



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

**“DISEÑO DE UNA MÁQUINA ENBOBINADORA
PARA MOTORES ELÉCTRICOS”**

T E S I S

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

P R E S E N T A :

JOSÉ VINICIO ESCOBAR GARCÍA

ASESOR: DR. JAVIER JIMÉNEZ GARCÍA





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Agradecimientos

Agradezco y dedico el presente trabajo por el apoyo recibido:

A DIOS...

A la Universidad Nacional Autónoma de México y

A la Facultad de Estudios Superiores Aragón.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología.

Al Dr. Javier Jiménez García y

Profesores Síodos.

A mis padres: Luisa Amalia y José Eduardo.

A mis hermanos: Andrés, Hugo y Marco Antonio

A mis abuelos: Nicolasa, Pedro y Rubicelia

A la Lic. Esperanza, a mis amigos y a todas aquellas personas que aún sin estar escritos sus nombres en esta página fueron pilar para este logro.

Índice

	Página
Introducción	1
I. Motor eléctrico	3
I.1. Antecedentes históricos	3
I.2. Funcionamiento del motor eléctrico	6
I.2.1. Magnetismo y electromagnetismo	6
I.2.2. Principios magnéticos	7
I.3. Propiedades	11
I.4. Elementos constitutivos	12
I.5. Clasificación	14
I.5.1. Motor de corriente directa	14
I.5.1.1. Clasificación	17
I.5.1.2. Ventajas y desventajas	19
I.5.2. Motor de corriente alterna	19
I.5.2.1. Clasificación	24
I.5.2.1.1. Motor síncrono	24
I.5.2.1.1.1. Funcionamiento	28
I.5.2.1.1.2. Ventajas	33
I.5.2.1.2. Motor de inducción	34
I.5.2.1.2.1. Componentes	35
I.5.2.1.2.2. Funcionamiento	37
I.5.2.1.2.3. Clasificación	39
I.5.2.1.3. Motor universal	57
I.5.3. Esquema general de los motores eléctricos	60
II. Proceso de diseño	61
II.1. Factores del diseño	62
II.1.1. Consideraciones económicas	64
II.1.2. Selección de elementos comerciales	64
II.1.2.1. Manejo de tamaños estándares	65
II.1.2.2. Utilización de tolerancias	65
II.1.2.3. Puntos de equilibrio	66
II.1.2.4. Estimaciones de costo	66

II.2.	Ingeniería de diseño	67
II.3.	Diseño de la máquina embobinadora	76
II.3.1.	Identificación de la necesidad	77
II.3.2.	Investigación preliminar	77
II.3.3.	Definición del problema	78
II.3.4.	Especificaciones de funcionamiento	78
II.3.4.1.	Especificaciones iniciales	81
II.3.5.	Diseño de configuración	82
II.3.5.1.	Diseño del cabezal	83
II.3.6.	Conceptualización	87
II.3.6.1.	Evaluación de los sistemas	88
II.3.6.2.	Selección de materiales para usos mecánicos	89
II.3.7.	Diseño detallado	92
II.3.7.1.	Diseño del cabezal	92
II.3.7.1.1.	Análisis cinemático	93
II.3.7.1.2.	Análisis dinámico del sistema	101
II.3.7.2.	Diseño de la transmisión	109
II.3.7.3.	Diseño del sistema de control	112
II.3.7.4.	Diseño de la estructura	114
II.3.7.5.	Planos de detalle	115
II.3.8.	Prototipos y pruebas	122
	Conclusiones	128
	Bibliografía	130

Introducción

Con base en las encuestas de mercado que se realizaron en el Estado de México, la reparación de motores eléctricos no se efectúa a niveles de procesos industriales, dado que las compañías que se encargan de fabricarlos, no tienen centros de reparación, ya que para ellas la producción y venta en grandes volúmenes es más factible que ofrecer una reparación especializada.

Debido a ello, los consumidores se enfrentan a una gran problemática, sustituir o reparar los motores cuando éstos fallan, teniendo como atenuante que la sustitución produce un costo elevado, obligándolos a buscar medios alternos como es la reparación. Esto trajo consigo la aparición de talleres técnicos independientes que se dedican a la reparación de motores eléctricos.

Cabe mencionar que dichos talleres han creado procesos alternos que satisfacen necesidades específicas, ya sea utilizando moldes, creando puntos de sujeción y procesos rudimentarios; que en determinados casos cumplen con los requerimientos planteados por el mismo proceso, aunque con deficiencias tangibles, debido a que el devanado o embobinado es el elemento más crítico en la reparación, porque requiere de equipo especializado muy costoso, que en la actualidad es inaccesible para la mayoría de estas empresas.

Cabe destacar que en general el costo aproximado de una máquina para procesos de embobinado, la mayoría de ellas de control numérico (CNC), oscila entre \$90,000 y \$150,000 pesos moneda nacional; mismas que requieren de una capacitación especializada para sus operarios y un mantenimiento muy complejo, que esta condicionado por las propias empresas que las distribuyen.

Por las razones antes vertidas, es que se planteó el diseño de una máquina embobinadora para motores eléctricos, cuyo desempeño sea capaz de solventar los requerimientos mínimos del denominado proceso de embobinado, logrando

con ello que las empresas tengan a su alcance una máquina apropiada con la que puedan brindar un servicio de calidad a sus clientes.

Por ello el eje rector de este proyecto de investigación, es el de desarrollar el prototipo de una Máquina Embobinadora para Motores Eléctricos, con la finalidad primordial de resolver la problemática de productividad y calidad, que se presenta en las diferentes empresas del Estado de México, fundamentada en la Investigación de campo, el análisis y cálculo matemático de sus componentes, así como la adecuada selección de materiales para usos mecánicos; todo ello bajo una plataforma técnica y económica específica, que permita determinar su factibilidad.

I. Motor eléctrico

El motor eléctrico es considerado una máquina, que puede convertir la electricidad en movimiento rotatorio para generar un trabajo útil; así mismo, representa uno de los mayores avances logrados para controlar las fuerzas naturales y hacer que desarrollen algún trabajo para el hombre.

Éste, ha desempeñado un papel muy importante en el desarrollo de la humanidad, y desde sus inicios ha estado ligado de manera directa con el avance tecnológico al servicio de una mejor calidad de vida. Por ello, forma parte de la vida cotidiana, por lo que hoy en día es indispensable tanto en un aparato electrodoméstico como en el más avanzado vehículo eléctrico que contribuye con un transporte limpio y seguro.

En consecuencia, y dada la importancia que el mismo posee como parte fundamental del sistema mecánico que en el presente trabajo de tesis se propone, este capítulo tiene el objetivo de establecer las definiciones de diversos conceptos que giran en torno a la figura del motor eléctrico, su clasificación y características, estableciendo de este modo un panorama general de los motores mas importantes considerados para esta investigación.

I.1. Antecedentes históricos

El hombre a lo largo del tiempo ha buscado la forma de sustituir su propia fuerza, inicialmente con la de los animales y luego, con la potencia que obtuvo de las fuerzas naturales a su alcance, como el viento y el agua.

Con el desarrollo del raciocinio, inventiva y necesidad humana, en el inicio del siglo XIX Alessandro Volta (físico italiano) dio origen a la invención de la primera

pila o célula electrolítica, con esto se logro el control sobre una nueva forma de energía: la eléctrica; que dio el primer paso hacia la invención del motor eléctrico.

Más tarde, Hans Christian Oesterd (físico y químico danés) descubrió que la electricidad se puede utilizar para producir movimiento (efecto Oesterd), debido a que la corriente eléctrica cuando fluye a través de un conductor produce un campo magnético, esto fue demostrado por Oesterd al observar que la aguja de una brújula cambiaba de posición al aproximarla a un conductor por el cual circula un flujo de corriente eléctrica, este es el principio que da origen al electroimán.

Aprovechando este descubrimiento, Michael Faraday (científico británico) construyó en 1821 el primer motor eléctrico del mundo, la intención de Faraday fue hacer que el movimiento producido por el experimento de Oesterd fuera continuo, en lugar de un simple desplazamiento giratorio de posición. “El motor básico de Faraday dispone de un conductor que puede girar libremente alrededor del extremo de un imán recto. El extremo inferior del conductor se encuentra en un depósito de mercurio, lo cual hace posible que el conductor gire y, al mismo tiempo, mantenga un circuito cerrado”, figura 1, [1].

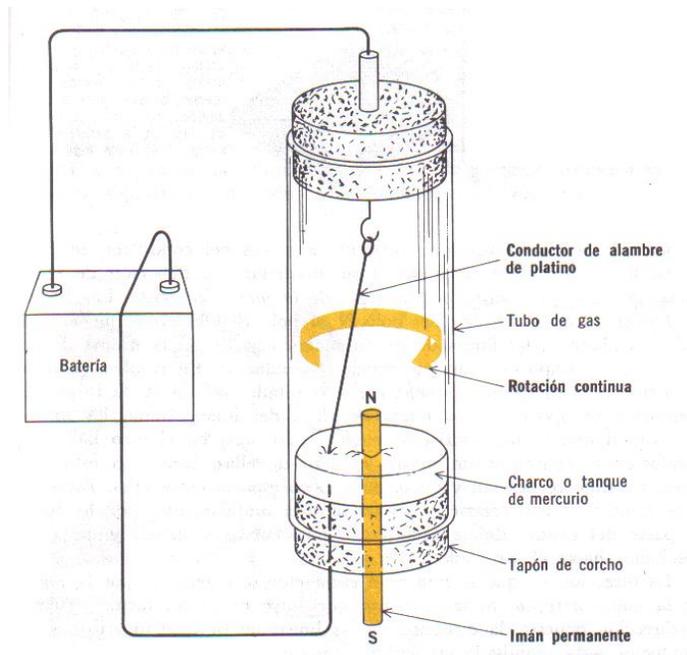


Figura 1. Motor eléctrico de Faraday.

El motor inventado por Faraday tenía un eje impulsor encerrado y sólo podía producir un movimiento orbital interno; no podía transferir energía mecánica al exterior, para impulsar una carga externa. “No obstante, aquel motor sirvió para mostrar cómo se podía hacer que los campos magnéticos de un conductor y un imán interactúan para producir movimiento continuo. En el motor de Faraday, el rotor de alambre giraba fuera del campo del imán. En un motor práctico, el rotor debe atravesar las líneas de fuerza del imán”, [1].

Los descubrimientos de Faraday sentaron las bases del motor eléctrico y por supuesto para la generación de electricidad a partir de la energía mecánica y posibilitaron de este modo el comienzo de los primeros pasos que posteriormente iban a cristalizar en el potente desarrollo industrial de la energía eléctrica, [2].

Con la formulación de Faraday podemos considerar cerrado este largo periodo de 24 siglos, desde los conocimientos atribuidos a los chinos sobre el manejo de imanes y el principio del motor; que su evolución posterior de una manera resumida podemos visualizarla de la siguiente manera:

- 1831-1850 Construcción de los primeros motores a partir del principio de atracción y repulsión entre electroimanes (Henry, Dal Negro, Ritchie, Jacobi...).
- 1850 Establecimiento del principio de reversibilidad (Jacob). La construcción de motores síncronos o de continua queda reducida a la construcción de un generador.
- 1885 Primer modelo de motor bifásico (G. Ferraris)
- 1886 Campos magnéticos giratorios creados mediante sistemas polifásicos para la construcción de motores sin colector ni escobillas (N. Tesla).
- 1889 Primer motor trifásico de inducción utilizable (Dolivo-Dobrowolsky).
- 1893 Motor de doble jaula (Dolivo-Dobrowolsky y Boucherot).

I.2. Funcionamiento del motor eléctrico

El funcionamiento de un motor eléctrico, en general, emplea las propiedades electromagnéticas de la corriente eléctrica y la posibilidad de crear a partir de ellas, determinadas fuerzas de atracción y repulsión encargadas de actuar sobre un eje y generar un movimiento de rotación, teniendo como principio fundamental de su funcionamiento el magnetismo.

I.2.1. Magnetismo y electromagnetismo

El magnetismo es una fuerza de la naturaleza que atrae y repele, a diferencia de la gravedad, la cual sólo atrae y afecta a todos los objetos, el magnetismo sólo puede dotar de propiedades magnéticas a algunos materiales, principalmente metales como el hierro y el níquel. Cuando un objeto se magnetiza y ejerce su fuerza magnética, se denomina imán. Un imán tiene un polo magnético en cada extremo, denominados polo norte y polo sur, respectivamente. Los polos iguales se repelen, y los polos contrarios se atraen. Es decir, un polo norte atrae al polo sur de otro imán, pero repele un polo norte, y un polo sur atrae al norte pero repele al sur.

La tierra es en realidad un imán gigante, razón por la cual tiene un polo magnético norte y otro sur, por ello el polo sur de un pequeño imán (por ejemplo, la punta de la aguja de una brújula magnética) apuntará siempre al norte. Así la fuerza magnética alrededor de un imán forma un campo magnético. Dicho campo está formado por líneas de fuerza que van desde el polo norte al polo sur. Cuando se juntan los polos opuestos, sus líneas de fuerza se atraen, pero cuando se juntan los polos iguales, sus líneas hacen fuerzas contrarias.

Por mucho tiempo los científicos se preguntaron si existía alguna relación entre las fuerzas de atracción o repulsión de la electricidad y del magnetismo, Oesterd

descubrió que un alambre con flujo de corriente eléctrica producía un campo magnético. De hecho, al envolver un alambre alrededor de un objeto de hierro y al aplicarle corriente se produce un efecto magnético; a esto se le denomina electroimán. Faraday descubrió posteriormente que un alambre que se movía por un campo magnético desarrollaba una corriente, a esto se denominó inducción.

En ocasiones en un motor se sustituye el imán permanente creador del campo por un electroimán, para ello se emplea de forma apropiada un cierto número de espiras devanadas sobre un núcleo magnético, el cual produce el mismo efecto cuando se le aplica la corriente excitadora.

I.2.2. Principios magnéticos

Cuando se hace pasar una corriente a través del conductor, se producen líneas de fuerza circundantes a su alrededor. La dirección de estas líneas de flujo está descrita por la regla de la mano izquierda; La cual muestra que cuando el pulgar señala en dirección de la corriente eléctrica, los otros dedos señalarán la dirección de las líneas de fuerza magnéticas, figura 2.

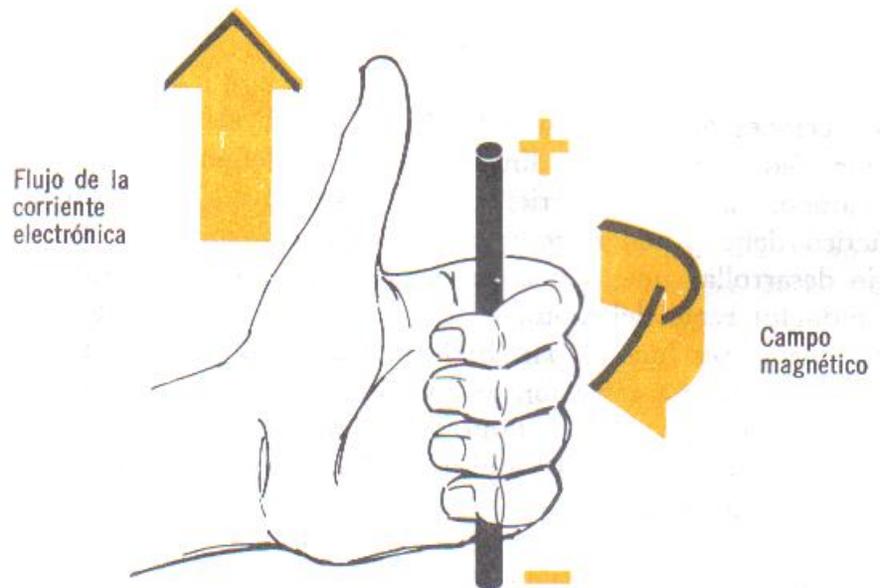


Figura 2. Regla de la mano Izquierda.

Por otro lado, la regla de la mano derecha para motores indica la dirección en que un conductor con corriente se moverá en un campo magnético. Cuando el índice señala en dirección de las líneas de campo magnético y el dedo medio se alinea en la misma dirección que la corriente del conductor, el pulgar señalará la dirección hacia donde se moverá el conductor, figura 3, [1].

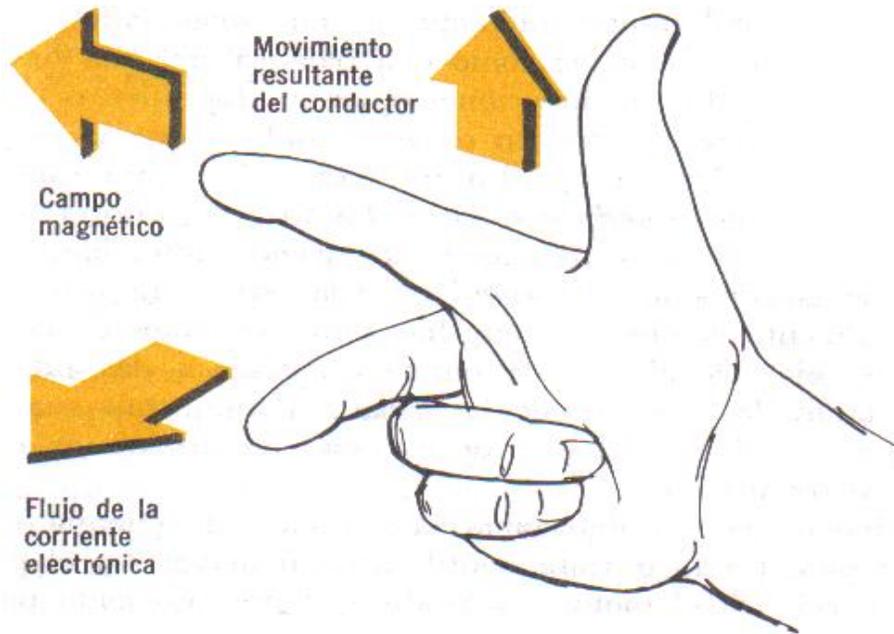


Figura 3. Regla de la mano derecha.

La regla de la mano derecha permite recordar la relación que existe entre la dirección, el sentido del campo magnético y la intensidad de la corriente eléctrica. En el caso del campo magnético creado por la corriente eléctrica que circula por un hilo conductor rectilíneo y largo, si el pulgar de la mano derecha se coloca a lo largo del hilo en la dirección y sentido de la corriente, los dedos de dicha mano se curvan en la dirección y sentido del campo magnético. Análogamente, en el caso del campo magnético originado por la corriente que circula por una espira circular, si los dedos de la mano derecha se curvan en el sentido de la intensidad de la corriente eléctrica, el dedo pulgar indicará la dirección y sentido del campo magnético, [12].

Tomando en cuenta estas ilustraciones sobre el campo magnético, en un motor práctico, a diferencia del motor de Faraday, debe producirse un movimiento rotatorio continuo.

Para esto es esencial desarrollar una fuerza de torsión denominada *par* (fuerza de torsión que se ejerce sobre la espira y que la hace girar sobre su eje). Dicha fuerza puede obtenerse, al moldear un conductor recto en forma de espira alimentándolo con corriente y suspendiéndolo sobre un eje, de esta forma la corriente fluirá en una dirección en un lado de la espira y en dirección opuesta en el otro lado, esto provocará que las líneas del campo magnético interactúen en ambos lados de la espira haciendo que ésta funcione como una palanca con una fuerza que empuja tanto en un lado como en el otro en direcciones opuestas como se muestra en la figura 4.

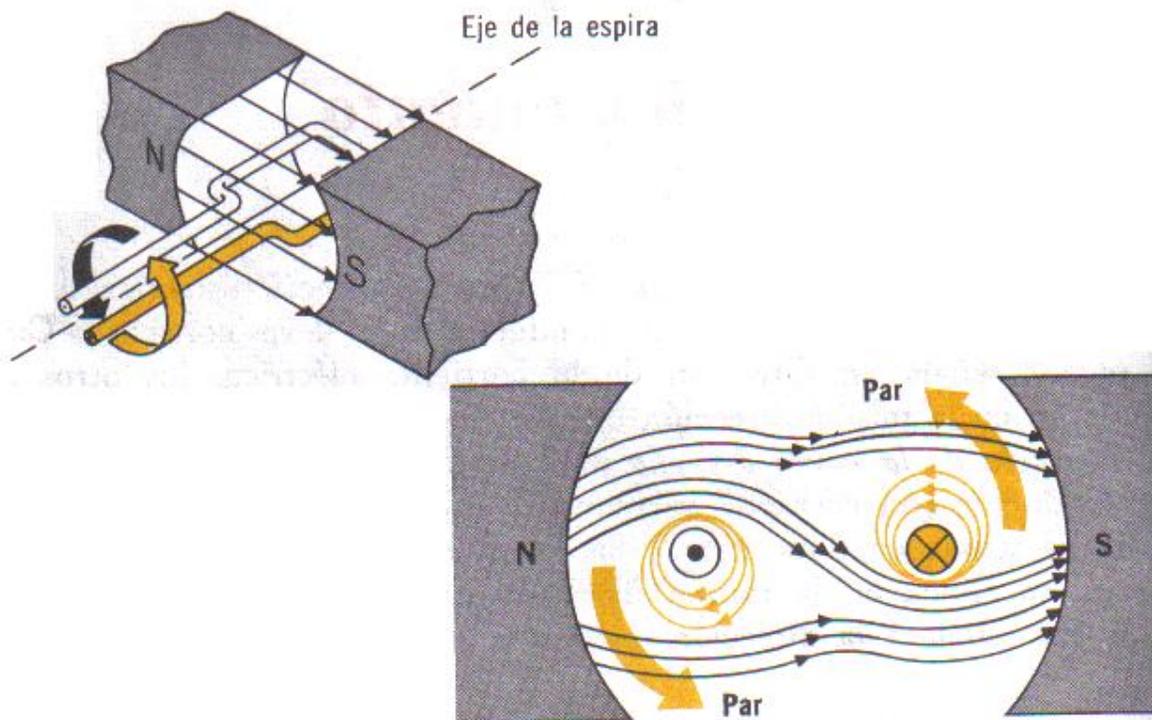


Figura 4. Par generado por una espira.

Cuando se introduce una espira de hilo de cobre en un campo magnético y se conecta a una batería, la corriente pasa en un sentido por uno de sus lados y en sentido contrario por el lado opuesto. Así, sobre los dos lados de la espira se ejerce una fuerza, en uno de ellos hacia arriba y en el otro hacia abajo. Si la espira de hilo va montada sobre el eje metálico, empieza a dar vueltas hasta alcanzar la posición vertical. Entonces, en esta posición, cada uno de los hilos se encuentra situado en el centro de los dos polos, y la espira queda retenida.

Para que la espira siga girando después de alcanzar la posición vertical, es necesario invertir el sentido de circulación de la corriente. Para conseguirlo, se emplea un conmutador o colector, que en el motor eléctrico más simple, el motor de corriente continua, está formado por dos chapas de metal con forma de media luna, que se sitúan sin tocarse, como las dos mitades de un anillo, y que se denominan delgas. Los dos extremos de la espira se conectan a las dos medias lunas. Dos conexiones fijas, unidas al bastidor del motor y llamadas escobillas, estas hacen contacto con cada una de las delgas del colector, de forma que, al girar la armadura, las escobillas contactan primero con una delga y después con la otra.

Cuando la corriente eléctrica pasa por el circuito, la espira empieza a girar y la rotación dura hasta que la espira alcanza la posición vertical. Al girar las delgas del colector con la espira, cada media vuelta se invierte el sentido de circulación de la corriente eléctrica. Esto quiere decir que la parte de la espira que hasta ese momento recibía la fuerza hacia arriba, ahora la recibe hacia abajo, y la otra parte al contrario. De esta manera la espira realiza otra media vuelta y el proceso se repite mientras gira la armadura.

Este esquema corresponde a un motor de corriente continua, el más simple dentro de los motores eléctricos, pero que reúne los principios fundamentales del motor eléctrico.

En un motor práctico, la espira que se mueve en el campo se llama armadura o rotor y el par depende de factores como la intensidad del campo magnético, la intensidad de la corriente en la armadura y la estructura física de la armadura, especialmente la distancia paralela que existe entre el eje y a los lados de la espira; es por esto que para obtener grandes fuerzas de torsión las armaduras o rotores tendrán que crecer en magnitud, así el par determina la cantidad de energía que puede aprovecharse para producir un trabajo útil, [2].

I.3. Propiedades

Normalmente los motores se caracterizan por dos parámetros que expresan directamente sus propiedades como:

- Velocidad de rotación
- Par motor

La primera en mención, indica el número de vueltas por unidad de tiempo que produce el motor y depende por completo de la forma de construcción del mismo, de la tensión de alimentación, así como de la carga mecánica que se acople a su eje, aunque esto último no es aplicable a un tipo especial de motores denominados *síncronos* o *sinclónicos*. Las unidades empleadas son las revoluciones por minuto (r.p.m.) y las revoluciones por segundo (r.p.s.).

El par motor expresa la fuerza de actuación de éste y depende lógicamente de la potencia que sea capaz de desarrollar dicho motor, así como de la velocidad de rotación del mismo. El concepto de par motor es importante a la hora de elegir un modelo para una aplicación determinada; se define como la fuerza que es capaz de vencer el motor multiplicada por el radio de giro.

Esto significa que no es lo mismo desplazar una polea que transmita una fuerza de 10 N., si se tiene un radio de 5 cm. y éste se modifica por uno de 10 cm., ya que el par motor será en el segundo caso el doble que el del primero. Las unidades de medida suelen ser el $N-m$. Además de estos factores también se tienen en cuenta otros como son las condiciones de arranque, la potencia absorbida y el factor de potencia.

Los parámetros mencionados se expresan en la siguiente la relación matemática, ecuación 1.

$$P = \frac{M}{n} \quad \dots(1)$$

Donde:

P = Potencia absorbida en Watts

M = Par motor expresado en $N-m$,

n = Velocidad en revoluciones por minuto (rpm).

I.4. Elementos constitutivos

Todos los motores eléctricos poseen ciertos elementos específicos que lo caracterizan, pero tienen varios elementos constitutivos en común. Entre estos están, las partes estructurales tales como: la carcasa, las tapas laterales, los porta cojinetes, los cojinetes, el eje, las cuñas, las guías de aire, los ventiladores externos e internos, las bridas, los pies de fijación, etc., figura 5.

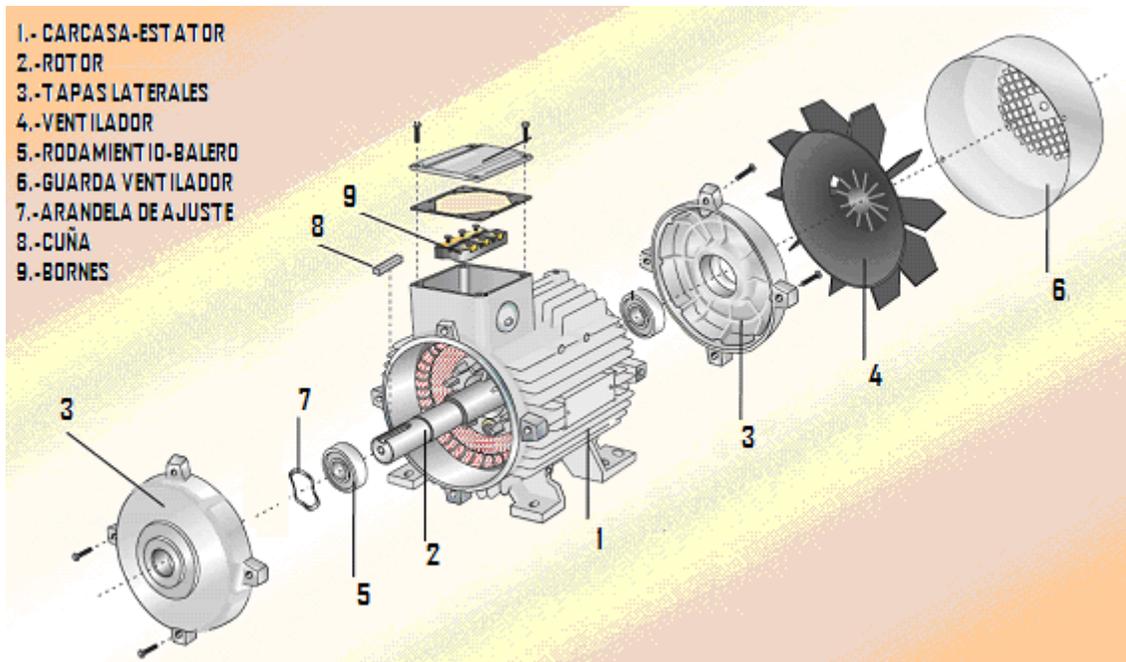


Figura 5. Despiece motor eléctrico.

Los materiales empleados para la carcasa, los porta cojinetes, las guías de aire y los ventiladores podrán ser de hierro fundido o chapa de acero; los ejes suelen ser de acero forjado.

