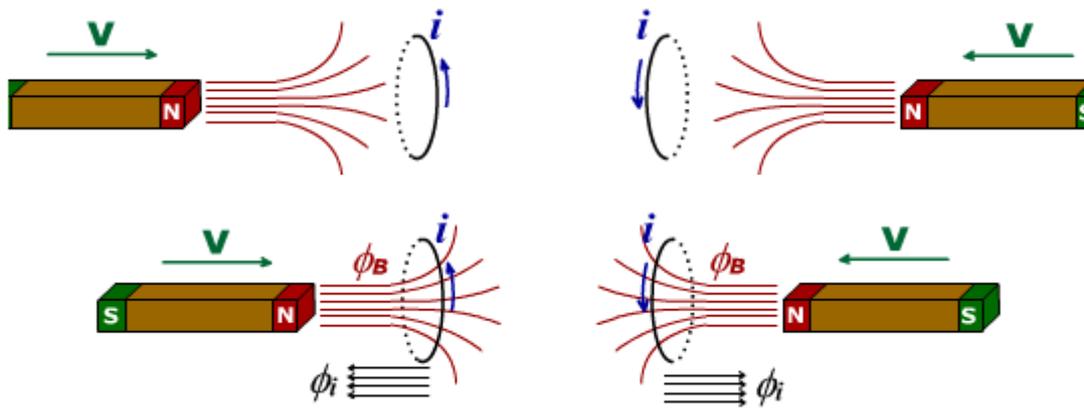


Figura No.1.3 De acuerdo con la Ley de Lenz, las corrientes inducidas deben crear flujos, que se deben oponer al aumento del flujo inicial, y los sentidos de las corrientes serán los indicados.

## 1.6 CAMPO ELÉCTRICO

Desarrollado por el Inglés Michael Faraday (1791-1867), vence la dificultad del concepto de fuerza a distancia.

El propio Newton se sintió incómodo cuando la postuló en su ley de gravitación universal.

Definición: El Campo eléctrico es una propiedad del espacio adquirida por la presencia de una carga eléctrica.

Una definición posible en términos operacionales es:

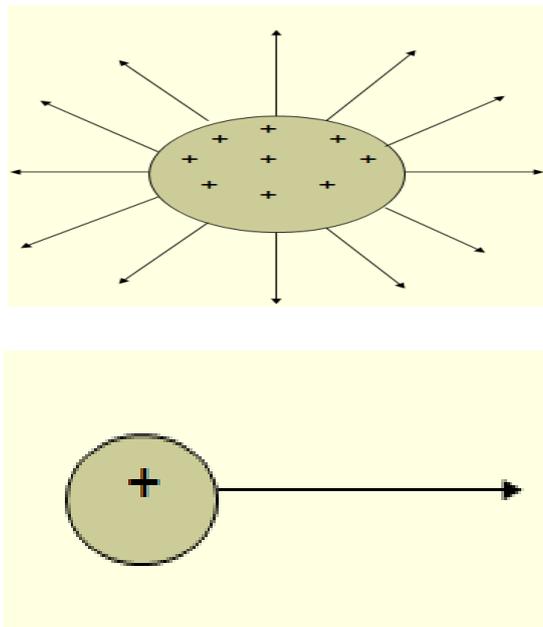
El campo eléctrico  $E$  en un punto del espacio que corresponde al vector de posición  $r$ , es la fuerza que experimentaría una carga unitaria positiva si estuviera localizada en ese punto (si su localización no alterara la distribución de cualquiera de las demás cargas en el espacio).

En otras palabras, el campo eléctrico indica que la fuerza experimenta una carga en una posición determinada del espacio.

## 1.7 INTENSIDAD DEL CAMPO

Para poder interpretar cómo es la **intensidad del campo eléctrico producido por una carga eléctrica**, se emplea una carga positiva (por convención) de valor muy pequeño, llamada **carga de prueba**, de esta manera sus efectos, debido al campo eléctrico, se pueden despreciar.

**Esa pequeña carga de prueba  $q$**  se coloca en el punto del espacio a investigar como se ve a continuación en la figura No.1.4.



En la figura No.1.4 anterior se observa la dirección y el sentido del vector campo eléctrico.

En la figura No.4 anterior se observa la dirección y el sentido del vector campo eléctrico  $E$  debido a un cuerpo con carga positiva que actúa sobre la carga de prueba  $q$ . Si el cuerpo tuviera carga negativa, el sentido del vector campo eléctrico  $E$ , sería el contrario.

Si la carga de prueba recibe una fuerza de origen eléctrico, diremos que en ese punto del espacio existe un **campo eléctrico**, cuya intensidad  $E$  es igual a la relación dada entre la **fuerza  $F$**  y el valor de dicha **carga de prueba  $q$** . Por lo tanto:

$$E = \frac{F}{q}$$

Donde:

$E$  = intensidad del campo eléctrico en Newtons/Coulomb  $\frac{N}{C}$ .

$F$  = fuerza que recibe la carga de prueba en Newtons (N) o dinas.

$q$  = valor de la carga de prueba en Colulombs (C).

Como se observa, **la intensidad del campo eléctrico E, es una magnitud vectorial**, toda vez que la fuerza **F** también lo es, **por ello los campos eléctricos se suman vectorialmente**. Así pues, la dirección y el sentido del vector representativo de la intensidad del campo eléctrico en un punto será igual a la de la fuerza que actúa en ese punto sobre la carga de prueba, la cual como señalamos es positiva por convención.

La dirección y el sentido de la intensidad del campo eléctrico E en cualquier punto del espacio que rodea a una carga positiva, figura No. 1.5, a) están dirigidos hacia fuera de la carga. b) Si la carga es negativa, E está dirigido hacia el centro.

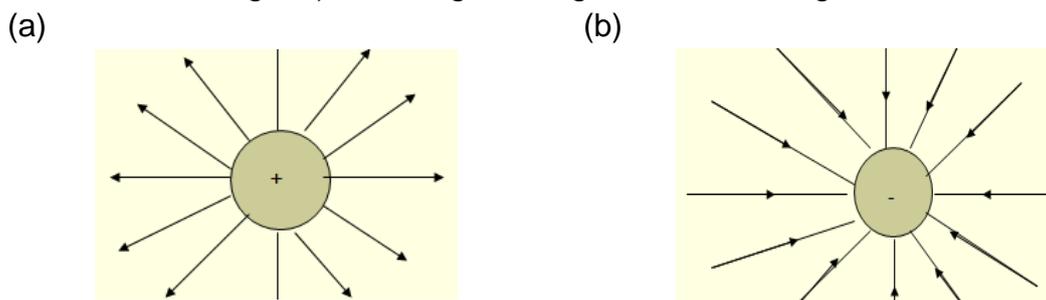


Figura No.1.5 La dirección y el sentido de la intensidad del campo eléctrico  
a) están dirigidos hacia fuera de la carga.  
b) Si la carga es negativa, E está dirigido hacia el centro.

**El valor de la intensidad del campo eléctrico E no es constante, sino que disminuye a medida que aumenta la distancia.** Sin embargo, el valor de E, será el mismo para todos los puntos con igual distancia del centro de una carga. Cuando se tiene un cuerpo esférico cargado eléctricamente de dimensiones tales que se supongan como una carga puntual (la cual tiene un cuerpo cargado de pequeñas dimensiones), el valor de la intensidad de su campo eléctrico en un determinado punto a su alrededor se determina basándose en que toda la carga de la esfera está reunida en su centro como si fuera una carga puntual.

Si se desea calcular la intensidad del campo eléctrico E a una determinada distancia r de una carga q como se ve en la figura No. 6, se considera que una carga de prueba  $q_1$  colocada a dicha distancia recibe una fuerza F debida a q y de acuerdo con la Ley de Coulomb se calcula con la expresión siguiente:

$$F_e = \frac{K q \cdot q_1}{r^2} (1)$$

Como:

$$E = \frac{F}{q_1} (2)$$

Sustituyendo la ecuación 1 en 2 tenemos:

$$E = \frac{K q q_1}{r^2 q_1} (3)$$

Donde:

$$E = \frac{K q \cdot q_1}{r^2} (4)$$

La ecuación (4), nos permitirá calcular el valor de E en cualquier punto de una carga eléctrica. El valor de k es el mismo de la Ley de Coulomb, figura No. 1.6.

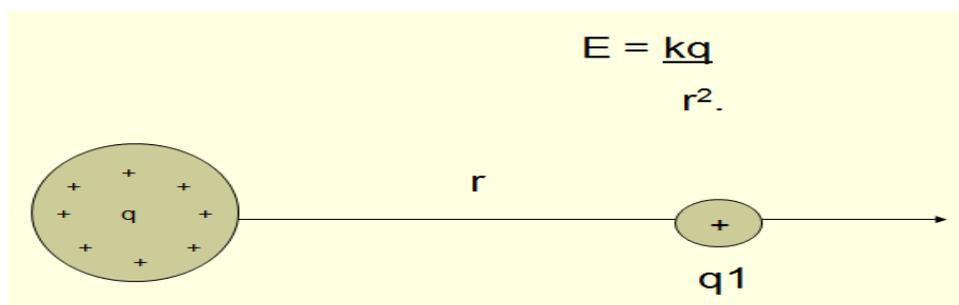


Figura No.1.6 Intensidad del campo eléctrico E, producido por una carga q a una distancia r del centro de dicha carga.

## 1.8 ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA

Definimos la energía potencial eléctrica:

$$\Delta E_p$$

De un sistema de cargas como el trabajo que hay que hacer para formar ese sistema de cargas trayéndolas desde una distancia infinita. Suponemos que todas las cargas están en reposo cuando están en el infinito, esto es, no tienen energía cinética inicial, figura No. 1.7.

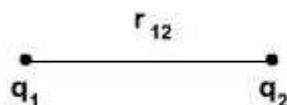


Figura No.1.7 Sistema de cargas.

Para traer la carga  $q_1$  (Fig.7) desde infinito no se requiere trabajo, para traer  $q_2$  hasta una distancia  $r_{1,2}$  de  $q_1$  se requiere un trabajo, quedando de la siguiente manera:

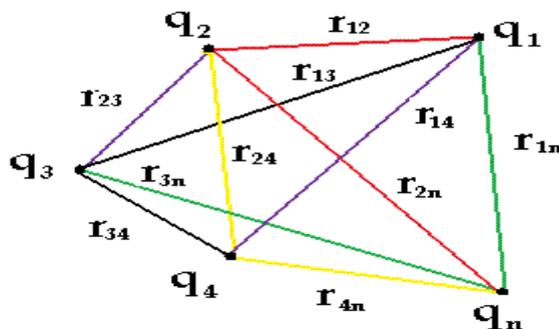
$$W_2 = q_1 V_2 = k \frac{q_1 q_2}{r_{1,2}}$$

De modo que la energía potencial eléctrica del sistema  $(q_1, q_2)$  es:

$$W_2 = k \frac{q_1 q_2}{r_{1,2}}$$

Para un sistema de n cargas, la energía potencial será,

$$E_p = \sum_{\text{todas la parejas}} \frac{q_i q_j}{r_{ij}}$$



En forma explícita,

$$E_p = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}} + k \frac{q_1 q_3}{r_{13}} + \dots + k \frac{q_1 q_n}{r_{1n}} + \dots + k \frac{q_{n-1} q_n}{r_{(n-1)n}}$$

### 1.9 MOVIMIENTO DE CARGAS EN UN CAMPO ELÉCTRICO

Una carga, al moverse libremente entre dos puntos de un campo eléctrico constante, experimenta una aceleración y un incremento de su energía cinética que equivale al producto de la carga por la diferencia de potencial eléctrico entre esos dos puntos.

En el movimiento de partículas cargadas en un campo eléctrico, se pueden dar dos situaciones: que las partículas ingresen en forma paralela a las líneas de campo o que lo hagan en forma perpendicular a estas líneas.

En un campo eléctrico uniforme en que  $V_A > V_B$ , una carga positiva inicialmente en reposo se moverá de mayor a menor potencial, mientras que una carga negativa se moverá de menor a mayor potencial.

Así, los protones se mueven en la dirección en que disminuye el potencial eléctrico y los electrones lo hacen en la dirección en que el potencial aumenta.

Sin embargo, ambas cargas describirán una trayectoria rectilínea con un movimiento uniformemente acelerado paralelo a las líneas de campo, ya que la fuerza eléctrica sobre ellas es constante.

La energía potencial de la partícula inicialmente en reposo se transformará en energía cinética a medida que se mueve de acuerdo a su signo según:

$$qV = \frac{mv^2}{2}$$

Esta expresión que muestra la conservación de la energía, permite determinar la velocidad que alcanzará la partícula al atravesar la diferencia de potencial  $\Delta V$ . Es común expresar la energía de movimiento de las partículas cargadas que se desplazan en un campo eléctrico mediante la unidad electrón volt (eV).

Un electrón volt corresponde a la energía que un electrón (o un protón) adquiere cuando se acelera a través de una diferencia de potencial de un volt y su equivalencia con el joule es:

$$1eV = 1.6 \times 10^{-19} J$$

Cuando la velocidad inicial de la partícula es perpendicular a las líneas del campo eléctrico, estas describen trayectorias parabólicas y con un movimiento uniformemente acelerado, curvándose en el sentido de las líneas de campo, si son positivas, y en sentido contrario, si son negativas.

Este procedimiento es útil para determinar la carga eléctrica y la masa de muestras radiactivas, radiación cósmica, etc.

## TEMA II MAGNETISMO

### 2.1 MAGNETISMO

El **magnetismo** (del latín *magnes*, *-ētis*, imán) es un fenómeno físico por el que los materiales ejercen fuerzas de atracción o repulsión sobre otros materiales. Hay algunos materiales conocidos que han presentado propiedades magnéticas detectables fácilmente como el níquel, hierro, cobalto y sus aleaciones que comúnmente se llaman imanes. Sin embargo todos los materiales son influidos, de mayor o menor forma, por la presencia de un campo magnético.

El magnetismo también tiene otras manifestaciones en física, particularmente como uno de los dos componentes de la radiación electromagnética, como por ejemplo, la luz.

Cada electrón es, por su naturaleza, un pequeño imán. Ordinariamente, innumerables electrones de un material están orientados aleatoriamente en diferentes direcciones, pero en un imán casi todos los electrones tienden a orientarse en la misma dirección, creando una fuerza magnética grande o pequeña dependiendo del número de electrones que estén orientados.

Además del campo magnético intrínseco del electrón, algunas veces hay que contar también con el campo magnético debido al movimiento orbital del electrón alrededor del núcleo. Este efecto es análogo al campo generado por una corriente eléctrica que circula por una bobina. De nuevo, en general el movimiento de los electrones no da lugar a un campo magnético en el material, pero en ciertas condiciones los movimientos pueden alinearse y producir un campo magnético total medible.

El comportamiento magnético de un material depende de la estructura del material y, particularmente, de la configuración electrónica.

Ciertas sustancias minerales y la piedra imán tienen la propiedad de atraer o repeler las partículas de hierro o acero. A estas sustancias se les llama "imán natural" y a la propiedad de atraer o repeler se le denomina "magnetismo".

Los imanes pueden confeccionarse y, entonces, se les llama imán artificial, siendo sus propiedades idénticas al imán natural.

Los imanes artificiales se manufacturan a base de una cierta clase de acero al que se le agrega tungsteno.

El magnetismo puede ser dado:

- a) Por frotamiento con un imán natural o artificial.
- b) Por percusión dentro de un campo magnético.
- c) Por corriente eléctrica hecha pasar a través de un solenoide.

Existen además del hierro y acero otras materias que son atraídas en menor grado por un imán y son también susceptibles de magnetización, por ello se les denomina "cuerpos magnéticos".

Hay en un imán dos puntos que deben ser especialmente considerados: uno cerca de cada extremo, en el cual la atracción es máxima. Cercano a su medianía el efecto de atracción es “cero” (plano neutro).

Estos puntos están a un doceavo del largo de sus extremos, y son los que se denominan “polos del imán”; la línea que los une es el eje magnético.

Un imán suspendido con su eje magnético horizontal y libre de girar sobre un eje vertical, tomará una dirección definida, aproximadamente Norte – Sur magnético. El extremo que mira o apunta hacia el Norte, se le denomina “polo norte del imán” y se le asigna el color "rojo". Al extremo que apunta hacia el Sur se denomina "polo sur del imán", asignándole el color "azul".

En un imán no puede existir un solo polo. Siempre estará presente el polo norte y el sur, tanto es así, que si un imán se quiebra, cada parte forma otro imán separadamente.

La cantidad de magnetismo que puede adquirir un cuerpo no es indefinido. Tiene un límite hasta cierta cantidad llamada “Saturación”. También se ha establecido que el magnetismo se pierde gradualmente con el tiempo, siendo esta disminución muy lenta, aunque actualmente los imanes artificiales tienen características retentivas muy grandes, por lo que la pérdida de magnetismo es muy reducida.

Otra característica de los imanes es que si lo calentamos, pierde su fuerza magnética hasta llegar a perderla totalmente cuando se le calienta al rojo cereza. Si lo volvemos a enfriar vuelve a ser cuerpo magnético, pero ha perdido el magnetismo que tenía.

Si sometemos un imán o un cuerpo magnético o enfriamiento; éste, no pierde sus características magnéticas. En cambio las vibraciones alteran el magnetismo, aumentándolo o disminuyéndolo de acuerdo con las circunstancias.

Las propiedades de los imanes son permanentes en todas partes del mundo, cualquiera que sea la dirección en que se les coloque.

**Campo Magnético:** Se llama campo magnético, la superficie que está bajo la influencia de un imán. El campo magnético está formado por “líneas de fuerzas” que salen del polo norte (rojo) y entran por el polo sur (azul).

**Inducción:** Si colocamos un trozo de hierro en contacto con un polo de un imán o cerca de él, este hierro se magnetizará y adquirirá las propiedades de un imán. A esto se le llama magnetismo por inducción.

## 2.2 TEORÍA DEL MAGNETISMO.

El hecho que el hierro puede ser magnetizado ha sido conocido desde la antigüedad, pero la explicación de este fenómeno ha debido esperar los recientes conocimientos adquiridos de la estructura atómica. De acuerdo a esta teoría, el campo magnético alrededor de un conductor con corriente y el magnetismo de un imán permanente, son el mismo fenómeno; es decir, son campos creados por cargas eléctricas en movimiento. Esto ocurre ya sea que la carga está moviéndose a lo largo de un conductor, o fluyendo en la masa ígnea interior de la tierra, o circundando la tierra a gran altura como un flujo de partículas cargadas, o girando alrededor del núcleo de un átomo.

Ha sido recientemente comprobado que existe en el hierro y otras sustancias ferromagnéticas, regiones microscópicamente pequeñas llamadas "dólmens". En cada dólmen, los campos creados por electrones girando alrededor de sus núcleos atómicos son paralelos entre sí, siendo la causa que el dólmen sea magnetizado hasta la saturación.

En un pedazo de hierro con magnetismo los dólmenes están dispuestos en direcciones desordenados unos con respecto a otros.

Si la substancia es colocada en un campo magnético débil, los dólmenes giran un poco hacia la de ese campo. Aquellos dólmenes que están prácticamente casi paralelos al campo aumentan en tamaño a expensas de los que se encuentran menos paralelos. Si el campo se hace suficientemente fuerte, todos los dólmenes giran súbitamente a fin de quedar paralelos al llamado "eje cristal", que es el eje imaginario más cercanamente paralelo a la dirección del campo. Si la fuerza del campo sigue aumentando hasta un cierto valor dependiente de las condiciones individuales, todos los dólmenes giran colocándose paralelos al campo; en estas condiciones se dice que el hierro está magnéticamente "saturado".

Si se saca el campo magnético, los dólmenes tienen una tendencia a girar más o menos rápidamente hacia una dirección más paralela a algún "eje cristal", siendo este giro más lento a direcciones desordenados, bajo la influencia de agitación térmica.

### 2.3 MAGNETISMO TERRESTRE

La tierra actúa como un gran imán esférico (figura No.2.1). Muchas teorías han tratado de mostrar el carácter de este magnetismo, pero todas han fallado al constatar su inconsistencia como alguno de los factores observados. No existe, hasta el momento, ninguna aceptable; sin embargo, se observan los efectos de su campo magnético y debemos imaginarnos que el centro de ella tiene un poderoso imán apuntando con su eje mayor en la dirección del eje de la tierra; debemos admitir que la posición de este imán no es absolutamente fijo y que sus polos se mueven muy lentamente.

El campo magnético terrestre no es constante, ni en intensidad ni en dirección. La variación es diaria, anual y secular. El cambio de intensidad es muy pequeño y no afecta en navegación. Lo mismo ocurre con la variación diaria y anual en dirección. Por el contrario, el cambio secular en dirección tiene valor que debe ser considerado oportunamente.