Aunque se puede considerar al estator, el rotor y a las bobinas de alambre magnético como elementos sustancialmente semejantes en los diversos tipos de motores, existen diferencias significativas en el número, el arreglo y la constitución de las propias bobinas de alambre magnético y en los núcleos ferromagnéticos que producen características de funcionamientos diferentes, así como de componentes y dispositivos adicionales. Aunque los estatores y los rotores de todas las máquinas suelen estar compuestos por chapas de acero finas, aisladas y superpuestas, abrazadas por las bobinas de alambre magnético, cada uno de estos elementos denotan el tipo de motor, mismas que se detallan en su clasificación, [3].

I.5. Clasificación

Según la naturaleza de la corriente eléctrica transformada o tensión de alimentación, los motores eléctricos se clasifican en motores de corriente continua, también denominada directa, motores de corriente alterna, que, a su vez, se agrupan, según su sistema de funcionamiento, en motores de inducción, motores síncronos y motores de colector. Tanto unos como otros disponen de todos los elementos comunes a las máquinas rotativas electromagnéticas, [13].

I.5.1. Motor de corriente directa

La estructura física de este motor consta de dos partes: el estator o parte estacionaria y el rotor o parte rodante de la máquina. La parte estacionaria consta de una estructura que proporciona el soporte físico a las piezas polares (imanes o electroimanes), las cuales se proyectan hacia adentro y proveen el camino para el flujo magnético. Los extremos de las piezas polares cercanos al rotor se extienden hacia fuera, sobre la superficie del rotor, para distribuir el flujo uniforme sobre la superficie del mismo. Estos extremos son llamados zapatas polares (escobillas).

En una máquina de este tipo hay dos devanados principales: los devanados del inducido (armadura) y los devanados del campo. Los devanados del inducido están definidos como aquellos en los cuales es inducido un voltaje, y los devanados de campo están definidos como aquellos que producen el campo magnético principal en la máquina, [4].

En un motor de corriente directa, el estator, donde se sitúan los polos principales de excitación está constituido de chapas finas de acero, aisladas unas de otras; el rotor o inducido, en cuyas ranuras se alojan las bobinas de alambre magnético, que están hechas de chapas de acero al silicio, aisladas y empaquetadas, cada elemento del alambre magnético está conectado a una determinada delga del

colector montado en el eje. El colector está formado por un cierto número de láminas (delgas) de cobre, ajustadas en forma de cilindro y aisladas unas de las otras por aislantes de mica. Sobre el colector se deslizan las escobillas que están alojadas en el porta escobillas, el cuales a su vez está sujeto a la carcasa, figura 6.

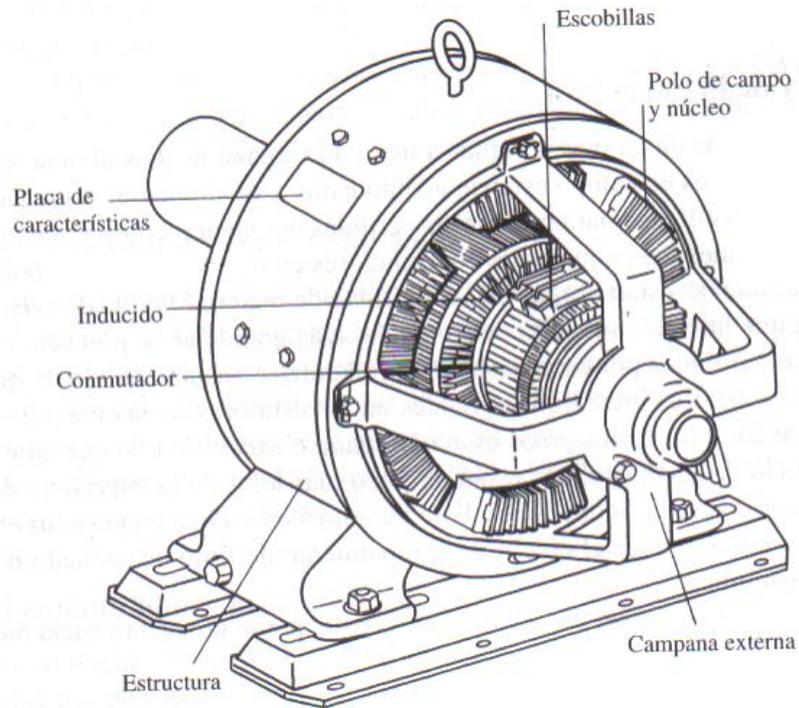


Figura 6. Motor de corriente directa.

Es importante mencionar que las bobinas de alambre magnético están impregnadas con resinas sintéticas y generalmente en éstas se envuelven fajas de hilos de fibra de vidrio que hacen el conjunto del rotor más rígido.

Por otro lado, las escobillas pueden ser de grafito, carbón, electrografito o metalgrafito, que tienen específicamente una alta conductividad para reducir pérdidas eléctricas y un bajo coeficiente de rozamiento para reducir el desgaste excesivo. Debido a que este elemento se comprime sobre el colector con muelles,

resulta complicado elegir el grado de dureza, debido a que si son demasiado blandas se deberán reemplazar con frecuencia, por otro lado, al ser muy duras la superficie del colector se desgastará en exceso disminuyendo la vida útil de la máquina.

Asimismo si la presión de las escobillas es muy grande, tanto éstas como las barras del colector se desgastarán demasiado, sin embargo, si la presión en ellas es muy pequeña, las escobillas tienden a apoyarse ligeramente sobre el colector y ocurre una gran cantidad de chisporroteo, situación que causa un gran daño a estos elementos; por ello, se tiene que ser muy detallista para lograr el ajuste idóneo y así prolongar al máximo la vida útil de estos componentes.

Los motores de corriente directa se distinguen de los de corriente alterna por el número de accesorios que suelen utilizar. Una variante de este motor, es aquella en la que el campo está creado por imanes permanentes que garantizan sus propiedades magnéticas, y no por bobinas de alambre magnético, figura 7, [3].

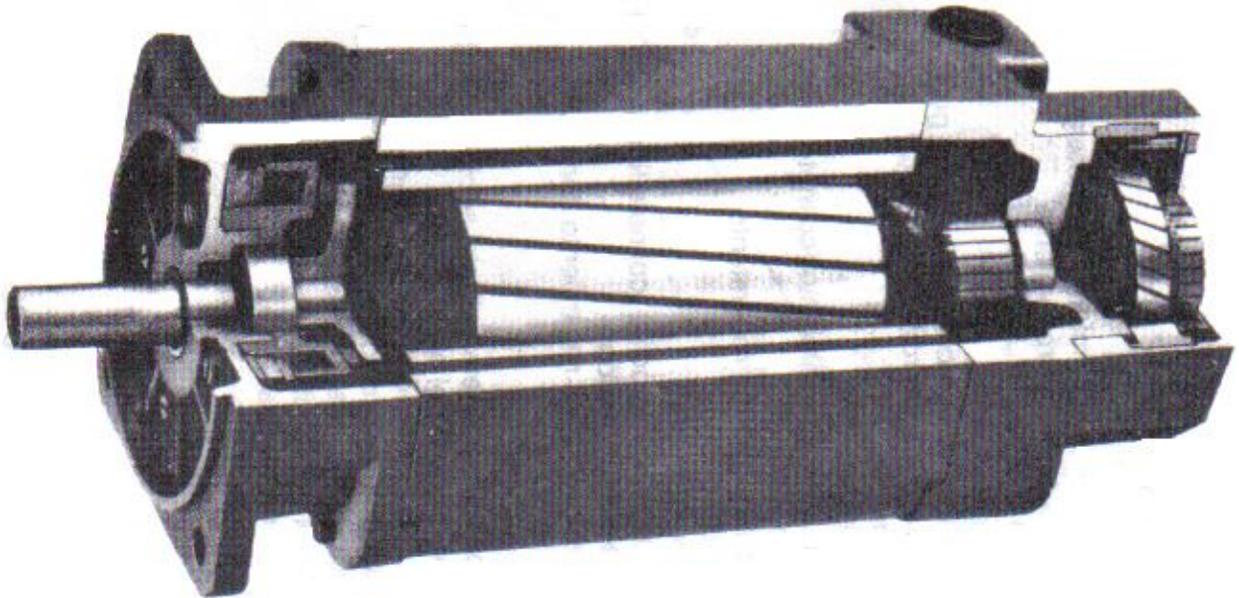


Figura 7. Motor de c.d. de imanes permanentes.

I.5.1.1. Clasificación

Los motores de corriente directa han sido clasificados según la forma en que sus devanados de campo están conectados a la fuente de energía eléctrica que los impulsa. Los nombres descriptivos: serie, derivación y compound (excitación compuesta) identifican los tres tipos principales de motores de corriente continua, figura 8.

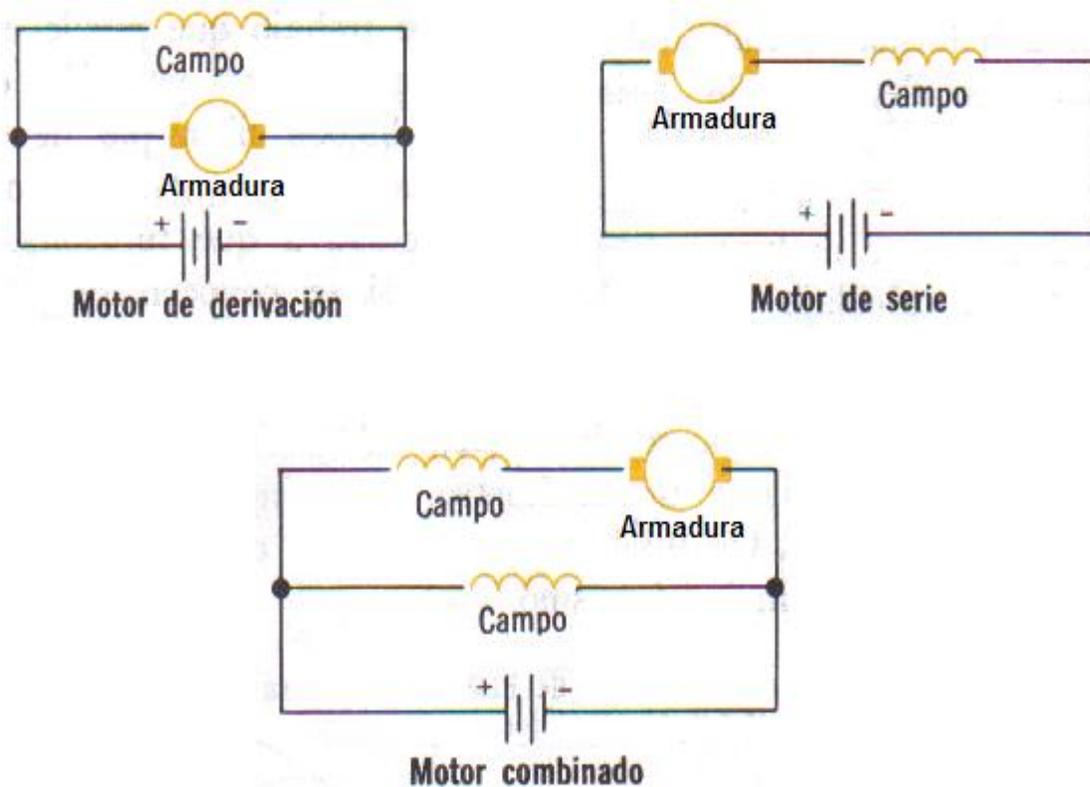


Figura 8. Conexión motores de c.d..

En el caso de motor en serie, las bobinas del campo están conectadas en serie con las bobinas del inducido (armadura). Así, sólo habrá un flujo en el entrehierro de la máquina cuando la corriente del inducido sea diferente de cero.

Por esta razón, un motor en serie tiene un par bastante elevado con velocidad angular baja y una velocidad sumamente elevada cuando el motor está en vacío (no tiene carga).

En el motor en derivación, el devanado de campo y el de armadura se conectan en paralelo al circuito de entrada.

En el motor tipo combinado, como su nombre lo indica, las conexiones en serie y derivado del devanado de campo y la armadura, se combinan en una sola máquina.

Otra forma en que se pueden clasificar los motores de corriente continua es con base en su fisiología mecánica, existiendo dos tipos: por el tipo de cubierta que tienen y la llamada característica carga-velocidad, las cuales se indican a continuación.

- a) Basados en el tipo de cubierta se encuentran los siguientes tipos: abierto, semicerrado, a prueba de goteo, a prueba de agua, sumergible y a prueba de explosión;
- b) Respecto a las características de carga-velocidad, pueden ser: de velocidad constante, velocidades múltiples, velocidad ajustable, velocidad variable y de velocidad variable ajustable, [1].

I.5.1.2. Ventajas y desventajas

La flexibilidad que se puede obtener de los motores de corriente continua, con sus varios tipos de excitación, asociada a la relativa simplicidad de los modernos convertidores de corriente continua, acaba por determinar una ventaja decisiva de estos motores sobre los de corriente alterna, siempre que altos pares o amplia variación de velocidad sean deseables.

No obstante para una misma potencia, los motores de corriente continua son de mayor tamaño y con un costo más elevado que los motores de inducción de c.a.. Asimismo por la presencia del colector existe una mayor necesidad de mantenimiento. Además, la conmutación de corriente por un elemento mecánico implica arcos y chispas, un impedimento decisivo si el motor debe ser aplicado en ambientes peligrosos.

Para una buena conmutación, la tensión entre las delgas del colector no debe exceder los 20 V, lo que significa que las máquinas de corriente continua no pueden ser alimentadas con tensiones superiores a los 900V, mientras que los de corriente alterna pueden tener millares de voltios en sus terminales, [3].

I.5.2. Motor de corriente alterna

El motor de corriente alterna, como su nombre lo indica utiliza corriente alterna para su funcionamiento. En general tienen una estructura similar con los motores de corriente directa, con pequeñas variaciones en la fabricación de las bobinas y del conmutador del rotor.

En este motor el devanado del estator es alimentado de corriente alterna, así el campo generado entre los polos alterna con la potencia alterna aplicada; y al hacerlo, el campo se establece desde cero hasta un máximo en una dirección, se

reduce, pasa nuevamente por cero y luego repite el ciclo en dirección opuesta; por otro lado el rotor se comporta como si fuera un imán permanente.

En la figura 9 se ilustra el movimiento del rotor en función del tiempo y la corriente aplicada. Al aplicar una corriente alterna al estator electromagnético, en el instante T_0 no se origina campo entre los polos del estator, ya que la corriente es nula, figura 9-A. Sin embargo, en el tiempo transcurrido entre T_0 y T_1 , se origina un campo que aumenta según la corriente aplicada, el estator se pone en marcha y así se da origen a los polos magnéticos; como los polos del mismo signo se repelen, el rotor es repelido primero por el campo magnético; luego, como los polos opuestos se atraen, el rotor continúa girando hasta que sus polos norte y sur quedan frente a los polos opuestos del estator.

Si la polaridad de la corriente del estator no cambiara, el rotor quedaría sujeto en la posición indicada en la figura 9-B. Sin embargo, como se usa corriente alterna la corriente del campo comienza a reducirse después del instante T_1 y el rotor continúa girando por inercia. En el instante T_2 , cuando la corriente aplicada vuelve al valor cero, el campo magnético del estator también se nulifica; como se ilustra en la figura 9-C, el rotor es impulsado por su propia inercia. Sin embargo, entre T_2 y T_3 , la alternancia de la potencia se establece en la dirección opuesta; la polaridad de los polos se invierte y el rotor es repelido nuevamente.

El rotor gira en el mismo sentido de las manecillas del reloj hasta que llega a la posición de la figura 9-D. donde nuevamente se mantendría estacionario por la fuerza de atracción del estator si la corriente no disminuyera e hiciera posible que la inercia lo impulsara más allá de la posición de la figura 9-E; nuevamente en esta posición, la potencia suministrada al campo actúa otra vez para invertir el campo y el ciclo se repite para mantener girando el rotor, [1].

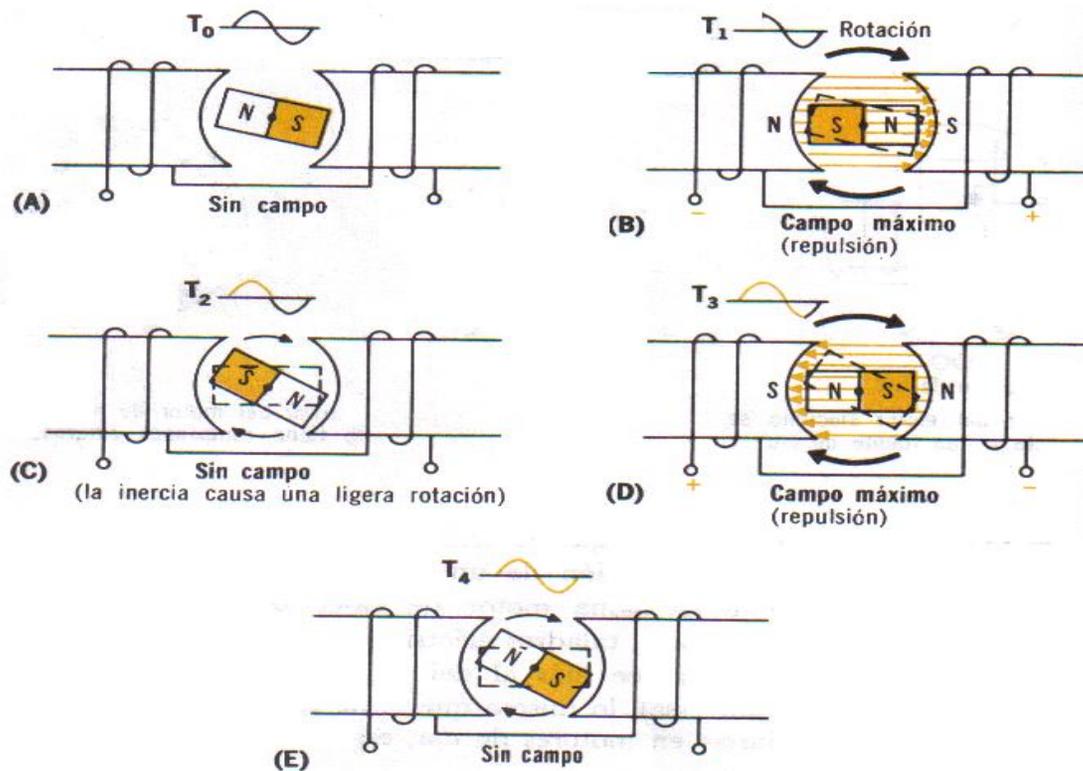


Figura 9. Movimiento producido por la c.a..

Un motor simple de corriente alterna tiene la desventaja de que en algún instante por si mismo no podría ponerse en marcha, puesto que si el rotor estuviese exactamente en una posición paralela a la del campo, su rotación no sería posible debido a que la repulsión magnética es igual en ambas direcciones de rotación; y si lo hiciera tal vez no sería en la dirección correcta. Ambos fenómenos dependen de la posición que tome el rotor cuando se empieza aplicar la potencia. Para ponerlo en marcha es necesario impulsarlo con la mano en la dirección en que se desea que funcione hasta que adquiera suficiente rapidez para seguir al campo alterno.

Para superar esta desventaja es necesario hacer que el campo magnético del estator gire en vez de simplemente alternar, de esta manera, los polos giratorios atraerían a los polos opuestos del rotor; el rotor quedaría sujeto en una posición por la atracción magnética y giraría con el campo, figura 10.

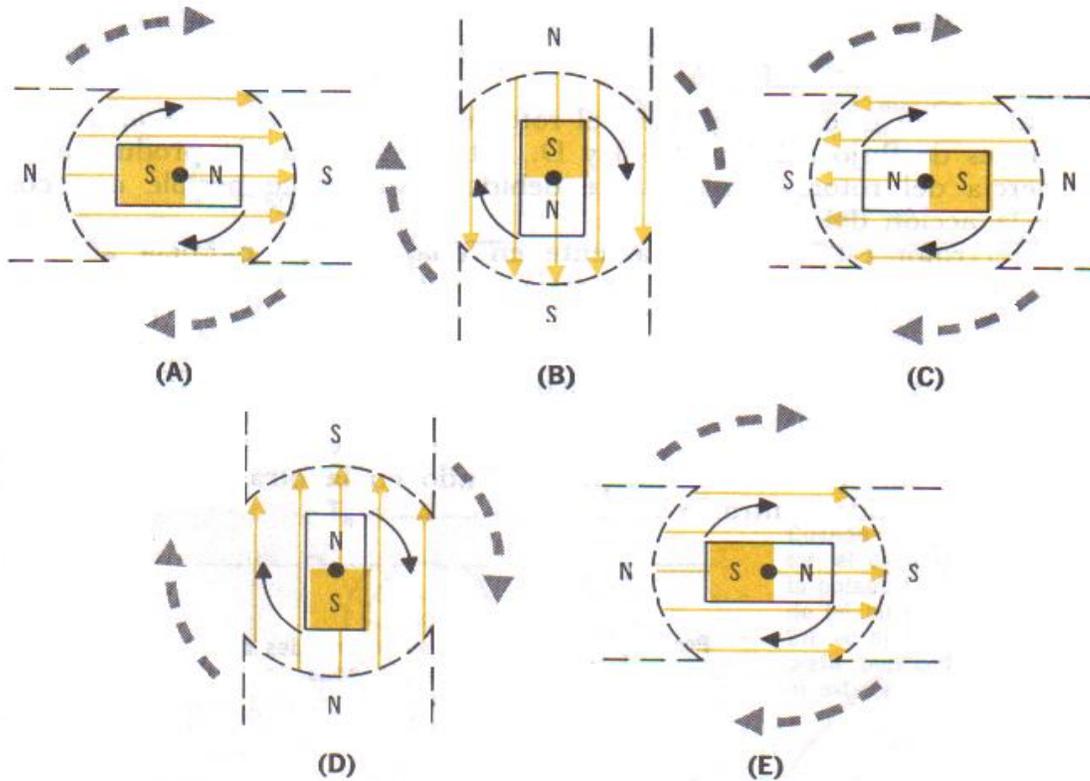


Figura 10. Giro de campo magnético.

En los motores prácticos de corriente alterna se aplican diversos métodos para hacer que el campo del estator gire eléctricamente. En un motor polifásico, el efecto rotatorio es producido por el defasamiento natural de los voltajes utilizados; a diferencia de éstos, en un motor monofásico el efecto se produce dividiendo una fase.

Debido a que la potencia comercial es monofásica, ha sido necesario idear un medio para obtener dos fases provenientes de la potencia monofásica original que produzcan el campo magnético rotatorio necesario para poner en marcha un motor de corriente alterna.

El proceso de obtener dos fases de una se conoce como división de fase, un medio para esta división es un devanado auxiliar especialmente montado en el

estator llamado devanado o embobinado de arranque, figura 11. En la mayor parte de los motores de corriente alterna de fase dividida, este devanado sólo es utilizado para ponerlo en marcha.

Más adelante se explicará el funcionamiento del motor fase dividida o partida cuando se muestre la clasificación de los motores de corriente alterna.

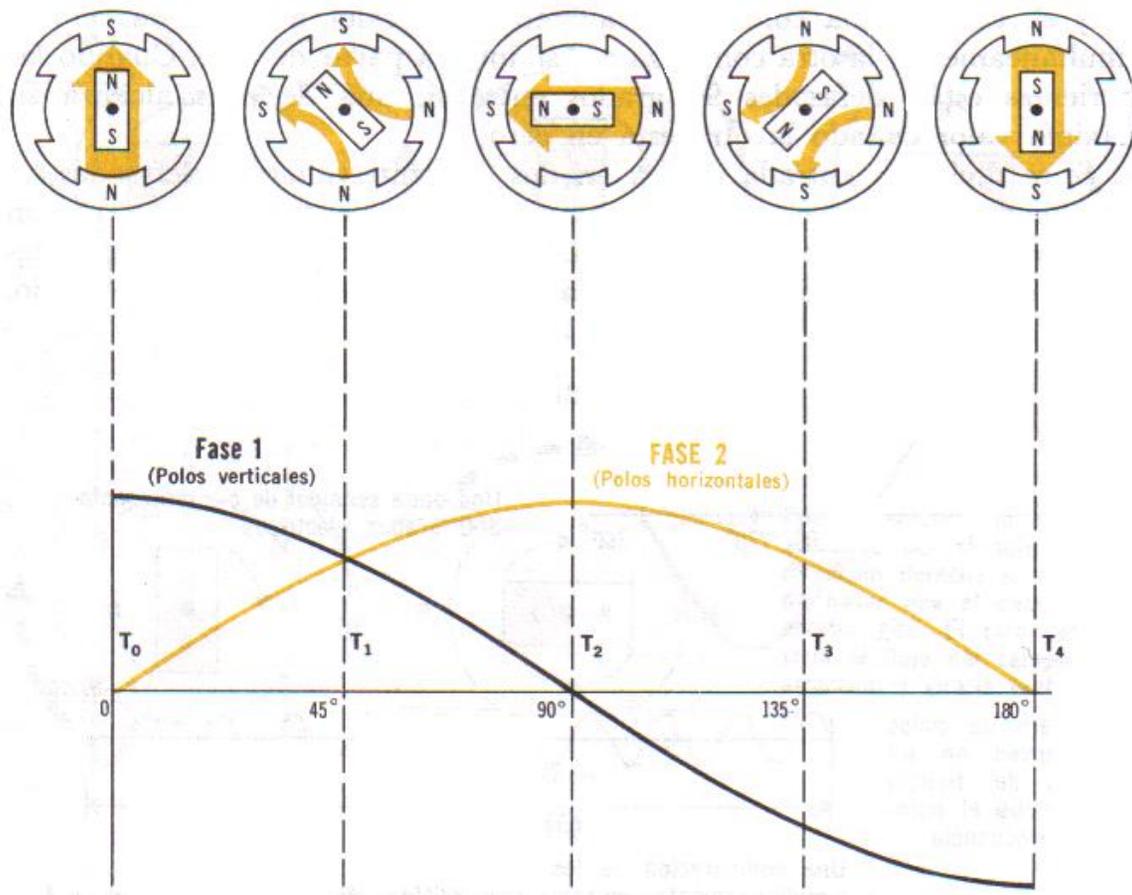


Figura 11. División de fase motor monofásico.

I.5.2.1. Clasificación

Con base en su sistema de funcionamiento, los motores de corriente alterna se clasifican en motores síncronos, de inducción y universales, los cuales se describirán a continuación.

I.5.2.1.1. Motor síncrono

Como su nombre lo indica, un motor síncrono funciona en condiciones de estado estable a una velocidad fija llamada velocidad síncrona; ésta depende de la frecuencia del voltaje aplicado y el número de polos en el motor.

Es importante mencionar que la velocidad de un motor síncrono es independiente de la carga, mientras ésta no exceda la potencia del mismo. Asimismo, si el par de carga excede el par máximo que puede desarrollar el motor, éste sencillamente se detiene y el par promedio desarrollado es igual a cero. Por ello, un motor síncrono no tiene la característica inherente de auto arranque, por lo que debe ser impulsado casi a su velocidad síncrona con algún medio auxiliar antes de que pueda sincronizarse a la red de suministro.

Debido a su característica de par constante, un motor síncrono pequeño se utiliza como dispositivo controlador de tiempo (relojes eléctricos), [5].

Los motores síncronos tienen una construcción semejante a la de los generadores de corriente alterna o alternadores, e incluso sustancialmente iguales a la de los motores de inducción, funcionan a una velocidad síncrona fija proporcional a la frecuencia de la corriente alterna aplicada. En este motor se produce un campo magnético rotatorio, el cual es creado por las propiedades de la corriente alterna (ciclo senoidal), éste se usa de manera que reaccione con un campo especialmente originado en el rotor, de esta manera el rotor se fija

sincrónicamente con el campo rotatorio del estator y es arrastrado a la velocidad síncrona.

El devanado de campo de un motor síncrono requiere de una fuente de c.d. para crear el campo magnético controlado mediante la magnitud de la fuente, también este campo magnético puede provenir de un imán permanente con el problema de que no se tiene un control independiente del campo, y una tercera opción para la fuente de c.d. de este motor es aprovechar el voltaje inducido en el devanado del rotor y rectificarlo para luego aplicarlo a los devanados de campo.

Como todos los motores en general, el motor síncrono está constituido de dos componentes esenciales el estator y el rotor, los cuales se describen a continuación.

1. Estator, figura 12. Este devanado (también conocido como devanado de armadura) es similar al devanado de un motor de inducción y se conecta a una fuente trifásica, ya sea como motor o como generador.

Cabe mencionar que la velocidad del campo magnético de la armadura se calcula de la misma manera que en uno de inducción, utilizando la siguiente ecuación:

$$n_{\text{sin}} = \frac{120f}{\rho} \quad \dots(2)$$

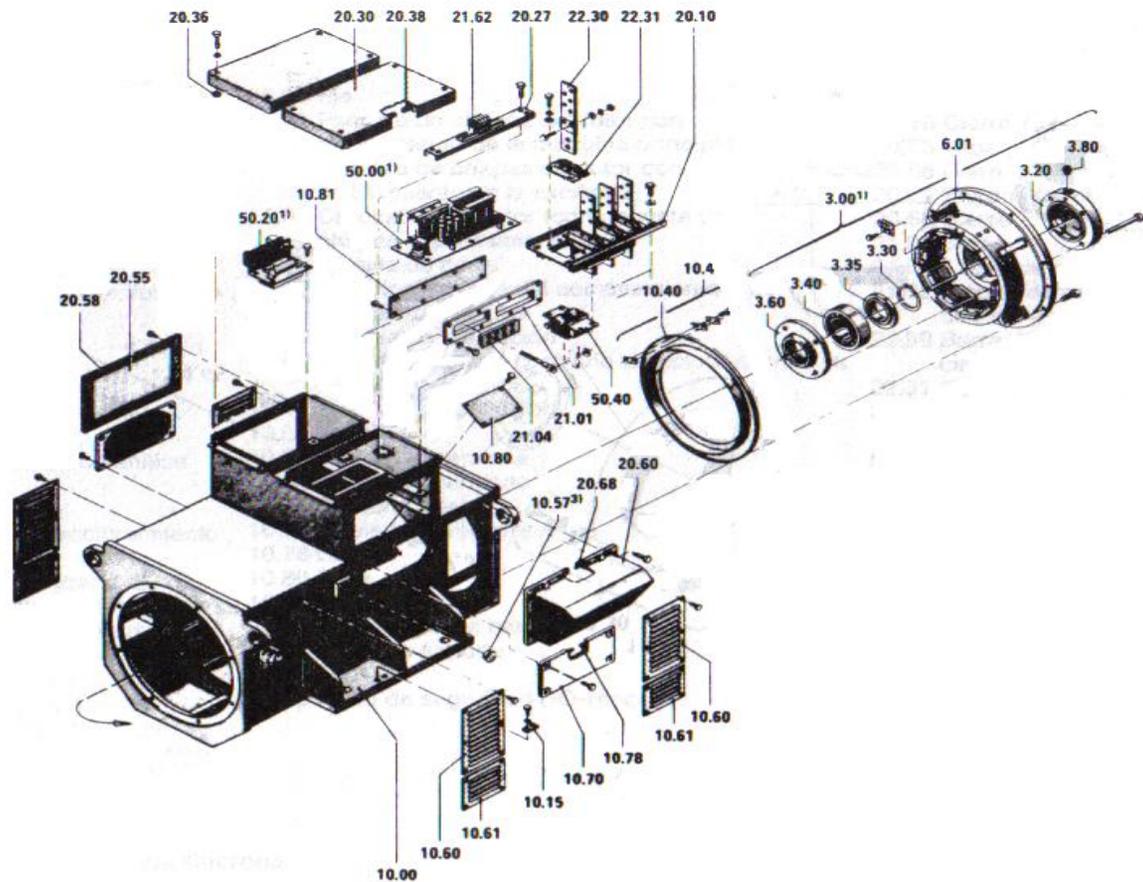
Donde:

n_{sin} = Velocidad síncrona en revoluciones por minuto (rpm),

f = Frecuencia de la red en Hz y

P = Número de polos.

La amplitud del campo magnético del estator es constante y similar a la del motor de inducción, pero la forma de la onda será similar si la reluctancia (resistencia o oposición que brinda un material al flujo de campo magnético) en la periferia del entrehierro es constante, [6].



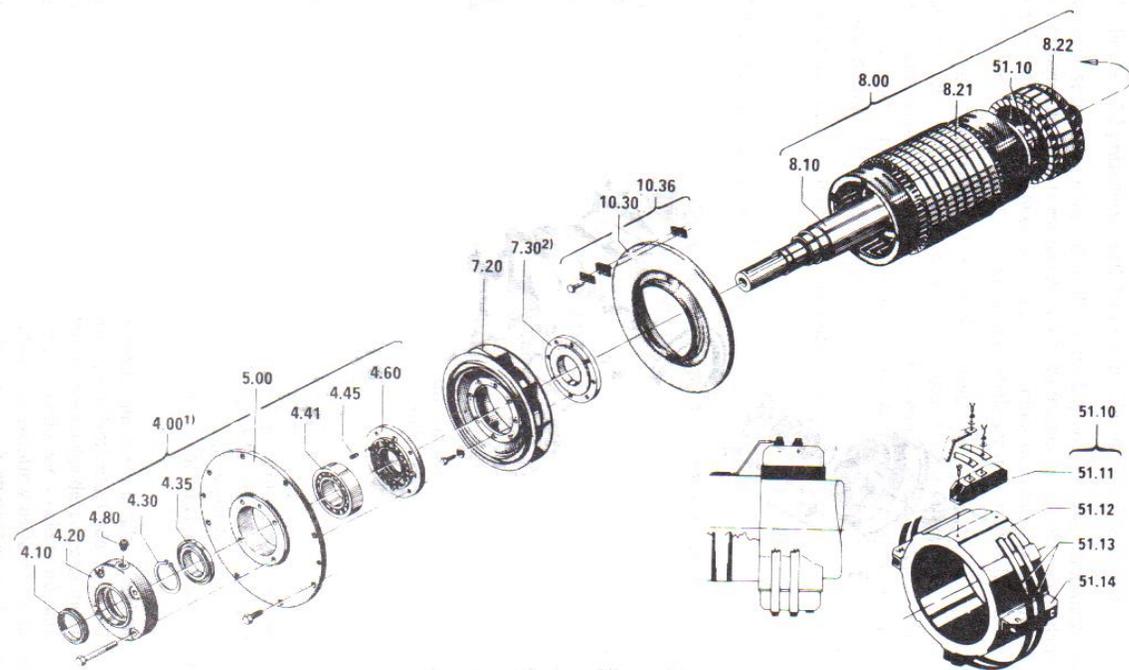
- | | | |
|--|-----------------------------|---|
| 3.00 Conjunto de rodamiento | 10.40 Deflector | 20.58 Cierre |
| 3.20 Tapa externa del rodamiento | 10.46 Elementos de fijación | 20.60 Entrada de cables |
| 3.30 Anillo frena eje | 10.57 Tapón | 20.68 Cierre |
| 3.35 Disco centrifugo | 10.60 Chapa de persiana | 21.01 Guía |
| 3.40 Rodamiento de bolas | 10.61 Chapa de persiana | 21.04 Tapón de goma |
| 3.60 Tapa interna del rodamiento | 10.70 Cubierta lateral | 21.62 Bloque de bornes circuito auxiliar |
| 3.80 Engrasador | 10.75 Cubierta con cierre | 22.30 Barra de empalme circuito principal |
| 10.00 Carcasa del estator | 10.78 Cierre | 22.31 Cantonera aislante |
| 10.15 Presilla de tierra | 10.80 Tapa | 30.40 Elemento de refrigeración |
| 10.30 Detector del lado del accionamiento o de la punta del eje AS | 10.81 Tapa | 50.00 Unidad de excitación |
| 10.36 Elementos de fijación | 20.10 Soporte de las barras | 50.20 Regulador de tensión con Circuito de potencia |
| | 20.27 Barra de soporte | 50.40 Transformador de corriente |
| | 20.36 Anillo de seguridad | |
| | 20.38 Cierre | |
| | 20.55 Tapa | |

Figura 12. Despiece del estator de un motor síncrono.

2. Rotor, figura 13. Es un devanado (conocido también como devanado de campo) alimentado por una fuente de c.d. para crear un electroimán controlando la magnitud del campo por dicha fuente. Dependiendo de la velocidad del motor se tienen dos tipos de rotores: cilíndrico o de alta velocidad y de polos salientes o de baja velocidad. Independientemente de la configuración del rotor, sus arrollamientos siempre se alimentan de corriente continua. Dependiendo de la fuente que proporcione esta corriente de alimentación o excitación se tendría, excitación independiente o auto excitación.

La excitación independiente significa que la corriente que alimenta el devanado inductor procede de una fuente independiente de la máquina, como un banco de acumuladores o un rectificador conectado a una red alterna.

La auto excitación significa que la corriente que activa las bobinas inductoras procede de la misma máquina, es decir un generador montado sobre el propio eje llamado excitatriz. Para obtener ésta auto excitación, es preciso que exista un pequeño flujo en el circuito magnético, flujo que es posible producir y mantener gracias al fenómeno de histéresis magnética (conservación de la propiedad magnética al retirar el campo magnético).



- | | |
|---|--|
| 4.00 Conjunto de rodamiento (cojinete libre) | 7.20 Rueda del ventilador |
| 4.10 Anillo V | 7.30 Cubo del ventilador |
| 4.20 Tapa externa del rodamiento | 8.00 Rotor completo |
| 4.30 Anillo freno eje | 8.10 Eje |
| 4.35 Disco centrífugo | 8.21 Paquete de chapas del rotor con arrollamiento de la máquina principal |
| 4.41 Rodamiento de bolas (cojinete libre) | 8.22 Paquete de chapas del rotor con arrollamiento de la excitatriz |
| 4.45 Muelles de presión | 51.10 Anillo rectificador con módulos, completo |
| 4.60 Tapa interna del rodamiento con anillos de fieltro | 51.11 Módulo varistor |
| 4.80 Engrasador | 51.12 Cubo |
| 5.00 Tapa porta cojinete lado del accionamiento o de la punta del eje | 51.13 Anillos de empalme |
| 6.01 Tapa porta cojinete, lado contrario al accionamiento o a la punta del eje AS, con anillo de corona y polos de excitatriz | 51.14 Módulo rectificador |

Figura 13. Despiece de un rotor cilíndrico con una excitatriz montada sobre el eje.

I.5.2.1.1.1. Funcionamiento

El funcionamiento de este motor se puede describir suponiendo que el rotor se encuentra inmóvil (condición de reposo) y el devanado del campo se excita para producir polos alternos en su periferia. El campo rotatorio que crea la armadura puede visualizarse como si dos imanes, un polo norte y uno sur, girasen a velocidad constante (síncrona) justo por encima de los polos del rotor. Cuando el

polo sur del campo rotatorio está precisamente arriba del polo norte del rotor, la fuerza de atracción entre ellos tiende a mover el rotor en dirección del campo rotatorio. Debido a la considerable masa del rotor, transcurre cierto tiempo antes de que comience a moverse, pero para entonces el campo rotatorio ha invertido su polaridad.

En ese momento la fuerza de repulsión entre los dos polos de igual polaridad tiende a mover el rotor en dirección opuesta. A medida que el rotor trata de girar en la dirección opuesta, el campo rotatorio ha invertido su polaridad una vez más. Por tanto, cada polo en el rotor recibe la acción de una fuerza que se invierte rápidamente, con igual magnitud en ambas direcciones. El par promedio que desarrolla el rotor en tales condiciones es igual a cero. Por tanto, un motor síncrono no puede arrancar por sí mismo.

En consecuencia, para que un motor síncrono arranque es necesario dotarlo de ciertos medios de modo que desarrolle un par de arranque por sí mismo, o impulsar el rotor casi a su velocidad síncrona mediante otro impulsor primario y en seguida sincronizarlo excitando el devanado del campo. Con objeto de que un motor síncrono arranque por sí solo, se le coloca un devanado adicional en las caras polares, el cual se conoce como devanado amortiguador o devanado de inducción. El devanado amortiguador, también conocido como de jaula de ardilla, es un devanado en cortocircuito.

Para máquinas pequeñas, el devanado de jaula de ardilla requiere, que las laminaciones del rotor sean colocadas en un molde para vaciar el material conductor fundido (a menudo aluminio) dentro de las ranuras. El molde tiene cavidades en ambos lados del rotor, las cuales se rellenan con el material conductor al mismo tiempo. El material conductor que llena la ranura de extremo a extremo forma una barra conductora. Las barras conductoras están en cortocircuito por los anillos terminales, como se muestra en la figura 14. La construcción en su conjunto es semejante a una jaula de ardilla, de ahí su nombre.

Para máquinas grandes, el devanado de jaula de ardilla puede estar formado por barras de metal que se introducen en las ranuras una a la vez y luego se ponen en cortocircuito por medio de bandas conductoras anulares en ambos extremos.

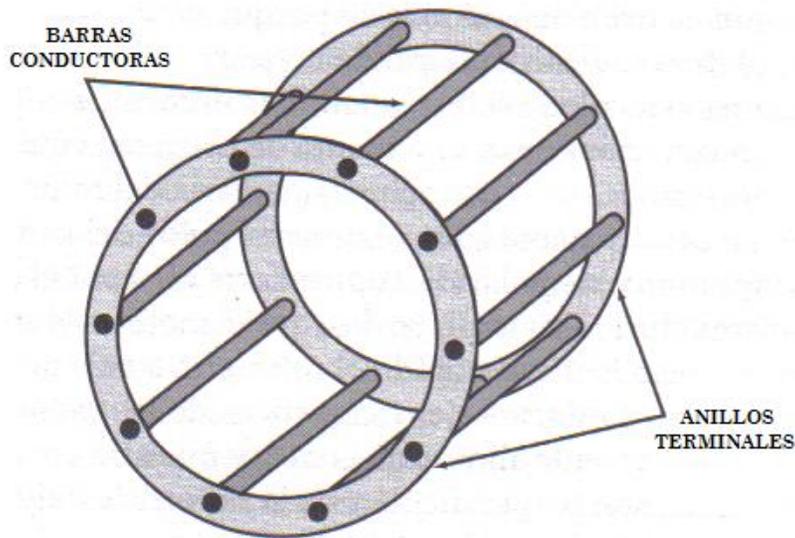


Figura 14. Devanado amortiguador jaula de ardilla.

El devanado amortiguador de un motor síncrono también puede ser del tipo de rotor devanado. El rotor devanado se utiliza cuando se desea controlar la velocidad del motor y desarrollar un par de arranque elevado. En las ranuras del rotor se coloca un devanado trifásico con la misma cantidad de polos que tenga la armadura. Un extremo de los devanados trifásicos está conectado internamente para formar un nodo común, en tanto que los otros extremos están conectados a los anillos rozantes.

En cualquier caso, el devanado amortiguador forma un lazo cerrado. El campo uniforme giratorio induce una fuerza electromotriz (fem) en ese devanado, el cual, a su vez, origina una corriente inducida en él. La corriente inducida ejerce un par sobre los conductores del devanado amortiguador y los obliga a girar en dirección del campo rotatorio. Funcionando sin carga, la velocidad del rotor es casi igual a la

velocidad síncrona del motor. Por consiguiente un motor síncrono se impulsa a su velocidad de operación sin carga.

Durante el periodo de aceleración del rotor, el devanado de campo debe cortocircuitarse por medio de un banco de resistencias apropiado. Una vez que el rotor alcanza una velocidad estable, se elimina el cortocircuito y el devanado del campo se energiza conectándolo a una fuente de corriente directa (c.d.). Los polos del campo que se forman de ese modo sobre la periferia del rotor lo jalen en fase con el campo rotatorio. En otras palabras, los poderosos polos del campo se aseguran en fase con los polos rotatorios de polaridad opuesta creados por el devanado de la armadura (polos de la armadura). Por lo tanto, se dice que el motor está sincronizado. El devanado amortiguador se torna ineficaz cuando el rotor gira a velocidad síncrona.

Sin carga, los ejes magnéticos de los polos de la armadura y los del rotor están prácticamente alineados, como se muestra en la figura 15a. Las líneas magnéticas de fuerza son perpendiculares a la superficie del rotor, por lo que no ejercen par alguno sobre éste. Los polos del rotor comienzan a deslizarse tras los de la armadura, a medida que se incrementa la carga sobre el motor, como se ilustra en la figura 15b. Luego, las líneas magnéticas de fuerza tienen una componente paralela a la superficie de la armadura y ejercen una fuerza sobre el rotor.

El ángulo de potencia entre los dos ejes magnéticos se mantiene en aumento con el incremento de la carga en el motor. El motor alcanza una región inestable aproximadamente a 60° eléctricos de desplazamiento angular entre los ejes magnéticos. Cualquier incremento adicional en la carga puede sacar al motor de sincronía, [5].

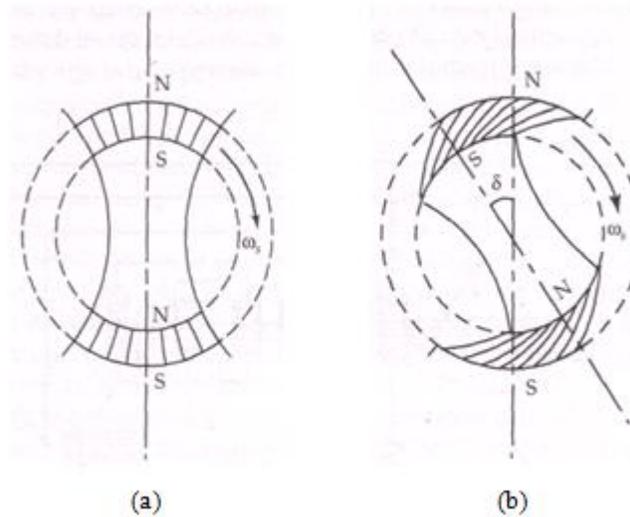


Figura 15. Líneas magnéticas de fuerza (a) sin carga y (b) con cierta carga, entre el campo rotatorio y el rotor de un motor síncrono.

El devanado amortiguador no sólo permite a un motor síncrono desarrollar el par de arranque, sino también tiene otro propósito útil: tiende a reducir al mínimo la oscilación del motor. La oscilación comprende los aumentos y disminuciones sucesivos en la velocidad del motor debido a cambios bruscos en la carga. Cuando ésta se modifica repentinamente en un motor síncrono, se requiere tiempo para que el motor modifique su ángulo de potencia ajustándolo debido a la propia inercia. Durante estos ajustes en el ángulo de potencia, la velocidad del motor fluctúa por arriba y por abajo de su velocidad síncrona. Estos cambios en la velocidad inducen corriente en el devanado amortiguador, desarrollando, en consecuencia, un par que se opone al cambio.

Por ejemplo, cuando la carga en el motor se incrementa súbitamente, el rotor tiende a reducir su velocidad debido a un incremento en el par aplicado. En cuanto se reduce la velocidad, la corriente inducida en los conductores del devanado amortiguador ejerce una fuerza de aceleración en el rotor en la dirección de su rotación. Por otro lado, si la carga se reduce repentinamente, la inercia del motor tiende a incrementar la velocidad del rotor. De nuevo, se induce una corriente en

los conductores del devanado amortiguador. Sin embargo, la corriente inducida ahora va en la dirección opuesta. Por tanto, se crea un par en la dirección contraria y obliga al rotor a disminuir su velocidad. Si el motor no está equipado con un devanado amortiguador, es posible que la oscilación adquiriera una severidad intolerable, [5].

I.5.2.1.1.2. Ventajas

Existen tres ventajas de los motores que los hacen particularmente indicados para algunos tipos de accionamientos.

1. El rendimiento del motor síncrono es mayor que el motor de inducción equivalente, particularmente a baja velocidad angular.
2. Este motor pueden trabajar con factor de potencia capacitivo o unitario.
3. La velocidad angular es rigurosamente constante con la frecuencia de alimentación.

Hay motores síncronos entre 80 y 3600 rpm. Esto permite que el motor se pueda acoplar directamente a la carga, incluso a baja velocidad angular, mientras que un motor de inducción exigiría un reductor de velocidad, pues éstos, a baja velocidad angular presentan rendimiento y factor de potencia pobres.

Las ventajas arriba apuntadas tienden a ser más expresivas a medida que aumenta el tamaño de los motores. En general, los motores síncronos empiezan a ser industrialmente importantes a partir de unos 300 Hp, siendo casi exclusivos en potencias superiores a 15.000 Hp., [3].

I.5.2.1.2. Motor de inducción

Los motores de corriente directa c.d. y síncronos tienen en común que ambos son del tipo de doble alimentación. Estos motores tienen corriente continua en los devanados del campo y corriente alterna c.a. en los devanados de la armadura. Como la energía eléctrica se alimenta directamente a la armadura de un motor de c.d. por medio de un conmutador, también puede hacerse referencia a él como un motor de conducción.

A diferencia de estos, un motor de inducción es llamado así porque el rotor no recibe la energía por conducción sino por inducción. Un devanado que recibe la energía exclusivamente por inducción constituye un transformador. Por ende, un motor de inducción es un transformador con un devanado secundario giratorio. De lo anterior se desprende que:

1. Un motor de inducción es un motor con una sola alimentación. Por consiguiente, no requiere de un conmutador, anillos rozantes o escobillas. En realidad, no hay contactos móviles entre el estator y el rotor. Los aspectos mencionados dan como resultado un motor robusto, confiable y prácticamente libre de mantenimiento.
2. La ausencia de escobillas elimina la pérdida eléctrica debida a la caída de voltaje en éstas y la pérdida mecánica debida a la fricción entre las escobillas y el conmutador o los anillos rozantes. Por tanto, un motor de inducción tiene una eficiencia relativamente alta.
3. Un motor de inducción porta c.a. en los devanados tanto del estator como del rotor.
4. El devanado secundario recibe energía por inducción mientras gira.

En la actualidad los motores de inducción se pueden encontrar en más del 70% de las aplicaciones de accionamientos eléctricos, incluyendo velocidad constante y variable, lo que se logra sólo cuando se puede modificar la velocidad de sincronía o el número de polos del motor.

Hay dos tipos básicos de motores de inducción: monofásicos y polifásicos. Los motores de inducción monofásicos son preferibles para aplicaciones domésticas. Un gran número de ellos se construyen en el rango de potencia fraccionaria (menos de un caballo de fuerza). Por otro lado, los motores de inducción polifásicos cubren todo el espectro de las especificaciones en caballos de fuerza y se prefiere instalarlos en lugares donde hay acceso fácil a una fuente de potencia polifásica. Debido a la amplia disponibilidad de la generación y transmisión de potencia trifásica, la mayor parte de los motores de inducción polifásicos son del tipo trifásico.

I.5.2.1.2.1. Componentes

Los motores de inducción tienen su origen en 1885. En ese año Galileo Ferraris, construyó un pequeño motor bifásico, cuyo inductor consistía en dos pares de electroimanes colocados Radialmente a 90° y con una culata común, que eran alimentados mediante dos corrientes senoidales desfasadas 90° eléctricos en el tiempo. El inducido lo formaba un cilindro de cobre que se ponía a girar al excitar los electroimanes, figura 16, [2].

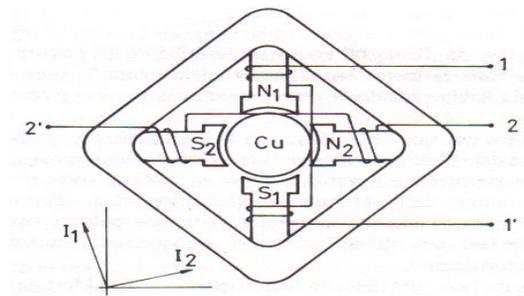


Figura 16. Motor de inducción.

Para estos motores, al igual que los antes mencionados los dos componentes esenciales son el estator y el rotor.

El estator (miembro externo estacionario) esta conformado por un conjunto de láminas delgadas, ranuradas, de acero de alta permeabilidad, dentro de un bastidor o carcasa de acero o hierro fundido. El bastidor proporciona apoyo mecánico al motor y, aunque está hecho de material magnético, no está diseñado para conducir flujo magnético.

En las ranuras se colocan (o devanan) bobinas idénticas conectadas de manera formen un devanado equilibrado.

El rotor también está compuesto de láminas delgadas, ranuradas, de acero sumamente permeable que se fijan por presión sobre un eje. Hay dos tipos de rotores: de jaula de ardilla y devanado.

1. Rotor de jaula de ardilla. Por lo general, dicho rotor se utiliza cuando la carga requiere un par de arranque reducido. Para motores pequeños, un devanado se moldea forzando un material conductor fundido (con frecuencia, aluminio) dentro de las ranuras mediante el proceso de fundición a presión. En ambos lados del conjunto de láminas también se forman anillos circulares, llamados anillos terminales, que colocan en cortocircuito las barras en ambos extremos del rotor.

Para motores de gran volumen, el devanado de jaula de ardilla se forma insertando barras conductoras pesadas (generalmente de cobre, aluminio o alguna de sus aleaciones) en las ranuras, soldándolas o atornillándolas a los anillos terminales. Cada par de polos tiene tantas fases en el rotor como barras, ya que cada una de éstas se comporta en forma independiente de las demás. Es práctica común sesgar las láminas del rotor para reducir la vibración y el ruido eléctrico en el motor.

2. Rotor devanado. Es necesario utilizarlo cuando la carga requiere un par de arranque alto. Un rotor devanado debe tener tantos polos y fases como el estator. En realidad, la colocación de las bobinas en un rotor devanado no es diferente de la de un estator. Los devanados en el rotor están conectados internamente para formar una conexión neutral, así los extremos están conectados a los anillos rozantes, en donde al deslizarse las escobillas, es posible agregar resistencias externas en el circuito del rotor. De este modo puede controlarse la resistencia total del circuito del rotor; al hacerlo, realmente está controlándose el par que desarrolla el motor.

La velocidad a la que un motor de inducción desarrolla el par máximo (denominada velocidad crítica) depende de la resistencia del rotor. Conforme se incrementa la resistencia del rotor, la velocidad crítica disminuye. Por tanto, es posible obtener el par máximo en el arranque (velocidad cero) insertando la cantidad exacta de resistencia en el circuito del rotor. Sin embargo, un motor de inducción con rotor devanado es más caro y menos eficiente que uno de inducción de jaula de ardilla con las mismas especificaciones. Por estas razones, un motor de inducción con rotor devanado solo se utiliza cuando uno de jaula de ardilla no puede suministrar el alto par de arranque que exige la carga, [5].

I.5.2.1.2.2. Funcionamiento

Cuando el devanado del estator de un motor de inducción se conecta a una fuente de potencia, produce un campo magnético que es de magnitud constante y gira alrededor de la periferia del rotor a la velocidad síncrona.

Si f es la frecuencia de la corriente en el devanado del estator y P es el número de polos, la velocidad síncrona del campo rotatorio es la que se describió en la ecuación 2 descrita anteriormente.

El campo rotatorio induce una fuerza electromotriz (fem) en el devanado del rotor. Como el devanado del rotor forma un lazo cerrado, la fem inducida en cada una de las bobinas da origen a una corriente inducida en ellas. Cuando la bobina conductora de corriente se introduce en un campo magnético, experimenta una fuerza (o par) que tiende a hacerla girar. El par desarrollado se llama par de arranque. Si el par de la carga es menor que el par de arranque, el rotor comienza a girar. La fuerza desarrollada y, por tanto, la rotación del rotor están en la misma dirección que el campo rotatorio.

En condiciones sin carga, el rotor alcanza pronto una velocidad casi igual a la síncrona, pero nunca puede girar a ella porque sus bobinas parecerían estacionarias respecto al campo rotatorio y no habría fem inducida en ellas. En ausencia de una fem inducida en las bobinas del rotor, no habría corriente en los conductores de éste y, en consecuencia, tampoco experimentarían fuerza. En ausencia de una fuerza, el rotor tendería a disminuir su velocidad. En cuanto el rotor comienza a reducir su velocidad el proceso de inducción se presenta de nuevo. En resumen, el rotor recibe su potencia por inducción sólo cuando existe un movimiento relativo entre su velocidad y el campo rotatorio.

Puesto que el rotor gira a una velocidad menor que la síncrona del campo rotatorio, un motor de inducción también se denomina motor asíncrono.

I.5.2.1.2.3. Clasificación

Con base en el tipo de rotor, este tipo de motor puede clasificarse en motor jaula de ardilla y rotor devanado.

A. Motor de inducción jaula de ardilla

Desde hace mucho tiempo el motor de inducción tipo Jaula de ardilla ha sido muy relevante dentro de la industria por su simplicidad, constitución robusta y bajo costo de fabricación; asimismo la incorporación de controladores electrónicos que le brindan ajustes de frecuencia específicos, le han otorgado grandes ventajas que lo mantiene en un liderazgo sobre sus competidores.

El rotor de este motor esta hecho con barras conductoras que están en paralelo con el eje y en corto circuito, por medio de unos anillos en los extremos, que a su vez le brindan el soporte físico que requiere.

Cuando se desarrolló por primera vez el rotor de doble jaula de ardilla se creo tal variedad y adaptabilidad en el diseño de rotores para motores de inducción que ha llevado a diversas características de curva deslizamiento - par. Al dar la proporción correcta al devanado de doble jaula de ardilla, los fabricantes han desarrollado numerosas variaciones del diseño del rotor de vaciado o normal único. Estas variaciones tienen por consecuencia pares de arranque mayores o menores que el diseño normal y también menores corrientes de arranque.

El rotor jaula de ardilla es empleado tanto en los motores de inducción trifásicos (motor que emplea un ingenioso esquema en la colocación de tres devanados de fase idénticos, espaciados 120° eléctricos entre si, excitados por medio de un suministro trifásico equilibrado), así como en motores de inducción monofásico (opera con una fuente monofásica). Mismos que se describen a continuación.

❖ Motor de inducción trifásico.