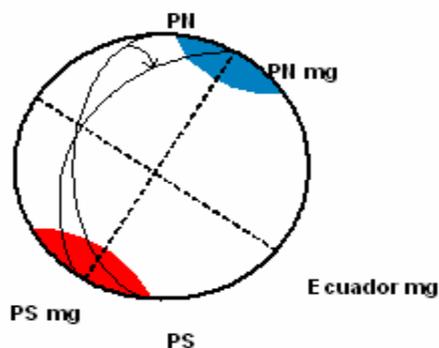


Figura No.2.1 Los polos magnéticos terrestres.

Los polos del campo magnético terrestre, toman el nombre del hemisferio en que se encuentran, o sea polo Norte y Sur magnético. Si observamos una aguja de compás vemos que su extremo Norte o rojo, apunta hacia el polo norte magnético terrestre; lo que iría contra la ley fundamental del magnetismo que dice: que los polos del mismo nombre se repelen y de nombre contrario se atraen, esto nos indica la razón por la cual el Hemisferio Norte tiene, polaridad azul y el Hemisferio Sur polaridad rojo.

Los polos del campo magnético terrestre están: el "azul" apuntando hacia Bahía Hudson y el rojo" hacia South Victoria; en cada uno de estos lugares las líneas de fuerzas convergen verticalmente. Aproximadamente a medio camino entre ellos está el ecuador magnético, donde las líneas son horizontales. El ecuador magnético, es entonces, la línea que divide el magnetismo rojo y azul de la tierra, la figura No.8 nos muestra la tierra con su polaridad y campo magnético.

## 2.4 INCLINACIÓN MAGNÉTICA

Si suspendemos una aguja imantado en el plano del meridiano magnético; es decir, en la dirección del plano de las líneas de fuerza del campo terrestre, y en libertad para moverse alrededor de un eje horizontal, se orientará en la dirección de la fuerza magnética y estará bajo la influencia de la intensidad total del magnetismo de ese lugar. A la aguja imantado así suspendida se le denomina "aguja de inclinación". Esta aguja en el ecuador magnético se mantiene horizontal; pero si se traslada hacia el Norte o hacia el Sur del ecuador, la inclinación aumento de acuerda con el aumento en latitud magnético, hasta colocarse vertical en los polos magnéticos.

En el Hemisferio Norte el extremo Norte o rojo de la aguja apuntará hacia abajo y en el hemisferio sur hacia arriba. El ángulo entre la horizontal y la dirección que toma la aguja de inclinación, en un lugar cualquiera, es lo que se denomina "ángulo de inclinación" o "inclinación magnética; siendo cero en el ecuador magnético y  $90^\circ$  en los polos magnéticos.

Las líneas que en una carta unen todos puntos de igual inclinación se denominan "líneas isóclinas" o de igual latitud magnética. La aguja de un compás está construida para girar alrededor de un eje vertical, es por esto que se mantiene en posición horizontal.

Se consigue esto, dejando el centro de gravedad por debajo del centro de suspensión. luego, ella no nos indica la dirección real en que actúa el magnetismo, ya que por construcción elimina la componente vertical debido a la inclinación magnética, dejando que actúe sólo la componente horizontal del magnetismo terrestre, entonces tenemos que la componente horizontal será la "fuerza directriz" del compás.

## 2.5 FUERZAS MAGNÉTICAS

A diferencia de lo que sucede con una barra de ámbar electrizada por frotamiento la cual atrae hacia sí todo tipo de objetos con la condición de que sean ligeros, un imán ordinario sólo ejerce fuerzas magnéticas sobre cierto tipo de materiales, en particular sobre el hierro. Este fue uno de los obstáculos que impidieron una aproximación más temprana entre el estudio de la electricidad y el del magnetismo.

Las fuerzas magnéticas son fuerzas de acción a distancia, es decir, se producen sin que exista contacto físico entre los dos imanes. Esta circunstancia, que excitó la imaginación de los filósofos antiguos por su difícil explicación, contribuyó más adelante al desarrollo del concepto de campo de fuerzas.

Experiencias con imanes y dinamómetros permiten sostener que la intensidad de la fuerza magnética de interacción entre imanes disminuye con el cuadrado de la distancia.

Representando por  $F_m$  la fuerza magnética, por  $r$  la distancia y por el símbolo de la proporcionalidad directa, tal propiedad se expresa en la forma:

$$F_m \sim \frac{1}{r^2}$$

En la figura No.2.3 se muestra un dinamómetro, aparato destinado a medir fuerzas que lleva un muelle alojado en su interior que se alarga de forma proporcional a la fuerza ejercida en el gancho adosado en la parte inferior, marcando el valor correspondiente al estiramiento en una escala adosada.

Situando fijo el dinamómetro con un imán en su extremo y posicionando el brazo inferior, que sostiene otro imán, a distintas alturas se puede medir la variación de la fuerza de atracción de ambos imanes en función de la distancia entre ellos.

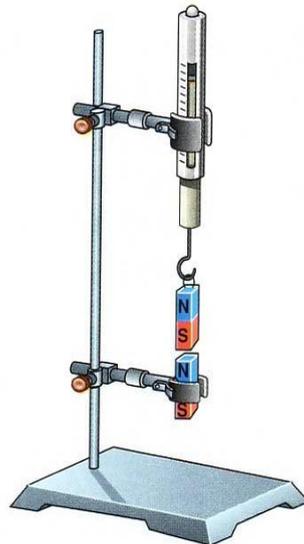


Figura No. 2.3 Dinamómetro.

## 2.6 FUERZA DE LORENTZ

Del estudio experimental de este fenómeno se deduce que:

- $F_m$  es tanto mayor cuanto mayor es la magnitud de la carga  $q$  y su sentido depende del signo de la carga.
- $F_m$  es tanto mayor cuanto mayor es la velocidad  $v$  de la carga  $q$ .
- $F_m$  se hace máxima cuando la carga se mueve en una dirección perpendicular a las líneas de fuerza y resulta nula cuando se mueve paralelamente a ella.
- La dirección de la fuerza magnética en un punto resulta perpendicular al plano definido por las líneas de fuerza a nivel de ese punto y por la dirección del movimiento de la carga  $q$ , o lo que es lo mismo,  $F_m$  es perpendicular al plano formado por los vectores  $B$  y  $v$ . (la figura No.2.4 nos muestra la trayectoria circular de la partícula)

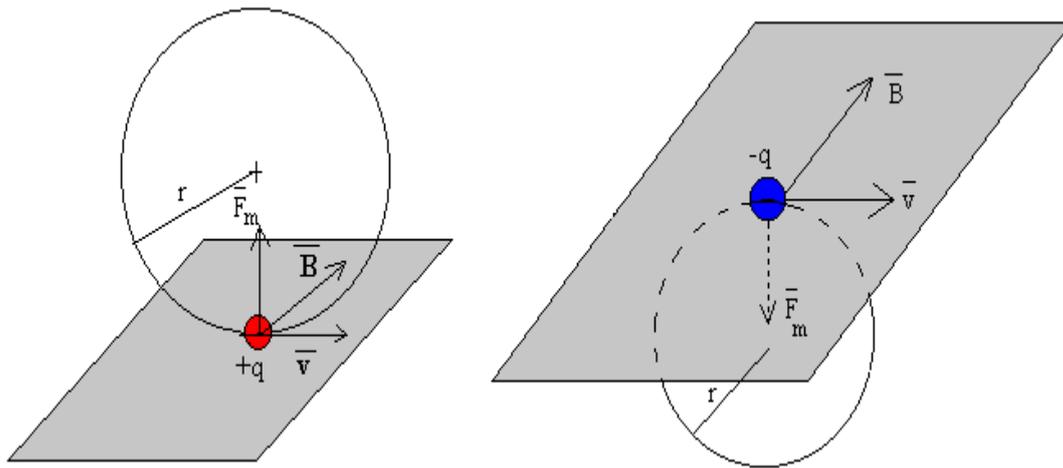


Figura No.2.4 Trayectoria circular de la partícula.

Como verás el sentido en que describe la trayectoria circular la partícula depende del signo de la carga, girando en sentido horario si es negativa y en sentido opuesto si es positiva.

Las conclusiones experimentales anteriormente reseñadas quedan resumidas en la siguiente expresión conocida como **Fuerza de Lorentz** o fuerza debida al campo magnético que actúa sobre una carga:

$$F_m = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta$$

Donde  $B$  representa el módulo o magnitud de la intensidad del campo y el ángulo que forman los vectores  $v$  y  $B$ .

## 2.6.1 DIRECCIÓN Y SENTIDO DE LA FUERZA DE LORENTZ

Dado que  $F_m$ ,  $v$  y  $B$  pueden ser considerados como vectores, es necesario además reunir en una regla lo relativo a la relación entre sus direcciones y sentidos: el vector  $F_m$  es perpendicular al plano formado por los vectores  $v$  y  $B$  y su sentido coincide con el de avance de un tornillo que se hiciera girar en el sentido que va de  $v$  a  $B$  (por el camino más corto).

Dicha regla, llamada del tornillo de Maxwell, es equivalente a la de la mano izquierda, según la cual las direcciones y sentidos de los vectores  $F_m$ ,  $v$  y  $B$  vienen dados por los dedos pulgar, índice y corazón de la mano derecha dispuestos en la forma que se muestra en la figura No.2.5.

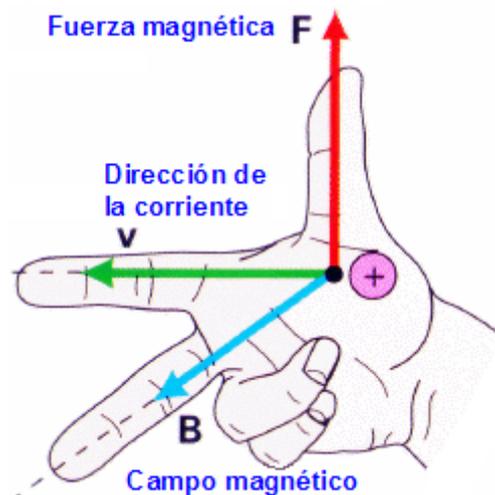


Figura No. 2.5 Regla de la mano derecha.

## 2.7 ESPECTROS MAGNÉTICOS

Cuando se espolvorea en una cartulina o en una lámina de vidrio, situadas sobre un imán, limaduras de hierro, éstas se orientan de un modo regular a lo largo de líneas que unen entre sí los dos polos del imán. Lo que sucede es que cada limadura se comporta como una pequeña brújula que se orienta en cada punto como consecuencia de las fuerzas magnéticas que soporta. La imagen que forma este conjunto de limaduras alineadas constituye el espectro magnético del imán (véase figura 2.6).

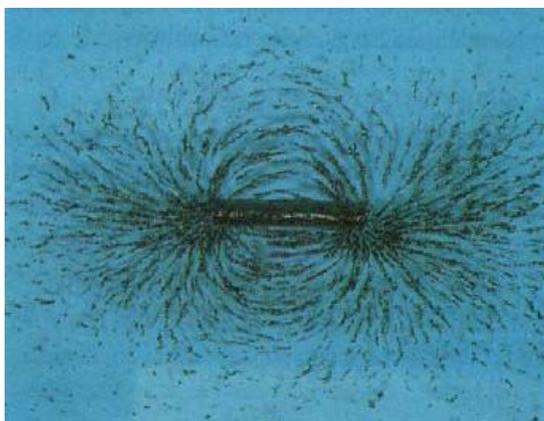


Figura No.2.6 El espectro magnético de un imán.

El espectro magnético de un imán permite no sólo distinguir con claridad los polos magnéticos, sino que además proporciona una representación de la influencia magnética del imán en el espacio que le rodea.

Esta imagen física de la influencia de los imanes sobre el espacio que les rodea hace posible una aproximación relativamente directa a la idea de campo magnético.

## 2.8 EL CAMPO MAGNÉTICO

El hecho de que las fuerzas magnéticas sean fuerzas de acción a distancia permite recurrir a la idea física de campo para describir la influencia de un imán o de un conjunto de imanes sobre el espacio que les rodea.

### 2.8.1 LÍNEAS DE FUERZA DEL CAMPO MAGNÉTICO

Al igual que en el caso del campo eléctrico, se recurre a la noción de líneas de fuerza para representar la estructura del campo. En cada punto las líneas de fuerza del campo magnético indican la dirección en la que se orientaría una pequeña brújula situada en tal punto. Así las limaduras de hierro espolvoreadas sobre un imán se orientan a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético correspondiente y el espectro magnético resultante proporciona una representación espacial del campo. Por convenio se admite que las líneas de fuerza salen del polo Norte y se dirigen al polo Sur, tal como lo muestra la figura No. 2.7.

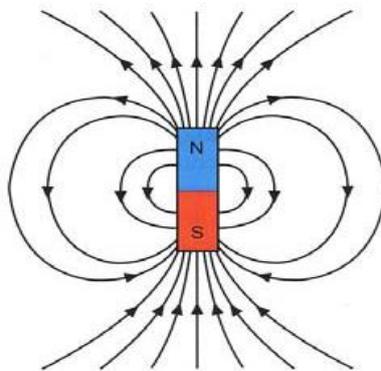


Figura No. 2.7 Líneas de fuerza de un imán.

## 2.9 LA INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO

Como sucede en otros campos de fuerza, el campo magnético queda definido matemáticamente si se conoce el valor que toma en cada punto una magnitud vectorial que recibe el nombre de intensidad de campo. Las brújulas, al alinearse a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético, indican la dirección y el sentido de la intensidad del campo **B**.

La intensidad del campo magnético, a veces denominada inducción magnética, o campo se representa por la letra **B** y es un vector tal que en cada punto coincide en dirección y sentido con los de la línea de fuerza magnética correspondiente.

La unidad del campo magnético en el SI es el tesla (T) y representa la intensidad que ha de tener un campo magnético para que una carga de 1 C, moviéndose en su interior a una velocidad de 1 m/s perpendicularmente a la dirección del campo, experimentase una fuerza magnética de 1 newton.

$$1T = \frac{1N}{1C \cdot 1\frac{m}{s}}$$

Aunque no pertenece al SI, con cierta frecuencia se emplea el gauss (G):

$$1 T = 10^4 G.$$

### 2.9.1 FUERZA SOBRE UNA CARGA

De la observación experimental de lo que le sucede a una carga q en movimiento en presencia de un campo magnético se desprende lo siguiente: si la carga estuviera en reposo no se apreciaría ninguna fuerza; sin embargo, si la carga q se mueve dentro del campo creado por un imán se observa cómo su trayectoria se curva, lo cual indica que una fuerza magnética  $F_m$  se está ejerciendo sobre ella.

### 2.9.2 MOVIMIENTO DE UNA CARGA EN UN CAMPO MAGNÉTICO

Como ya hemos dicho anteriormente la actuación de la fuerza de Lorentz supone una desviación de la carga según una trayectoria circular. Como ya sabrás siempre que un cuerpo gira actúa sobre él la fuerza centrífuga, es decir:

$$F_m = F_c$$

Pudiendo así calcular el radio de la trayectoria que describe la carga al adentrarse en el seno del campo magnético.

$$q \cdot V \cdot B \cdot \sin \theta = m \cdot \frac{V^2}{r}$$

Como puedes ver en la figura No. 2.8 que se detalla a continuación hemos dibujado las líneas de campo magnético perpendiculares a la hoja a través de cruces si el campo es entrante y de puntos si es saliente; esto nos permite dibujar sobre el papel la trayectoria circular que describiría una partícula al adentrarse en el campo.

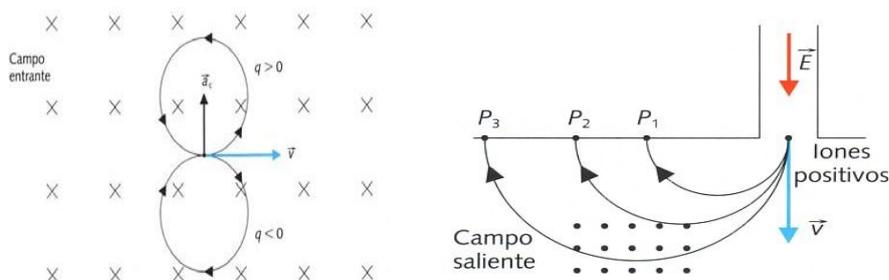


Figura No. 2.8 Trayectoria circular que describiría una partícula al adentrarse en el campo.

Asimismo, si deseásemos conocer el periodo (T), o tiempo que tardaría la carga en completar una revolución bastaría con pensar que el movimiento circular que describe es un movimiento uniforme, por lo tanto, como la trayectoria es circular y la longitud de una circunferencia es  $2\pi r$  quedaría:

$$v = \frac{e}{t} = \frac{2\pi r}{T}$$

El fenómeno del magnetismo es ejercido por un campo magnético, por ejemplo, una corriente eléctrica o un dipolo magnético crea un campo magnético, éste al girar imparte una fuerza magnética a otras partículas que están en el campo.

Para una aproximación excelente (pero ignorando algunos efectos cuánticos, las ecuaciones de Maxwell (que simplifican la ley de Biot-Savart en el caso de corriente constante) describen el origen y el comportamiento de los campos que gobiernan esas fuerzas. Por lo tanto el magnetismo se observa siempre que partículas cargadas eléctricamente están en movimiento. Por ejemplo, del movimiento de electrones en una corriente eléctrica o en casos del movimiento orbital de los electrones alrededor del núcleo atómico. Estas también aparecen de un dipolo magnético intrínseco que aparece de los efectos cuánticos, por ejemplo, el del *spin* de la mecánica cuántica.

La misma situación que crea campos magnéticos (carga en movimiento en una corriente o en un átomo y dipolos magnéticos intrínsecos) son también situaciones en que el campo magnético causa sus efectos creando una fuerza. Cuando una partícula cargada se mueve a través de un campo magnético  $B$ , se ejerce una fuerza  $F$  dado por el producto cruz:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \cdot \vec{B})$$

Donde  $q$  es la carga eléctrica de la partícula,  $\vec{v}$  es el vector velocidad de la partícula y  $\vec{B}$  es el campo magnético. Debido a que esto es un producto cruz, la fuerza es perpendicular al movimiento de la partícula y al campo magnético.

La fuerza magnética no realiza trabajo mecánico en la partícula, esto cambiaría la dirección del movimiento de ésta, pero esto no causa su aumento o disminución de la velocidad. La magnitud de la fuerza es:  $F = qvB \sin \theta$  donde  $\theta$  es el ángulo entre los vectores  $\vec{v}$  y  $\vec{B}$ .

Una herramienta para determinar la dirección del vector velocidad de una carga en movimiento, es siguiendo la ley de la mano izquierda (véase Figura No.12 Regla de la mano izquierda).

El físico alemán Heinrich Lenz formuló lo que ahora se denomina la ley de Lenz, ésta da una dirección de la fuerza electromotriz (fem) y la corriente resultante de una inducción electromagnética.

## 2.10 EL CIRCUITO MAGNETICO

Las maquinas eléctricas necesitan de un campo magnético para funcionar. Igual que la corriente eléctrica necesita un circuito de material conductor (cobre o aluminio) por donde circular, el campo magnético también necesita un circuito de material ferromagnético por donde circular. Para saber cuántas espiras debe tener la bobina que induce el campo magnético, o que sección debe tener el circuito magnético etc. se hace necesario estudiar los circuitos magnéticos. Para poder hacer este estudio tenemos que definir una nueva magnitud, la **intensidad de campo magnético** o **excitación magnética H**. Su valor viene dado por la siguiente fórmula:

$$H = \frac{N \cdot I}{L}$$

Donde **N** es el número de espiras de la bobina inductora, **I** la corriente que circula por la misma y **L** la longitud de la bobina (del núcleo magnético donde está arrollada la bobina). La unidad de medida de la intensidad de campo magnético es el amperio/metro (A/m).

A partir de la intensidad de campo, podemos calcular la inducción magnética mediante la fórmula  $B = \mu \cdot H$ , donde  $\mu$  es la permeabilidad magnética del material que se utiliza como núcleo de la bobina.

Como el flujo magnético es  $\varphi = B \cdot S$ , entonces podemos calcular el flujo:

$$\varphi = \frac{\mu \cdot N \cdot I \cdot S}{L} = \frac{N \cdot I}{\frac{L}{\mu \cdot S}}$$

Al numerador de esta expresión se le denomina fuerza magnetomotriz ( $F_m = N \cdot I$ ) y al denominador, reluctancia magnética ( $R_m = \frac{L}{\mu \cdot S}$ ).