Para distinguir entre diversos tipos disponibles de motores de inducción trifásicos, la National Electrical Manufacturers Association (NEMA) ha desarrollado un sistema de identificación con letras en la cual cada tipo de motor comercial de inducción de jaula de ardilla se fabrica de acuerdo con una determinada norma de diseño y se coloca en una de las seis clases identificadas con las letras de la A a la F. La denominación de cada letra está encaminada a satisfacer las exigencias de cierta aplicación, las características principales se describen a continuación.

1. Motores clase A

Un motor clase A se considera estándar y es apropiado para aplicaciones de velocidad constante. El motor puede arrancar aplicando el voltaje especificado. Desarrolla un par de arranque de 125 a 175% del par a plena carga. La corriente de arranque al voltaje especificado es de cinco a siete veces la corriente especificada. El deslizamiento a plena carga es casi siempre menor de 5% debido a que la resistencia del rotor es relativamente baja. La regulación de la velocidad es de 2 a 4%.

Las barras del rotor están colocadas cerca de la superficie de las laminaciones del rotor con objeto de reducir la reactancia de dispersión. Estos motores impulsan cargas de inercia baja y poseen aceleraciones altas. Se emplean en aplicaciones como ventiladores, sopladores, bombas centrífugas y máquinas-herramienta.

2. Motores clase B

Un motor clase B se considera de propósito general y puede arrancar aplicando el voltaje especificado. La resistencia del rotor para un motor clase B es un tanto más elevada que la de uno clase A. Los conductores del rotor están colocados con mayor profundidad en las ranuras que los de un motor clase A. Por tanto, la reactancia del rotor de un motor clase B es mayor que la de otro clase A.

Cabe mencionar que el incremento en la reactancia del rotor reduce el par de arranque, en tanto que un incremento de la resistencia del rotor, aumenta el par de arranque. Por ende, el rango de par de arranque para un motor clase B es casi el mismo que para uno clase A. Debido al aumento de la reactancia, la corriente de arranque es aproximadamente de 4.5 a 5.5 veces la corriente a plena carga. La baja corriente de arranque y el par de arranque casi igual hacen que los motores clase B también sean apropiados para aplicaciones de clase A. En consecuencia, los motores clase B pueden sustituir a los de clase A en todas las aplicaciones. La regulación de la velocidad para los motores clase B es de 3 a 5%.

3. Motores clase C

Generalmente, un motor clase C tiene un rotor de doble jaula y está diseñado para arrancar con voltaje pleno. La resistencia elevada del rotor limita la corriente de arranque entre 3.5 y 5 veces la corriente a plena carga. El par de arranque es de 200 a 275% del par a plena carga. La regulación de velocidad es de 4 a 5%. Los motores clase C se emplean en aplicaciones que requieren pares de arranque elevados, como bombas de compresión, trituradores, horadoras, bandas transportadoras, maquinaria textil y equipos para trabajar madera.

4. Motores clase D

Un motor clase D se caracteriza por su alta resistencia, capaz de desarrollar un par de arranque de 250 a 300% del par especificado. La alta resistencia del rotor se crea utilizando aleaciones de alta resistencia para construir las barras del rotor y reduciendo el área transversal de la barra. Según el diseño, la corriente de arranque puede ser de tres a ocho veces la corriente especificada. La eficiencia de un motor clase D es menor que la eficiencia de los motores clases A, B y C. La regulación de la velocidad puede ser tan alta como 10%. Las características de estos motores los hacen adecuados para aplicaciones como excavadoras, máquinas cizalladoras, troqueladoras, estampadoras, equipo de lavandería y montacargas.

5. Motores clase E

En general, los motores clase E tienen un par de arranque bajo y operan con bajo deslizamiento con la carga especificada. La corriente de arranque es relativamente baja para motores de menos de 7.5 caballos de fuerza. Estos motores pueden arrancar con el voltaje nominal (o especificado). Sin embargo, para motores de más de 7.5 caballos de fuerza, la corriente de arranque puede ser suficientemente alta para exigir un circuito de arranque a voltaje reducido.

6. Motores clase F

Un motor clase F generalmente es de doble jaula. Es un motor de par bajo y de todos los motores, es el que necesita la corriente de arranque más baja. El par de arranque suele ser 1.25 veces el par especificado, en tanto

que la corriente de arranque es de dos a cuatro veces la corriente nominal. La regulación de velocidad es superior a 5%. Estos motores pueden arrancar aplicando el voltaje especificado. Están diseñados para reemplazar a los motores clase B y se construyen en tamaños mayores de 25 caballos de fuerza.

❖ Motor monofásico

A diferencia de un motor trifásico, uno monofásico se construyen en el rango de potencia fraccionaria (menos de un caballo de fuerza), este tipo de motor sólo requiere un devanado monofásico para mantenerse en movimiento. No obstante, un motor con esas características no arranca por sí mismo, por ende, debe proveérsele algún medio para que lo haga. Dependiendo del sistema o método empleado para la marcha, los motores monofásicos se pueden clasificar como:

1. Motor de fase partida

Éste es uno de los motores de inducción más utilizado para aplicaciones mecánicas que requieren potencias en fracciones de caballo de fuerza, figura 17.

El motor emplea dos devanados separados que se sitúan en cuadratura (a 90°) y están conectados en paralelo a una fuente monofásica.

El primer devanado, que se conoce como devanado principal, tiene una resistencia baja e inductancia alta y al conducir corriente produce el flujo magnético necesario para proporcionar la velocidad nominal.

El segundo devanado, llamado devanado auxiliar, tiene resistencia alta e inductancia baja. Este devanado se desconecta del suministro cuando el motor alcanza una velocidad cercana al 75% de su velocidad síncrona. Comúnmente se usa un interruptor centrífugo para desconectar el devanado auxiliar del suministro a una velocidad predeterminada. La desconexión es necesaria para evitar la pérdida excesiva de potencia en el devanado auxiliar a plena carga.

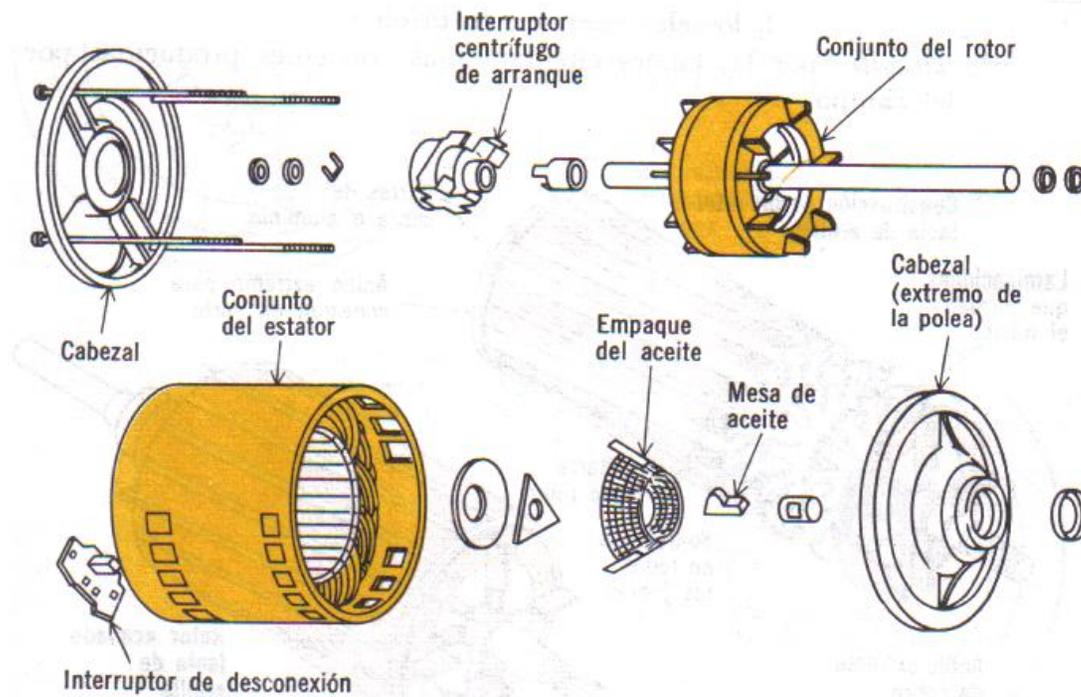


Figura 17. Motor de inducción de fase partida.

En el momento del arranque, los dos devanados toman corrientes del suministro. La corriente del devanado principal está en atraso respecto del voltaje aplicado en casi 90° debido a su elevada inductancia (gran número de vueltas) y baja resistencia (gran diámetro del conductor). La corriente en el devanado auxiliar se encuentra esencialmente en fase con el voltaje

aplicado debido a su alta resistencia (diámetro pequeño del conductor) y baja inductancia (número reducido de vueltas).

Como puede interpretarse, la corriente en el devanado principal no está en un atraso exacto de 90° , ni tampoco la corriente en el devanado auxiliar está precisamente en fase con el voltaje aplicado. Además, también las dos corrientes en los devanados de fase podrían no ser iguales en magnitud. En un motor de fase partida o dividida bien diseñado la diferencia de fase entre las dos corrientes podría llegar a ser de 60° . Es de esta acción de división de fase es por la cual recibe su nombre.

Puesto que los dos devanados de fase están posicionados con un espaciamiento en cuadratura y conducen corrientes fuera de fase, establecen un campo rotatorio no equilibrado. Este campo rotatorio, aunque no equilibrado, permite que el motor arranque.

El par de arranque desarrollado por un motor de fase partida es en general, de 150 a 200% del par a plena carga. La corriente de arranque es aproximadamente de seis a ocho veces la corriente a plena carga. En la figura 18, se observa la representación esquemática de un motor de fase dividida, [6].

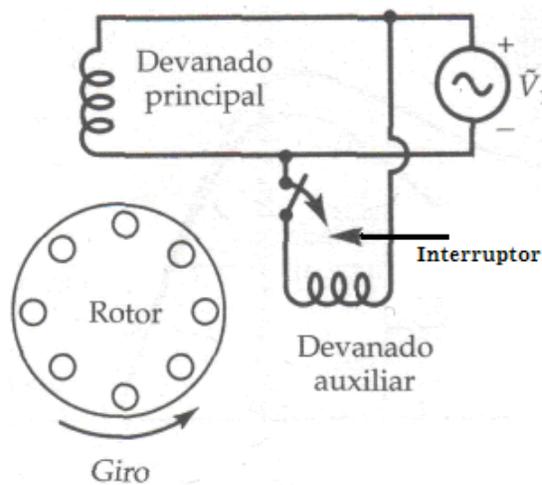


Figura 18. Representación de un motor de fase partida.

2. Motor de arranque por condensador

En un motor de arranque por condensador se incluye un condensador en serie con el devanado auxiliar. Si el valor del condensador se elige apropiadamente, es posible diseñar un motor de arranque por condensador de manera que la corriente en el devanado principal se encuentre en atraso respecto de la corriente en el devanado auxiliar exactamente en 90° . Por tanto, el par de arranque desarrollado por un motor con condensador puede ser tan alto como el de un motor polifásico.

Tanto el devanado auxiliar y el condensador se desconectan aproximadamente a un 75% de la velocidad síncrona. Por ello el motor de arranque por condensador funciona a la velocidad especificada solamente con el devanado principal.

Cabe destacar que la necesidad de un condensador externo hace que este tipo de motor sea un poco más caro que un motor de fase dividida. Sin embargo, el motor de arranque por condensador se utiliza cuando los requerimientos de par de arranque son de cuatro a cinco veces el par especificado.

Por ello, un par de arranque tan elevado queda fuera de las posibilidades de un motor de fase dividida. Como el condensador sólo se usa durante el arranque, su ciclo de servicio es muy intermitente. Por tanto, los motores de arranque por condensador utilizan condensadores de tipo electrolítico, que es barato y relativamente pequeño, figura 19.

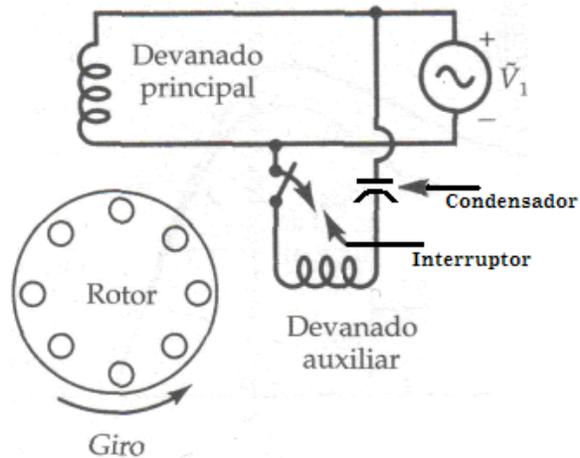


Figura 19. Representación de un motor de arranque por condensador.

3. Motor de arranque por condensador y marcha por condensador

Aunque los motores de fase dividida y de arranque por condensador están diseñados para satisfacer los requerimientos de la carga especificada, tienen un factor de potencia bajo a la velocidad nominal (especificada). Cuanto más bajo es el factor de potencia, más alta es la potencia de entrada para la misma potencia de salida.

Por ende, la eficiencia de un motor monofásico es más baja que la de un motor de inducción polifásico del mismo tamaño. Por ejemplo, la eficiencia de un motor monofásico de arranque por condensador o de uno de fase dividida generalmente es de 50 a 60%, en el rango de potencia en fracciones de caballo de fuerza. Por otro lado, para la misma aplicación, un motor de inducción trifásico puede tener una eficiencia de 70 a 80%. La eficiencia de un motor de inducción monofásico puede mejorarse con el empleo de otro condensador.

Modificación que conlleva al desarrollo del motor de arranque por condensador y marcha por condensador (cscr, capacitor-start capacitor-run). Como este motor requiere dos condensadores, también se conoce como motor con condensador de dos valores.

Es importante destacar que un condensador se selecciona sobre la base de los requerimientos del par de arranque (condensador de arranque), mientras que el otro se elige para desempeño en funcionamiento (condensador de marcha).

Por otro lado el devanado auxiliar permanece en el circuito siempre, pero el interruptor centrífugo lleva a cabo la conmutación del condensador de arranque al la velocidad síncrona aproximadamente 75% de la velocidad nominal.

El condensador de arranque es del tipo electrolítico, en tanto que el de marcha es del tipo en aceite para c.a. y operación continua. Como ambos devanados están activos a la velocidad especificada, el condensador de marcha puede seleccionarse para hacer que las corrientes en los devanados estén realmente en cuadratura una respecto de la otra. Por tanto, un motor de este tipo funciona como motor bifásico tanto en el arranque como a su velocidad nominal. Aun cuando este motor es más caro porque utiliza dos condensadores, tiene una eficiencia relativamente alta a plena carga en comparación con un motor de fase dividida o de arranque por condensador, figura 20.

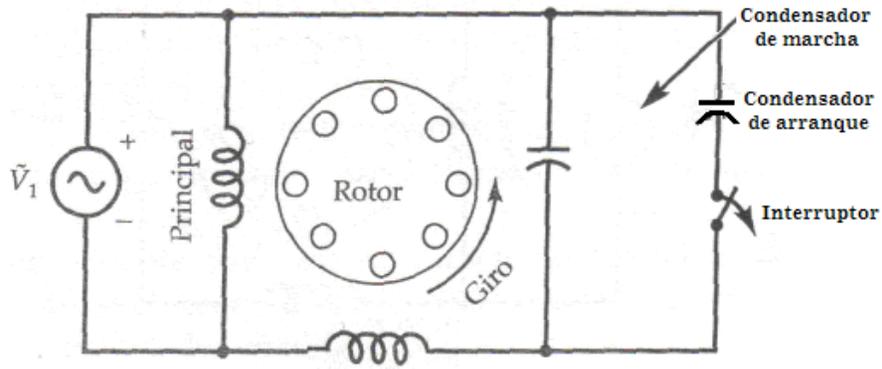


Figura 20. Representación de un Motor de arranque por condensador y marcha por condensador.

4. Motor de condensador con fase dividida permanente

El motor de condensador con fase dividida permanente (psc, permanent split-capacitor) es una variante más económica. Utiliza el mismo tipo de condensador para ambas cargas, tanto en el arranque como en el funcionamiento a plena carga. Debido a que el devanado auxiliar y el condensador permanecen en el circuito en tanto opere el motor, no es necesario un interruptor centrífugo. Por ello, la longitud del motor es menor que en los casos anteriores. El condensador generalmente se elige para obtener eficiencia alta a la velocidad especificada. Como el condensador no está previsto adecuadamente para desarrollar un par de arranque óptimo, el par de arranque de este tipo de motor es más pequeño.

Por tanto, estos motores son adecuados para utilizarse en ventiladores, ya que estos no requieren un elevado par de arranque, además facilitan arranques frecuentes, ya que no tienden a sobrecalentarse; y por no tener tantas piezas giratorias, generalmente es silencioso y tiene alta eficiencia a plena carga, figura 21.

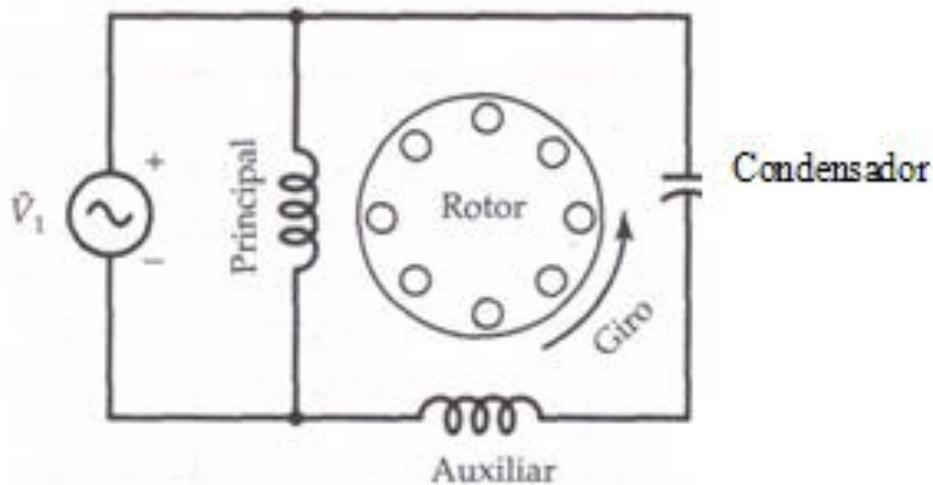


Figura 21. Representación de un Motor de condensador permanente.

B. Motor de inducción con rotor devanado

El motor de inducción de rotor devanado, opera bajo los mismos principios de los motores jaula de ardilla, aunque difieren en la construcción del rotor. En lugar de las barras en corto circuito, el rotor está constituido de bobinas cuyas terminales llegan a unos anillos rosantes montado sobre el eje. La conexión de las resistencias externas a los circuitos del rotor a través de los anillos rosantes, permite la variación de las características par-velocidad. El máximo par que un motor puede producir está determinado por el diseño de su rotor. Cada diseño de rotor devanado tiene una familia de curvas par-velocidad que corresponden a varios valores de resistencia externa del rotor, [14].

El problema de la regulación de la velocidad en los motores de corriente alterna y la mejora del factor de potencia han sido resueltos de manera adecuada con los motores de corriente alterna de rotor devanado. Según el número de fases para los que están concebidos los motores de este tipo se clasifican en monofásicos y polifásicos; que a su vez se dividen en dos grandes grupos, motores de repulsión y motores de serie, [13].

1. Motor de repulsión

Entre los clasificados como motores de repulsión figura tres tipos. En primer lugar se tiene el motor de repulsión ordinario, que se pone en marcha y funciona por la llamada repulsión magnética; después se encuentra el motor de inducción que se pone en marcha por repulsión, arranca por repulsión magnética, convirtiéndose operativamente en un motor de inducción monofásica; finalmente, el motor repulsión-inducción que se pone en marcha por repulsión magnética y opera como una combinación de repulsión-inducción.

Los motores de repulsión tienen un estator laminado con devanado distribuido, muy similar al de un motor de inducción. Por otra parte, el rotor del motor de repulsión es una armadura devanada en tambor que tiene conmutador y escobillas muy similares a las que se encuentran en el motor de c.d., figura 22. Sin embargo, en el motor de repulsión las escobillas están conectadas en corto. El motor común de repulsión funciona a partir de potencia monofásica de c.a. y tiene una característica especial, un mecanismo de conexión en corto y de desconexión de escobillas que no se encuentra en otros motores.

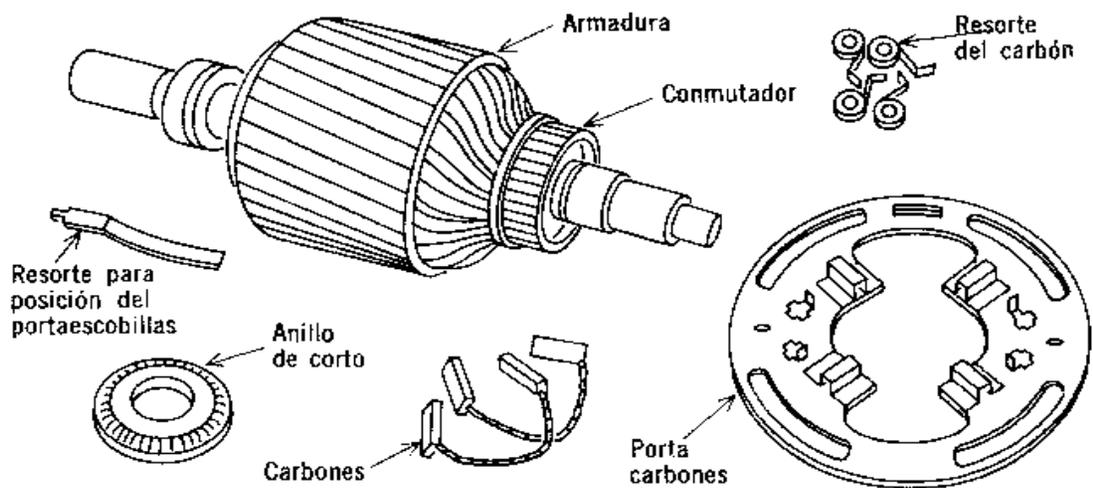


Figura 22. Representación de un Motor de repulsión de c.a..

Para explicar este principio, en la figura 23, aparecen polos salientes (que se proyectan hacia afuera). En la figura 23A, con el eje de escobillas alineado con los polos, el estator induce corrientes iguales y opuestas en las dos mitades de los devanados del rotor. El efecto neto anula el par y el motor no funciona. Si el eje de escobillas se coloca perpendicularmente a los polos, en la figura 23B, los voltajes inducidos en el rotor se neutralizan, y como no se produce voltaje en las escobillas, no hay corriente de armadura y, en consecuencia, no hay par. Sin embargo, si las escobillas se encuentran en cualquier punto entre la posición de las figuras anteriores, como en la 23C, existirá un voltaje resultante y habrá corriente en la armadura.

Esto originará un campo que produce polos similares entre el rotor y el estator, lo cual produce una fuerza de repulsión magnética (par) que hace girar al rotor en dirección del desplazamiento de las escobillas.

Las características de funcionamiento del motor de repulsión son muy parecidos a las de un motor de serie de c.d.. Tiene un alto par de arranque y puede funcionar a velocidades relativamente altas bajo cargas ligeras.

Para producir la inversión de la rotación, se desplaza la posición de las escobillas al lado opuesto del plano neutro, como en la figura 23D. El motor de repulsión siempre gira en la misma dirección en que se desplazan las escobillas con respecto al plano neutro.

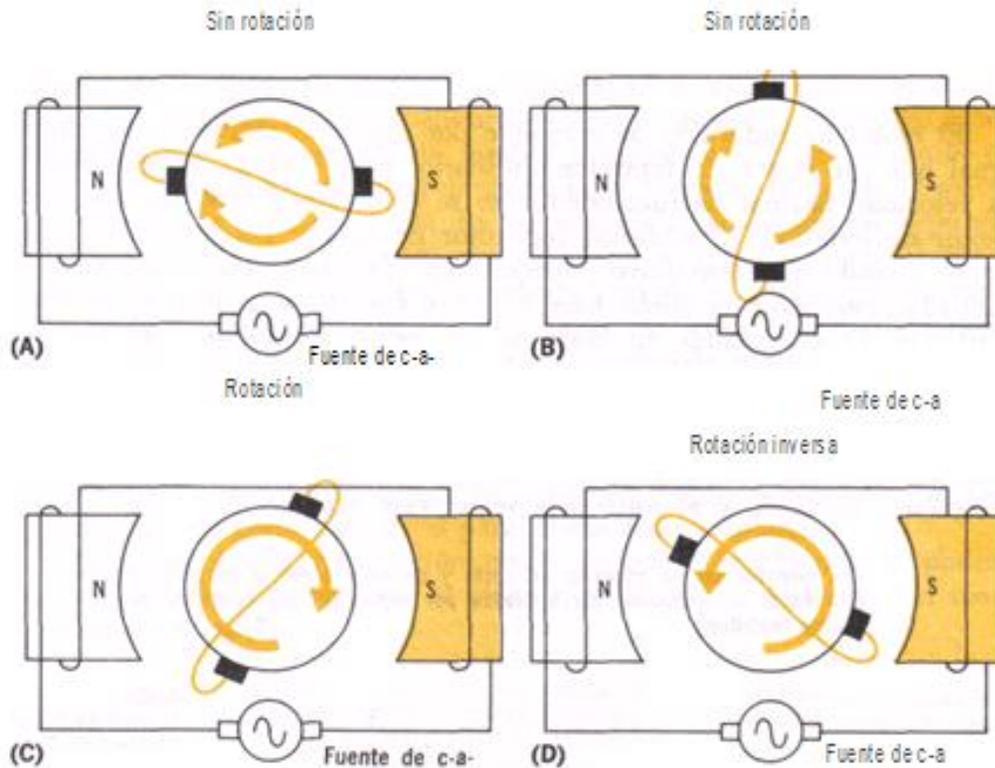


Figura 23. Representación de un Motor de repulsión.

El motor de inducción de arranque por repulsión posee un arranque igual que un motor de repulsión ordinario, pero cuando se aproxima a la velocidad normal de funcionamiento se convierte y funciona como un motor de inducción monofásico con rotor devanado. La conversión tiene lugar cuando un dispositivo especial que funciona centrífugamente, llamado conector en corto, hace contacto con la carga interna del conmutador. El conector en corto es un anillo conductor que une los segmentos del conmutador, desviando todo el flujo de corriente de las escobillas. En este punto, se origina un sistema ordinario de campo magnético rotatorio y el rotor gira según esta acción.

Existen dos clases de motores de inducción de arranque por repulsión: el tipo de escobillas conectadas y el de escobillas desconectadas, que se describen a continuación.

- 1) En el tipo de escobillas conectadas, éstas se mantienen en contacto con el conmutador aún después de que se ha activado el dispositivo de conexión en corto y el motor funciona como si fuera de inducción.
- 2) En el tipo de escobillas desconectadas, un mecanismo en el motor levanta las escobillas del conmutador cuando se activa la conexión en corto circuito. Esta acción evita que se desgasten las escobillas y el conmutador cuando el motor funciona como motor normal de inducción, figura 24.

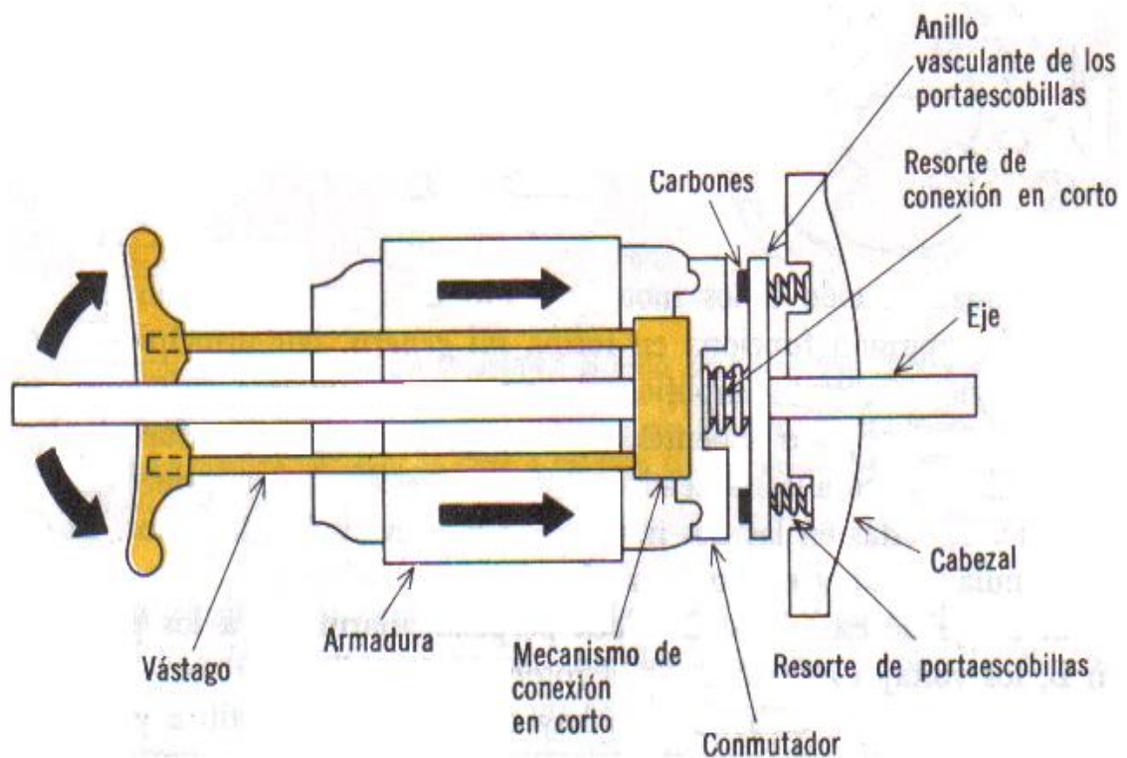


Figura 24. Motor de arranque por repulsión.