Por lo tanto el flujo magnético podremos calcularlo como:  $\varphi = \frac{F_m}{R_m}$ , expresión conocida como ley de Hopkinson, que podemos considerar al equivalente a la ley de Ohm para circuitos magnéticos. El flujo magnético sería el equivalente a la intensidad de corriente, la Fuerza magnetomotriz, sería el equivalente a la fuerza electromotriz y la reluctancia magnética el equivalente a la resistencia eléctrica.

## 2.11 UNIDADES

Las unidades de medida de la fuerza magnetomotriz son los amperios (aunque también se suele expresar como amperios-vuelta) y las de la reluctancia magnética son la inversa de los Henrios.

### 2.11.1 UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL (SI) RELACIONADAS CON EL MAGNETISMO

Tesla [T] = unidad de campo magnético.

Weber [Wb] = unidad de flujo magnético.

Amper [A] = unidad de corriente eléctrica, que genera campos magnéticos.

### 2.11.2 UNIDADES DEL SISTEMA CEGESIMAL (C.G.S) RELACIONADAS CON EL MAGNETISMO

- gauss, abreviado como G, es la unidad CGS de inducción magnética (**B**).
- Oersted, es la unidad CGS de campo magnético.
- Maxwell, es la unidad CGS de flujo magnético.

### 2.12 LEY DE GAUSS PARA EL CAMPO MAGNÉTICO

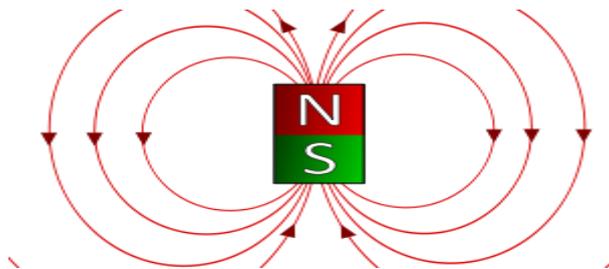


Figura No. 2.9 Líneas de campo magnético.

Las líneas de campo magnético comienzan y terminan en el mismo lugar, por lo que no existe un magnético, tal como se ve en la figura No. 2.9.

Experimentalmente se llegó al resultado de que los campos magnéticos, a diferencia de los eléctricos, no comienzan y terminan en cargas diferentes. Esta ley primordialmente indica que las líneas de los campos magnéticos deben ser cerradas. En otras palabras, se dice que sobre una superficie cerrada, sea cual sea ésta, no seremos capaces de encerrar una fuente o sumidero de campo, esto expresa la inexistencia del monopolo magnético. Matemáticamente esto se expresa así:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Donde  $\vec{B}$  es la densidad de flujo magnético, también llamada inducción magnética. Es claro que la divergencia sea cero porque no salen ni entran vectores de campo sino que este hace caminos cerrados. El campo no diverge, es decir la divergencia de B es nula.

Su forma integral equivalente:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Como en la forma integral del campo eléctrico, esta ecuación sólo funciona si la integral está definida en una superficie cerrada.

## 2.13. LEY DE FARADAY-LENZ

La ley de Faraday nos habla sobre la inducción electromagnética, la que origina una fuerza electromotriz en un campo magnético. Es habitual llamarla ley de Faraday-Lenz en honor a Heinrich Lenz ya que el signo menos proviene de la Ley de Lenz. También se le llama como ley de Faraday-Henry, debido a que Joseph Henry descubrió esta inducción de manera separada a Faraday pero casi simultáneamente. Lo primero que se debe introducir es la fuerza electromotriz ( $\varepsilon$ ), si tenemos un campo magnético variable con el tiempo, una fuerza electromotriz es inducida en cualquier circuito eléctrico; y esta fuerza es igual a menos la derivada temporal del flujo magnético, así:

$$\varepsilon = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

Como el campo magnético es dependiente de la posición tenemos que el flujo magnético es igual a:

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Además, el que exista fuerza electromotriz indica que existe un campo eléctrico que se representa como:

$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Con lo que finalmente se obtiene la expresión de la ley de Faraday:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Lo que indica que un campo magnético que depende del tiempo implica la existencia de un campo eléctrico, del que su circulación por un camino arbitrario cerrado es igual a menos la derivada temporal del flujo magnético en cualquier superficie limitada por el camino cerrado.

El signo negativo explica que el sentido de la corriente inducida es tal que su flujo se opone a la causa que lo produce, compensando así la variación de flujo magnético (Ley de Lenz).

La forma diferencial de esta ecuación es:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$$

Se interpreta como sigue: si existe una variación de campo magnético B entonces este provoca un campo eléctrico E. En presencia de cargas libres como los electrones el campo E puede desplazar las cargas y producir una corriente eléctrica. Esta ecuación relaciona los campos eléctrico y magnético, y tiene otras aplicaciones prácticas como los motores eléctricos y los generadores eléctricos y explica su funcionamiento. Más precisamente, demuestra que un voltaje puede ser generado variando el flujo magnético que atraviesa una superficie dada.

## 2.14 LA TEORÍA DE LOS DOMINIOS MAGNÉTICOS

Como se expresó en el punto anterior, las propiedades magnéticas superlativas que presentan los materiales ferromagnéticos no pueden ser explicadas solamente a partir de los campos individuales que presentan sus átomos. Dichas propiedades están relacionadas además a la capacidad de estos elementos de orientar sus orbitales dentro del material. Una de las teorías desarrolladas para explicar este singular comportamiento, es la teoría de los **dominios magnéticos**. Según ésta, dentro de un material ferromagnético existen zonas denominadas “dominios” dentro de las cuales las moléculas están ordenadas de tal forma que sus campos netos individuales están alineados. En un material virgen, estos dominios tienen orientaciones aleatorias resultando en un campo macroscópicamente nulo. (fig. No. 2.10)



Figura No.2.10 Material en estado original.

Cuando se aplica un campo externo, los dominios que poseen una orientación similar a la del campo aplicado comienzan a ordenarse según el campo aplicado, comenzando por aquellos que presentan una orientación más favorable. (fig. No. 2.11)

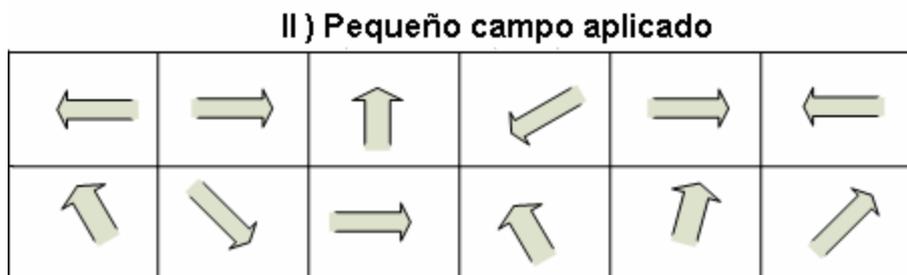


Figura No. 2.11 Pequeño campo aplicado.

A medida que va aumentando el campo aplicado hay cada vez menos dominios para reorientar y a su vez, los dominios aún no reorientados son los que presentaban el estado inicial más desfavorable. Finalmente, llega un momento en que ulteriores aumentos del campo aplicado ya no incrementan la magnetización; esto es lo que se denomina saturación del material.

La teoría de los dominios está apoyada por la experiencia que se describe a continuación. Si se efectúa un corte plano de un material ferromagnético no magnetizado, se pule la sección y se espolvorea con material ferromagnético muy finamente dividido, puede observarse mediante un microscopio que las virutas se agrupan en pequeñas zonas con orientaciones individuales distintas. Aplicando un campo magnético externo puede observarse como van evolucionando los dominios. Cabe aclarar que sólo pueden observarse mediante el método descrito los dominios de los materiales magnéticos blandos (aquellos que pierden la magnetización al desaparecer el campo aplicado, fig. No. 2.12). Los dominios de los materiales magnéticos duros (los que retienen la magnetización una vez desaparecido el campo externo) son mucho más pequeños y sólo pueden ser observados mediante otras técnicas, como la utilización de luz polarizada.

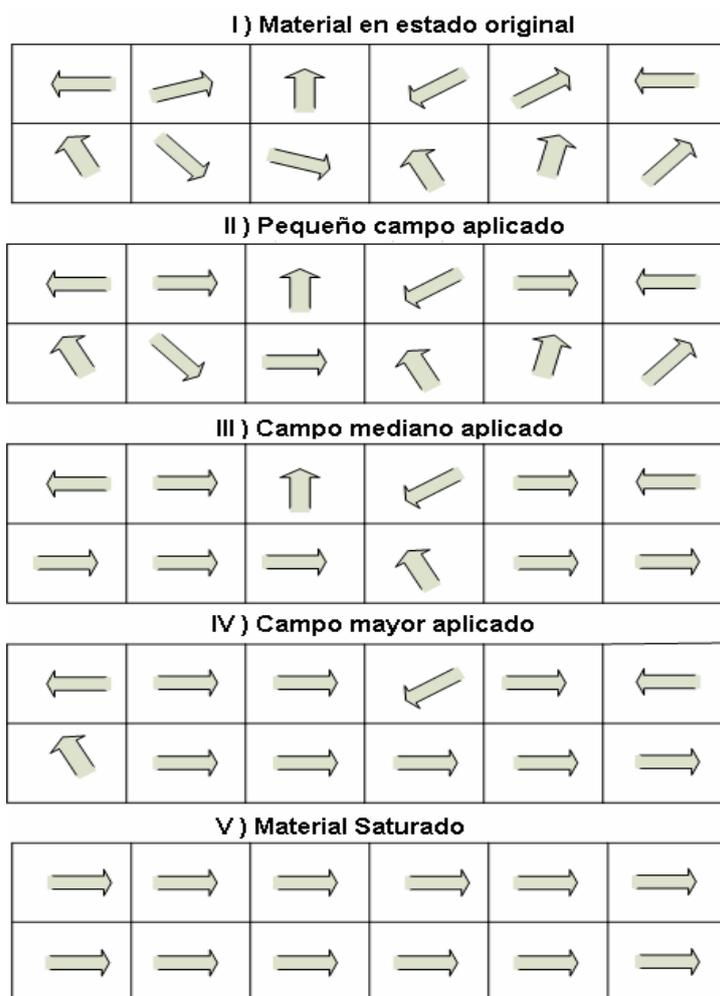


Figura No. 2.12 Dominios magnéticos con diferente campo aplicado.

El proceso de progresiva alineación de los dominios según el campo aplicado puede interpretarse también como el crecimiento de dominios individuales, orientados más favorablemente, a expensas de los circundantes.

De acuerdo a la teoría expuesta, el campo magnético que exhiben los imanes es originado en corrientes sub-microscópicas que hacen las veces de pequeñas bobinas que combinan aditivamente sus campos individuales. Así se explica el antiguo dilema de por qué no podían separarse las masas magnéticas sur y norte.

#### 2.14.1 CONCEPTO DE PERMEABILIDAD MAGNÉTICA

La permeabilidad magnética de un material se define como el cociente entre el campo total que se induce dentro del material (inducción magnética  $B$ ) y el campo magnético aplicado (campo  $H$ ). La ecuación que lo expresa matemáticamente es la siguiente:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Lo que es lo mismo;  $B = \mu \cdot H$

Dicho de otra forma, en un campo magnético de magnitud  $H$ , se introduce un material con permeabilidad  $\mu$ , por lo que dentro de dicho material se establece un campo magnético total  $B$  cuya magnitud es  $\mu$  veces el campo  $H$  aplicado.

Cuando un material cualquiera es sometido a la acción de un campo magnético de un valor determinado, teóricamente pueden ocurrir tres cosas:

**1)** El campo magnético que se establece dentro del material es igual al campo aplicado. Este material no presentaría respuesta alguna al campo magnético, por lo que no sería atraído ni repelido por un imán. La relación o cociente entre el campo total que existe dentro del material y el campo magnético aplicado externamente, se denomina **permeabilidad magnética**. Un material tal que el campo magnético en su interior es igual al campo aplicado, tendría permeabilidad magnética unitaria. En la práctica, la permeabilidad exactamente unitaria es una propiedad que sólo tiene el vacío, ya que todos los materiales, en mayor o menor medida, presentan algún grado de magnetización.

**2)** El campo magnético que se establece dentro del material es menor que campo aplicado. Si el campo resultante dentro del material es menor que el campo aplicado, la permeabilidad es menor que 1. Este tipo de materiales, denominados **diamagnéticos**, tienen la propiedad de magnetizarse negativamente es decir, oponiéndose al campo externo, por lo que serían repelidos por un imán permanente. Cabe aclarar que la magnetización que presentan estos materiales es muy débil (Por ejemplo, la permeabilidad del agua es 0,999991) y desaparece junto con el campo externo aplicado. Sin embargo, aplicando campos muy intensos los efectos pueden ser fácilmente comprobables, como el famoso experimento en el que se hace levitar una rana en un campo muy intenso generado por bobinas de material superconductor.

Existe una gran cantidad de elementos diamagnéticos, pudiendo citarse como ejemplo a metales como el cobre, la plata, el oro, el mercurio, etc., como así también gases, como los gases raros, el nitrógeno, etc.

3) El campo magnético que se establece dentro del material es mayor que el campo aplicado. En este caso la permeabilidad es mayor que 1. Estos materiales tienen la propiedad de magnetizarse en el mismo sentido del campo aplicado, lo cual redundaría en un aumento del campo interno, que es la suma del campo externo más la magnetización propia.

#### 2.14.2 PERMEABILIDAD EN EL SISTEMA C.G.S

Comenzaremos por expresar esta ecuación en unidades del sistema cgs, por resultar más intuitivo:

$$B \text{ [Gauss]} = \mu \cdot H \text{ [Oersted]}$$

**Gauss:** Unidad de medición de la inducción magnética en el sistema c.g.s.

**Oersted:** Unidad de medición de campo magnético H en el sistema c.g.s.

La permeabilidad en el sistema c.g.s. es un valor adimensional que expresa la relación que existe entre el campo inducido (B) y el campo inductor (H). En el vacío, dado que dicho medio no se opone al campo aplicado ni lo refuerza, la permeabilidad es unitaria y por lo tanto  $B = H$ . El Gauss y el Oersted son iguales en magnitud y poseen la misma dimensión. Es decir que ambas unidades, aunque son dimensional y numéricamente iguales y miden una misma magnitud física (campo magnético), tienen distinto nombre. El sentido de esto es diferenciar conceptualmente el campo magnético inductor, del campo magnético total que se induce dentro de un material. Por tal motivo el campo magnético B se suele denominar también "inducción magnética", aunque también se lo denomina "densidad de flujo magnético", por el motivo que veremos más adelante. Entonces, en el vacío, un campo de 1 Oersted induce un campo de 1 Gauss:

$$1 \text{ G} = 1 \text{ Oe}$$

#### 2.14.3 PERMEABILIDAD EN EL SISTEMA INTERNACIONAL

En el Sistema Internacional la inducción magnética B se mide en Tesla y el campo H en A/m (esta última unidad no tiene nombre específico, aunque alguna vez se propuso denominarlo "Lenz"). Ambas magnitudes no son ni numérica, ni dimensionalmente iguales. Por ende, la permeabilidad no puede ser ni unitaria, ni adimensional. En el Sistema Internacional:

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \mu_r \cdot H$$

Donde:

B [Tesla]: Inducción magnética

H [A/m]: Campo inductor

$$\mu_0 = \text{permeabilidad magnética del vacío} = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Wb}}{\text{A.m}}$$

$\mu_r$  = permeabilidad relativa del medio relativa al vacío, igual a la permeabilidad en el sistema cgs, igual a la unidad para el vacío.

En el vacío y con un campo H de 1 Oe = 79,557 A/m:

$$B = 1 \text{ Gauss} = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Wb}}{\text{A.m}} \times 1 \times 79.557 \text{ A/m} = 1 \times 10^{-4} \frac{\text{Wb}}{\text{A.m}} = 10^{-4} \text{ Tesla}$$

De donde se deduce que:

$$1 \text{ Gauss} = 10^{-4} \text{ T} \quad \text{o} \quad 1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

#### 2.14.4 TABLA COMPARATIVA DE PERMEABILIDAD

SISTEMA C.G.S.	SISTEMA INTERNACIONAL
$B = \mu \cdot H$	$B = \mu \cdot H$
En el vacío: $B = H$	En el vacío: $B = \mu_0 \cdot H$
Permeabilidad magnética del vacío = 1	Permeabilidad magnética del vacío = $\mu_0$
Permeabilidad magnética adimensional	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m} = 4\pi \times 10^{-7} \frac{Wb}{A \cdot m}$
En un medio cualquiera $B = \mu \cdot H$	En un medio cualquiera $B = \mu_0 \mu_r \cdot H$
$\mu = \text{Parametro adimensional}$	$\mu_r = \text{Parametro adimensional}$
$\mu$ del sistema c.g.s = $\mu_r$ del sistema internacional	$\mu = \mu_0 \mu_r$

Tabla No.2.1 comparativos de la permeabilidad.

#### 2.14.5 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES MAGNÉTICOS

Entre los materiales con permeabilidad magnética mayor que la unidad pueden distinguirse dos grupos muy diferenciados:

- **Materiales Paramagnéticos:** se magnetizan en forma débil (Por ejemplo, la permeabilidad del aluminio es 1,000022) y positiva (en el mismo sentido del campo aplicado, por lo que son atraídos por el imán). Pueden citarse como ejemplos de materiales paramagnéticos el platino, el osmio, el litio, el oxígeno, etc.
- **Materiales Ferromagnéticos:** Si se considera la tabla periódica de los elementos en su conjunto, puede decirse que del orden de la mitad de los elementos que la constituyen son diamagnéticos y la otra mitad son paramagnéticos. Tanto unos como otros, poseen permeabilidades muy próximas a la unidad, es decir que si bien se magnetizan, lo hacen muy débilmente. Pero de todos los elementos de la tabla, hay tres que presentan un comportamiento magnético radicalmente distinto: es la llamada tríada o terna del hierro, el cobalto y el níquel. Estos tres elementos tienen la extraordinaria propiedad de magnetizarse en una proporción enormemente mayor que todos los restantes. Particularmente el hierro presenta una permeabilidad magnética del orden de 10<sup>4</sup>, es decir que desarrolla en su interior un campo magnético 10000 veces superior al que se le aplica externamente.

## TEMA III MATERIALES

### 3.1 HISTORIA DE LOS IMANES

El fenómeno del magnetismo ya fue analizado por los griegos varios siglos antes de Cristo en ciertos minerales encontrados en la naturaleza, aunque los primeros estudios científicos acerca de tema recién se realizan en el siglo XVII. Sin embargo, mucho antes de esto la humanidad hizo amplio uso de un trascendente invento basado en un imán permanente: la brújula. Si bien los chinos alegan haber utilizado la brújula 2500 años antes de Cristo, en occidente los primeros usos documentados de la misma datan del siglo XII. Pero, recién en el siglo XVIII, con el avance de la metalurgia y el desarrollo de los aceros aleados, aparecen las primeras generaciones imanes permanentes específicamente fabricados como tales. El siglo XX marca un enorme progreso en el tema ya que se desarrolló un amplio conjunto de compuestos para imanes permanentes, muchos de los cuales siguen siendo fabricados actualmente.

Un imán es un material capaz de producir un campo magnético exterior y atraer el hierro (también puede atraer al cobalto y al níquel). Los imanes que manifiestan sus propiedades de forma permanente pueden ser naturales, como la magnetita ( $Fe_3O_4$ ) o artificiales, obtenidos a partir de aleaciones de diferentes materiales.

Se enumeran a continuación, en orden cronológico, los compuestos más notables de imanes permanentes que fue desarrollando la tecnología:

#### 3.1.1 IMANES DE ACERO AL CARBONO

Los aceros de medio y alto carbono poseen la propiedad de magnetizarse por medios mecánicos o físicos y de retener en cierta medida este magnetismo. Golpes, deformación plástica, tensiones mecánicas elevadas, etc. son ejemplos de acciones mecánicas que pueden inducir magnetización de aceros. La aplicación de campo magnético externo, la circulación de corriente, etc., son ejemplos de acciones físicas que pueden generar el mencionado efecto. Con el avance de la metalurgia del acero se exploró el efecto de diversos elementos aleantes, lo que permitió descubrir que la adición de cromo, tungsteno, etc., además de modificar las propiedades mecánicas, también modificaba su capacidad de retener la magnetización. Los diversos grados de imanes de acero que se desarrollaron de esta forma en los siglos XVIII y XIX, fueron la única alternativa tecnológica práctica disponible, hasta que se crearon imanes más avanzados recién en el siglo XX. Diversas máquinas eléctricas de la época fueron posibles merced a este tipo de imanes, como por ejemplo los llamados "magnetos" (dispositivos que generaban la alta tensión para el encendido en los motores a explosión).