El motor repulsión-inducción es único ya que su rotor combina una disposición de jaula de ardilla a un devanado de tambor con un conmutador y escobillas en corto circuito. Cuando se aplica potencia monofásica de c.a., el devanado de tambor produce el par de arranque por repulsión magnética. Al girar la armadura, también se produce un par en el devanado de jaula de ardilla. El par se suma al producido por repulsión.

Como resultado, sin carga, la velocidad a que funciona es ligeramente superior a la velocidad síncrona, debido al efecto del devanado de repulsión, en tanto que a plena carga, su velocidad es ligeramente inferior a la síncrona, igual que en el motor de inducción.

Conviene hacer notar que ambos devanados siempre están funcionando cuando gira la armadura. El motor de repulsión-inducción no tiene mecanismos de corto circuito o para desconectar las escobillas, figura 25.

El motor repulsión-inducción puede invertirse cambiando la posición de las escobillas con respecto al plano neutro, como en el caso del motor sencillo de repulsión.

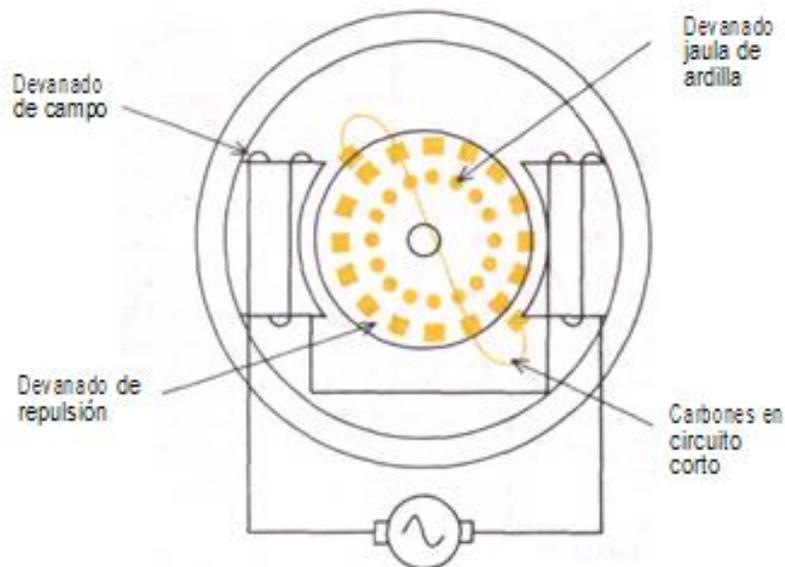


Figura 25. Representación de un Motor de repulsión-inducción.

2. Motor de serie

En un motor de serie los devanados de campo y de armadura están conectados en serie y al ser alimentados con c.a., tanto el flujo de campo como la corriente de armadura se invierten simultáneamente cada medio ciclo. Debido a que ambos cambian al mismo tiempo, la dirección de la rotación permanece igual para cada medio ciclo de c.a..

Es importante mencionar que este motor alimentado con c.a., originalmente fue construido para trabajar con c.d., por lo que tiene ciertas limitaciones en el funcionamiento. La más notable es que el flujo alterno del campo ocasiona grandes pérdidas en el núcleo ferroso por corrientes parásitas e histéresis; la autoinducción de los devanados de campo y de armadura produce un bajo factor de potencia y, por lo tanto, es ineficiente; y la reacción de armadura produce chisporroteo excesivo en el conmutador.

Para superar estas limitaciones se ajusta el diseño del motor de c.d., laminando los polos de campo y el núcleo para reducir al mínimo las corrientes parásitas y las pérdidas por histéresis. El factor de potencia se mejora, reduciendo la reactancia del devanado de campo por el uso del menor número posible de espiras en el campo. Así se obtiene un alto flujo en el campo mediante un circuito magnético de baja reluctancia; así mismo la reactancia de armadura se reduce mediante un devanado compensador en las caras polares.

Cuando el motor de serie de c.a. tiene aplicaciones tanto en c.a. como en c.d., el devanado compensador se conecta en serie con la armadura y se dice que estará compensado conductivamente, figura 26A. Si el devanado compensador está conectado en corto circuito sobre si mismo se dice que el motor estará compensado inductivamente, figura 26B.

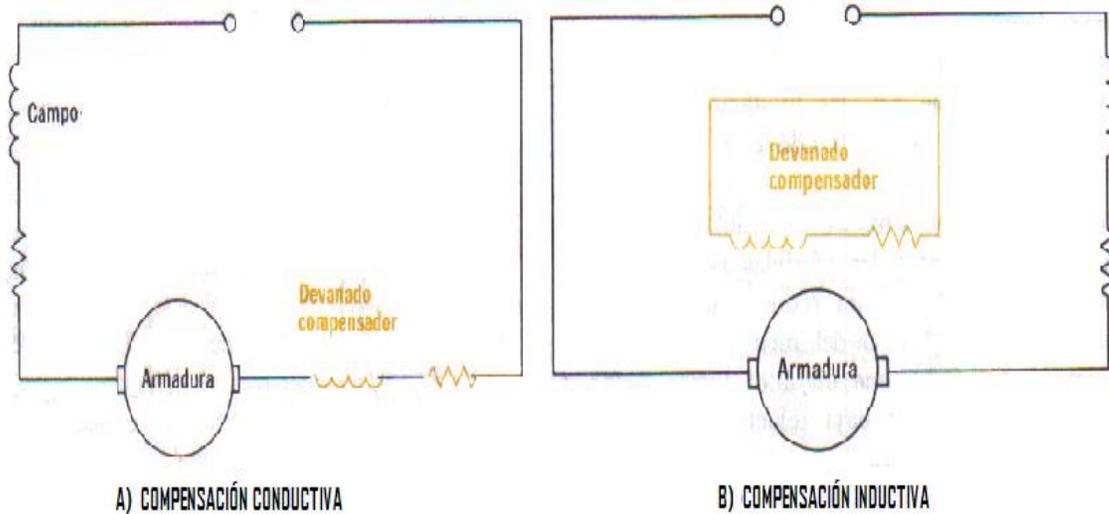


Figura 26. Representación de un motor de repulsión-inducción.

I.5.2.1.3. Motor universal

El motor universal es un motor en serie de potencia fraccional, de c.a., diseñado especialmente para usarse en potencia ya sea de c.d. o de c.a.. Este motor tiene la misma característica de velocidad y par cuando funcionan en c.a. o en c.d.. En general, los motores universales pequeños no requieren devanados compensadores debido a que el número de espiras de su armadura es reducido y por lo tanto, también lo será su reactancia de armadura. Como resultado, los motores inferiores a 3/8 de caballo generalmente se construyen sin compensación. El costo de los motores universales no compensados es relativamente bajo por lo que su aplicación es muy común en aparatos domésticos ligeros, por ejemplo aspiradoras, taladros de mano, licuadoras, etc., figura 27.

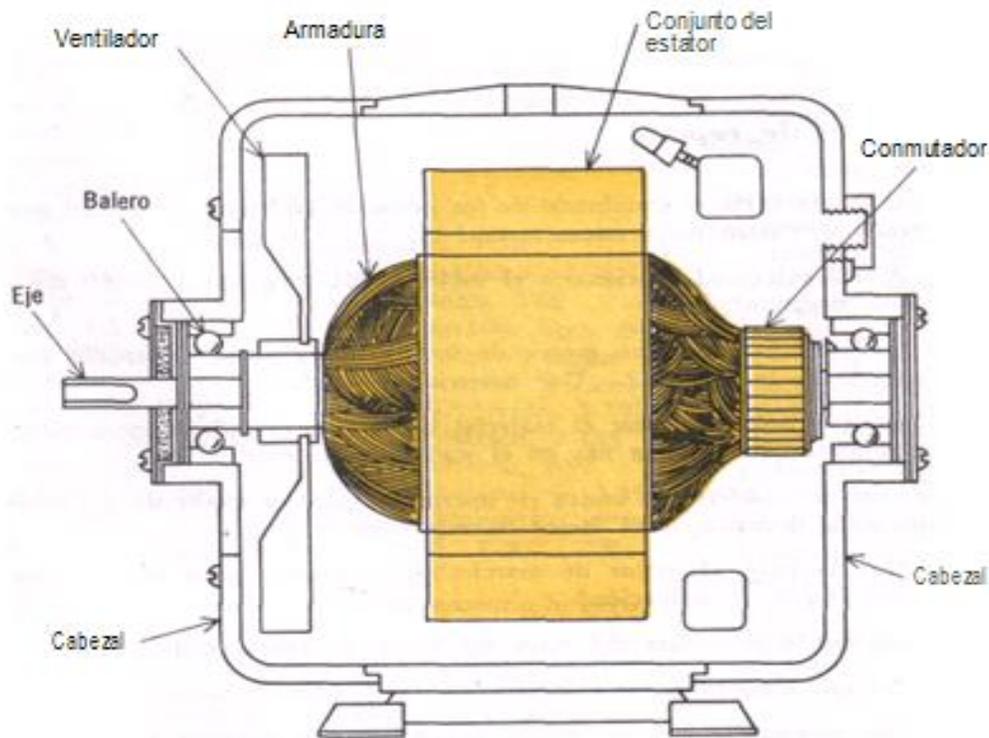


Figura 27. Motor universal.

Los motores universales grandes tienen algún tipo de compensación. Normalmente se trata del devanado compensador del motor de serie o un devanado de campo distribuido especialmente para contrarrestar los problemas de la reacción de armadura.

En un motor universal, el conmutador mantiene a la armadura girando a través del campo magnético del devanado de campo. También cambia el flujo de corriente con relación al devanado de campo y la armadura, es decir, cumple con una función de empujar y jalar. Esta acción de jalar y empujar está creada por los polos norte y sur de los devanados de campo y armadura, [14]

Cuando un motor de serie se opera con una fuente de c.d., la corriente es unidireccional en ambos devanados, de campo y de la armadura. Por tanto, el flujo

producido por cada polo y la dirección de la corriente en los conductores de la armadura bajo ese polo permanecen siempre en la misma dirección. Por ello, el par desarrollado por el motor es constante.

Cuando un motor de serie se conecta a una fuente de c.a., la corriente en el campo y en los devanados de la armadura invierte su dirección cada medio ciclo, como se muestra en la figura 28, para un motor serie bipolar.

Durante la mitad positiva del ciclo (figura. 28a), el flujo producido por el devanado del campo va de derecha a izquierda. Para la dirección marcada de la corriente en los conductores de la armadura, el motor desarrolla un par en sentido contrario al de las manecillas del reloj. Durante la mitad negativa del ciclo (figura 28b), el voltaje aplicado ha invertido su polaridad.

En consecuencia, la corriente ha invertido su dirección. Como resultado, el flujo producido por los polos está dirigido ahora de izquierda a derecha. Como la inversión de la corriente en los conductores de la armadura también está acompañada por la inversión de la dirección del flujo en el motor, la dirección del par desarrollado por el motor permanece sin cambio. Así, el motor continúa su giro en el sentido de las manecillas del reloj, [3].

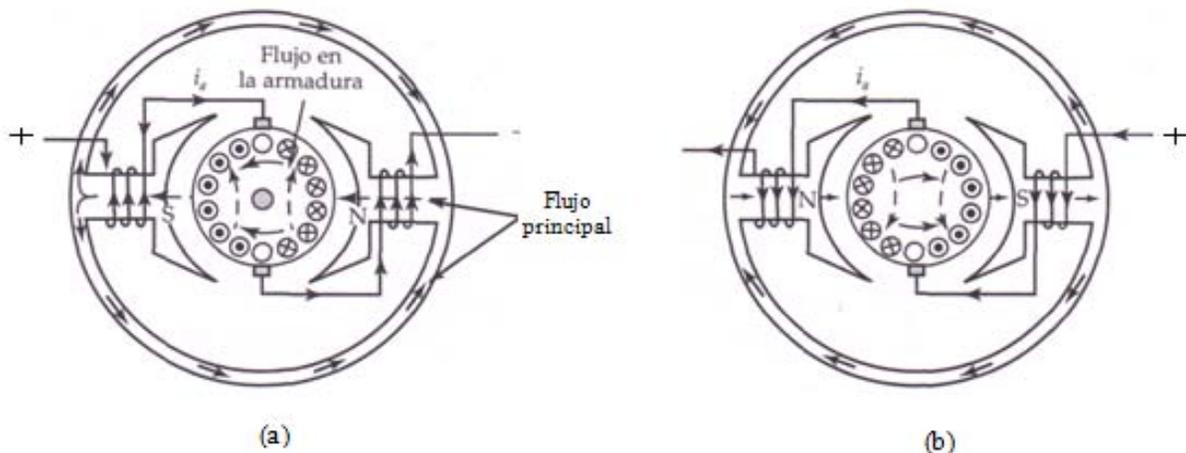
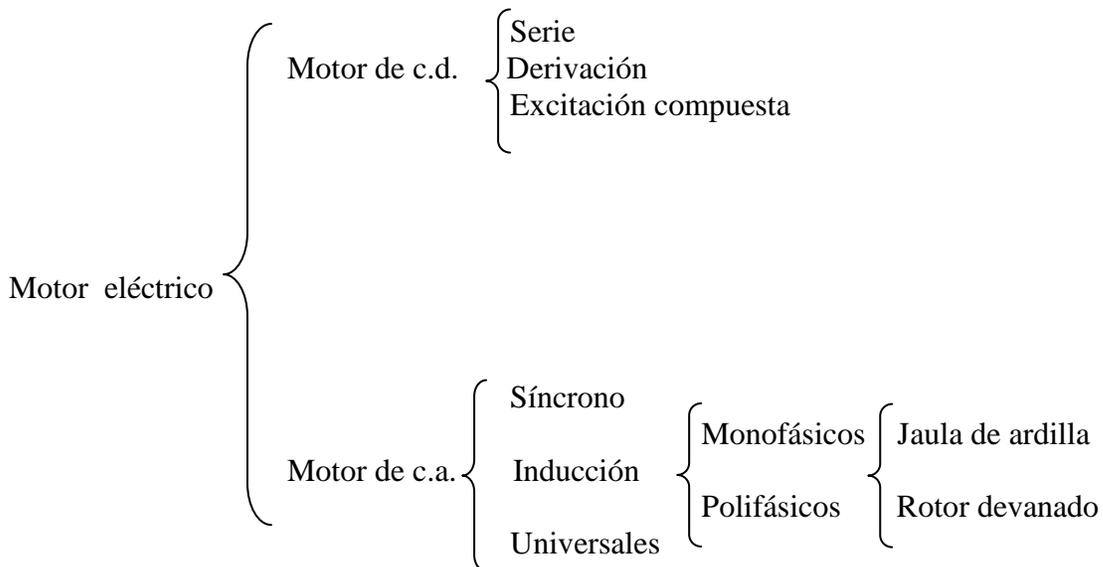


Figura 28. Direcciones de corriente y de flujo de un motor universal.

I.5.3. Esquema general de los motores eléctricos

De lo anteriormente expuesto, podemos aseverar que en la actualidad los motores más utilizados son los de inducción tanto monofásicos como polifásicos, debido a que estos se encuentran en más del 70% de las aplicaciones domésticas e industriales de accionamientos eléctricos.

Ahora bien, con base en el desarrollo teórico descrito anteriormente y con la finalidad de aportar un panorama general de los motores estudiados en el presente capítulo, se bosqueja a continuación la sistematización de los mismos, acto seguido, se desarrollará en el siguiente capítulo el diseño del sistema mecánico objeto del presente trabajo de tesis.



II. Proceso de diseño

En el presente capítulo se desarrollará una alternativa de solución para la problemática que presenta la reparación de motores eléctricos al sustituir el embobinado. Debido a que el diseño mecánico es la base teórica que lo sustenta, inicialmente se dará una descripción de lo que es el diseño y las etapas del mismo de manera general, para posteriormente desarrollar y aplicar de manera práctica las que así sean necesarias para obtener un prototipo funcional y dar solución a la problemática planteada.

Etimológicamente la palabra Diseño proviene del latín *designare* (designar, referente al signo, signar, señalar, señal, indicación gráfica de sentido o dirección) representada mediante cualquier medio y sobre cualquier soporte analógico, digital, virtual en dos o más dimensiones.

Como verbo, "diseñar" se refiere al proceso de creación y desarrollo para producir un nuevo objeto o medio de comunicación (máquina, producto, edificio, etc.) para uso humano. Como sustantivo, el diseño se refiere al plan final o proposición determinada, fruto del proceso de diseñar (dibujo, proyecto, maqueta, plano o descripción técnica), o (más popularmente) al resultado de llevar a la práctica el concepto ideado.

Así mismo, diseñar requiere principalmente consideraciones funcionales y estéticas. Por ello se requieren de numerosas fases de investigación, análisis, modelado, ajustes y adaptaciones previas a la producción definitiva del objeto. Además, comprende multitud de disciplinas y oficios dependiendo del objeto a diseñar y de la participación en el proceso de una o varias personas.

Por tal motivo al diseñar se tiene que realizar un proceso metodológico, estructurado, en donde de manera sistematizada se optimizan los recursos con que cuenta una organización, con el fin de transformar un conjunto de ideas y conocimientos en un sistema capaz de satisfacer una necesidad. El diseño puede

ser mecánico, eléctrico, electrónico ó una combinación multidisciplinaria de ellos, pero el objetivo siempre es el mismo, satisfacer una necesidad o dar solución a un problema.

Por lo tanto, el diseño mecánico es el diseño de objetos y sistemas de naturaleza mecánica: piezas, estructuras, mecanismos, máquinas y dispositivos e instrumentos diversos. En su mayor parte, el diseño mecánico hace uso de las matemáticas, las ciencias de los materiales y las ciencias mecánicas aplicadas a la ingeniería. Esto quiere decir que el diseño mecánico consiste en construir dispositivos que involucran fuerza y movimiento.

Es importante destacar que dichos dispositivos deben diseñarse con base en las normas y estándares vigentes, nacionales e internacionales. Debido a que son sistemas que transmiten movimiento, deben contar con rigidez, tener accesos seguros para los usuarios y un consumo mínimo de energía.

Lo anterior en cuanto a consideraciones generales, pero hoy en día, en diseño mecánico se deben considerar aspectos tan importantes como la calidad, estética e impacto ecológico, esto implica generar productos, procesos ó sistemas limpios y en la medida de lo posible minimizar los desechos, así como, fomentar la reutilización de elementos una vez que cumplieron su ciclo de vida, [8], [9], [11].

II.1. Factores del diseño

A veces la resistencia de un elemento es un asunto muy importante para determinar la configuración geométrica y las dimensiones que tendrá dicho elemento. En el de diseño tradicional se consideran principalmente aspectos de rigidez, funcionalidad y costo, dentro de éste ámbito es necesario realizar un análisis completo de los elementos mecánicos críticos para determinar los materiales a utilizar, dimensiones y características superficiales.

La expresión factor de diseño significa alguna característica o consideración que influye en el diseño de un elemento o quizás en todo el sistema. Por lo general se tienen que considerar diversos factores en un caso de diseño determinado. En ocasiones alguno de estos factores será crítico y, si se satisfacen sus condiciones, ya no será necesario considerar los demás.

La siguiente lista no pretende indicar todas las consideraciones de diseño que se tienen que realizar en el proyecto, pero puede ser una guía útil a considerar durante el desarrollo del proceso.

- | | |
|---------------------------|-----------------------------|
| 1. Resistencia. | 12. Ruido. |
| 2. Confiabilidad. | 13. Estilización. |
| 3. Condiciones térmicas. | 14. Forma. |
| 4. Corrosión. | 15. Tamaño. |
| 5. Desgaste. | 16. Flexibilidad. |
| 6. Fricción o rozamiento. | 17. Control. |
| 7. Procesamiento. | 18. Rigidez. |
| 8. Utilidad. | 19. Acabado de superficies. |
| 9. Costo. | 20. Lubricación. |
| 10. Seguridad. | 21. Mantenimiento. |
| 11. Peso. | 22. Volumen. |

Alguno de estos factores se refiere directamente a las dimensiones, al material, al proceso de fabricación, o bien, a la unión o ensamble de los elementos del sistema; otros se relacionan con la configuración total del sistema.

A continuación se muestran algunas consideraciones relevantes en las que se pueden resumir los factores de diseño tomando en cuenta los más significativos.

II.1.1. Consideraciones económicas

Sin duda alguna las consideraciones económicas son las que tienen mayor relevancia al momento de diseñar, ya que el factor de diseño está intrínsecamente involucrado con los costos de fabricación y adquisición de materia prima. Para su mejor comprensión únicamente se presentarán algunos enfoques sencillos y reglas generales.

En primer lugar, debe notarse que no se puede decir nada absoluto en lo que respecta a los costos. El costo de los materiales y de la mano de obra se incrementa generalmente año con año. Sin embargo, es de esperar que los costos de procesamiento de materiales manifiesten una tendencia a bajar debido al uso de máquinas-herramientas automatizadas. El costo de fabricar un mismo producto varía de una ciudad a otra y de una planta a otra, debido a las diferencias que hay en gastos generales, de mano de obra, ajustes por fletes y ligeras variaciones por manufactura.

II.1.2. Selección de elementos comerciales

No todos los elementos que se integran en una máquina deben diseñarse, existen empresas dedicadas a fabricar elementos “comerciales”, es decir, cuentan con piezas en tamaños estándar de rodamientos, tornillos, cadenas de rodillos, engranes, ventiladores, baterías, circuitos electrónicos, impresoras, reductores de velocidad y motores eléctricos. Estos últimos de gran importancia en el diseño, ya que en muchas máquinas el movimiento rotativo es constante.

Por ello, el ingeniero de diseño debe conocer los elementos comerciales que existen en el mercado, y evaluar la posibilidad de integrarlos a su diseño. Compara los datos del fabricante como materiales, resistencia, dimensiones, peso y con esto realizar la selección de los mismos.

II.1.2.1. Manejo de tamaños estándares

Este es un principio básico para reducir los costos. Por ejemplo, se requiriera una barra G10350 de acero laminado en caliente y de sección cuadrada de $2\frac{1}{8}$ " (53.9mm) de lado, al cual suele llamarse "cuadrado laminado en caliente" incrementaría el costo del producto siempre si no hubiera cuadrados estándares de 2" (50.8mm) o de $2\frac{1}{4}$ " (57.1mm) que sirvieran también como uno de $2\frac{1}{8}$ " debido a que los cuadrados de esta última medida sólo se pueden adquirir sobre pedido especial o bien laminando o maquinando una barra especial, procedimientos que encarecerían el producto. Cabe mencionar que en los sistemas métricos se emplean medidas en milímetros.

Para tener la seguridad de que se especifiquen tamaños estándares, el ingeniero de diseño debe tener conocimiento de las listas de existencias de los materiales a emplear. Tales listas se pueden consultar en bibliotecas u otros centros de información, o bien, adquirir directamente con los abastecedores o proveedores.

Por otro lado, en el diseño se especifican muchas piezas o máquinas que deben comprarse, como por ejemplo, motores, bombas, cojinetes y sujetadores. En este caso el diseñador tiene que especificar elementos que se puedan conseguir fácilmente. Recordemos que los elementos que se fabrican o venden en grandes cantidades tienen un costo menor, en comparación con los que tienen tamaños poco comunes.

II.1.2.2. Utilización de tolerancias

Entre los efectos que tienen las especificaciones de diseño sobre los costos, los de las tolerancias son las más significativas, debido a que influyen directamente en la rentabilidad del producto final, por ejemplo; se pueden necesitar pasos adicionales en el proceso, los cuales hagan que la fabricación de una pieza sea

totalmente incosteable. El término tolerancia abarca tanto la variación de las dimensiones y los límites para la aspereza de las superficies, como la variación de las propiedades mecánicas producidas por tratamientos térmicos u otras operaciones de procesado.

Muchas de las piezas que tienen amplias tolerancias se pueden producir con máquinas de alto rendimiento o alto volumen de producción. Además, el costo de la mano de obra será menor, ya que no se requiere emplear a operarios muy calificados si se desean piezas con altos grados de tolerancia. Así mismo, serán pocas las piezas de este tipo que se rechacen durante el proceso de inspección y por lo general, será más fácil montarlas o ensamblarlas.

II.1.2.3. Puntos de equilibrio

Es muy común que cuando se compara el costo de dos o más diseños, el criterio para elegir uno de ellos, dependerá de otras condiciones como son: volumen de producción, velocidad de las líneas de ensamble o alguna otra. De esta manera se llega a un punto donde se igualan o equilibran los costos, el cual recibe el nombre de punto de equilibrio.

II.1.2.4. Estimaciones de costo

Hay muchas maneras de obtener valores relativos de los costos, de modo que se puede hacer una comparación aproximada entre uno o más diseños; sin embargo, en algunos casos se necesitan bastantes criterios. Una forma de comparar el costo de un diseño con el de otro sería, simplemente, contar el número de piezas, pues es probable que cueste menos el que tenga menos cantidad de partes.

Se pueden utilizar otros estimadores de costos, según se requiera en cada cotización, como área, volumen, potencia, momento o par de torsión, capacidad, velocidad y diversas relaciones o coeficientes de funcionamiento.

II.2. Ingeniería de diseño

La ingeniería de diseño se ha definido como “el proceso de aplicar diversas técnicas y principios científicos con el objeto de definir un dispositivo, un proceso o un sistema enormemente complejo, fácil o difícil, matemático o no matemático, y puede implicar un problema trivial o uno de gran importancia”, [11]. El diseño es un componente universal en la práctica de la ingeniería. Sin embargo, la complejidad de las cuestiones de ingeniería generalmente requiere que el estudiante disponga de un conjunto de problemas bien estructurados, diseñados para aclarar uno o varios conceptos particulares que se relacionan con un tema específico.

Por desgracia, los problemas de ingeniería de la vida real casi nunca están estructurados así. Por tales motivos al diseñar es conveniente desarrollar un proceso de diseño, El cual se puede considerar como una guía de las etapas por cumplir con un cierto grado de flexibilidad para la solución de problemas de ingeniería. Debido a que los diseñadores emplean un gran número de combinaciones de etapas y ninguna garantiza ser la mejor, el cumplir estrictamente un proceso de diseño no asegura una solución exitosa. Pero si, un orden en las ideas y en el manejo de la información.

Con base en el planteamiento anterior, en la tabla 1 se propone un orden de pasos del proceso de diseño, describiéndose a continuación cada uno de ellos.

Proceso de diseño
1.- Identificación de la necesidad.
2.- Investigación preliminar.
3.- Definición del problema.
4.- Especificaciones de funcionamiento.
5.- Configuración.
6.- Conceptualización.
7.- Diseño detallado.
8.- Prototipo y pruebas.

Tabla 1. Pasos a seguir en el proceso del diseño.

1. Identificación de la necesidad

Este primer paso con frecuencia lo realiza alguien más, el encargado directo o un cliente “Lo que se necesita es...” En general este enunciado será breve y carente de detalles. Estará muy lejos de proporcionarle un enunciado de problema estructurado.

Comúnmente, el diseño comienza cuando un ingeniero se da cuenta de que existe una necesidad y decide hacer algo al respecto. Cabe mencionar, que identificar una necesidad y expresarla en determinado número de palabras, es una actividad sumamente creativa, pues la necesidad puede manifestarse simplemente como un vago descontento, o bien, por la intuición de una dificultad o en la sensación de que algo no está bien.

Por lo general, las necesidades se identifican a partir de una circunstancia adversa o bien de una serie de circunstancias fortuitas que surgen casi al mismo tiempo. Además, es obvio que si una persona es sensible y percibe fácilmente las cosas, entonces es más probable que identifique una necesidad y haga algo al respecto. Por esta razón, las personas sensibles son las más creativas.

Como ya se ha indicado, generalmente la necesidad no es evidente. Una necesidad se identifica fácilmente después de que alguien la ha planteado.

2. Investigación preliminar

Ésta es la fase más importante en el proceso y desafortunadamente suele desdeñarse, ya que la investigación en este caso se realiza para reunir información preliminar acerca de datos de física, química o de otros aspectos relevantes del problema.

Asimismo, es conveniente hallar si éste, o un problema similar, se han resuelto antes. No se necesita “reinventar la rueda”, con suerte ya está en el mercado la solución, y sin duda será más económico comprarla que elaborar una propia. Sin embargo en esta etapa, se puede aprender mucho acerca del problema por resolver cuando se investiga la existencia del arte asociado a tecnologías y productos similares.