Ejemplos de imanes de acero:

Acero al cromo 3% Cr, 0,9% C, 0,3 % Mn.

Acero al tungsteno 6% W, 0,7% C, 0,3% Cr.

Acero 15 cobalto 15% Co, 5% Cr, 1% C, 1% W, 1 % Mo.

### 3.1.2 IMANES DE ALNICO

“Alnico” es el nombre genérico de una familia de imanes permanentes que comenzaron a desarrollarse en la década de 1930 y que recibió esta denominación porque generalmente, además de hierro, estos imanes contienen aluminio, níquel y cobalto como elementos de aleación. Existen diversos grados de Alnico dependiendo de la tecnología de fabricación y de las proporciones que guarden los elementos mencionados (pueden contener además cobre). Su aspecto es metálico, similar al de un acero, aunque mecánicamente son más frágiles. Cada grado posee propiedades particulares que son de interés para un uso determinado. Estos imanes constituyeron un importante avance respecto a los de acero al carbono (mayor resistencia a la desmagnetización o sea, coercitividad) y presentan algunas propiedades que los hacen actualmente insustituibles en ciertos usos particulares (Ejemplo: instrumentos de medición, donde se requiere independencia de las propiedades magnéticas con respecto a la temperatura, además de estabilidad en el tiempo).

Ejemplos:

Alnico 1 59 % Fe, 21 % Ni, 12 % Al, 5 % Co, 3 % Cu.

Alnico 4 56 % Fe, 27 % Ni, 12 % Al, 5 % Co.

Alnico 5A 50 % Fe, 15 % Ni, 8 % Al, 24 % Co, 3 % Cu.

### 3.1.3 IMANES DE FERRITA

Las ferritas o ferrites deben su nombre a la denominación en inglés del compuesto químico del que están hechas (Ej.: Barium ferrite,  $BaFe_{12}O_{19}$ ). Presentan un color gris oscuro, son frágiles e inmunes a la corrosión.

Estos compuestos superaron ampliamente la coercitividad del Alnico y a un costo mucho menor.

Desarrolladas a partir de 1950, son actualmente insustituibles para gran número de aplicaciones en la cuales el costo es una variable importante, pero el volumen y peso no son muy limitantes. Ejemplos de utilización son los parlantes, los motores de corriente continua para industria automotriz, etc.

Ejemplos:

Ferrita de Bario  $BaO_6Fe_2O_3$  (13,8 % BaO, 86,2 %  $Fe_2O_3$ ).

Ferrita de Estroncio  $SrFe_{12}O_{19}$ .

### 3.1.4 IMANES DE TIERRAS RARAS

Antes del desarrollo de esta nueva generación de imanes, la tecnología disponía en la práctica de dos opciones: los diversos grados de Alnico (alta remanencia y baja coercitividad) y ferritas (baja remanencia y alta coercitividad). Con los imanes de tierras raras la tecnología logra condensar en un solo compuesto las mejores prestaciones de las generaciones anteriores de imanes, obteniendo imanes de alta remanencia y alta coercitividad. Los primeros imanes de tierras raras que se desarrollaron (1960) fueron los de **Samario-Cobalto**, que presentaban propiedades magnéticas superlativas en relación los Alnico y las ferritas, pero que tenían el inconveniente de ser muy costosos. De cualquier forma, sus propiedades magnéticas les permitían reemplazar a las viejas generaciones con un peso mucho menor, lo que los hizo particularmente aptos en aquellas utilidades donde la disminución de peso (Por ejemplo en la

industria aeronáutica) o la miniaturización (Por ejemplo motores de Discman) son de tal importancia que justifican el incremento del precio.

Posteriormente, en 1984 aparece comercialmente un nuevo compuesto basado en una tierra rara, el llamado **Neodimio-Hierro-Boro**, que supera las propiedades magnéticas del samario cobalto a precio menor, aunque con una temperatura máxima de operación también menor. El compuesto básico del neodimio-hierro-boro ( $Nd_2Fe_{14}B$ ) presenta algunas limitaciones para su uso práctico (además de desmagnetizarse a temperaturas menores que otros compuestos, presenta una baja resistencia a la corrosión) que se fueron mejorando mediante ajustes de la composición y otros recursos.

Tanto los imanes de samario-cobalto como los de neodimio-hierro-boro presentan diversos grados comerciales que les permiten adaptarse a distintas condiciones de utilización.

### 3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS IMANES SEGÚN SU ORIGEN

**IMANES NATURALES:** se refiere a minerales naturales, los cuales tienen la propiedad de atraer elementos como el hierro, el níquel, etc. La magnetita es un imán de este tipo, compuesto por óxido ferroso férrico, cuya particularidad principal consiste en atraer fragmentos de hierro natural.

**IMANES ARTIFICIALES:** esta denominación recae sobre aquellos cuerpos magnéticos que, tras friccionalos con magnetita se transforman de manera artificial en imanes.

### 3.3 CONCEPTO DE IMÁN DE TIERRAS RARAS

Un imán de tierras raras es un fuerte imán permanente hecho con aleaciones de elementos químicos conocidos como tierras raras. Desarrollados en los años 1970s y 1980s, los imanes de tierras raras son el tipo más fuerte de imanes permanentes, produciendo campos magnéticos significativamente más fuertes que otros tipos tales como imanes de ferrita o de alnico. El campo magnético típicamente producido por los imanes de tierras raras pueden ser superiores a 1.4 teslas, mientras que los imanes de ferrita o los cerámicos exhiben típicamente campos magnéticos de 0.5 a 1 tesla. Existen dos tipos: imanes de neodimio e imanes de samario-cobalto.

Los imanes de tierras raras son extremadamente quebradizos y también vulnerables a la corrosión, así que usualmente son cubiertos con una capa de metal o de pintura para protegerlos de romperse o astillarse.

El término "tierra rara" puede ser malinterpretado, ya que estos metales no son particularmente raros o preciosos; son tan abundantes como el estaño o el plomo.

El interés en compuestos de tierras raras como imanes permanentes comenzó en 1966, cuando K. J. Strnat y G. Hoffer del Laboratorio de Materiales de la Fuerza Aérea de Estados Unidos descubrió que una aleación de itrio y cobalto,  $YCo_5$ , tenía por mucho la mayor constante de anisotropía magnética que cualquier material conocido.( fig. No. 3.1)

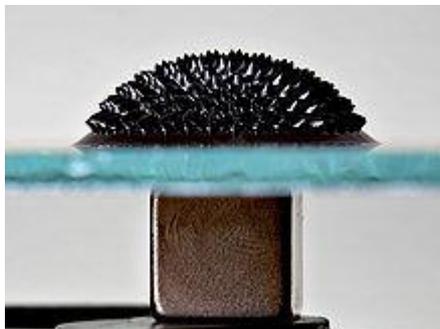


Figura No.3.1 Ferrofluido en vidrio, con un imán de tierras raras debajo de él.

### 3.3.1 EXPLICACIÓN DE LA FUERZA

Los elementos de tierras raras (lantánidos) son metales que son ferromagnéticos, lo que significa que al igual que el hierro pueden ser magnetizados, pero sus temperaturas de Curie están debajo de la temperatura ambiente, así que en su forma pura su magnetismo solo aparece a bajas temperaturas. Sin embargo, forman compuestos con los metales de transición tales como el hierro, níquel, y cobalto, y algunos de estos compuestos tienen temperaturas de Curie bien arriba de la temperatura ambiente. Los imanes de tierras raras están hechos de estos compuestos.

La ventaja de los compuestos de tierras raras sobre otros imanes es que sus estructuras cristalinas tienen una muy alta anisotropía magnética. Esto significa que un cristal del material es fácil de magnetizar en una dirección particular, pero se resiste a ser magnetizado en cualquier otra dirección.

Los átomos de elementos de tierras raras pueden retener altos momentos magnéticos en el estado sólido. Esta es una consecuencia del llenado incompleto de la subcapa electrónica  $f$ , que puede contener hasta 7 electrones desapareados con espines alineados. Los electrones en esos orbitales están fuertemente localizados y por tanto retienen fácilmente sus momentos magnéticos y funcionan como centros paramagnéticos. Los momentos magnéticos en otros orbitales están ocasionalmente perdidos debido al fuerte traslape con los vecinos; por ejemplo, los electrones que participan en enlaces covalentes forman pares con espín neto cero.

Los altos momentos magnéticos a nivel atómico en combinación con un alineamiento estable (alta anisotropía) resultan en una alta fuerza.

### 3.3.2 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

Algunas propiedades importantes usadas para comparar imanes permanentes son: remanencia magnética ( $B_r$ ), que mide la fuerza del campo magnético; coercividad ( $H_{ci}$ ), que es la resistencia del material a desmagnetizarse; producto de energía ( $BH_{max}$ ), que es la densidad de energía magnética; y la temperatura de Curie ( $T_c$ ), que es la temperatura a la cual el material pierde su magnetismo. Los imanes de tierras raras tienen una mayor remanencia, mocha mayor coercividad y producto de energía, pero (para el neodimio) menores temperatura de Curie que otros tipos. La tabla No.3 compara el rendimiento magnético de dos tipos de imanes de tierras raras, de neodimio ( $Nd_2Fe_{14}B$ ) y de samario-cobalto ( $SmCo_5$ ), con otros tipos de imanes permanentes.

Imán	$B_r$ (T)	$H_{ci}$ (kA/m)	$(BH)_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	$T_c$ (°C)
$Nd_2Fe_{14}B$ (sinterizado)	1.0–1.4	750–2000	200–440	310–400
$Nd_2Fe_{14}B$ (depositado)	0.6–0.7	600–1200	60–100	310–400
$SmCo_5$ (sinterizado)	0.8–1.1	600–2000	120–200	720
$Sm(Co,Fe,Cu,Zr)_7$ (sinterizado)	0.9–1.15	450–1300	150–240	800
Alnico (sinterizado)	0.6–1.4	275	10–88	700–860
Sr-ferrita (sinterizado)	0.2–0.4	100–300	10–40	450

Tabla no.3.1 Comparación de diferentes tipos de imanes permanentes.

### 3.3.3 TIPOS DE IMANES DE TIERRAS RARAS

#### 3.3.4 SAMARIO-COBALTO

Los imanes de samario-cobalto (fórmula química:  $SmCo_5$ ), la primera familia imanes de tierras raras inventados, son menos usados que los imanes de neodimio debido a su alto costo y más débil fuerza de campo magnético. Sin embargo, los imanes de samario-cobalto tienen una mayor temperatura de Curie, creando un nicho para estos imanes en aplicaciones donde se necesita alta fuerza de campo a altas temperaturas de operación. Son altamente resistentes a la oxidación, pero los imanes de samario-cobalto sinterizados son frágiles y propensos a astillarse y agrietarse, y pueden fracturarse cuando son sujetos a choque térmico.

### 3.3.5 NEODIMIO

Los imanes de neodimio, inventados en los años 1980s, son los más fuertes y más asequibles imanes de tierras raras. Están hechos de una aleación de neodimio, hierro y boro: ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ). Los imanes de neodimio son utilizados en numerosas aplicaciones que requieren imanes fuertes y compactos, tales como motores eléctricos para herramientas inalámbricas, discos duros, y sujetadores y broches magnéticos de joyería. Ellos tienen la mayor fuerza de campo magnético, pero tienen menor temperatura de Curie y son más vulnerables a la oxidación que los imanes de samario-cobalto. El uso de tratamientos protectores de superficie tales como laminado con oro, níquel, cinc y estaño y revestimiento con resina epoxi, puede proveer protección contra la corrosión cuando sea requerida. (fig. No. 3.2)

Originalmente, el alto costo de estos imanes limitaba su uso para aplicaciones que requerían compactibilidad junto con una alta fuerza de campo. Tanto las materias primas como las licencias de patentes eran caras



Figura No. 3.2 Imán de neodimio con lámina de níquel parcialmente removida.

### 3.3.6 RIESGOS

La gran fuerza ejercida por los imanes de tierras raras creó riesgos que no habían sido vistos con otros tipos de imanes. Imanes mayores que a unos pocos centímetros son suficientemente fuertes para causar lesiones a las partes del cuerpo atrapadas entre dos imanes o entre un imán y una superficie metálica, causando incluso huesos rotos. Los imanes que se colocan muy cerca uno del otro pueden golpearse con suficiente fuerza para astillar y hacer pedazos el material quebradizo, y las astillas que vuelan pueden causar lesiones. Ha habido casos donde niños que se han tragado varios imanes tuvieron un pliegue del aparato digestivo atrapado entre los imanes, causando lesiones o la muerte.<sup>6</sup> Los fuertes campos magnéticos pueden ser peligrosos también, y pueden borrar medios magnéticos de almacenamiento de información como discos duros y tarjetas de crédito.

### 3.3.7 APLICACIONES

Debido a que sus precios se volvieron competitivos en los años 1990s, los imanes de neodimio han estado reemplazando a los imanes de alnico y ferrita en las muchas aplicaciones en la tecnología moderna que requieren imanes poderosos. Su mayor fuerza permite que se utilicen imanes más pequeños y ligeros para una aplicación dada.

### 3.3.8 APLICACIONES COMUNES

Las aplicaciones comunes de los imanes de tierras raras incluyen:

- Discos duros de computadora.
- Aerogeneradores.
- Altavoces y auriculares.
- Dínamos de bicicleta.
- Frenos de carretes de pesca.
- Motores de imanes permanentes en taladros inalámbricos.
- Linternas con auto-alimentación, empleando imanes de tierras raras para generar electricidad en un movimiento de sacudida.

### 3.3.9 OTRAS APLICACIONES

Otras aplicaciones de los imanes de tierras raras incluyen:

- Motores lineales (usados en trenes de levitación magnética)
- Experimentación en levitación diamagnética, el estudio de dinámica de campos magnéticos y levitación por superconductividad (Efecto Meissner).
- Rodamiento electrodinámico.
- Tecnología de montañas rusas lanzadas.
- Pastillas para guitarra eléctrica.

## 3.4 MATERIAL USADO PARA NUESTRO MOTOR

### 3.4.1 IMANES NEODIMIO

Un **imán de neodimio** (también conocido como imán **NdFeB**, **NIB**, o **Neo**) es el tipo de imán de tierras raras más extensamente utilizado; se trata de un imán permanente hecho de una aleación de neodimio, hierro y boro. Fue desarrollado en 1982 por la General Motors y la división de metales especiales de la Sumitomo Metal Industries. Los imanes de neodimio son los más poderosos tipos de imanes permanentes hechos por el hombre. Han reemplazado a otros tipos de imanes en muchísimas aplicaciones de la industria moderna que requieren imanes permanentes de gran poder; aplicaciones tales como la fabricación de motores en herramientas inalámbricas, discos duros, y sellos magnéticos.

Los imanes de Neodimio pertenecen a la familia de imanes de Tierras Raras, son imanes permanentes de aleación Ne.Fe.B, con gran potencia, unas 6 veces

más que los imanes de ferrita. Los imanes de neodimio tienen las mejores características magnéticas del mercado principalmente diseñados para reducir dimensiones y aumentar potencia, pudiéndose utilizar a gran temperatura.

Existen imanes de diversas formas y tamaños cuadrados, rectangulares, en forma de anillo, cilíndricos. El tamaño del imán de neodimio normalmente determina la potencia aunque también depende de la temperatura y de los materiales que acompañan a los imanes.(fig. No. 3.3)

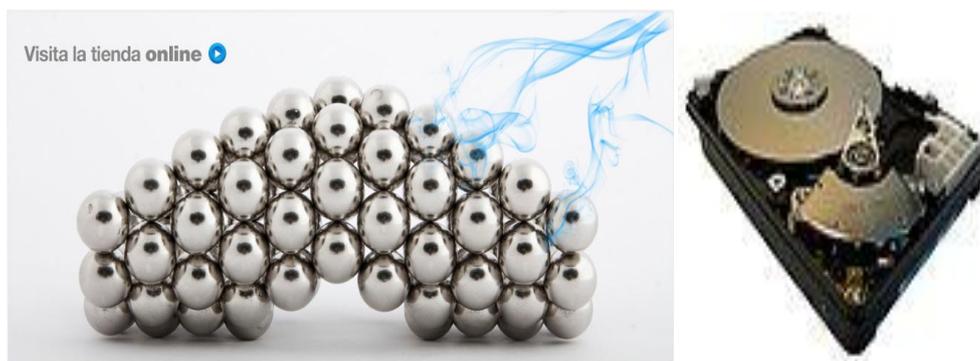


Figura No.3.3 Imanes de Neodimio, en forma de bolas y los usados en discos duros.

### 3.4.1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL

<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>	
Nombre: Neodimio	Símbolo: Nd
Número atómico: 60	Masa atómica (uma). 144.24
Período: 6	Grupo: Lantánidos
Bloque: f ( no representativo)	Valencias: +2, +3, +4
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> ): 7,007	Color: Plateado
Punto de fusión (°C): 1021	Punto de ebullición (°C): 3074
Volumen atómico (cm <sup>3</sup> /mol): 20,59	

Tabla No. 3.2 Descripción general y propiedades físicas del neodimio.

### 3.4.1.3 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS IMANES DE NEODIMIO Y SAMARIO-COBALTO SINTERIZADOS (SM-CO).

<b>Propiedad</b>	<b>Neodimio</b>	<b>Sm-Co</b>
Remanencia (T)	1–1.3	0.82–1.16
Coercividad (MA/m)	0.875–1.99	0.493–1.59
Permeabilidad magnética	1.05	1.05
Coeficiente de remanencia/temperatura (%/K)	-0.12	-0.03
Coeficiente de coercividad/temperatura (%/K)	-0.55..-0.65	-0.15..-0.30
Temperatura de Curie (°C)	320	800
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	7.3–7.5	8.2–8.4
CET, sobre la dirección de magnetización (1/K)	$5.2 \times 10^{-6}$	$5.2 \times 10^{-6}$
CET, normal a la dirección de magnetización (1/K)	$-0.8 \times 10^{-6}$	$11 \times 10^{-6}$
Resistencia a la flexión (N/mm <sup>2</sup> )	250	150
Resistencia a la compresión (N/mm <sup>2</sup> )	1100	800
Resistencia a la tracción (N/mm <sup>2</sup> )	75	35
Dureza Vickers (HV)	550–650	500–550
Resistividad (Ω·cm)	$(110–170) \times 10^{-6}$	$86 \times 10^{-6}$

Tabla No. 3.3 datos comparativos de los imanes de neodimio y sinterizados

### 3.4.1.4 METODOS DE OBTENCION

A partir de los minerales se obtienen las sales de varios metales de transición, las sales de neodimio se separan de las de los otros metales mediante columnas de intercambio iónico y extracción con disolventes.

## 3.5 NAYLAMIND

### 3.5.1 QUE ES EL NYLAMIND

La barra de nylon es un producto de enorme versatilidad, fabricado con procesos avanzados de ingeniería de plásticos. Sus extraordinarias características le permiten operar en severas condiciones de uso, abrasión, corrosión y flamabilidad. Sus aplicaciones varían en función a las necesidades específicas de la industria farmacéutica, metalúrgica, minera, alimenticia, marítima, textil, papelería y embotelladora, entre otras.

### 3.5.2 CARACTERÍSTICAS

Los plásticos tienen como cualidades generales, el ser muy ligeros y resistentes a la oxidación, principalmente. Sin embargo, esto no es suficiente, ya que la industria constantemente demanda materiales que satisfagan necesidades aun más complicadas y diversas.

- Familia de las poliamidas (PA) nylon.
- Facilidad de maquinado.
- Resistencia a la abrasión que el celoron el bronce y el acero.
- Resulta de dos a siete veces más ligero que los metales (su peso es 1/7 del peso del bronce); se mantiene por años sin necesidad de lubricación, no produce chispas, es aislante auto extingible.
- Amplia disponibilidad de presentaciones y medidas.
- Gran resistencia al desgaste
- Mayor resistencia a la corrosión.
- Balance ideal de resistencia y tenacidad.
- Mayor eficacia para la eliminación de ruido.
- Nylosteel absorbe cargas que puede fracturar a los metales, así como el ruido producido por partes metálicas.
- Menor coeficiente de fricción y mayor resistencia al impacto que el bronce, el teflón, el celoron y otros polímeros.
- Variedad de opciones: Normatividad higiénica, auto lubricidad, resistencia térmica.
- Estabilidad dimensional.
- Maleabilidad.
- Compatibilidad para usarse en contacto con alimentos, sin contaminar.
- Resistencia al desgaste.
- Resistencia dieléctrica.
- Resistencia mecánica.
- Resistencia química.
- Resistencia térmica.
- Rigidez.

### 3.5.3 TIPO

M.- De uso general resistente al impacto y a la abrasión. (Especificaciones mostradas en la tabla No.6)

6.- Muy resistente a la tensión. (Especificaciones mostradas en la tabla No.6)

### 3.5.4 FORMAS DE FABRICACIÓN

Placa, barra hueca, tubo o buje, barra cuadrada, barra cilíndrica.

### 3.5.5 APLICACIÓN

Ideal para el maquinado de piezas y partes que requieren trabajar: en condiciones silenciosas; donde el peso sea prioritario; cuando la lubricación sea de difícil acceso o poco frecuente; en casos de desgaste excesivo de las piezas. Ampliamente utilizado en equipos eléctricos. Sus aplicaciones más usuales son engranes, chumaceras, poleas, ruedas, catarinas, rodillos y guías de desgaste, entre otras muchas.

La versatilidad del Nylamid ha ayudado a resolver problemas de diseño de partes para equipo original o de sustitución de refacciones fabricadas con otros materiales, como: acero, bronce, aluminio, madera, cerámica, celorón y otros plásticos, en un sinnúmero de sectores industriales, tales como:

- Alimenticio
- Siderúrgico
- Embotellador
- Azucarero
- Constructor
- Papelero
- Naval
- Textil
- Minero
- Farmacéutico
- Transportadores

### 3.5.6 BENEFICIOS

- Buena relación Costo-Beneficio. El rendimiento de las piezas fabricadas con Nylamid en combinación con el precio, es sin duda el principal motivo para su aplicación, ya que aunque en algunas ocasiones existan materiales más baratos, su limitada durabilidad generan gastos extras derivados de la mayor frecuencia de recambio de las refacciones, los paros para mantenimiento, montaje y desmontaje, etc.
- Facilidad de maquinado. Por su suavidad la mayoría de los productos se maquinan mucho más rápido que los metales, dando como resultado, ahorros muy significativos.
- Ligereza. Por pesar menos que los metales, los plásticos exigen menor esfuerzo de los motores, contribuyendo así a consumir menos energía.
- Menor consumo de lubricantes. Gracias a su bajo coeficiente de fricción el Nylamid ayuda a reducir el consumo de lubricantes y en algunos casos hasta lo elimina.
- Reduce el nivel de ruido. La capacidad de absorción de impactos tan característica de los plásticos ayudan a disminuir la emisión de ruido provocado por las partes que trabajan en movimiento y en contacto directo entre sí.

### 3.5.7 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL TIPO M TIPO 6

Tipos	Resistencia a la Tracción			Resistencia a la Tracción			Elongación %	Resistencia al Impacto cmKg/cm2	Dureza Shore-D
	Mpa	(Kgf/mm2)	[Ksi]	Mpa	(Kgf/mm2)	[Ksi]			
<b>M</b>	70.6	(7.2)	[10.2]	83.4	(8.5)	[12.1]	15-30	8.0	80-82
<b>6</b>	82.4-87.3	(8.4-8.9)	[11.9-12.7]	105.2	(10.7)	[15.3]	42	5.4	82-84

Tabla No.3.4 propiedades mecánicas del nylamind M y 6.

### 3.6 CLASIFICACIÓN DEL NYLAMIND

Entre los plásticos, al igual que entre los metales, existe una gran diversidad de productos, por lo que es necesario diferenciarlos y clasificarlos, para evitar cometer errores en su aplicación.

Específicamente, el nylon ó poliamidas (*nombre técnico*) se clasifican de acuerdo al número de carbonos del que están compuestas sus moléculas: 6, 6/6, 6/12, 10, 11, 12, etc. Cada tipo tiene características diferentes y algunos de ellos son físicamente idénticos y pueden ser confundidos, usando un tipo cuando se debe utilizar otro.

### 3.6.1 NYLAMID M (M=MECÁNICO)

#### 3.6.1.2 CARACTERÍSTICAS

- Color hueso.
- Nylon sin aditivos.
- Su resistencia térmica es de 93°C.
- Combina una adecuada resistencia mecánica.
- Rigidez y dureza junto con una buena resistencia al desgaste.
- Esta aprobado para trabajar en contacto directo con alimentos de consumo humano, por la SECOFI (NMX-E-202-1993-SCFI).
- Muy buena estabilidad dimensional libre de esfuerzos internos.

Este Nylamid es producido por la polimerización directa de monómeros para formar polímeros de nylon 6/12, al ser vaciados a presión atmosférica. Este proceso ofrece la ventaja de poder fabricar piezas de mucho mayor volumen que con la inyección y extrusión.

#### 3.6.1.3 APLICACIONES TÍPICAS

- Cojinetes con lubricación natural para bajas velocidades y lubricación forzada para altas velocidades.
- Engranajes con alta resistencia a la abrasión y al impacto.
- Cantarinas y poleas de baja velocidad y tensores.
- Guías de desgaste, guías axiales y radiales.
- Placas de desgaste.
- Piezas varias para reducir el elevado nivel de vibraciones, ruido y abrasión.
- Aprobado para estar en contacto directo con alimentos de consumo humano (NOM).

### 3.6.2 NYLAMID SL (SUPER LUBRICADO)

#### 3.6.2.1 CARACTERÍSTICAS

- Color negro.
- Es un Nylon Súper lubricado de alta calidad, cargado con pequeñas partículas de desulfuro de molibdeno, dispersas homogéneamente que mejora sus propiedades de resistencia al desgaste.
- Tiene un incremento en la dureza superficial que brinda excelente maquinabilidad y mejores propiedades antifricciónantes.
- Este Nylamid es producido por la polimerización directa de monómeros para formar polímeros de nylon 6/12, al ser vaciados a presión atmosférica. Este proceso ofrece la ventaja de poder fabricar piezas de mucho mayor volumen que con la inyección y extrusión.
- Brinda soluciones en lugares donde se restringe o dificulta el uso de aceites o grasas, también ofrece una resistencia térmica de 93°C.

### 3.6.2.2 APLICACIONES TÍPICAS

- Cojinetes sin lubricación.
- Anillos porta cables o de desgaste
- Anillos giratorios.
- Piezas varias con la misma velocidad tangencial de la pieza que lo aloja o soporta.
- Rodillos
- Prototipos y Moldes
- Ruedas y Engranés.
- Sellos de Válvulas

### 3.6.3 NYLAMID XL (EXTRA LUBRICADO)

#### 3.6.3.1 CARACTERÍSTICAS

- Color verde.
- Auto lubricado con aceite, permite el suave deslizamiento de los componentes con los que esté en contacto, sus propiedades.
- Resistencia térmica 93°C.
- Disponibilidad, son prácticamente iguales a las de los anteriores, pero su nivel de absorción de humedad es menor.

#### 3.6.3.2 APLICACIONES TÍPICAS

- Piezas varias (cojinetes, patines, etc.) de baja velocidad sin acceso a lubricación.
- Piezas varias (cojines, estrellas, etc.) de la misma velocidad tangencial con un mínimo coeficiente de fricción.
- Todo tipo de piezas de alta resistencia a la abrasión, flexibilidad y elevada carga de trabajo.

### 3.6.4 NYLAMID TS (TABLA DE SUAJE)

#### 3.6.4.1 CARACTERÍSTICAS

- Color ámbar.
- También es producido por vaciado con una formulación especial de nylon 6/12. Con esta formulación se obtienen materiales de alta resistencia, ideales para usarse en el corte o suajado industrial, ya que protegen las herramientas y permiten un mejor acabado de corte.
- Su alta resistencia (memoria), principal característica de este material proporciona alto rendimiento y economía y opera satisfactoriamente en las condiciones de trabajo más severas.
- Por su alta resistencia, es ideal para el suajado (corte) industrial de diferentes materiales; textiles, cuero, piel, cartón, sintéticos, etc.

### 3.6.4.2 APLICACIONES TÍPICAS

- Tabla para suaje o corte industrial.

### 3.6.5 NYLAMID 6/6

#### 3.6.5.1 CARACTERÍSTICAS

- Color blanco.
- De todos los Nylons sin modificar, éste es el más fuerte, el más rígido y tiene uno de los más altos puntos de fusión.
- Está aprobado para trabajar en contacto directo con alimentos de consumo humano, por la FDA.
- Este Nylamid es producido por extrusión. Este proceso ofrece la ventaja de poder fabricar piezas con longitudes hasta de 96”.

#### 3.6.5.2 APLICACIONES TÍPICAS

- Cojinetes de baja velocidad con lubricación líquida poco viscosa o velocidades medias con lubricación forzada.
- Engranajes con adecuada resistencia de viga.
- Catarinas y poleas. (fig. No. 3.4)

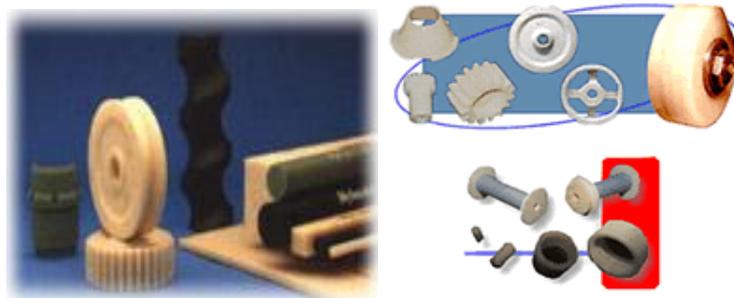


Figura No. 3.4 Diferentes aplicaciones del Nylamid.

### 3.7 TABLA COMPARATIVA DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES DEL NYLAMID

PROPIEDADES PRINCIPALES DE NYLAMID®							
Propiedades	Norma ASTM	Unidades M	XL	SL	TS	6/6	
Densidad	D792	gr/cm <sup>3</sup>	1.14	1.14	1.14	1.11	1.14-1.15
Dureza Shore – D			80-82	80-85	80-82	74-77	80-85

PROPIEDADES PRINCIPALES DE NYLAMID®

Absorción Agua: 24 hrs.	D570	%	0.6	0.5-1	0.6		0.6-1.15
Hasta Saturación		%máx	3	1	3		7-9
Temperatura de Servicio	D648	°C	100	110	100		100
COEFICIENTE DE POSICION TERMICA	D696	1/°C	100X10 (-6)	100X10 (-6)	100X10 (-6)	475	100X10 (-5)
Resistencia a la Tensión	D638	kg/cm <sup>2</sup>	720	810-914	720	500	632-843
Resistencia a la compresión	D695	kg/cm <sup>2</sup>	850	670-810	850	110	843
Resistencia a la Flexión	D790	kg/cm <sup>2</sup>	1200	770- 1,270	1200		879-984
Resistencia al Impacto	D256	kg-m/cm	8	11.8	8	7	6.5
Elongación	D638	%	15-30	40	15-30	275	50
Modulo de elasticidad	D638	kg/cm <sup>2</sup>	24000	21,093- 28,124	24000	28120	
COEFICIENTE FRICCION SECO:							
Estatico			0.3 a 0.4	0.05-0.1	0.07 a 0.15		
Dinamico			0.15 a 0.3		0.06 a 0.1		0.17 – 0.4

Tabla No. 3.5 Principales propiedades del Nylamid.

### 3.8 MATERIAL USADO PARA NUESTRO MOTOR

#### 3.8.1 NYLAMID M – MECÁNICO – COLOR NATURAL HUESO

Es el polímero más utilizado en la industria pues entre sus cualidades están: Gran resistencia al desgaste, Buenas propiedades mecánicas y eléctricas, Balance ideal de resistencia y tenacidad, Normatividad higiénica, auto lubricidad y resistencia térmica.

Este material esta aprobado por la norma NMX-E-202-1993-SCFI para el contacto con alimentos. Su resistencia térmica es de 93°C.

##### 3.8.1.2 APLICACIONES TÍPICAS

•Cojinetes • Engranés • Aislantes eléctricos • Ruedas • Moldes • Rodillos • Poleas  
• Sellos para válvulas • Catarinas • Raspadores • Guías de desgaste • Tolvas • Piezas de impacto • Aislantes térmicos • Prototipos. (fig. No. 3.5)



Figura No. 3.5 Engrane y rodillo cónico fabricados en Nylamid.

##### 3.8.1.3 TABLA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL NYLAMID M

PROPIEDADES	NORMA ASTM	UNIDADES	VALORES	UNIDADES	VALORES
Gravedad específica 23°C	D792	-----	1.04	-----	-----
Resistencia a la tensión 23°C	D638	Psi	12,000	$Kg/cm^2$	844
Elongación a la ruptura a 23°C	D638	%	20	-----	-----
Resistencia a la flexión a 23°C	D790	Psi	16,000	$Kg/cm^2$	1,125
Módulo de elasticidad a la flexión 23°C	D790	Psi	500,000	$Kg/cm^2$	35,115
Resistencia a la compresión 10% de deformación 23°C	D695	Psi	15,000	$Kg/cm^2$	1,055

<b>Módulo de elasticidad a la compresión 23°C</b>	D695	Psi	400,000	$Kg/cm^2$	28,124
<b>Dureza escala Shore d, 23°C</b>	D2240	-----	D85	-----	-----
<b>Impacto Izod ( con muesca), 23°C</b>	D256	Ft. Lb(in)	0.4	$cm.Kg/cm^2$	2.18
<b>Coefficiente de fricción dinámico</b>	PTM550 07	-----	0.2	-----	-----

Tabla 3.6

### 3.8.1.4 TABLA DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE NYLAMID M

<b>PROPIEDADES</b>	<b>NORMA ASTM</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>VALORES</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>VALORES</b>
Coeficiente de expansión térmica lineal (de -40°C a 149°C)	E831 (TMA)	$in/°F$	$3.5 \times 10^{-5}$	$m/(m.K)$	$90 \times 10^{-6}$
Temperatura de deflexión al calor (264 psi)	D648	°F	200	°C	93.3
Punto de fusión	D3418	°F	420	°C	215.5
Temperatura de servicio continuo en aire (Max.)		°F	200	°C	93.3
Conductividad térmica	F433	$BTUin/hr$	1.7	$W/(K.m)$	0.29

Tabla 3.7

### 3.8.1.5 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL NYLAMID M

PROPIEDADES	NORMA ASTM	UNIDADES	VALORES
Resistencia dieléctrica, corto tiempo	D149	<i>Volts/mil</i>	500
Resistividad volumétrica	D257	<i>Ohm – cm</i>	$> 10^{13}$
Constante dieléctrica $10^6$	D150	-----	3.7

Tabla No. 3.8

## 3.9 ALUMINIO

El Aluminio en Bruto (tocho) es un material blando, de baja resistencia mecánica, poca rigidez, ligero y de gran ductilidad.

Para mejorar sus características, se realizan aleaciones de aluminio con otros metales, siendo la aleación más frecuente la realizada con magnesio.

El aluminio es un metal simbolizado con las letras Al, su número atómico es el trece. Este metal se caracteriza por ser muy blando en estado natural. Es de color plateado.

### 3.9.1 CLASIFICACIÓN DEL ALUMINIO

El aluminio y sus aleaciones pueden ser clasificados según: su estado y el proceso utilizado.

#### 3.9.1.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU ESTADO

1. W: son denominadas a las sustancias que deben ser tratadas por medio de la temperatura. Este tipo de aluminio es adicionado a las sustancias que son inestables.
2. F: este es el aluminio en su estado puro.
3. O: este tipo de aluminio se encuentra cocido. Existen también los  $O_1$ ,  $O_2$  y  $O_3$ .
4. T: se denomina a las aleaciones que son endurecidos por el suministro de calor. También existen  $T_1, T_2$  y muchos otros más.
5. H: el estado de las aleaciones es de carácter áspero. Es dada por los materiales que se han endurecido luego de ser deformadas. Existen otros tipos de H, como  $H_1, H_2, H_3$  y  $H_4$ .

### 3.9.1.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL PROCESO UTILIZADO

1. Aluminio fundido: en este caso para utilizarlo no debe utilizar el calor.
2. Aluminio forjado: para manipular el aluminio en este caso es necesario someterlo a procesos térmicos.

### 3.10 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ALUMINIO

En líneas generales, y sin considerar la inmensa variedad de aluminios con diferentes aleaciones, las propiedades principales del aluminio son:

- El Peso Específico del aluminio es de  $2,7 \text{ gr/cm}^3$
- Este es el más ligero de los metales.
- Son mucho mayores sus prestaciones cuando se lo alea con cobre, silicio y magnesio. También, sometiéndolo a procesos físicos de templado y estirado en frío.
- El aluminio posee  $1/3$  de la rigidez del acero.
- El módulo elástico del aluminio es de alrededor de  $65.000 \text{ N/mm}^2$ , en comparación, el módulo elástico del acero, se encuentra en los  $200.000 \text{ N/mm}^2$ .
- El punto de fusión del aluminio es muy bajo:  $658^\circ\text{C}$ .
- La ductilidad es una característica notable en el aluminio; es un material muy maleable y de gran ductilidad, mucho más fácil de conformar que el acero.
- Puede extruirse con facilidad, por lo cual es un material apto para la fabricación de perfiles de secciones complejas, huecos o abiertos, y de dimensiones pequeñas.
- El aluminio es un metal blando, se corta y se raya con suma facilidad.

#### Conductividad Térmica

- Al igual que todos los metales posee un coeficiente de conductividad térmica muy elevado. Por esta razón no es apto como material de aislamiento térmico. Existen espumas de aluminio que pueden reducir sus propiedades conductivas y sirven también como aislantes acústicos.

#### Conductividad Eléctrica

- Posee una de las más elevadas entre los metales, situándose detrás del cobre. Por tal razón, se lo usa en la fabricación de componentes eléctricos y cables de alta, media y baja tensión.

- Posee un alto índice de reflexión de los rayos solares, lo cual hace que este material sea adecuado para la fabricación de aislantes termo reflectantes.
- Resistencia a la difusión de vapor, por ello se lo emplea como barrera de vapor para impedir condensaciones intersticiales en aislamientos térmicos.
- El aluminio genera de forma natural una capa de óxido que lo hace muy resistente a la corrosión. Los diferentes tipos de tratamiento de superficie pueden mejorar aún más esta propiedad. Resulta especialmente útil para aquellos productos que requieren de protección y conservación.
- La hoja de aluminio, incluso cuando se lamina a un grosor de 0,007 mm., sigue siendo completamente impermeable y no permite que las sustancias pierdan ni el más mínimo aroma o sabor. Además, el metal no es tóxico, ni desprende olor o sabor.
- El aluminio es cien por cien reciclable sin merma de sus cualidades. La recuperación del aluminio al final de su vida útil necesita poca energía.
- El proceso de reciclado requiere sólo un cinco por ciento de la energía que fue necesaria para producir el metal inicial. Con el aluminio reciclado podemos volver a fabricar los mismos productos de los que procede.

### 3.11 PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas o propiedades de resistencia mecánica sirven en la mayoría de los casos como base para dictaminar sobre un material metálico, con vistas a un fin de aplicación concreto. A continuación se da un resumen de las propiedades mecánicas más importantes del aluminio no sólo sometido a esfuerzo continuo sino también, oscilante y por golpe.

#### 3.11.1 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Entre las características mecánicas del aluminio se tienen las siguientes:

- De fácil mecanizado.
- Muy maleable, permite la producción de láminas muy delgadas.
- Bastante dúctil, permite la fabricación de cables eléctricos.
- Material blando (Escala de Mohs: 2-3).
- Permite la fabricación de piezas por fundición, forja y extrusión.
- Material soldable.

### 3.11.1.2 DUREZA

La mayoría de las veces se da en los materiales de aluminio la dureza Brinell, a causa de la sencillez de su determinación. Los valores de la dureza Brinell se extienden desde HB=15 para aluminio purísimo blando hasta casi HB=110 para AlZnMgCu 1,5 endurecido térmicamente, es decir, aleación 7075. Los valores de la dureza determinados por otros métodos, como el Vickers o el de Knoop, apenas tienen significado práctico en este metal. De vez en cuando se utiliza la microdureza, una variante del método Vickers, para determinar la dureza de capas anodizadas.

### 3.11.1.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, A LA FLEXIÓN, AL CORTE Y A LA TORSIÓN

En los materiales alumínicos se puede admitir que el valor del límite de aplastamiento 0,2% (parámetro de la resistencia a la compresión) es igual al valor del límite elástico 0,2% de tracción.

La resistencia a la compresión o el límite de aplastamiento 0,2% tienen importancia principalmente en las piezas sometidas a compresión tales como cojinetes de fricción.

La resistencia a la flexión en las aleaciones de aluminio se tiene en cuenta para las de fundición, en aquellos casos en que, al realizar el ensayo de tracción no es posible determinar el límite elástico con suficiente exactitud a causa de su pequeño valor.