La información sobre patentes y las publicaciones técnicas en el área son fuentes de información y es posible tener acceso a ellas por medio de Internet. Es claro que si se halla la solución y ésta amparada por una patente aún en vigencia, se tendrá pocas opciones éticas: adquirir la solución patentada, diseñar algo que no entre en conflicto con la patente, o bien, abandonar el proyecto. Es muy importante que se dediquen la energía y el tiempo suficientes a esta fase de

investigación y preparación del proceso, con el fin de evitar tropiezos al elaborar una solución grandiosa para un problema equivocado.

3. Definición del problema

Una vez que se comprende el funcionamiento del área del problema como originalmente se estableció, se estará listo para expresar de nuevo ese problema en un planteamiento de meta más coherente. Esta nueva especificación del problema debe tener tres características. Ser concisa, general y no estar matizada por términos que pronostiquen una solución. Debe ser esbozada, con base a una visualización funcional, lo que significa concebir su función, más que señalar cualquier incorporación particular.

El planteamiento de la meta debe abarcar también todas las condiciones para el objeto que se va a diseñar. Tales condiciones son las cantidades de entrada y de salida, las características y dimensiones del espacio que deberá ocupar el objeto, y todas las limitaciones a estas cantidades. Se puede considerar al objeto como algo colocado en una caja negra, invisible desde fuera. En este caso se tiene que determinar lo que entrará y lo que saldrá de dicha caja, así como sus características y limitaciones.

4. Especificaciones de funcionamiento

Cuando se comprende el funcionamiento, y las metas se establecen claramente, se está listo para formular un conjunto de especificaciones de funcionamiento. Esto no debe incluir especificaciones de diseño. La diferencia es que las especificaciones de funcionamiento definen lo que el sistema debe hacer, en tanto que las especificaciones de diseño definen como debe hacerse. En esta etapa del

proceso de diseño no es prudente determinar el objetivo específico. Éste se define en la fase de conceptualización.

Por ello, el propósito de las especificaciones de funcionamiento es definir y restringir cuidadosamente el problema, de modo que se pueda resolver y mostrar que se ha resuelto, después de tal hecho.

Asimismo, las especificaciones definen el costo, la cantidad de piezas a fabricar, la duración esperada, el intervalo o variedad de capacidades, la temperatura de trabajo y la confiabilidad. Entre dichas condiciones sobresalen las velocidades necesarias, las intensidades de alimentación, las limitaciones de temperatura, el alcance máximo, las variaciones esperadas en las variables y las restricciones en tamaño y peso.

Existen muchas condiciones intrínsecas que dependen del ambiente particular del diseñador o de la propia naturaleza del problema. Los procesos de fabricación de que se disponen y las instalaciones de cierta planta industrial son restricciones a la libertad de acción del que diseña; por lo tanto, forman parte de las condiciones intrínsecas. Por ejemplo, una fábrica pequeña tal vez no tenga maquinaria para trabajar metales en frío. Sabiendo esto, el diseñador seleccionará otro método de fabricación que se pueda aplicar en la planta. La habilidad y calificación del personal disponible y la situación competitiva son también condiciones o especificaciones inherentes.

Todo lo que limite la libertad de selección del diseñador es una condición o especificación. Por ejemplo, en los catálogos, los fabricantes listan muchos materiales y tamaños de productos, pero muchas veces no pueden surtirlos todos y frecuentemente hay escasez de alguno. Además la economía de inventario requiere que el fabricante tenga en existencia una cantidad mínima de materiales y producto a sustituir, [9].

5. Diseño de configuración

Este paso entraña diversión y frustración. Esta fase es, potencialmente, la más satisfactoria para la mayoría de los diseñadores, pero también la más difícil, donde la creatividad (característica por excelencia de los seres humanos) es la base fundamental para llevar a cabo su desarrollo, [10].

Esta etapa del diseño lleva consigo lo que se llama, proceso creativo, el cual ha desarrollado muchas técnicas para acentuar o inspirar la resolución creativa de problemas.

La generación de ideas, es la etapa más difícil. Incluso personas muy creativas tienen dificultad en la invención "sobre pedido". Se han sugerido muchas técnicas para mejorar la producción de ideas, y la más importante es la del juicio diferido, lo que significa que el espíritu crítico de uno debe anularse temporalmente. La meta aquí es obtener la mayor cantidad posible de diseños potenciales. Aun sugerencias en apariencia ridículas deben ser bienvenidas, ya que pueden hacer surgir nuevas perspectivas y proponer otras soluciones más prácticas y realistas.

Una técnica de gran éxito en la generación de soluciones creativas es la lluvia de ideas. En este método se necesita un grupo de personas, de preferencia entre 6 y 15, y se trata de evitar la más grande barrera a la creatividad que es el miedo al ridículo. En un grupo la mayoría de las personas no manifestarán sus verdaderos pensamientos acerca de una materia por temor a la burla.

Cuando se trabaja solo se requiere utilizar otras técnicas, por ejemplo, las analogías y la inversión con frecuencia son útiles, un problema mecánico se puede convertir en uno hidráulico o eléctrico. La inversión pone de manifiesto otro enfoque de resolución.

6. Conceptualización

Una vez que se llega a esta etapa se tendrá estructurado el problema, por lo menos temporalmente, aunque se podrán aplicar técnicas de análisis más refinadas para examinar la realización del diseño en la fase de análisis del proceso respectivo. Cabe destacar que se requerirá mayor iteración a medida que se descubran problemas a partir del análisis.

Cuando el análisis técnico indica que hay algunos diseños potencialmente viables, se debe seleccionar el óptimo disponible para el diseño detallado, el prototipo y las pruebas. Este proceso de selección generalmente incluye un análisis comparativo de las soluciones de diseño disponibles. A veces una matriz de decisión ayuda a identificar la mejor solución y obliga a considerar una variedad de factores en forma sistemática como el costo, la facilidad de uso, la eficiencia, el funcionamiento, la confiabilidad y otras que se juzguen apropiadas para el problema en particular.

7. Diseño detallado

Este paso por lo general incluye la creación de un conjunto completo de dibujos de ensamblaje y de detalle, o de archivos de partes mediante el diseño asistido por computadora (CAD), para todas y cada una de las partes empleadas en el diseño. Cabe destacar que en esta etapa se efectúa la memoria de cálculo para cada uno de los componentes. Asimismo cada dibujo de detalle debe especificar todas las dimensiones y especificaciones de material necesario para elaborar esa pieza o parte. A partir de esos dibujos (o archivos de CAD) debe construirse un modelo de prueba (o varios modelos) para someterlo a pruebas físicas. Es muy probable que las pruebas revelen más defectos y se requiera realizar una mayor cantidad de iteraciones.

8. Prototipos y pruebas

El prototipo es un modelo o versión inicial de un producto, previsto para probar y desarrollar el diseño. Antes de invertir en el equipo necesario para fabricar en serie un producto, el fabricante debe estar convencido de que el diseño es seguro y fiable. Los diseñadores e ingenieros emplean prototipos para conseguirlo.

Los prototipos pueden ser muy sencillos, con sólo unos pocos componentes. Un ejemplo sería un prototipo para averiguar la velocidad de giro de una cuchilla de una cortacésped cuando es impulsada por un motor eléctrico determinado donde, solo sería necesario un motor, una cuchilla y una fuente de alimentación para obtener dicho dato.

A medida que el diseño avanza, los prototipos se hacen más complicados. Al aumentar gradualmente la complejidad del prototipo se pueden identificar y corregir posibles problemas del diseño.

En la última fase del proceso de diseño, los prototipos son muy parecidos al producto final. La principal diferencia es que no se fabrican con los medios de producción en serie que se emplearán en el producto final, ya que por lo general se construyen con partes de producción ideal, con la misma propiedad de material y geometría con que se tiene pensado que será en la versión de producción pero no necesariamente fabricadas con los procesos reales que se utilizarán en la manufactura, ya que dichos medios aún no existen.

El papel fundamental de un prototipo es reducir el riesgo de errores de diseño. Con los prototipos, los fabricantes pueden adquirir confianza en sus diseños y justificar la inversión necesaria para su producción en serie. Porque finalmente, no se puede estar seguro de la corrección o viabilidad de un diseño hasta que no sea construido y probado. Un modelo matemático, aunque es muy útil, no puede ser una representación tan completa y segura como un modelo físico, debido a la necesidad de efectuar hipótesis simplificadoras.

Los prototipos con frecuencia son muy costosos, pero aun así son la forma más económica de probar un diseño y no tener que construir un dispositivo real, a escala natural. Los prototipos pueden tomar muchas formas, desde modelos a escala de trabajo hasta representaciones del concepto, de tamaño natural pero simplificado. Los modelos a escala introducen sus propias complicaciones respecto a las tolerancias dimensionales respecto a los parámetros físicos.

Las pruebas que se le realizan al prototipo son de mucha importancia ya que por medio de estas se pueden eliminar peligros, costos y conflictos provenientes de encontrar errores en el diseño después de fabricar grandes cantidades de artículos defectuosos.

Con bastante tiempo, dinero y perseverancia, el diseño estará listo para la producción. Ésta podría consistir en la manufactura de una sola versión final del diseño, pero probablemente significará hacer miles o incluso millones de versiones de un solo diseño. Aunque antes se puede implementar una producción piloto, para prevenir algunas complicaciones que pudieran surgir en la producción final, [7].

II.3. Diseño de la máquina embobinadora

Con base en la metodología descrita en la ingeniería del diseño se desarrollará el prototipo de la máquina embobinadora para motores eléctricos, considerando las etapas del proceso de diseño, figura 29.

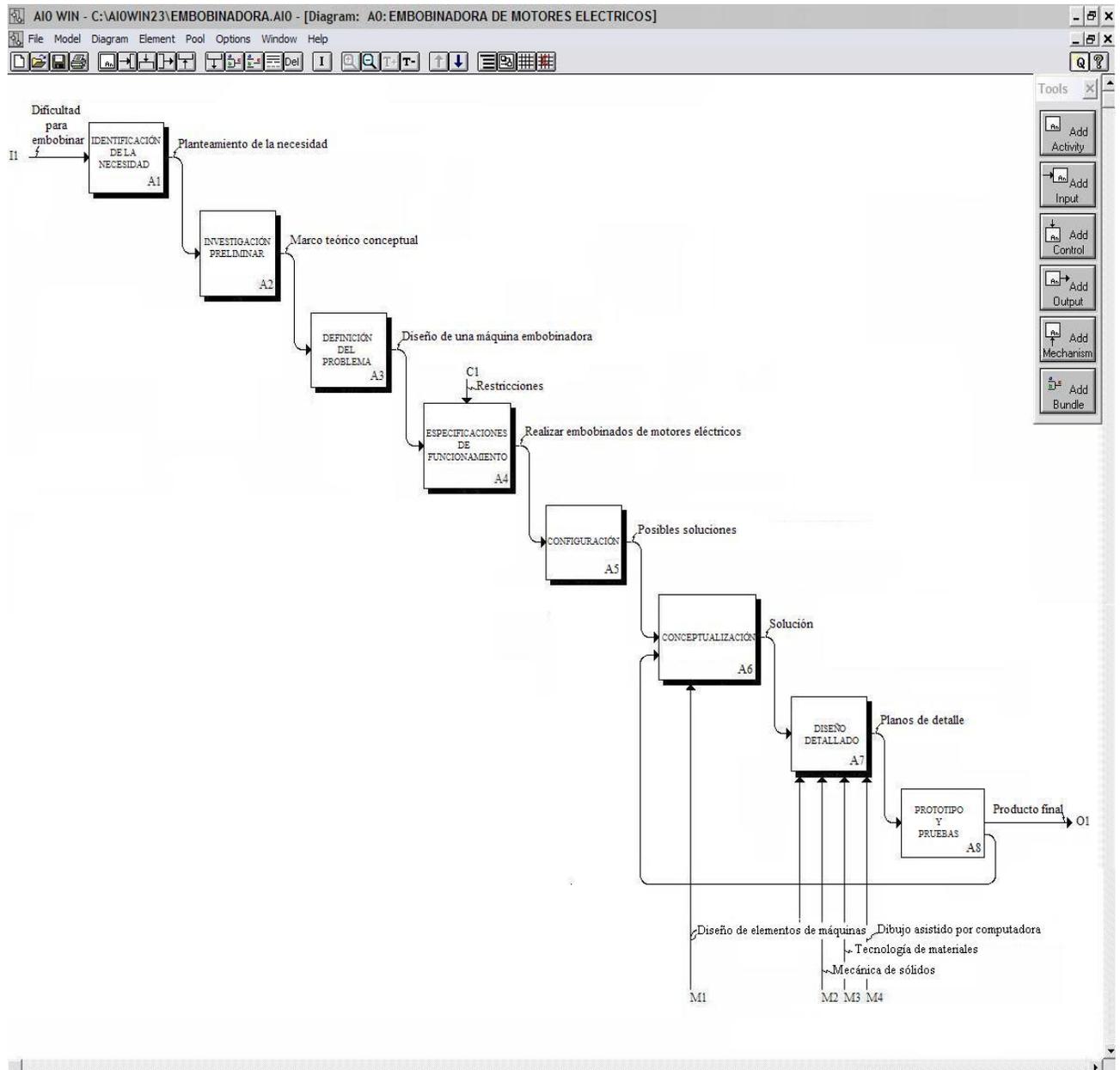


Figura 29. Modelo IDF0 del proceso del diseño.

II.3.1. Identificación de la necesidad

El presente trabajo de investigación, tiene como finalidad primordial resolver la problemática que se presenta en diferentes empresas del Estado de México al efectuar la reparación del embobinado de motores, mediante el diseño de una máquina - herramienta fundamental que permitirá realizar el proceso de embobinado de motores, cubriendo las características básicas del mismo, con un fácil manejo, un incremento en su productividad y mayor calidad a un bajo costo.

II.3.2. Investigación preliminar

Con base en encuestas de mercado que se realizaron en el Estado de México, la reparación de motores no se efectúa a niveles de procesos industriales, dado que las compañías que se encargan de fabricarlos, no tienen centros de reparación, ya que para ellas la producción y venta en grandes volúmenes es más factible que ofrecer una reparación especializada.

Debido a esto, los consumidores de motores se encuentran en la disyuntiva de sustituirlos o repararlos, con la gran desventaja que una sustitución produce un costo elevado, lo que los ha obligado a buscar medios alternos como es la reparación. Esto trajo consigo la aparición de talleres técnicos independientes que se dedican a la reparación de motores eléctricos.

Cabe mencionar, que estas empresas han creado procesos alternos que satisfacen necesidades específicas, ya sea utilizando moldes, creando puntos de sujeción y procesos rudimentarios, que en determinados casos cumplen con los requerimientos planteados, y en otros con deficiencias tangibles, debido a que el devanado o embobinado es el elemento más crítico de la reparación, porque requiere de herramental especializado.

En realidad sí existen máquinas - herramientas que satisfacen el proceso de embobinado en el mercado nacional o internacional, pero el inconveniente es que estas presentan un costo tan elevado, que resultan inviables para que puedan ser adquiridas por estas empresas.

En general el costo aproximado de una maquinaria para procesos de embobinado, la mayoría de ellas de control numérico (CNC), oscila entre \$90,000 y \$150,000 pesos moneda nacional; con la peculiaridad de que requieren de una capacitación especializada para su manejo y operación.

II.3.3. Definición del problema

Debido a que los empresarios no cuentan con una máquina – herramienta apropiada para poder realizar las operaciones de embobinado de motores, por su elevado costo y operación especializada, se plantea una alternativa de solución para esta deficiencia, el diseño de una máquina embobinadora para motores eléctricos, que simplifique las operaciones del proceso de embobinado, para poder brindar un servicio de calidad a sus clientes.

II.3.4. Especificaciones de funcionamiento

Para poder establecer las especificaciones de funcionamiento es necesario identificar las necesidades de los empresarios dedicados a este ramo tecnológico, se realizó un cuestionario para poder conceptualizar y delimitar el diseño. A continuación se muestran las preguntas primordiales que permitieron desglosar un panorama general.

1. ¿Cuenta con una máquina embobinadora?
2. ¿Qué tipo de embobinado se realiza?

3. ¿En cuanto tiempo efectúa un embobinado?
4. ¿Cuántos embobinados realiza en un mes?
5. ¿Cuánto personal requiere para realizar un embobinado?
6. ¿Qué factores limitan su proceso?
7. ¿Para llevar acabo el embobinado cuenta con área específica?
8. ¿De que espacio dispone para una máquina embobinadora?
9. ¿Cómo le gustaría que fuera el funcionamiento?
10. ¿Cuánto esta dispuesto a pagar por una máquina embobinadora?

Con base en las respuestas obtenidas se realizó una lista de los requerimientos. Debido a que algunos de ellos no son muy claros y no indican de manera específica las características necesarias de la máquina embobinadora, se efectuó la conversión de lo que se desea en parámetros que pueden ser analizados, determinando así, las especificaciones iniciales:

1. Tiene que realizar bobinas de dimensiones variables con un perímetro mínimo de 10 cm. y un máximo de un 1m.
2. Que la extracción de las bobinas no cause conflictos.
3. Que no sea necesario ajustar dimensiones cada vez que se inicie un nuevo grupo de bobinas.
4. Que su sistema de operación sea sencillo.
5. Que no contenga controladores electrónicos.
6. Que no sea ruidoso.
7. Que la máquina cuente con un sistema de seguridad.
8. Que el costo de mantenimiento sea el mínimo requerido.
9. El costo de inversión debe ser menor a \$15,000.00 00/100 MN.

Después de realizada esta actividad se obtuvo una lista de necesidades sin un orden, es decir, sin especificar la importancia de cada una de ellas en relación con las demás.

Considerando la siguiente escala y según las necesidades, se realizó la tabla 2 de relación de importancia.

- 1 – Mucha importancia
- 2 – Mediana importancia
- 3 – Poca importancia

Necesidad	Relación de importancia
Tiene que realizar bobinas de dimensiones variables con un perímetro mínimo de 10 cm y un máximo de un 1m.	1
Que la extracción de las bobinas no cause conflictos.	1
Que no sea necesario ajustar dimensiones cada vez que se inicie un nuevo grupo de bobinas.	1
Que su sistema de operación sea sencillo.	1
Que no contenga controladores electrónicos.	2
Que no sea ruidoso.	3
Que la máquina cuente con un sistema de seguridad.	1
Que el costo de mantenimiento sea el mínimo requerido.	2
El costo de inversión debe ser menor a \$15,000.00 00/100 MN.	1

Tabla 2. Relación de importancia.

Una vez obtenida la lista de necesidades con su respectivo orden de importancia, se llevo a cabo la identificación de las funciones que debe cumplir el diseño.

Con ayuda de la técnica conocida como caja negra se identificó la función principal que debe realizar la máquina, para satisfacer las necesidades y así saber que dispositivos o sistemas se tienen que diseñar, figura 30.

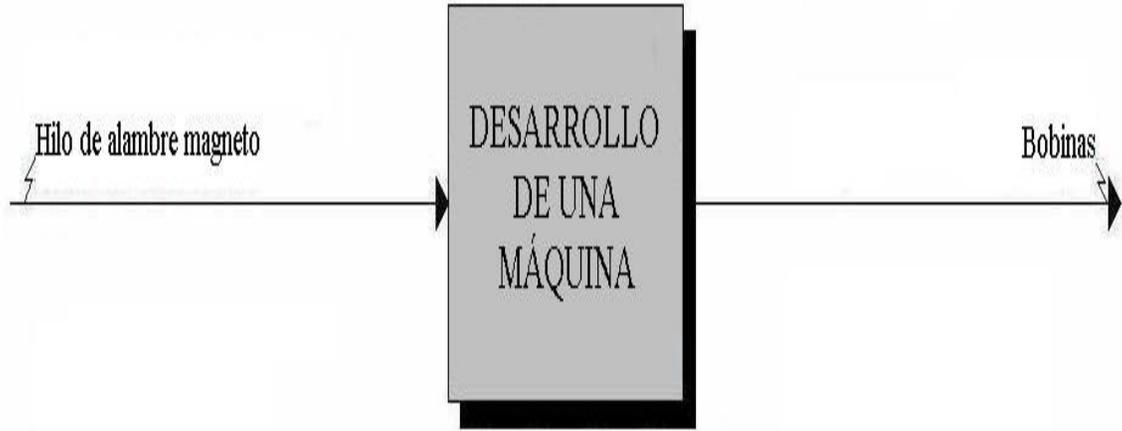


Figura 30. Caja negra.

II.3.4.1. Especificaciones iniciales

Ya determinadas las necesidades se prosiguió a establecer las especificaciones iniciales, las cuales nos indicarán los resultados que se desean conseguir para poder desarrollar el diseño.

Debido a que las especificaciones tendrán que cubrir cada necesidad con un parámetro analizable o medible específico, a continuación se identifican y delimitan los aspectos más relevantes de la estructura y de los mecanismos a desarrollar, tabla 3.

N	Especificación	Unidades	Rangos
1	Altura máxima	cm	100-150
2	Ancho	cm	50-70
3	Largo	cm	50-70
4	Masa por bobina	kg	1-10
5	Perímetro de bobina	cm	10-100
6	Precio	\$	15,000.00
7	Resistente		

Tabla 3. Especificaciones iniciales de la máquina.

Con base en las necesidades trazadas, así como, en las especificaciones delimitantes, se plantean a continuación las alternativas de solución, lo que da la pauta para la siguiente etapa del proceso del diseño.

II.3.5. Diseño de configuración

Definido el problema y con base en el principio de operación que realizan los empresarios para el embobinado de motores, se plantea un mecanismo que aloje el hilo de alambre magneto, para dar forma a las bobinas que dan origen al electro imán de los motores eléctricos, el cual cuenta con puntos de sujeción que rotarán a partir de uno fijo o un centro, rotación que es proporcionada por un motor eléctrico que brinda una velocidad adecuada, que a su vez estará cimentado en una estructura que de sustento a ambos sistemas.

Es importante mencionar que todo este conjunto debe estar respaldado con un sistema de control adecuado, para que el proceso se efectúe confiablemente, sin afectar la seguridad del operario.

Analizando la tabla anterior de relación de importancia, se puede observar que el sistema medular de esta máquina es la parte que dará alojamiento a las bobinas, al cual denominaremos cabezal.

Cabe destacar que dicho sistema estará destinado a la realización de embobinados de motores en su mayoría de inducción, específicamente para motores trifásicos, no obstante puede emplearse para motores monofásicos, realizando un arreglo en el acomodo de su embobinado, siempre y cuando su geometría lo permita.

Asimismo también dará la pauta para estructurar los componentes complementarios que contendrá la máquina. Por ello a continuación se plantearán las diferentes alternativas de solución para el cabezal.

II.3.5.1. Diseño del cabezal

Para cubrir la necesidad de dar forma a las bobinas de alambre magneto, se plantean dos alternativas de solución que satisfacen los requerimientos y especificaciones planteadas anteriormente.

Propuesta A:

Se propone un sistema tubular (peine), el cual contiene pequeñas salientes que darán cabida a las bobinas de alambre y que se tendrá que atornillar a otro elemento, para poder situarse a la distancia requerida por el operario, mediante una barra ranurada. Con esto tendremos una parte fija que proporcionará el diámetro de la bobina y otra, que con base en un encordado le dará la movilidad para colocarse en posición de operación y así mismo con un giro liberar los hilos de alambre conductor. Este sistema se muestra en la figura 31, 32 y 33.

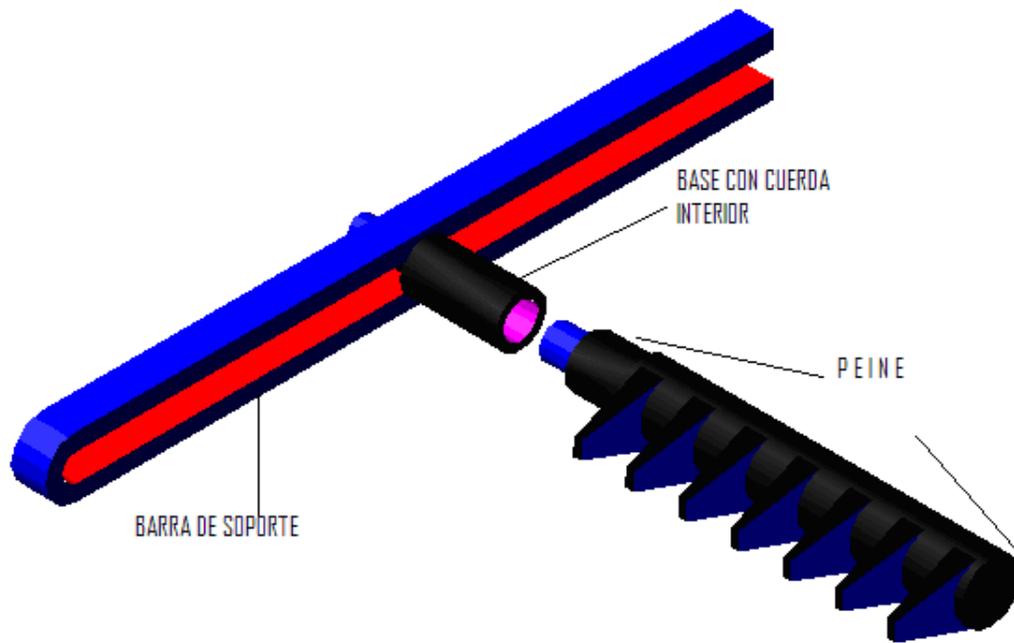


Figura 31. Sistema de liberación por cuerda.

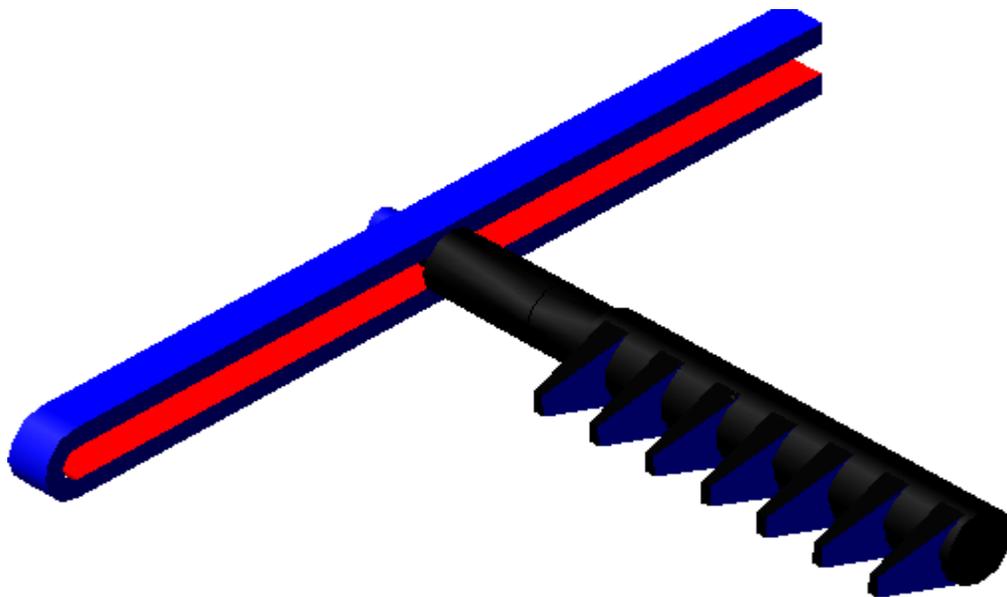


Figura 32. Posición para operación de embobinado con cuerda hasta el tope.

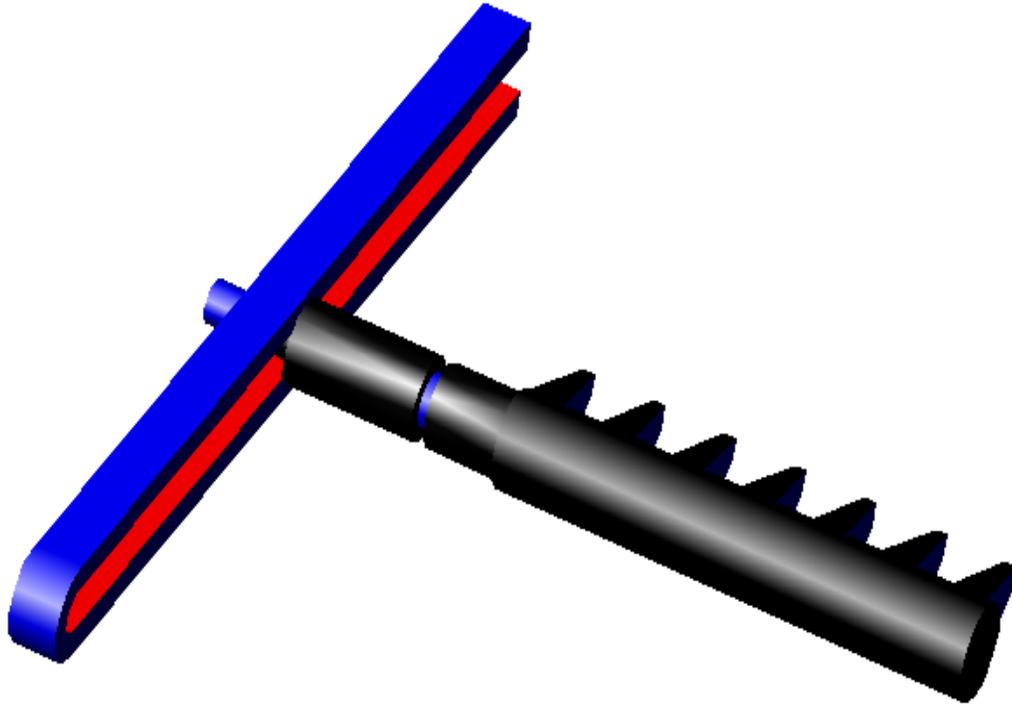


Figura 33. Posición para la extracción del embobinado con la cuerda libre.