La resistencia al cizallamiento es importante para el cálculo de la fuerza necesaria para el corte y para determinadas construcciones. No existen valores normalizados. Generalmente está entre el 55 y 80 % de la resistencia a la tracción.

Casi nunca se determina la resistencia a la torsión, si se considera una distribución lineal de tensiones, puede considerársela igual a la resistencia al cizallamiento.

#### 3.11.1.4 RESISTENCIA A BAJAS TEMPERATURAS

El comportamiento de los metales a bajas temperaturas depende fundamentalmente de la estructura de su red cristalina.

El aluminio con su red FCC (o CCC) tiene la misma estructura que el cobre, el níquel o los aceros austeníticos, por eso no se presentan nunca en las aleaciones de aluminio a temperaturas bajas las complicaciones que tienen lugar en los metales BCC, sobre todo en los aceros ferríticos.

#### 3.12. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Entre las características físicas del aluminio, destacan las siguientes:

- Es un metal ligero, cuya densidad o peso específico es de  $2700 \frac{Kg}{m^3}$  (2,7 veces la densidad del agua).
- Tiene un punto de fusión bajo:  $660^{\circ}C$  ( $933 K$ ).
- El peso atómico del aluminio es de 26,9815.
- Es de color blanco brillante.
- Buen conductor del calor y de la electricidad.
- Resistente a la corrosión, gracias a la capa de  $Al_2O_3$  formada.
- Abundante en la naturaleza.

#### 3.13 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

- Estructura atómica del aluminio.
- Debido a su elevado estado de oxidación se forma rápidamente al aire una fina capa superficial de óxido de aluminio (Alúmina  $Al_2O_3$ ) impermeable y adherente que detiene el proceso de oxidación, lo que le proporciona resistencia a la corrosión y durabilidad. Esta capa protectora, de color gris mate.
- El aluminio tiene características anfóteras. Esto significa que se disuelve tanto en ácidos (formando sales de aluminio) como en bases fuertes liberando hidrógeno.
- La capa de óxido formada sobre el aluminio se puede disolver en ácido cítrico formando citrato de aluminio.

### 3.14 TABLA DE LAS CARACTERISTICAS DEL ALUMINIO.

Aluminio	
Símbolo químico	Al
Número atómico	13
Grupo	13
Periodo	3
Aspecto	plateado
Bloque	p
Densidad	2698.4 kg/m <sup>3</sup>
Masa atómica	26.9815386 u
Radio medio	125 pm
Radio atómico	118
Radio covalente	118 pm
Configuración electrónica	[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>
Electrones por capa	2, 8, 3
Estados de oxidación	3
Óxido	anfótero
Estructura cristalina	cúbica centrada en las caras
Estado	sólido
Punto de fusión	933.47 K
Punto de ebullición	2792 K
Calor de fusión	10.79 kJ/mol
Presión de vapor	2,42 × 10 <sup>-6</sup> Pa a 577 K
Volumen molar	10,00×10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /mol
Electronegatividad	1,61
Calor específico	900 J/(K·kg)
Conductividad eléctrica	37,7 × 10 <sup>6</sup> S/m
Conductividad térmica	237 W/(K·m)

Tabla 3.9

## TEMA IV TIPOS DE CARCASA

### 4.1 TIPOS DE CARCASAS EN MOTORES

Dentro de las características fundamentales de los motores, éstos se hallan formados por varios elementos, sin embargo, las partes principales son: el estator, la carcasa, la base, el rotor, la caja de conexiones, las tapas y los cojinetes.

La carcasa es la parte que protege y cubre al estator y al rotor, el material empleado para su fabricación depende del tipo de motor, de su diseño y su aplicación. Así pues, la carcasa puede ser:

- a) Totalmente cerrada.
- b) Abierta.
- c) A prueba de goteo.
- d) A prueba de explosiones.
- e) De tipo sumergible.

El tipo de carcasa se seleccionara según las condiciones de operación, sean consideradas como normales o especiales, por ejemplo, sumergido en agua, a prueba de goteo, a prueba de polvo, en ambientes explosivos, etc. (fig. 4.1)



Figura No. 4.1 Tipos de carcasas.

## 4.2 NORMA NEMA PARA TIPOS DE CARCASAS DE MOTORES

La NEMA (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos) reconoce los siguientes:

- Carcasa a prueba de agua. Envoltente totalmente cerrada para impedir que entre agua aplicada en forma de un chorro o manguera, al recipiente de aceite y con medios de drenar agua al interior. El medio para esto último puede ser una válvula de retención o un agujero cachueado en la parte más inferior del armazón, para conectar un tipo de drenado.
- Carcasa a prueba de ignición de polvos. Envoltente totalmente cerrada diseñada y fabricada para evitar que entren cantidades de polvo que puedan encender o afectar desempeño o capacidad.
- Carcasa a prueba de explosión. Envoltente totalmente cerrada diseñada y construida para resistir una explosión de un determinado caso vapor que pueda estar dentro de un motor, y también para evitar la ignición de determinado gas o vapor que lo rodee, debido a chispas o llamaradas en su interior.
- Carcasa totalmente cerrada. Envoltente que evita el intercambio de aire entre el interior y el exterior de ella pero que no es lo suficiente mente cerrada para poderla considerar hermética al aire.
- Carcasa protegida al temporal. Envoltente abierta cuyos conductos de ventilación están diseñados para reducir al mínimo la entrada de lluvia o nieve y partículas suspendidas en el aire.

El costo y el tamaño de los motores totalmente cerrados es mayor que el de los motores abiertos, de la misma potencia y ciclo de trabajo y elevación sobre la temperatura ambiente.

## 4.3 MATERIALES PARA CONSTRUIR UNA CARCAZA

La carcasa es la parte externa del motor que puede estar construida en acero, hierro fundido, o cualquier aleación metálica como aluminio o silicio.



Figura No. 4.2 Carcasa del motor.

En la carcasa se dispone de las correspondientes patas de fijación y los anillos de elevación y de transporte. (fig. 4.2)

Las carcasas de los motores eléctricos trifásicos para uso industrial son fabricadas en los tamaños de carcasa 71 a 355, de acuerdo a las Normas IEC 72.

Las carcasas tamaños 56 y 63, son fabricadas en una aleación de aluminio inyectado a presión, proporcionando unidades compactas, livianas y de elevada resistencia mecánica. Del tamaño 71 a 355 inclusive, son de fundición de hierro gris, de construcción sólida y robusta.

A fin de facilitar su manipulación e instalación los motores construidos a partir del tamaño de carcasa 112 y hasta el 355 inclusive se proveen con cárcamo de izaje.

## TEMA V TIPOS DE ROTORES Y ESTADORES

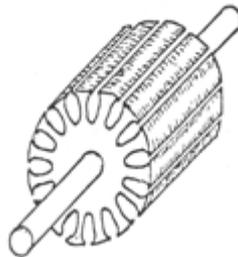
### 5.1 TIPOS DE ROTORES

El rotor es el elemento de transferencia mecánica, ya que de él depende la conversión de energía eléctrica a mecánica. Los rotores, son un conjunto de láminas de acero al silicio que forman un paquete, y pueden ser básicamente de tres tipos:

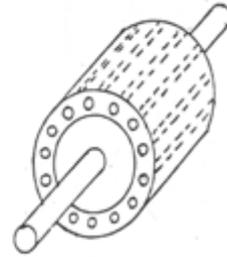
- a) Rotor ranurado.
- b) Rotor de polos salientes.
- c) Rotor jaula de ardilla.



a) Polos salientes



b) Ranurado



c) Jaula de ardilla

Existen varios tipos de estos elementos, pero aquí solamente vamos a tratar los que son más usados en la industria; es decir, los rotores para motores asíncronos de corriente alterna.

#### 5.1.1 ROTOR DE JAULA DE ARDILLA SIMPLE

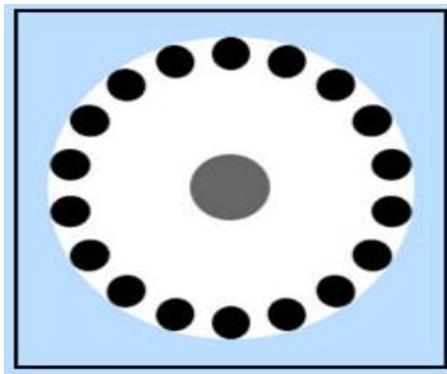


Figura No. 5.1 El rotor representado es de jaula de ardilla simple.

En el dibujo se puede observar unos círculos negros, éstos representan las ranuras del rotor donde va introducido el bobinado. Existen varios tipos de ranuras, de ahí que existan varios tipos de rotores.

Este tipo de rotor es el usado para motores pequeños, en cuyo arranque la intensidad nominal supera 6 o 8 veces a la intensidad nominal del motor. Soporta mal los picos de cargas. Está siendo sustituido por los rotores de jaula de ardilla doble en motores de potencia media. Su par de arranque no supera el 140 % del normal.

## 5.2 TIPOS DE ESTADORES

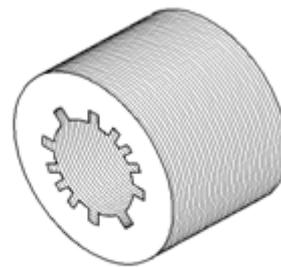
El estator es el elemento que opera como base, permitiendo que desde ese punto se lleve a cabo la rotación del motor. El estator no se mueve mecánicamente, pero sí magnéticamente. Existen dos tipos de estadores.

- a) Estator de polos salientes.
- b) Estator ranurado.

El estator está constituido principalmente de un conjunto de láminas de acero al silicio (y se les llama “paquete”), que tienen la habilidad de permitir que pase a través de ellas el flujo magnético con facilidad; la parte metálica del estator y los devanados proveen los polos magnéticos.



a) POLOS SALIENTES



b) RANURADO

Los polos de un motor siempre son pares (pueden ser 2, 4, 6, 8, 10, etc.), por ello el mínimo de polos que puede tener un motor para funcionar es dos (un norte y un sur).

Las “revoluciones por minuto” del rotor (RPM) se determinan por la siguiente fórmula:

$$\text{RPM} = \frac{F \times T}{P_p}$$

F = Frecuencia de la corriente alterna (60 Hz).

T = Tiempo en segundos (60 segundos).

pp = Pares de polo (todo motor tiene un mínimo de un par de polos, un norte y un sur).

RPM = Revoluciones por minuto.

### 5.3 TIPOS DE BOBINADOS

Cada fase del devanado trifásico está formada por varias espiras formando bobinas, conectadas de forma que se sumen las fuerzas electromotrices engendradas en los conductores. El bobinado de cada fase es de tipo tambor y abierto (con un principio y un final). Las fases deben ser idénticas y desfasadas entre sí, basándose en el ángulo característico del sistema ( $120^\circ$  eléctricos en el devanado trifásico).

Las bobinas del devanado forman grupos que pueden ser según su forma:

- Concéntricos.
- Imbricados.
- Ondulados.

Según la manera de conexión de los grupos de bobina de una misma fase, el devanado puede ser conectado:

- Por polos.
- Por polos consecuentes.

#### 5.3.1 BOBINADO POR POLOS

Un bobinado es por polos cuando el final de un grupo de bobinas está conectado con el final del siguiente, y el principio de un grupo con el principio del siguiente, dejando sin conectar el principio del primer grupo y el principio del último, que serán el principio y el final, respectivamente de la fase. En la figura No. 5.2 se puede observar el bobinado por polos.

En un bobinado por polos, el número de grupos por fase es igual al número de polos. Y el número total de grupos, es el número de grupos por fase, por el número de fases.

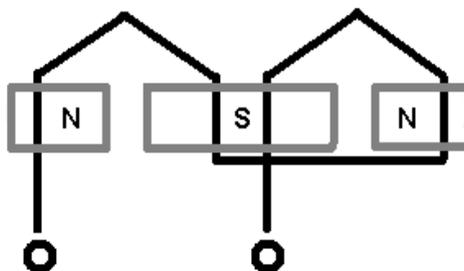


Figura No. 5.2 Bobinado por polos.

## TEMA VI APLICACIONES DEL MOTOR

### 6.1 COMO MOTOR PARA VENTILADORES

Un ventilador es una máquina de fluido concebida para producir una corriente de aire mediante un rodete con aspas que giran produciendo una diferencia de presiones. Entre sus aplicaciones, destacan las de hacer circular y renovar el aire en un lugar cerrado para proporcionar oxígeno suficiente a los ocupantes y eliminar olores, principalmente en lugares cerrados; así como la de disminuir la resistencia de transmisión de calor por convección. Fue inventado en 1882 por el estadounidense Schuyler S. Wheeler.

Se utiliza para desplazar aire o gas de un lugar a otro, dentro de o entre espacios, para motivos industriales o uso residencial, para ventilación o para aumentar la circulación de aire en un espacio habitado, básicamente para refrescar.

#### 6.1.1 TIPOS DE VENTILADORES

- Industriales: Centrífugos, Helicocentrífugos, Helicoidales de distintas presiones y caudales.
- De pared: son fijados en la pared, permitiendo una mayor circulación en lugares pequeños, donde el uso de ventiladores no es soportado debido a la largura del ambiente, o en conjunto con otros ventiladores, proporcionando una mayor circulación de aire.
- De mesa: son ventiladores de baja potencia utilizados especialmente en oficinas o en ambientes donde necesitan poca ventilación.
- De piso: son portátiles y silenciosos, posibilitan que sean colocados en el suelo en cualquier ambiente de una casa, pudiendo ser trasladados a cualquier parte. Podemos encontrarlos en varios modelos y formas.
- De techo: son ventiladores verticales, sus aspas están en posición horizontal, y por lo tanto el aire va hacia abajo. Muy comunes, utilizados en habitaciones donde no hay espacio disponible en las paredes o el suelo, pueden ser muy peligrosos si no están correctamente fijados al techo.

### 6.2 COMO GENERADOR DE IMANES PERMANENTES

Un generador de imanes permanentes consta de un conjunto de imanes que “se mueven” frente a unas bobinas “fijas”.

Dicha situación no es la que se da en los generadores eléctricos, sino que los imanes se mueven con velocidad “circular”, según sea el eje de giro.

## 6.2.1 TIPOS DE GENERADORES

Los generadores son de dos tipos, de flujo axial y de flujo radial.

- Generadores de flujo axial: el eje de giro es paralelo al campo magnético de los imanes
- Generadores de flujo radial: el eje de giro es perpendicular al campo magnético de los imanes

Las expresiones “flujo axial” y “flujo radial” no son físicamente correctas, puesto que el flujo es una magnitud escalar y por tanto no puede tener sentido axial ni radial, pero esta terminología se ha establecido como distintiva de los dos tipos de generadores, y por ello continuaremos usándola en este documento.

En los generadores de flujo axial, los imanes se disponen sobre un disco de hierro que gira alrededor de un eje perpendicular que pasa por su centro. Así pues el campo magnético de los imanes es paralelo al eje de giro, y de ahí la frase “flujo axial” que realmente significa campo magnético paralelo al eje de giro. En los generadores de flujo radial, los imanes se colocan sobre la superficie lateral de un cilindro que gira alrededor de su propio eje. En este caso el campo magnético de los imanes es perpendicular al eje de giro, y por tanto va en dirección radial, y de ahí la frase “flujo radial” que realmente significa campo magnético en dirección radial o perpendicular al eje de giro. (fig. 6.1)

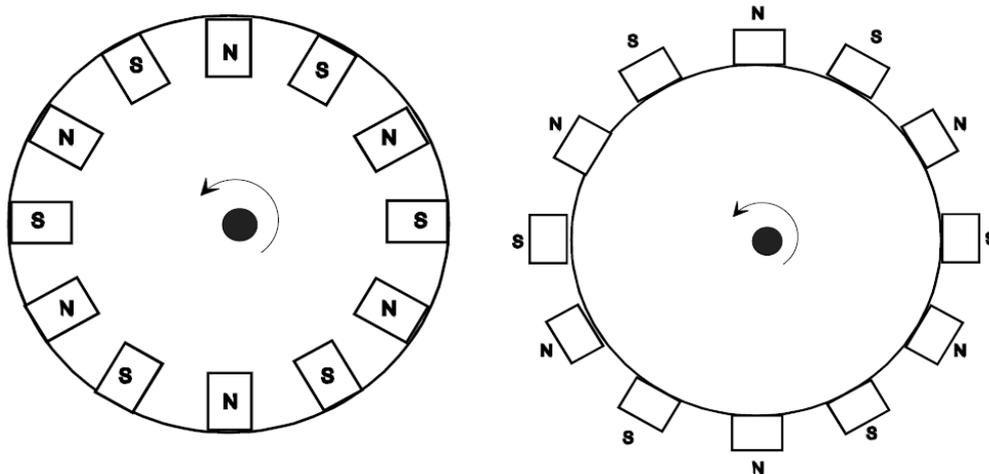


Figura No. 6.1 Un generador de imanes permanentes consta de un conjunto de imanes que “se mueven” frente a unas bobinas “fijas”.

## 6.3 COMO BATIDORA MEZCLADORA

Una batidora mezcladora, es un electrodoméstico que permite batir o mezclar alimentos blandos, esponjar y emulsionar mezclas y salsas, usada en panaderías, tortillerías y en procesos alimenticios.

### 6.3.1 FUNCIONAMIENTO

Un motor eléctrico (usualmente un motor universal) hace girar un eje, ese eje va conectado a una serie de engranajes, que se conectan a unas varillas de metal. Al girar, estas provocan el movimiento de batido de la mezcla de ingredientes.

Suelen tener varias velocidades, controladas electrónicamente o mecánicamente mediante un interruptor haciendo la vida más fácil y rápida, y permitiendo crear nuevos alimentos uniendo ingredientes.

## TEMA VII DISEÑO

### 7.1 CÁLCULOS

#### 7.1.2 CÁLCULOS PARA LA FUERZA MAGNÉTICA

Fuerza entre dos polos magnéticos en la dirección del flujo magnético se produce una fuerza de atracción ( $F_a$ ) dada por: (fig. 7.1)

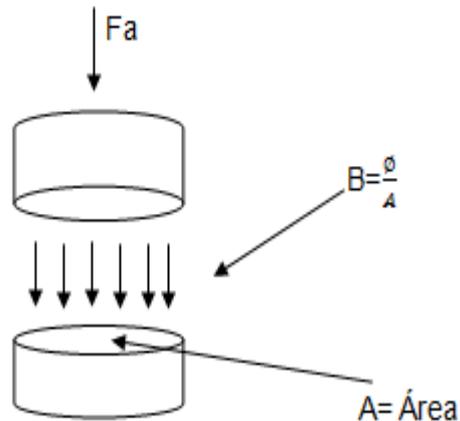


Figura No. 7.1 Dirección del flujo magnético entre imanes.

Que está dada por la siguiente fórmula:

$$F_a = \frac{1B^2}{2\mu_a}$$

O bien:

$$F_a = 40 \frac{B^2}{T} \left[ \frac{A}{cm^2} \right] N$$

Donde de acuerdo a las propiedades del neodimio:

H= Intensidad del campo.

$\mu$  = Permeabilidad relativa.

B= Inductancia magnética.

Donde:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi 1.8^2}{4} = 2.54 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto:

$$F_a = 40 \frac{B^2}{T} \left[ \frac{A}{\text{cm}^2} \right] N$$

$$F_a = 40 \frac{1.5^2}{T} \left[ \frac{2.54}{\text{cm}^2} \right] N$$

$$F_a = 498.6 \text{ N}$$

A continuación con los datos de la tabla del neodimio se calculan  $i$ ,  $r$  y  $B$ .

Masa del imán  $m = 0.018 \text{ kg}$

Inductancia magnética  $B = 15000 \text{ GS} = 1.5 \text{ T}$

Distancia entre imanes  $d = 1.7 \text{ cm}$

Resistividad  $\mu = 170 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$

Radio  $r_1 = 5 \text{ cm}$   $r_2 = 7.5 \text{ cm}$

### 7.1.3 FORMULAS Y DESPEJES PARA LA INDUCTANCIA MAGNÉTICA

Calculando ahora la inductancia magnética.

$$\oint Bdc = \mu \cdot i$$

$$Br2\pi = \mu \cdot i$$

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi r}$$

Donde la distancia que hay del imán sujetado al motorcito de pila al imán de nuestro rotor, la cual es de 1.7 cm.

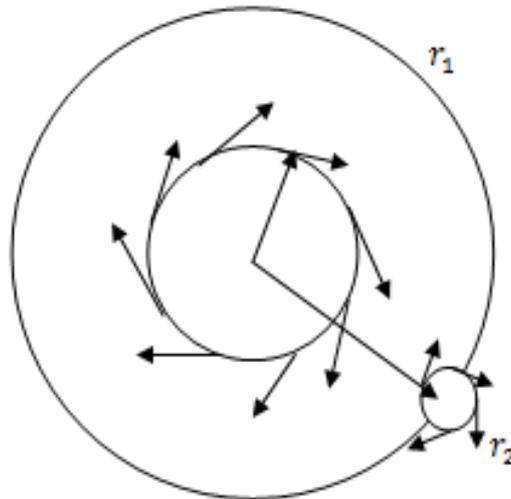


Figura No. 7.2 Ilustra la dirección de las líneas de flujo que se ejercen en el motor.

Luego entonces nos quedan las siguientes ecuaciones.

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi d}$$

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi r_1}$$

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi r_2}$$

#### 7.1.4 CALCULOS PARA LA CORRIENTE

Al no conocer el valor de la corriente, se despeja y por lo tanto se calcula  $i$ ;

$$i = \frac{2\pi dB}{\mu}$$

Tomando como dato de tablas del neodimio  $\mu = 170 \times 10^{-6} \Omega \cdot cm$ ,  $B = 1.5 \text{ T}$  y  $d = 1.7 \text{ cm}$ .

Sustituimos valores para encontrar la corriente que pueden generar los imanes, nos da lo siguiente:

$$i = \frac{2\pi dB}{\mu}$$

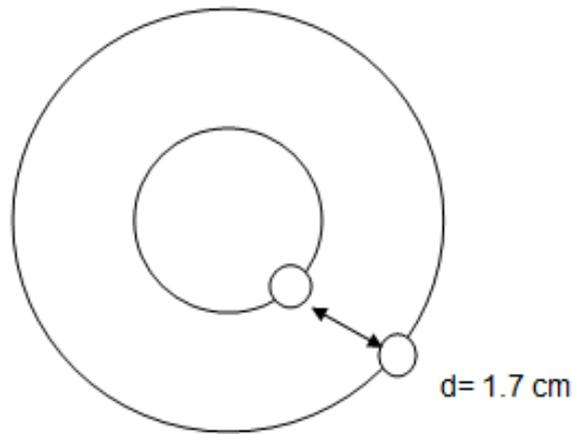


Figura No. 7.3 Distancia que hay del imán del rotor al imán motriz.

$$i = \frac{2\pi(1.7 \text{ cm})(1.5 \text{ T})}{170 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}}$$

$$i = \frac{16.022 \text{ cm T}}{170 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}}$$

$$i = 94 \times 10^{-3} \text{ T}/\Omega$$

#### 7.1.5 CALCULOS PARA LA INDUCTANCIA MAGNETICA

Ahora encontraremos los valores para B, sustituyendo el valor encontrado de  $i$ , con respecto a los radios y a la distancia entre imanes. Sustituyendo nos queda:

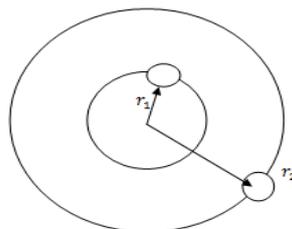


Figura No. 7.4 distancia entre radios.

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi d}$$

$$B = \frac{(170 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm})(94 \times 10^3 \text{ T}/\Omega)}{2\pi(1.7 \text{ cm})}$$

$$B = \frac{15.98}{10.68} = 1.496 \cong \mathbf{1.5 \text{ T}}$$

$$B_1 = \frac{\mu \cdot i}{2\pi r_1}$$

$$B_1 = \frac{(170 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm})(94 \times 10^3 \text{ T}/\Omega)}{2\pi(0.5 \text{ cm})}$$

$$B_1 = \frac{15.98}{3.1415} = \mathbf{5.08 \text{ T}}$$

$$B_2 = \frac{\mu \cdot i}{2\pi r_2}$$

$$B_2 = \frac{(170 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm})(94 \times 10^3 \text{ T}/\Omega)}{2\pi(7.5 \text{ cm})}$$

$$B_1 = \frac{15.98}{47.123} = \mathbf{0.339 \text{ T}}$$

### 7.1.6 CALCULOS PARA LOS RADIOS

Ahora encontraremos los valores para  $r$ , con respecto a los valores encontrados de  $B$ . Sustituyendo nos queda:

$$r = \frac{\mu \cdot i}{2\pi B}$$
$$r = \frac{(170 \times 10^{-6} \Omega \cdot cm)(94 \times 10^3 T/\Omega)}{2\pi(1.5 T)}$$
$$r = \frac{15.98}{9.42} = 1.69 \text{ cm}$$

$$r_1 = \frac{\mu \cdot i}{2\pi B_1}$$
$$r_1 = \frac{(170 \times 10^{-6} \Omega \cdot cm)(94 \times 10^3 T/\Omega)}{2\pi(5.08 T)}$$
$$r_1 = \frac{15.98}{31.91} = 0.50 \text{ cm}$$

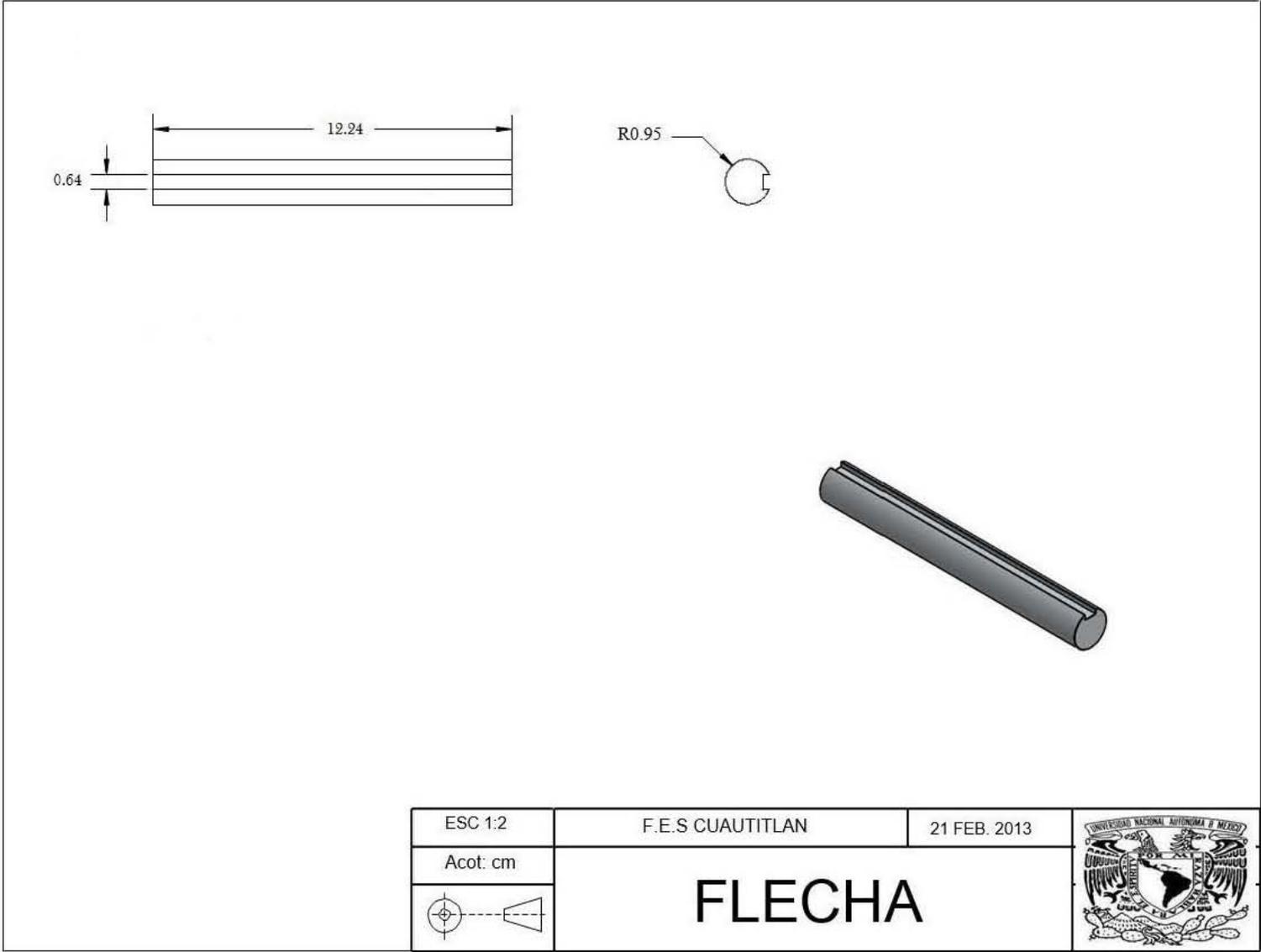
$$r_2 = \frac{\mu \cdot i}{2\pi B_2}$$
$$r_2 = \frac{(170 \times 10^{-6} \Omega \cdot cm)(94 \times 10^3 T/\Omega)}{2\pi(0.339 T)}$$
$$r_2 = \frac{15.98}{2.129} = 7.50 \text{ cm}$$

## 7.2 DIBUJOS

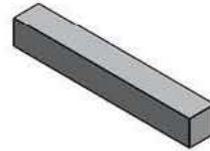
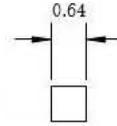
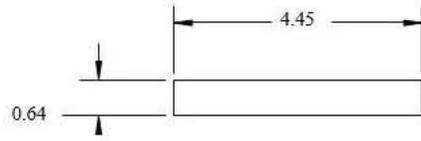
Se hicieron los dibujos de las diferentes partes del motor así como sus vistas de cada una de ellas, además se hizo el dibujo del ensamble del motor, todo esto se realizó en software de CAD Solidworks.

A continuación se muestran cada una de las piezas del motor.

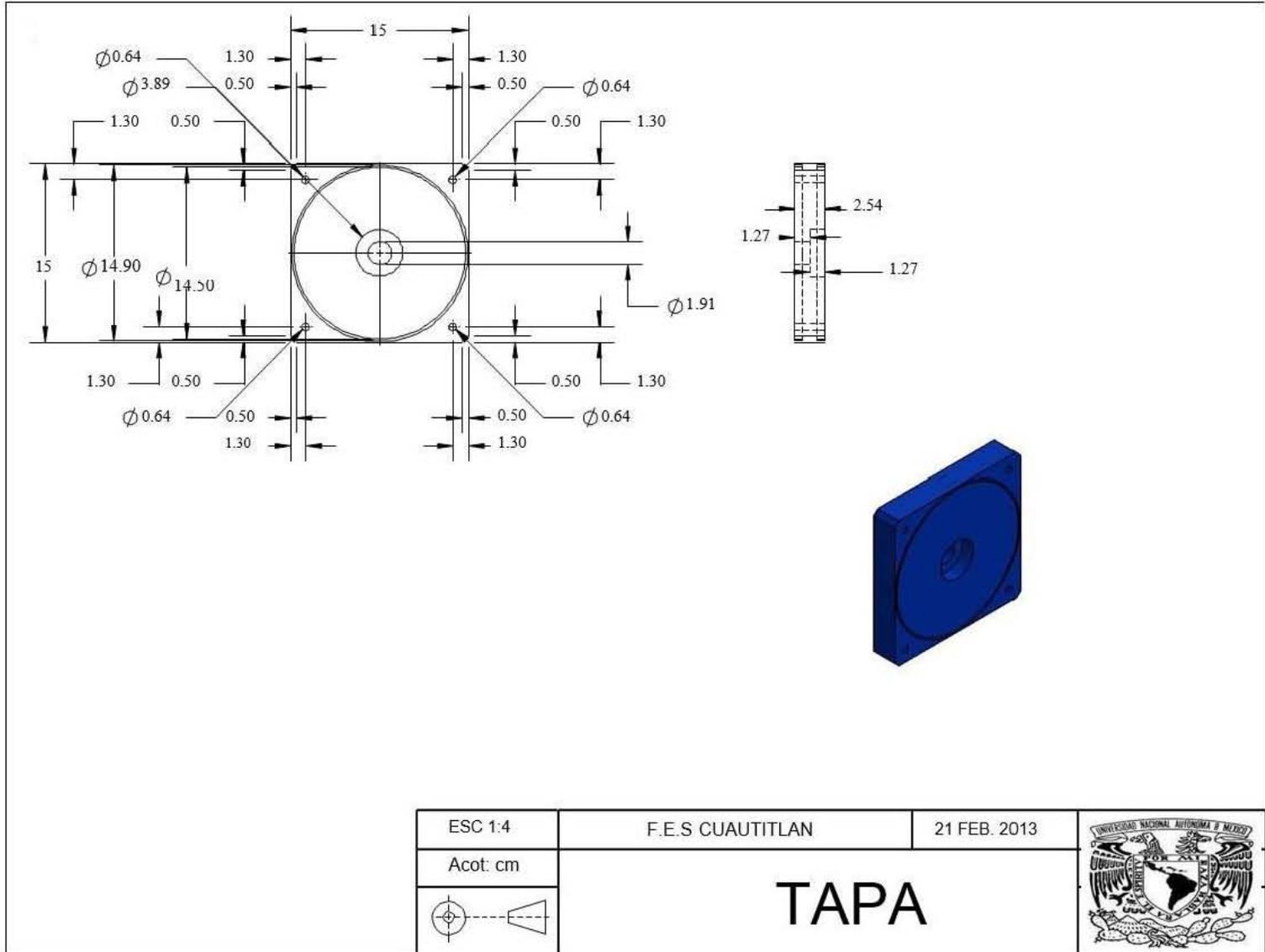
1. Flecha
2. Cuña
3. Tapa
4. Rotor
5. Balero
6. Estator
7. Imán
8. Esparrago
9. Vista explosionada

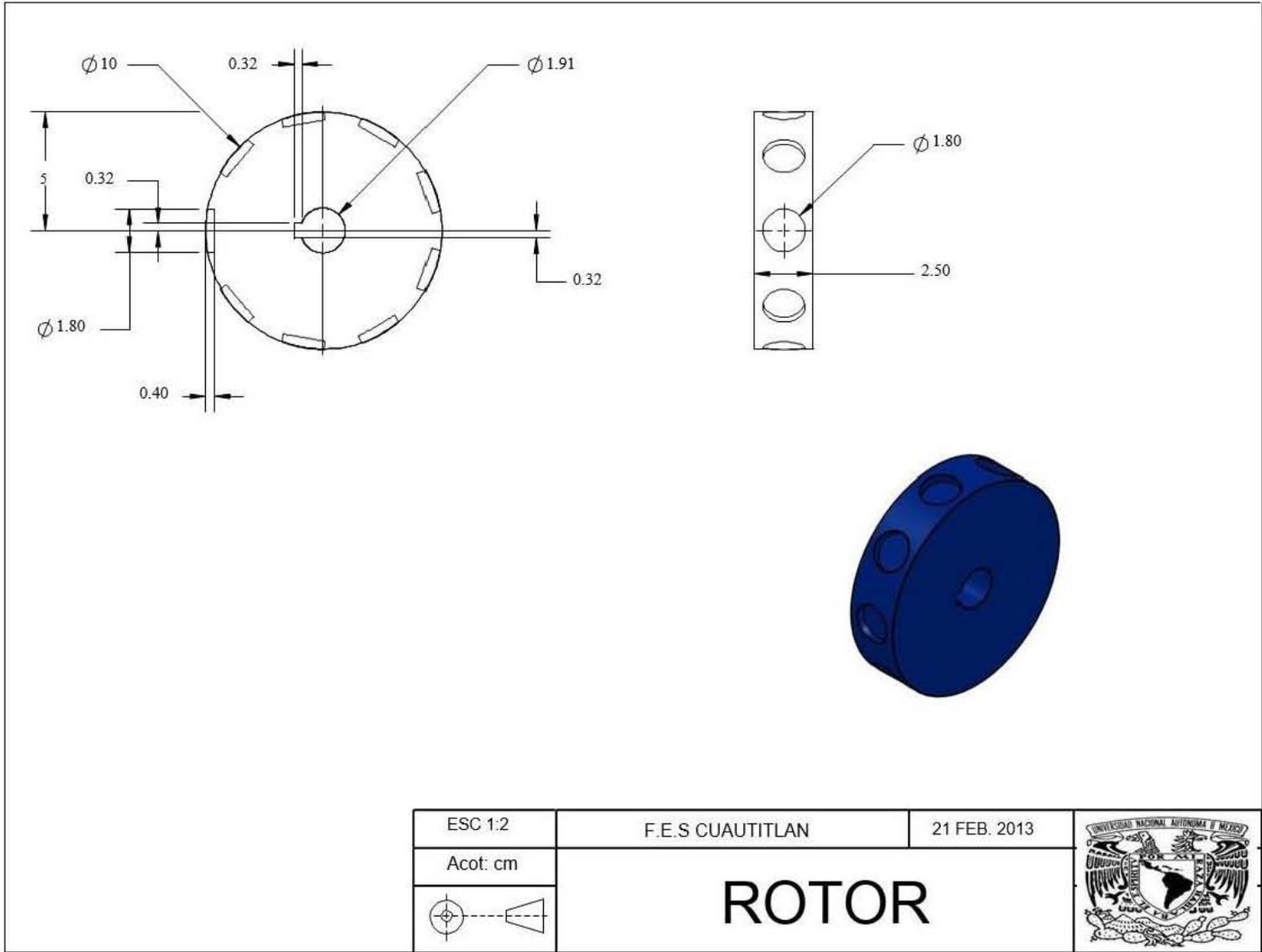


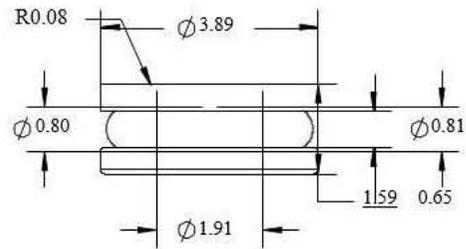
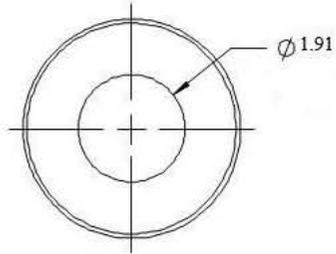
ESC 1:2	F.E.S CUAUTITLAN	21 FEB. 2013	
Acot: cm	<h1>FLECHA</h1>		