Propuesta B:

Por otro parte se propone un sistema B que tiene un principio similar al anterior, con la variación de que éste tendrá una entrada especial que proporcionará al peine (elemento donde se contendrán las bobinas) solo dos posiciones (operación y extracción), dichas posiciones se mantendrán fijas por medio de un seguro como se muestra en las figuras 34, 35 y 36.

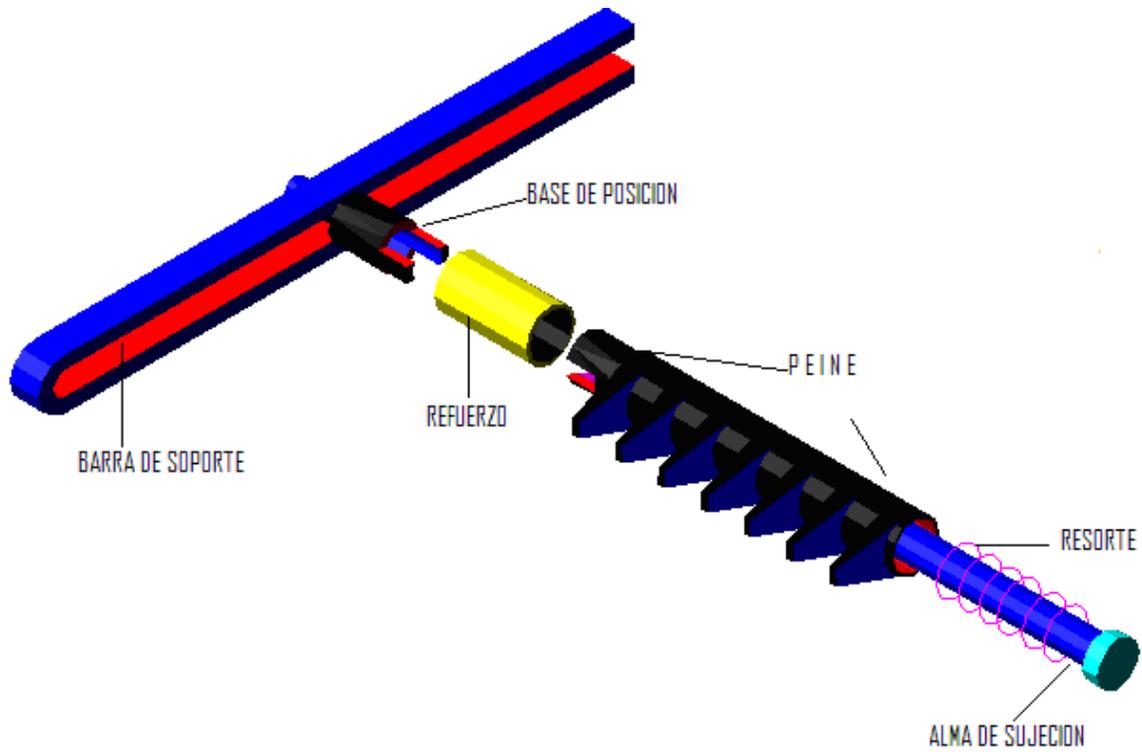


Figura 34. Sistema de liberación por posición.

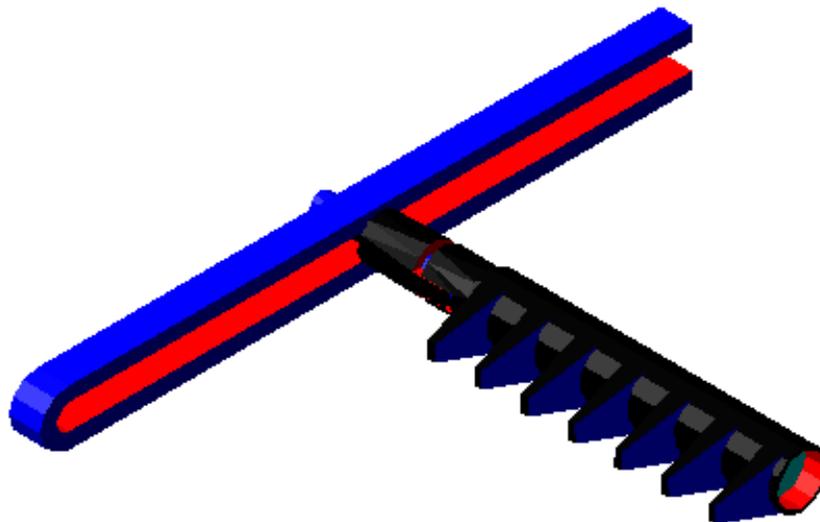


Figura 35. Sistema de liberación por posición, en posición de operación

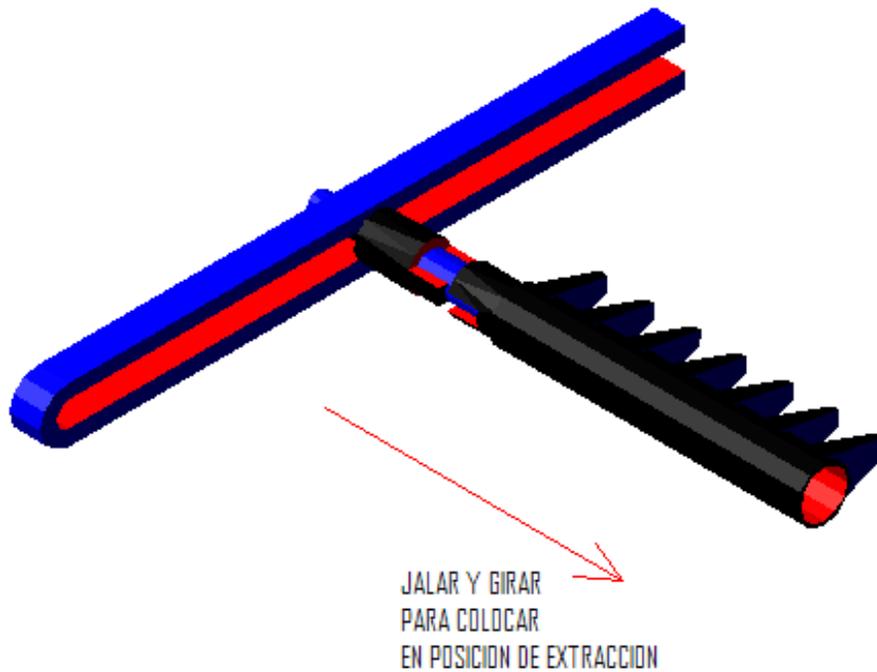


Figura 36. Sistema de liberación, en posición de extracción.

Una vez determinados los dos sistemas que permiten efectuar el proceso de embobinado, se evaluarán sus características dentro de las etapas del proceso del diseño, para elegir el más adecuado.

II.3.6. Conceptualización

En esta etapa se evaluará el grado de factibilidad de los sistemas propuestos, tanto operativo, como técnico y económico, así como el estudio de los materiales para determinar la mejor opción que cubra el mayor número de características de acuerdo a las restricciones, necesidades y especificaciones que se han planteado.

II.3.6.1. Evaluación de los sistemas

La tabla 4 muestra la matriz de decisión donde se determinó la solución más adecuada de diseño, misma que se analizó con base en las especificaciones iniciales más importantes, empleando la siguiente escala.

- + Buena
- + - Regular
- Mala

Criterios de selección	Solución A	Solución B
Altura máxima	+	+
Ancho	+	+
Largo	+	+
Masa por bobina	+	+
Desmante	-	+
Hilado preciso	-	+
Perímetro de bobina	+	+
Precio	+	+ -
Resistente	+ -	+
Resultado	6 + 1 + - 2 -	8 + 1 + - 0 -

Tabla 4. Matriz de decisiones de la máquina.

Con los datos arrojados por el muestreo anterior, se determinó que la opción B cumple con menos deficiencias, los requerimientos planteados, por ello, se elige como solución para el sistema que alojará el hilo conductor, al cual se denominó cabezal, parte medular de la máquina, figura 37.

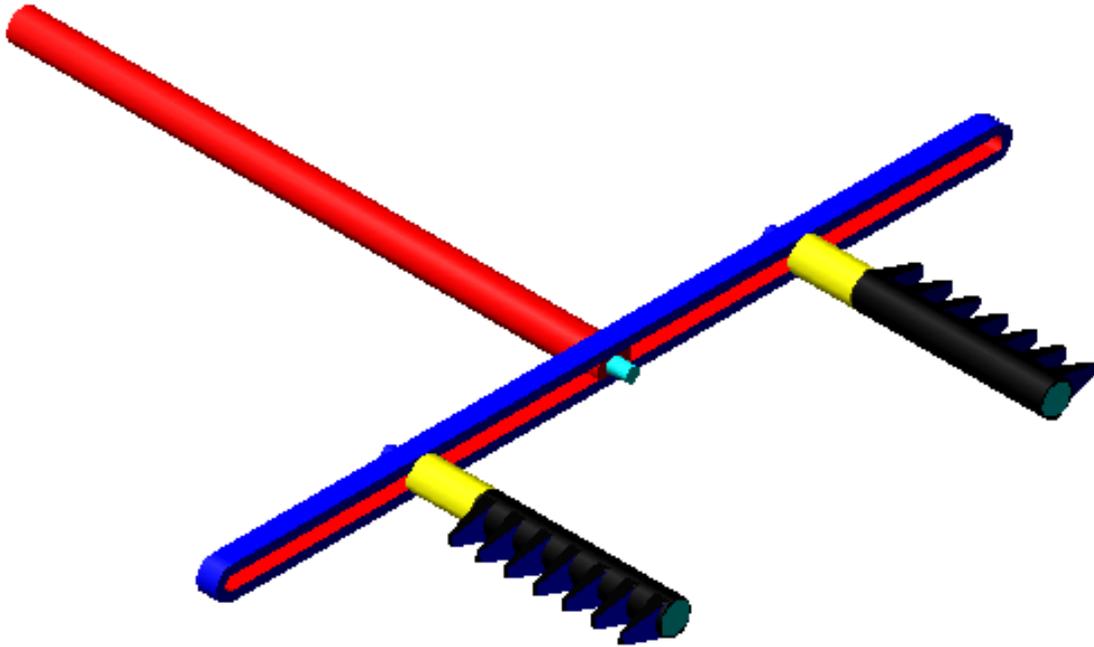


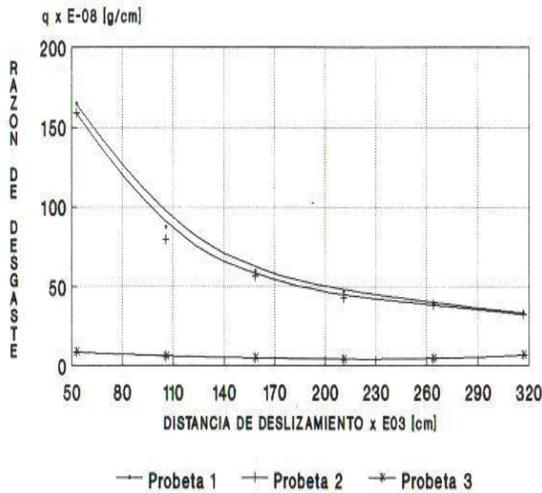
Figura 37. Sistema de embobinado a desarrollar (CABEZAL).

II.3.6.2. Selección de materiales para usos mecánicos

Para la selección de materiales, se consideró el tipo de funcionamiento al que va estar sometido el sistema, el cual trabajara con hilo conductor de cobre, requerimiento de los empresarios por ser el material que se utiliza comercialmente, por ello se evaluaron cuatro materiales, bronce salmenac 773, latón, zinalco y aluminio 6061-T6, para determinar su comportamiento en fricción y desgaste, parámetros críticos que definirán su función operativa [12].

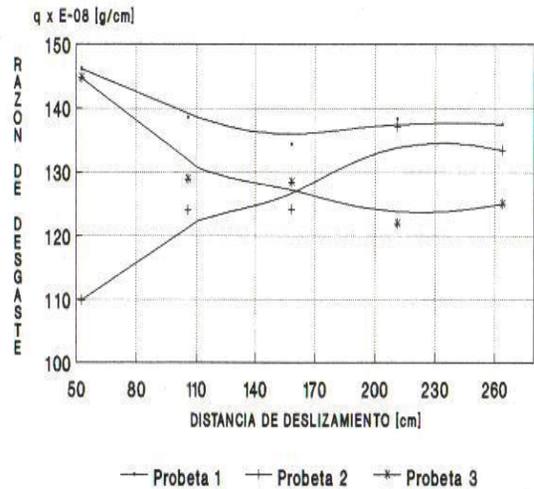
A continuación se muestran las gráficas de razón de desgaste y pérdida de peso contra distancia deslizamiento en cuatro materiales antes descritos, figura 38 y 39.

RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO 6061-T6



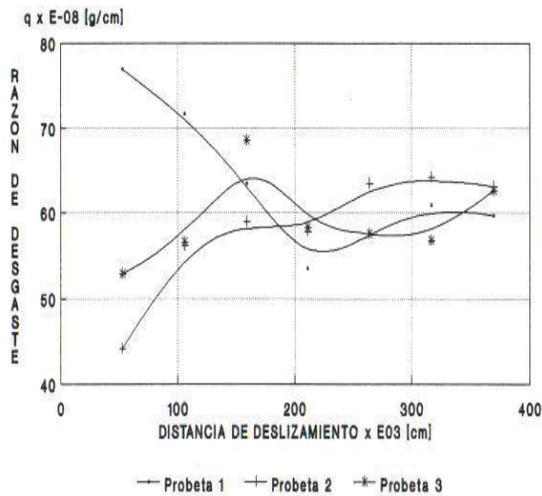
GRAFICA 1.2 PARAMETROS DE PRUEBA:
 * 900 rpm CARGA=1kg
 * INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA LATON



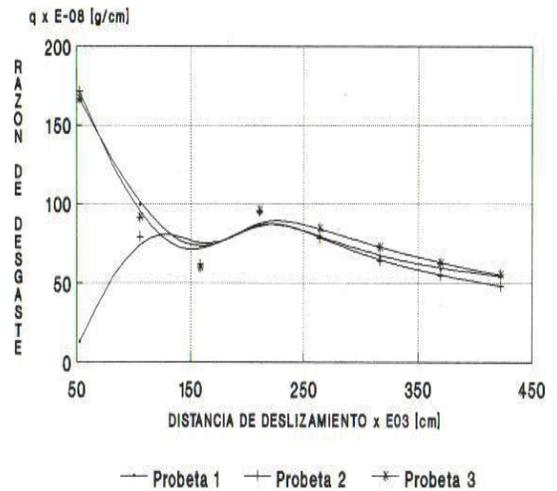
GRAFICA 1.5 PARAMETROS DE PRUEBA:
 * 900 rpm CARGA=1kg
 * INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



GRAFICA 1.7 PARAMETROS DE PRUEBA:
 * 900 rpm CARGA=1kg
 * INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

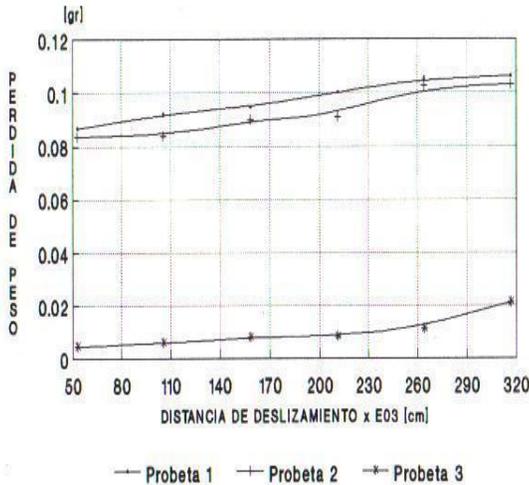
RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



GRAFICA 1.9 PARAMETROS DE PRUEBA:
 * 900 rpm CARGA=1kg
 * INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

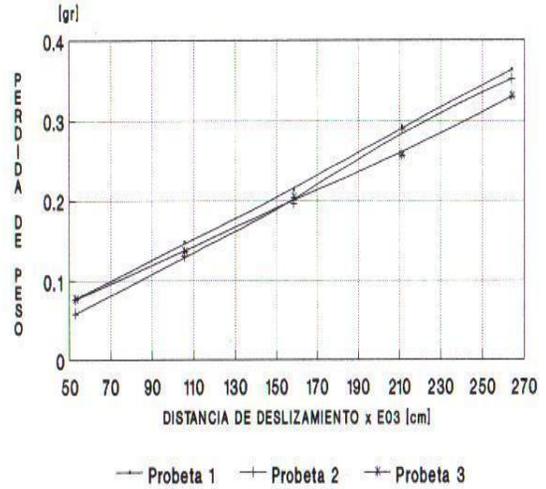
Figura 38. Gráfica de razón de desgaste.

PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ALUMINIO



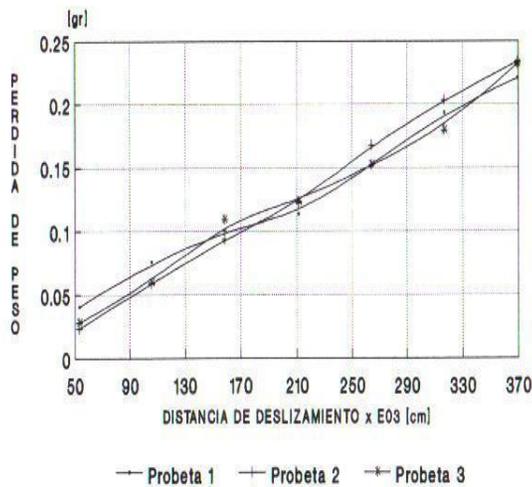
GRAFICA 1.1 PARAMETROS DE PRUEBA:
 * 900 rpm CARGA=1kg
 * INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA LATON



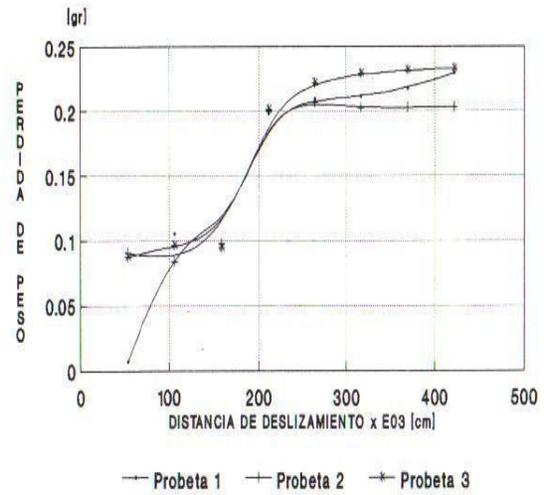
GRAFICA 1.3 PARAMETROS DE PRUEBA:
 * 900 rpm CARGA=1kg
 * INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



GRAFICA 1.6 PARAMETROS DE PRUEBA:
 * 900 rpm CARGA=1kg
 * INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



GRAFICA 1.8 PARAMETROS DE PRUEBA:
 * 900 rpm CARGA=1kg
 * INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

Figura 39. Gráfica de pérdida de peso.

Con base en las gráficas anteriores se observa que el aluminio 6061-T6, para condiciones de operación similares, velocidad, carga y tiempo, su razón de desgaste se mantiene constante y no presenta variaciones significativas como los otros tres materiales evaluados, sobre todo cuando se presentan distancias de deslizamiento mayores.

Teniendo definido el concepto y realizada la selección del material se determinarán las características y dimensiones para cada elemento en la siguiente etapa.

II.3.7. Diseño detallado

Para el desarrollo del diseño detallado, la máquina se dividirá en cuatro sistemas para facilitar su mejor comprensión: sistema de alojamiento denominado cabezal, sistema de transmisión, sistema de control y estructura de soporte, los cuales se describen a continuación.

II.3.7.1. Diseño del cabezal

Para el diseño del cabezal fue necesario considerar como punto de partida al movimiento de rotación, que al generar mayores reacciones que un sistema estático, se constituye como base del diseño del mecanismo.

Dado que este sistema tiene como requerimiento trabajar con una variación de diferentes grosores de hilo conductor de cobre que va desde un calibre 14, hasta un calibre 25, se determinó que la velocidad angular será crítica cuando se trabaje con calibres delgados, debido a que una velocidad elevada puede dañar el conductor. Por esta razón se estableció que cuando este elemento sea requerido

para el calibre más delgado (25), la velocidad del sistema no debe exceder de 900 rpm, teniendo con ello el parámetro que definirá el diseño.

Establecido lo anterior, a continuación se desarrollará el análisis cinemático y dinámico, para determinar los esfuerzos mínimos requeridos de los componentes del mecanismo propuesto como solución en la etapa de conceptualización, figura 37.

II.3.7.1.1. Análisis cinemático

Para este análisis se consideró que el elemento denominado peine del sistema mostrado en la figura 35, se comporta como una viga en voladizo, esto permitirá determinar las fuerzas que actúan en el mismo, por medio de un diagrama de cuerpo libre y cinético, figuras 40 y 41.

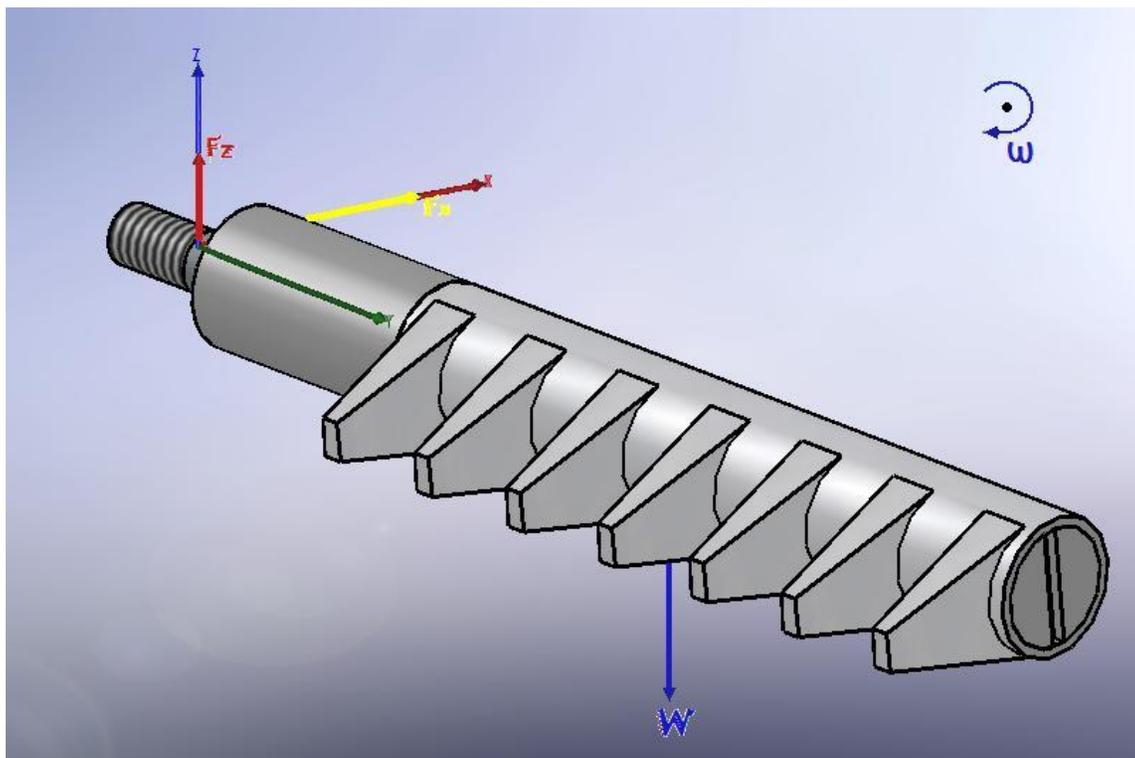


Figura 40. Diagrama de cuerpo libre.

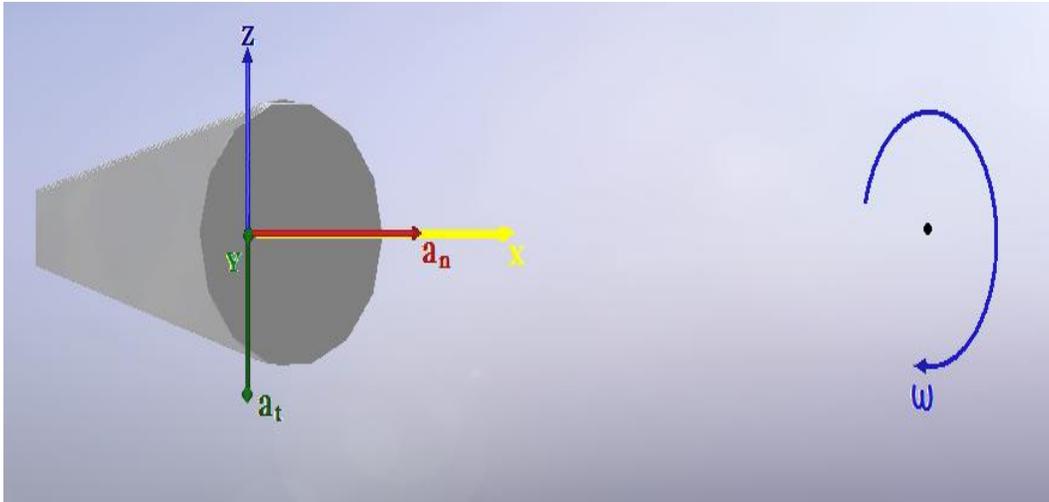


Figura 41. Diagrama cinético con vista en el eje y.

Para el cálculo de las reacciones mostradas, se consideró el funcionamiento del sistema mecánico, realizando inicialmente la suma de fuerzas con base en los diagramas antes mostrados, obteniendo las siguientes ecuaciones.

$$\sum F_x = ma_{Gx} \quad \dots(3)$$

$$\sum F_y = ma_{Gy} = 0 \quad \dots(4)$$

$$\sum F_z = ma_{Gz} = W \quad \dots(5)$$

Donde:

F = Fuerzas en x , y y z .

m = Masa.

a_G = Aceleración respecto al centro de masa.

Para conocer la magnitud de dichas reacciones, es necesario inicialmente determinar la masa del elemento de la figura 38, debido a que está constituido de materiales diferentes, se dividirá en dos geometrías, dentado y base, calculando la masa de cada uno a través de la ecuación 6, para posteriormente obtener una masa total.

$$m = \rho V \quad \dots(6)$$

Donde:

m = Masa.

ρ = Densidad.

V = Volumen.

Para obtener cada una de las masas, se calculó el volumen, ecuación 7;

$$V = Ah \quad \dots(7)$$

Donde:

V = Volumen.

A = Área.

h = Altura.

Por otro lado el área, se determinó mediante la ecuación 8.

$$A = \pi.r^2 \quad \dots(8)$$

Donde:

A = Área.

r = Radio.

Para el cálculo de la masa de la parte dentada, se utilizó la densidad del aluminio (aleación) $\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$ obtenida de la tabla 5; y para la base la densidad del acero $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$, obtenida de la tabla 6, para el soporte.

Material	Densidad kg/m ³	Módulo de elasticidad [Gpa]	Resistencia a fluencia [Mpa]	Resistencia a la rotura [Mpa]	Ductilidad % alarg. en 2 pulgadas	coeficiente de Poisson	Conduct. Térmica [W/m-°C]	Coef. de dilatación (°C) ⁻¹ 10 ⁻⁶
Aluminio puro	2710	69	17	55	25	0.33	231	23.6
Aluminio (aleación)	2800	72	97	186	18	0.33	192	22.5
Cobre puro	8940	110	69	220	45	0.35	398	16.5
Latón (70Cu-30Zn)	8530	110	75	303	68	0.35	120	20.0
Bronce (90Cu-8Sn)	8800	110	152	380	70	0.35	62	18.2
Magnesio puro	1740	45	41	165	14	0.29	122	27.0
Molibdeno puro	10220	324	565	655	35	--	142	4.9
Níquel	8900	207	138	483	40	0.31	80	13.3
Plata	10490	76	55	125	48	0.37	418	19.0
Titanio	4510	107	240	330	30	0.34	17	9.0

Tabla 5. Propiedades de materiales no ferrosos.