ESC 1:1	F.E.S CUAUTITLAN	21 FEB. 2013	
Acot: cm	<b>CUÑA</b>		

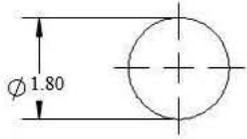


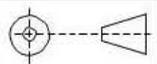


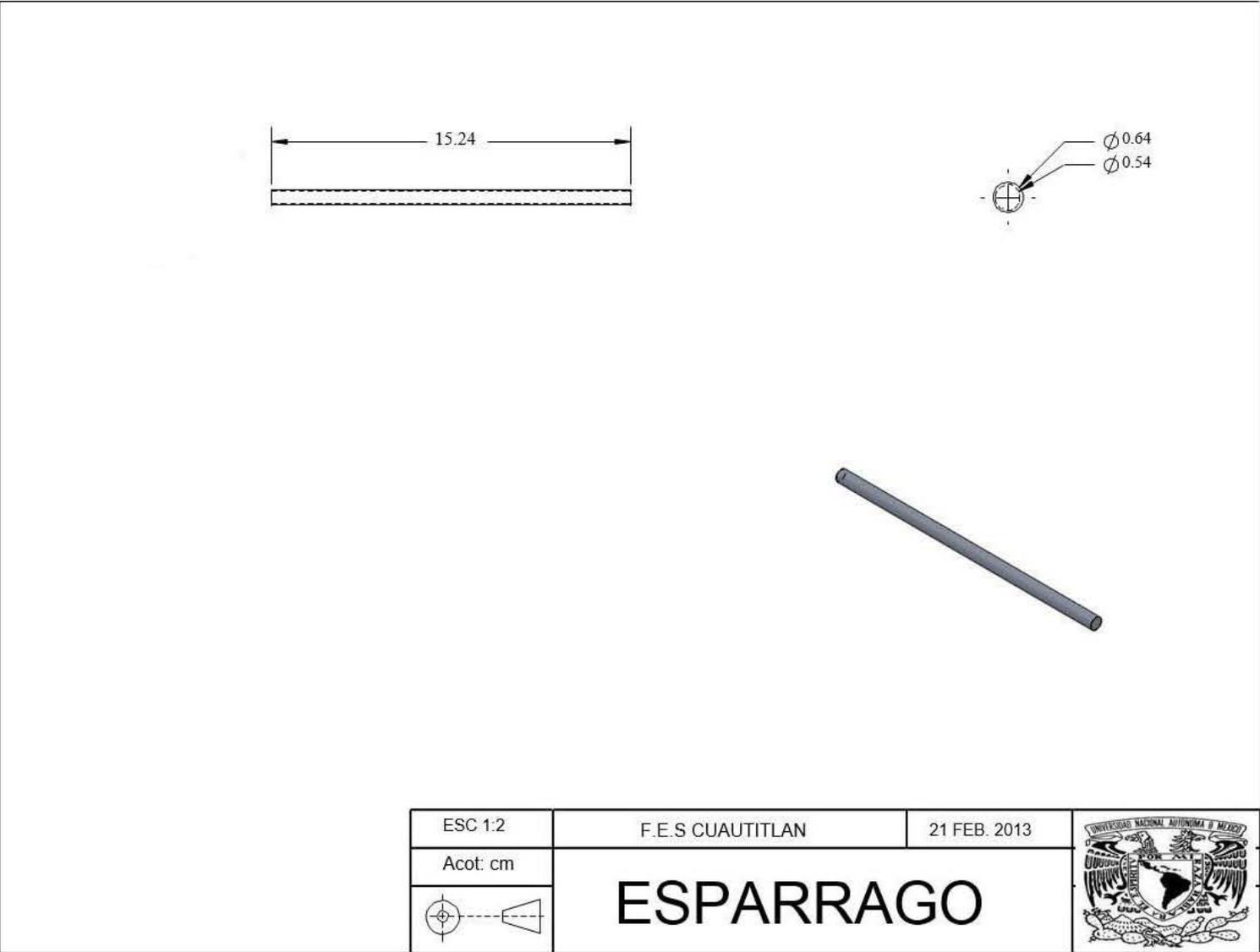


ESC 1:1	F.E.S CUAUTITLAN	21 FEB. 2013	
Acot: cm	<b>BALERO</b>		

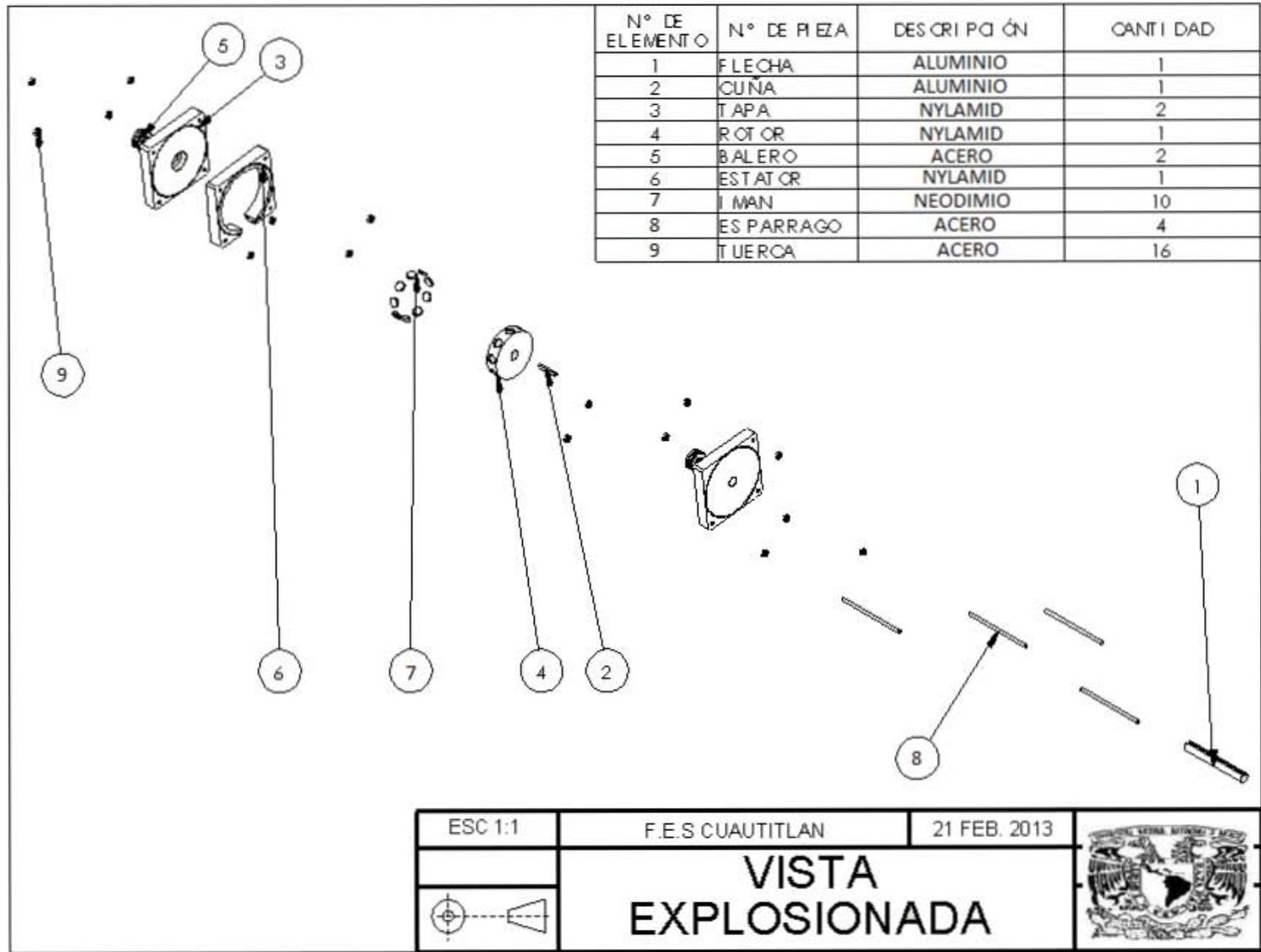




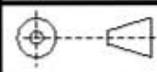
ESC 1:1	F.E.S CUAUTITLAN	21 FEB. 2013	
Acot: cm	<b>IMAN</b>		
			



ESC 1:2	F.E.S CUAUTITLAN	21 FEB. 2013	
Acot: cm	<b>ESPARRAGO</b>		



N° DE ELEMENTO	N° DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	FLECHA	ALUMINIO	1
2	CUÑA	ALUMINIO	1
3	TAPA	NYLAMID	2
4	ROTOR	NYLAMID	1
5	BALERO	ACERO	2
6	ESTATOR	NYLAMID	1
7	IMAN	NEODIMIO	10
8	ESPARRAGO	ACERO	4
9	TUERCA	ACERO	16

ESC 1:1	F.E.S CUAUTITLAN	21 FEB. 2013	
	<b>VISTA EXPLOSIONADA</b>		

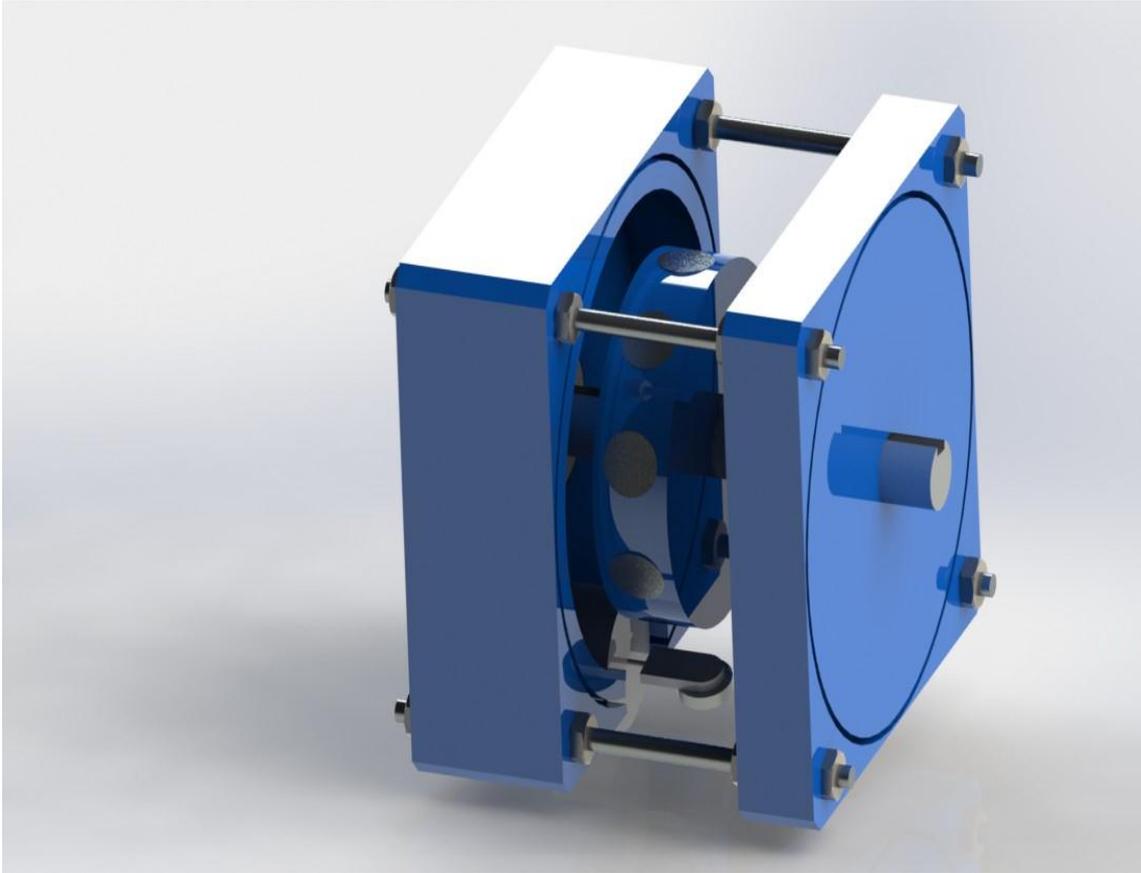


Figura No. 7.7 Ensamble realizado de motor

## 7.3 ESTRUCTURAS

Basándonos en la investigación previa de las diferentes partes de los motores, decidimos realizar nuestro diseño y a continuación se muestran las imágenes de las partes que conforman nuestro motor.

### 7.3.1 PROCEDIMIENTO DE ELABORACION DE PIEZAS

#### CONSTRUCCION DE PIEZAS PARA EL MOTOR MAGNETICO.

Máquinas de trabajo que se usaron:

- Torno paralelo.
- Sierra cinta.
- Fresadora universal.
- Taladro de banco.
- Cepillo de codo.

Herramientas utilizadas:

- Buril de tungsteno.
- Mariposa.
- Porta buril.
- Barra de interiores.
- Brocas alta velocidad (1", 3/4", 1/2", 7/16").

Procedimiento de elaboración de piezas:

1.-De una placa de 12 x 12 plg. X 1 plg. De grueso se cortaron 4 placas de nylamid m (maquinable) de 15cmx 15 cm x 2.6cm, en una sierra cinta. (Foto 7.1)



Fotografía No. 7.1 Sierra tipo cinta.

2.- Se escuadraron las 4 placas en una fresadora con mariposa y buril. (Foto 7.2 y 7.3)



Fotografía No. 7.2 Mariposa y buril.



Fotografía No. 7.3 Fresadora universal.

3.-Se barrenaron 3 de las 4 placas, 2 usadas como tapas del motor y una para estator.

- Se barrenan en el centro, a un diámetro de 3/4" pasado, para flecha y se hace una caja circular de 1 1/2" de diámetro externo x 1/2" de profundidad, para colocación de baleros. Además se maquina también ranura de 3mm de profundidad por un diámetro interior de 15 cm, por ambos lados de las placas, también se quitan las esquinas de las placas, para evitar filos. Todo lo anterior se maquina en el torno con una barra de interiores. (Foto 7.4 y 7.5)

Así mismo a la placa usada como estator se le hizo un barreno pasado, en el centro, con un diámetro exterior de 13 cm y un barreno en la parte inferior central de 1 1/2" de diámetro para colocar un motor eléctrico de 12 volts de CC.



Fotografía No. 7.4 Torno paralelo.

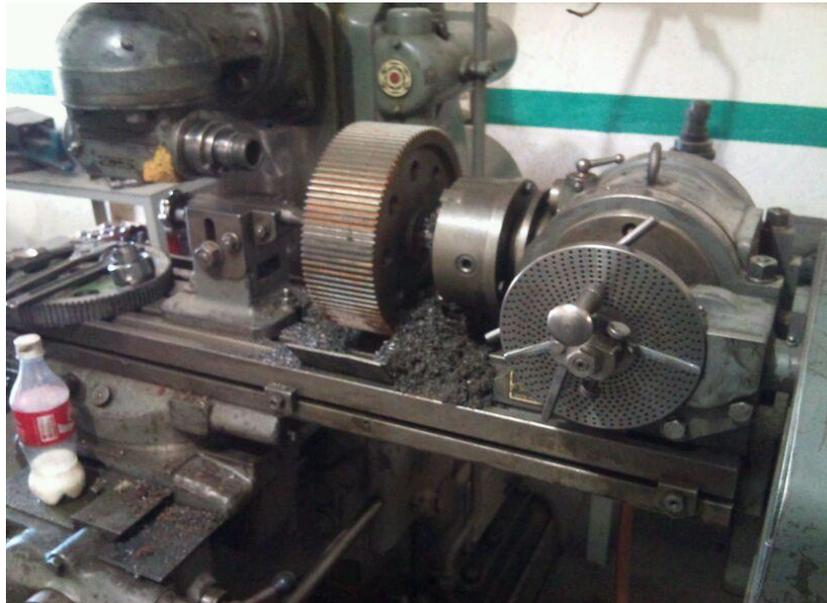


Fotografía No. 7.5 barra de interiores.

4.-Se toma la pieza diseñada para estator y se le hacen 11 barrenos, con broca de 20mm, con una separación de 1.5cm entre barrenos. Todo lo anterior se maquina en una fresadora universal con cabezal divisor. (Foto 7.6)

5.-Así mismo se toma la placa sobrante de nylamid, y se fabrica una rodaja de 10 cm de diámetro exterior, además de fabricarle un barreno pasado en el centro de 3/4".

5.-Se procede a perforar 9 barrenos, con broca de 20 mm y con una separación de 1.5cm de barreno a barreno, en misma fresa citada anteriormente.



Fotografía No. 7.6 Fresadora universal con cabezal divisor.

6.-Con un redondo de aluminio de 3/4"x 20 cm se fabrica la flecha.

-Se refrenta el redondo en el torno y se le maquina cuñero de 1/4", a lo largo de toda la flecha, en un cepillo de codo. (Foto 7.7)

7.-Se fabrica una cuña de 1/4" x 3cm.



Fotografía No. 7.7 Cepillo de codo

8.-Por último las tapas y el estator de nuestro motor, se le fabrican 4 barrenos pasados de 1/4", a cada una de las placas, en un taladro de banco y con broca de 1/4". (Foto 7.8)



Fotografía No. 7.8 Taladro de banco.

### 7.3.2 PIEZAS DEL MOTOR

A continuación se muestra una serie de imágenes de las distintas partes del motor, así como su estructura final. (Fotos 7.9, 7.10, 7.11 y 7.12)



Fotografía No. 7.9 Rotor con imanes.



Fotografía No. 7.10 Tapa con balero.



Fotografía No. 7.11 Carcasa y motor de pila.



Fotografía No. 7.12 Motor armado.

### 7.3.3 ARMADO DEL MOTOR

IMÁGENES DEL MOTOR YA ARMADO Y TERMINADO. (Foto 7.13 y 7.14)



Fotografía No. 7.13 Motor armado con su acabado final.



Fotografía No. 7.14 Motor armado con su acabado final (vista frontal).

## 7.4 PRUEBAS

Las pruebas que hicimos a nuestro motor fueron:

- Imágenes del campo magnético, con limadura de hierro
- Toma de lecturas de la velocidad de nuestro motor.

### 7.4.1 PRUEBAS DEL COMPORTAMIENTO DEL CAMPO MAGNETICO

#### IMÁGENES DE LOS CAMPOS MAGNETICOS

Colocamos un imán de neodimio y ferrita, para observar el campo. (Foto 7.15 y 7.16)



Fotografía No. 7.15 Imán en posición horizontal.



Fotografía No. 7.16 Imán en posición paralelo.

También se le tomaron imágenes al motor en conjunto, esto es ya armado. (Foto 7.17)



Fotografía No. 7.17 Imágenes al motor en conjunto.

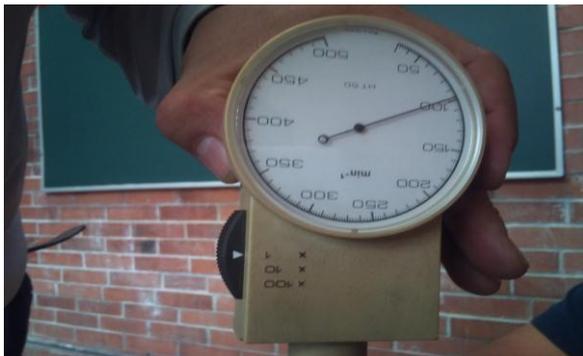
Se procedió a tomar las imágenes del motor cuando está en funcionamiento, es decir al estar en movimiento. A continuación se muestran lo observado. (Foto 7.18)



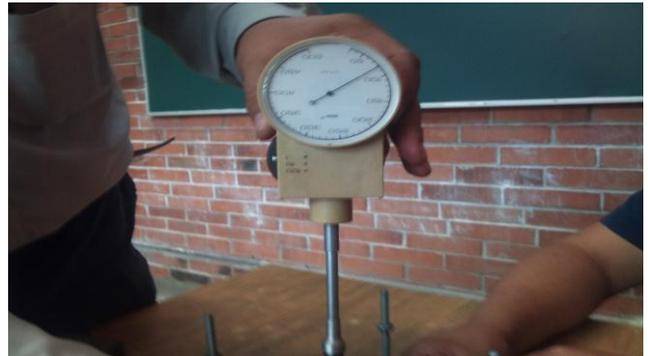
Fotografía No. 7.18 Imágenes del motor cuando está en funcionamiento.

#### 7.4.2 PRUEBAS DE VELOCIDAD

En las tomas de lecturas para velocidad, se utilizó un tacómetro analógico de caratula, se hicieron 5 lecturas las cuales se obtuvieron en el siguiente orden, **120 rpm, 100rpm, 145rpm, 150 rpm y 150 rpm**. A continuación se muestran las imágenes de este ejercicio. (Foto 7.19 y 7.20)



Fotografía No.7.19 lectura de velocidad.



Fotografía No.7.20 lectura de velocidad

## CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó el motor de acuerdo al comportamiento esperado por el campo magnético de cada uno de los imanes, tomando en cuenta la posición para generar un par de fuerza y generar el movimiento. Dicho movimiento se logró al mantener una variación de la intensidad del campo, esto se hizo mecánicamente, es decir, acercando y alejando el imán, ya que nuestro movimiento no era continuo ni uniforme, se optó por colocar un motor para generar el movimiento.

Se hizo la investigación para entender y comprender el magnetismo en su forma natural y artificial.

Se pudo observar los campos magnéticos de los imanes de neodimio por separado, así como en conjunto. Para poder visualizarlo se hizo la prueba con limadura de hierro.

Se hicieron los cálculos necesarios para entender y comprobar que los datos obtenidos en las pruebas se aproximaron a los nominales donde están los cálculos.

En base a los datos de tablas de neodimio se pudo calcular la fuerza y la distancia de la intensidad del campo magnético generada desde el centro del imán hacia su exterior.

Se logró construir un motor capaz de generar movimiento con un campo magnético, generado por imanes.

Los resultados obtenidos con el motor permiten hacer modificaciones, siempre y cuando se decida continuar con la investigación, ya que se tendrá que tomar como punto de partida, para hacer dichas aportaciones o modificaciones.

Por último mencionar que esta investigación no termina aquí si no que se deja para que alguien interesado en el tema continúe con esta y así lograr mejoras en el tema.

## BIBLIOGRAFÍA

Louis, W. (1887). *Magnetismo*. Mackeehan.

Alonso, S. (2009), *Electromagnetismo*. Universidad de Antioquia.

Hayden, W. (1968). *Propiedades Mecánicas*. Limusa-Wiley.

Alonso, M. (1921). *Física: mecánica*. Iberoamericana: Addison-Wesley.

Carl, T. (1981). *Teoría Electromagnética*. Limusa.

Roald, W. (1986). *Campos Electromagnéticos*. (20<sup>a</sup> ed.). México: Limusa

Reitz, J. R. Milford, F. J. Christy, R. W. (1996). *Fundamentos de la teoría electromagnética*. Iberoamericana: Addison-Wesley.

Marcelo, R. D. (1996). *Campos electromagnéticos*. Universidad de Sevilla: Manuales universitarios.

Francisco, G. Antonio, B. Raúl, M. Francisco, S. (2004). *Electricidad y Magnetismo*. Madrid: Pearson Educación.

Purcell, B. (1987). *Electricidad y Magnetismo*. Reverté