Material	Densidad kg/m ³	Módulo de elasticidad [Gpa]	Resistencia a fluencia [Mpa]	Resistencia a la rotura [Mpa]	Ductilidad % alarg. en 2 pulgadas	coeficiente de Poisson	Conduct. Térmica [W/m-°C]	Coef. de dilatación (°C) ⁻¹ 10 ⁻⁶
Fundición	7870	207	130	260	45	0.29	80	11.8
fundición gris	7150	variable	---	125	--	variable	46	10.8
fundición nodular	7120	165	275	415	18	0.28	33	11.8
fundición maleable	7200	172	220	345	10	0.26	51	11.9
Acero AISI 1020	7860	207	295	395	37	0.30	52	11.7
Acero AISI 1040	7850	207	350	520	30	0.30	52	11.3
Acero AISI 1080	7840	207	380	615	25	0.30	48	11.0
Acero AISI 446	7500	200	345	552	20	0.30	21	10.4
Acero AISI 316	800	193	207	552	60	0.30	16	16.0
Acero AISI 410	7800	200	275	483	30	0.30	25	9.9

Tabla 6. Propiedades de materiales ferrosos.

Considerando las ecuaciones anteriores, se determinó la masa de la parte dentada de la siguiente manera:

$$A = \pi(0.0127m)^2$$

$$A = 0.0005067m^2$$

$$h = 0.1524m$$

$$V = (0.0005067m^2)(0.1524m)$$

$$V = 0.00007722m^3$$

$$m = \left((2800 \frac{kg}{m^3})(0.00007722m^3) \right) + 0.100kg$$

$$m = 0.308kg$$

Asimismo, la masa de la base se obtuvo como se observa a continuación:

$$A = \pi(0.0127m)^2$$

$$A = 0.0005067m^2$$

$$h = 0.0349m$$

$$v = (0.0005067m^2)(0.0349m)$$

$$v = 0.00001768m^3$$

$$m = (7860 \frac{kg}{m^3})(0.00001768m^3)$$

$$m = 0.1379kg$$

Sumando ambas masas tenemos la masa total del peine:

$$m_{peine} = m_{dentado} + m_{base}$$

$$m_{peine} = 0.308kg + 0.138kg$$

$$m_{peine} = 0.446kg$$

Con esta se calculó la fuerza resultante que genera las reacciones Fx y Fz, así como el esfuerzo que produce cada una.

Debido a que en Fx actúa la aceleración normal, figura 39, se calculará dicha aceleración con base en la ecuación 9.

$$a_n = \omega^2 r_G \quad \dots(9)$$

Donde:

a_n = Aceleración normal.

ω = Velocidad angular.

r_G = Radio de circunferencia.

Con lo cual se determina que:

$$a_n = (94.25 \text{ rad/s})^2 (0.5m)$$

$$a_n = 4441.53 \text{ m/s}^2$$

Con la aceleración obtenida se empleó la 2ª ley de Newton expresada en la ecuación 3, que determina la fuerza generada en el eje x, con lo que se tiene que:

$$F = ma \quad \dots(10)$$

$$F = (0.446 \text{ kg})(4441.53 \text{ m/s}^2)$$

$$F = 1980.9 \text{ N}$$

Ahora con base en la teoría de mecánica de sólidos se calculará el esfuerzo cortante τ_x a partir de la ecuación 11.

$$\tau_x = \frac{F}{A} \quad \dots(11)$$

Donde:

τ_x = Esfuerzo cortante.

F = Fuerza.

A = Área.

$$A = \pi.r^2 = \pi(0.00476m)^2$$

Teniendo que el esfuerzo cortante es:

$$\tau_x = \frac{1980.9N}{0.00007125m^2}$$

$$\tau_x = 27.83MPa$$

Por otra parte la reacción Fz es generada por el peso W, como se muestra en la figura 38; es necesario considerar que en dicho elemento actúa la aceleración tangencial dada por:

$$a_t = \alpha r_G \quad \dots(12)$$

Donde:

a_t = Aceleración tangencial.

α = Aceleración angular.

r_G = Radio de circunferencia.

Para lo cual se tiene que:

$$\alpha = \frac{\omega}{t} \quad \dots(13)$$

Donde:

α = Aceleración angular.

ω = Velocidad angular.

t = Tiempo.

Por lo que la aceleración angular es:

$$\alpha = \frac{94.25 \text{ rad/s}}{4 \text{ s}}$$

$$\alpha = 23.56 \text{ rad/s}^2$$

Y para la aceleración tangencial se tiene:

$$a_t = (23.56 \text{ rad/s})(0.5 \text{ m})$$

$$a_t = 11.78 \text{ m/s}^2$$

Es importante destacar, que es necesario considerar la masa del alambre cuando el peine se encuentra en su máxima capacidad, debido a esto la masa total esta dada por:

$$m_{total} = m_{peine} + m_{alambre}$$

$$m_{total} = 0.4459 \text{ kg} + 0.600 \text{ kg}$$

$$m_{total} = 1.046 \text{ kg}$$

Considerando la masa total, así como la aceleración tangencial, se determinó la fuerza generada por el peso W ilustrado por la ecuación 5, de la cual tenemos.

$$W = ma \quad \dots(14)$$

$$W = (1.046 \text{ kg})(11.78 \text{ m/s}^2)$$

$$W = 12.32 \text{ N}$$

Con esta fuerza podemos calcular el esfuerzo cortante τ_z , con la ecuación 11, empleada anteriormente.

$$A = \pi.r^2 = \pi(0.00476m)^2$$

$$\tau_z = \frac{F}{A} = \frac{12.32N}{0.00007125m^2}$$

$$\tau_z = 172.9KPa$$

Es importante destacar que este esfuerzo es el mínimo requerido que tiene que soportar el elemento para no fallar mecánicamente.

II.3.7.1.2. Análisis dinámico del sistema

Para realizar el análisis dinámico del sistema mostrado en la figura 42, se emplearon las herramientas de AutoCAD, figura 43, para determinar el momento angular del sistema.

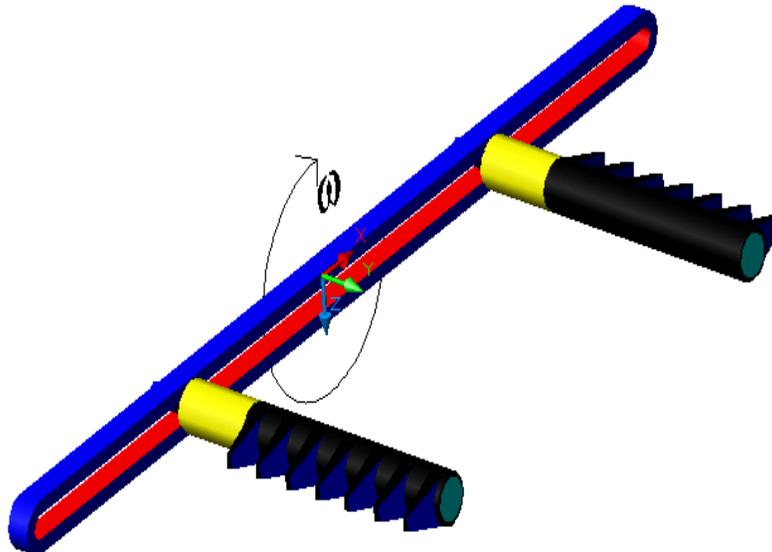


Figura 42. Sistema de embobinado.

```

----- SOLIDS -----
Mass:                14.0814
Volume:              14.0814
Bounding box:        X: -10.4453  --  10.4453
                    Y: -0.4375  --  7.1250
                    Z: -0.4453  --  0.4453
Centroid:            X: 0.0000
                    Y: 2.4166
                    Z: 0.0000
Moments of inertia:  X: 154.4521
                    Y: 423.3974
                    Z: 575.9503
Products of inertia: XY: 0.0000
                    YZ: 0.0000
                    ZX: -0.0504
Radii of gyration:   X: 3.3119
                    Y: 5.4834
                    Z: 6.3954
Principal moments and X-Y-Z directions about centroid:
                    I: 72.2189 along [1.0000 0.0000 -0.0001]
                    J: 423.3974 along [0.0000 1.0000 0.0000]
                    K: 493.7171 along [0.0001 0.0000 1.0000]

```

Figura 43. Herramientas de aplicación de AutoCAD.

Con respecto al origen del sistema mostrado en la figura 42, se determinó el momento angular mediante la ecuación 15.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H} = & [I_{xx} \omega_x - I_{xy} \omega_y - I_{xz} \omega_z] \mathbf{i} + [I_{xy} \omega_x + I_{yy} \omega_y - I_{yz} \omega_z] \mathbf{j} \\
 & + [-I_{xz} \omega_x - I_{yz} \omega_y + I_{zz} \omega_z] \mathbf{k}
 \end{aligned} \tag{15}$$

Donde:

\mathbf{H} = Momento angular.

I_{xx} = Momento de inercia respecto al eje x.

I_{yy} = Momento de inercia respecto al eje y.

I_{zz} = Momento de inercia respecto al eje z.

I_{xy} = Producto de inercia.

I_{yz} = Producto de inercia.

I_{xz} = Producto de inercia.

ω_x = Velocidad angular en el eje x.

ω_y = Velocidad angular en el eje y.

ω_z = Velocidad angular en el eje z.

Debido a que sólo existe la velocidad angular ω_y , la ecuación anterior se simplifica, obteniéndose la ecuación 16:

$$\mathbf{H} = [-I_{xy}\omega_y]\mathbf{i} + [I_{yy}\omega_y]\mathbf{j} + [I_{yz}\omega_y]\mathbf{k} \quad \dots(16)$$

Asimismo, sustituyendo los momentos y productos de inercia para el sistema mostrados en la figura 41.

$$I_{xy} = 0$$

$$I_{yz} = 0$$

$$I_{yy} = 423.3974 \text{ lb} \cdot \text{pu} \text{lg}^2$$

Se obtuvo la ecuación 17, de momento angular para nuestro sistema.

$$\mathbf{H} = [I_{yy}\omega_y]\mathbf{j} \quad \dots(17)$$

Con esta ecuación y los valores obtenidos previamente se calculó el momento angular.

$$\mathbf{H} = (0.124 \text{ kg m}^2)(94.24 \text{ rad/s})\mathbf{j}$$

$$\mathbf{H} = 11.686 \text{ j} \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}}$$

Obtenido este valor se calculará la energía cinética empleando la ecuación 18.

$$T = \frac{1}{2} \omega \bullet T \quad \dots(18)$$

Donde:

T = Energía cinética.

ω = Velocidad angular.

H = Momento angular

Con base en la ecuación anterior y los datos obtenidos tenemos que:

$$T = \frac{1}{2} \left(94.24 \frac{rad}{s} \right) \mathbf{j} \bullet \left(11.686 \frac{kg m^2}{s} \right) \mathbf{j}$$

$$T = 550.64 J$$

Por otro lado para realizar la suma de momentos se emplearán las ecuaciones siguientes de suma de momentos.

$$\sum M_x = -I_{xy} \dot{\omega}_y - I_{yz} \omega_y^2 \quad \dots(19)$$

$$\sum M_y = -I_{yy} \dot{\omega}_y \quad \dots(20)$$

$$\sum M_z = I_{yz} \dot{\omega}_y + I_{xy} \omega_y^2 \quad \dots(21)$$

De la misma manera para la aceleración angular $\dot{\omega}$ tenemos la ecuación 22 que parte de la ecuación 13, la cual se había calculado anteriormente.

$$\dot{\omega} = \alpha = \frac{\omega}{t} \quad \dots(22)$$

Teniendo que:

$$\dot{\omega} = 23.56 \frac{rad}{s^2}$$

Por otra parte al realizar la sustitución en las ecuaciones 19, 20 y 21, de suma de momentos tenemos que sólo existen suma de momentos $\sum M_y$, debido a que no se tienen productos de inercia, figura 41; con esto y los datos obtenidos se obtuvo que:

$$\begin{aligned}\sum M_x &= 0 \\ \sum M_z &= 0 \\ \sum M_y &= (0.124 \text{ kg m}^2) \left(23.56 \text{ rad/s}^2 \right) \\ \sum M_y &= 2.92 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2} = 2.92 \text{ N m}\end{aligned}$$

Cabe mencionar que este momento representa el par mínimo requerido que debe de tener el motor eléctrico para romper la inercia del sistema.

Con base en este par obtenido se calculó la potencia mínima que debe proporcionar el motor eléctrico al sistema, ecuación 23.

$$P = T \omega \quad \dots(23)$$

Donde:

P = Potencia.

T = Energía cinética.

ω = Velocidad angular.

Y teniendo que:

$$\begin{aligned}P &= (2.92 \text{ N m}) \left(94.25 \text{ rad/s} \right) \\ P &= (275.37 \text{ Watts}) \left(\frac{\text{HP}}{745.7 \text{ Watts}} \right) \\ P &= 0.37 \text{ HP}\end{aligned}$$

Considerando el diagrama, figura 44, se observa el comportamiento, tanto de la aceleración normal a_n , como de la aceleración tangencial a_t , que se desarrollan y que nos permitirán calcular las fuerzas que afectan al sistema.

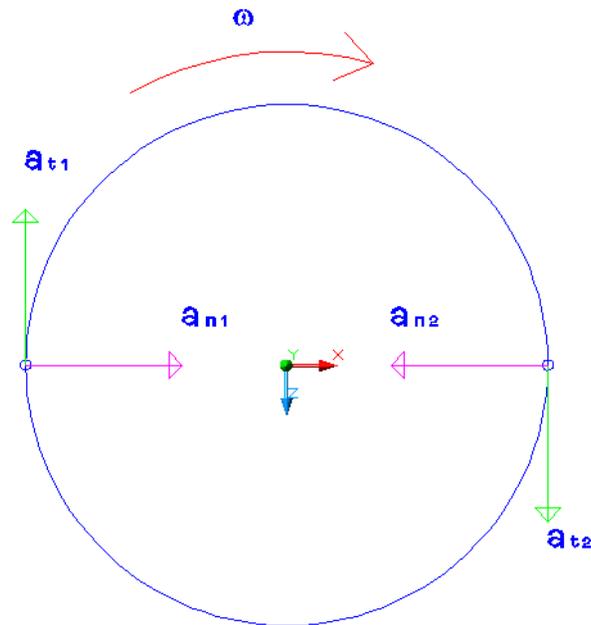


Figura 44. Diagrama aceleraciones.

Efectuando la suma de fuerzas con base en la 2ª ley de Newton, podemos observar que el sistema esta en equilibrio.

$$\sum F_x = m_1 a_{n1} - m_2 a_{n2} = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$\sum F_z = m_1 a_{t1} - m_2 a_{t2} = 0$$

Por otro lado la figura 45, muestra el sistema coordenado O_x , O_y y O_z donde se observan las fuerzas originadas por los diferentes pesos que actúan en el sistema.

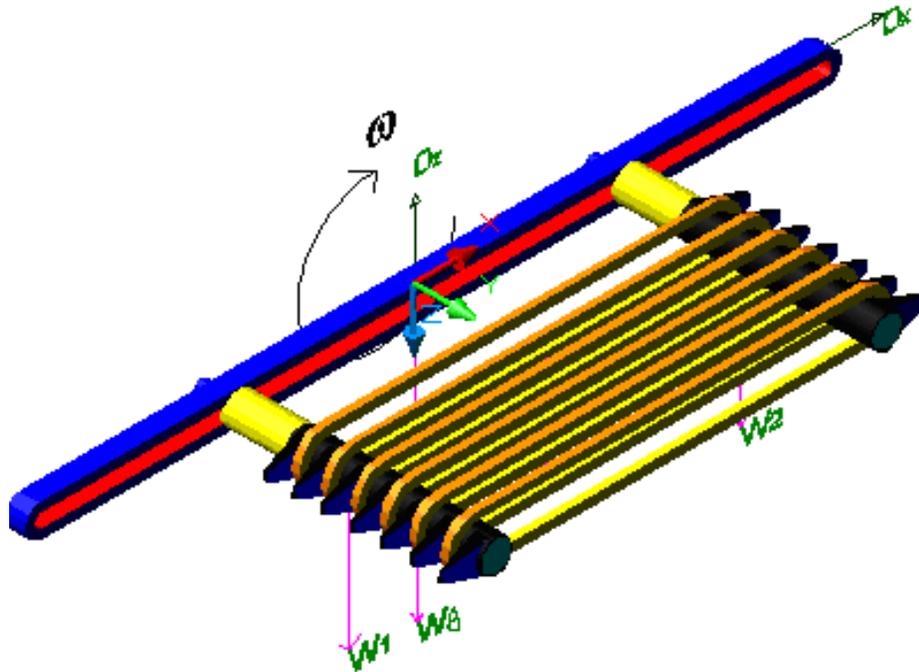


Figura 45. Sistema coordenado O_x , O_y y O_z .

Representando esto matemáticamente tendríamos que:

$$\begin{aligned} O_x &= 0 \\ O_y &= 0 \\ O_z &= W_1 + W_2 + W_B \end{aligned}$$

Debido a que ya se han determinado W_1 , y W_2 ; para obtener el peso total del sistema; se determinará W_B que representa el peso de la barra que sustenta los peines, ecuación 14.

Considerando la ecuación 6 y las propiedades de la tabla 6, obtenemos W_B por medio de la ecuación 14:

$$W_B = ma \quad \dots(14)$$

$$m = \left(7860 \frac{kg}{m^3}\right) (0.000149m^3)$$

$$m = 1.167kg$$

$$W_B = (1.167kg) (11.78 \frac{m}{s^2})$$

$$W_B = 13.747N$$

Con el peso obtenido de la barra, se determinó el peso total del cabezal, que es la fuerza que actúa en el sistema:

$$W_{TOTAL} = 12.322N + 12.322N + 13.747N$$

$$W_{TOTAL} = 38.747N$$

Una vez obtenida esta fuerza, podemos calcular el esfuerzo de corte que debe resistir el soporte del sistema (flecha), punto crítico del análisis, ya que en ella se concentran todos los esfuerzos calculados. Para ello se utilizará la ecuación 11.

$$A = \pi.r^2 = \pi(0.00635m)^2$$

$$\tau_z = \frac{F}{A} = \frac{38.747N}{0.0001266m^2}$$

$$\tau_z = 306KPa$$

II.3.7.2. Diseño de la transmisión

La transmisión, es el sistema que proporcionará el movimiento rotacional al cabezal, este movimiento es controlado por el usuario a través de un pedal que libera o frena la rotación del sistema, por medio de un embrague montado al motor eléctrico.

Para este diseño se empleo un motor industrial con embrague, monofásico, con una potencia de $\frac{1}{2}$ hp y una velocidad de 1400 rpm., ya que este tipo de motor permite proporcionar al cabezal, la potencia necesaria, tanto para su rotación como para el frenado del sistema en general, figura 46.

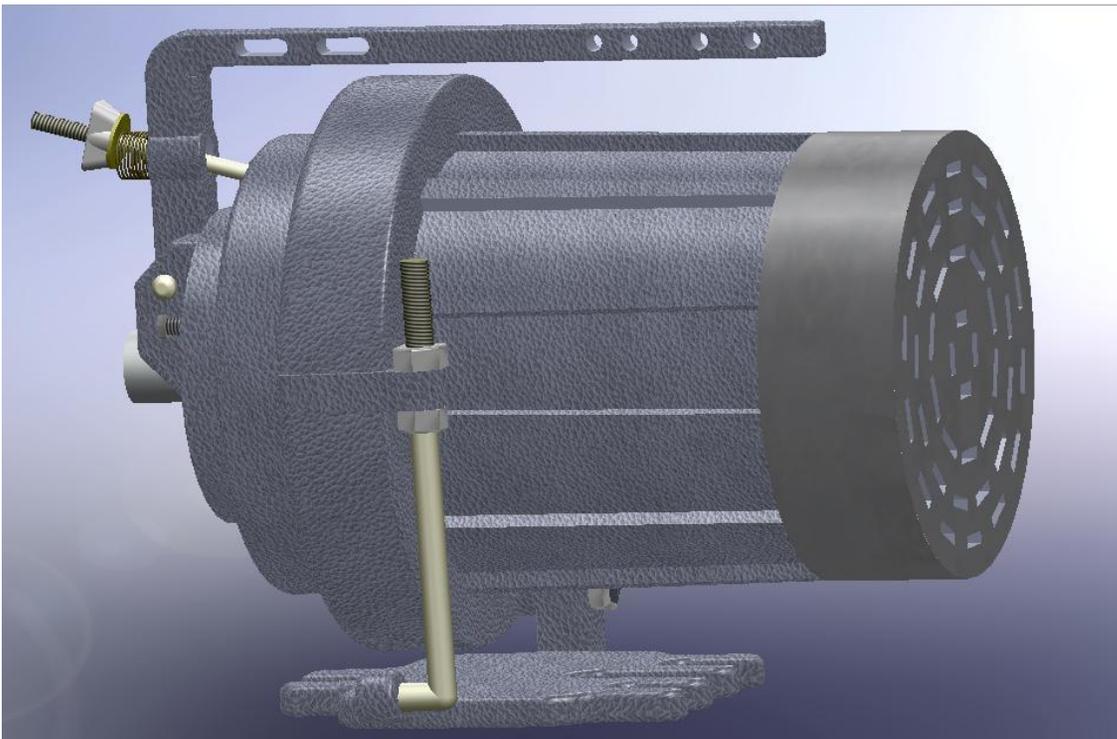


Figura 46. Motor industrial monofásico.

Para adecuar dicho motor al sistema del cabezal, se empleó una transmisión por correa, para unir la polea sujeta al eje del motor a la polea de la flecha del cabezal, por medio de una banda tipo A (comercial), figura 47.

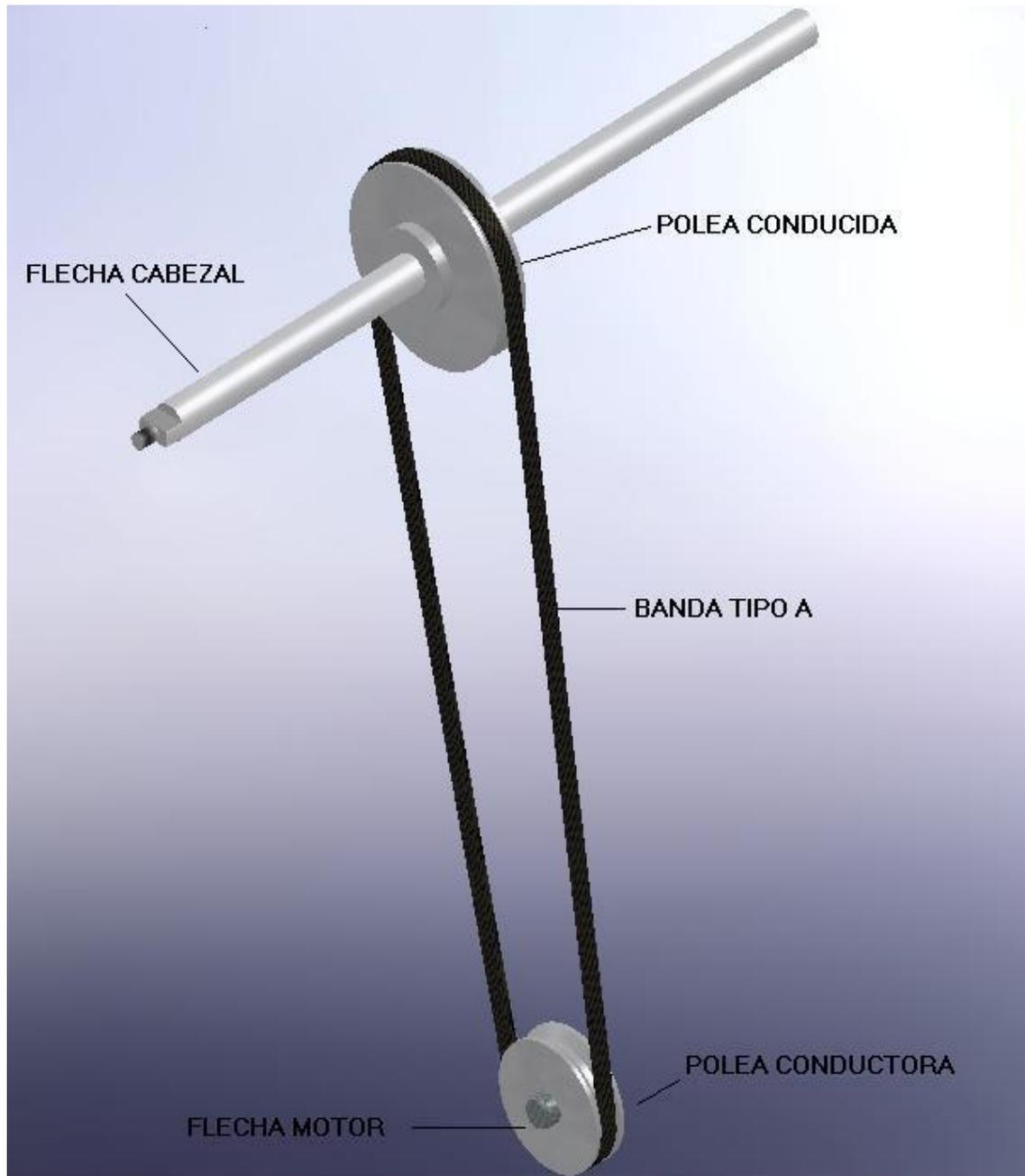


Figura 47. Esquema del sistema de transmisión.

Teniendo en cuenta que la velocidad máxima del sistema es menor que la que proporciona el motor se hizo un ajuste considerando una relación de velocidades simple por poleas, ecuación 24.

$$R = \frac{N}{n} = \frac{d}{D} \quad \dots(24)$$

Donde:

R = Relación de velocidades.

D = Diámetro de la polea conductora.

d = Diámetro de la polea conducida.

N = Velocidad de giro de la polea conductora.

n = Velocidad de giro de la polea conducida.

Con base en la ecuación anterior y las condiciones de operación obtenidas, a continuación se determinó el diámetro de la polea ubicada en el cabezal, ecuación 24.

$$d = \frac{(D)(N)}{n} \quad \dots(24)$$
$$D = \frac{(80mm)(1400rpm)}{900rpm}$$
$$D = 124mm$$

II.3.7.3. Diseño del sistema de control

Este sistema necesario para la máquina, controla el accionamiento y el paro eléctrico del motor, con accesorios complementarios, ubicados estratégicamente para salvaguardar la seguridad del operario, figura 48.

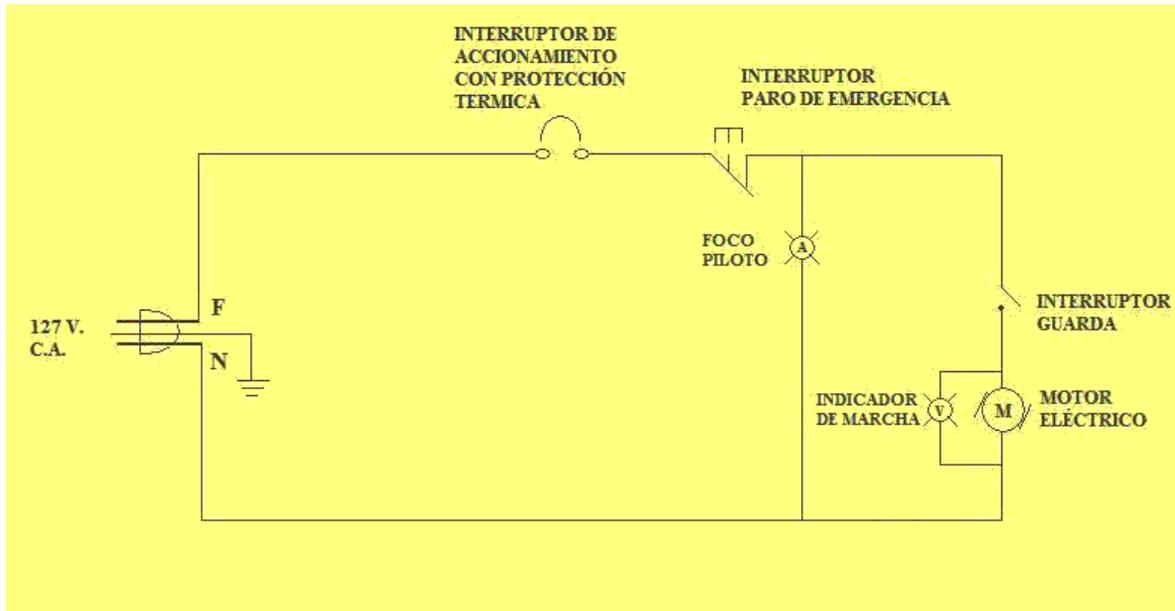


Figura 48. Esquema del diagrama eléctrico.

Por otro lado se acopló un contador que permite conocer el número de hilos que han conformado las bobinas realizadas por el cabezal, permitiendo con ello que el usuario lleve un control y realizar un paro oportuno, figura 49.



Figura 49. Ubicación de contador análogo.

II.3.7.4. Diseño de la estructura

Para integrar los sistemas que conformaran la máquina se diseñó la estructura empleando tubular PTR, figura 50.

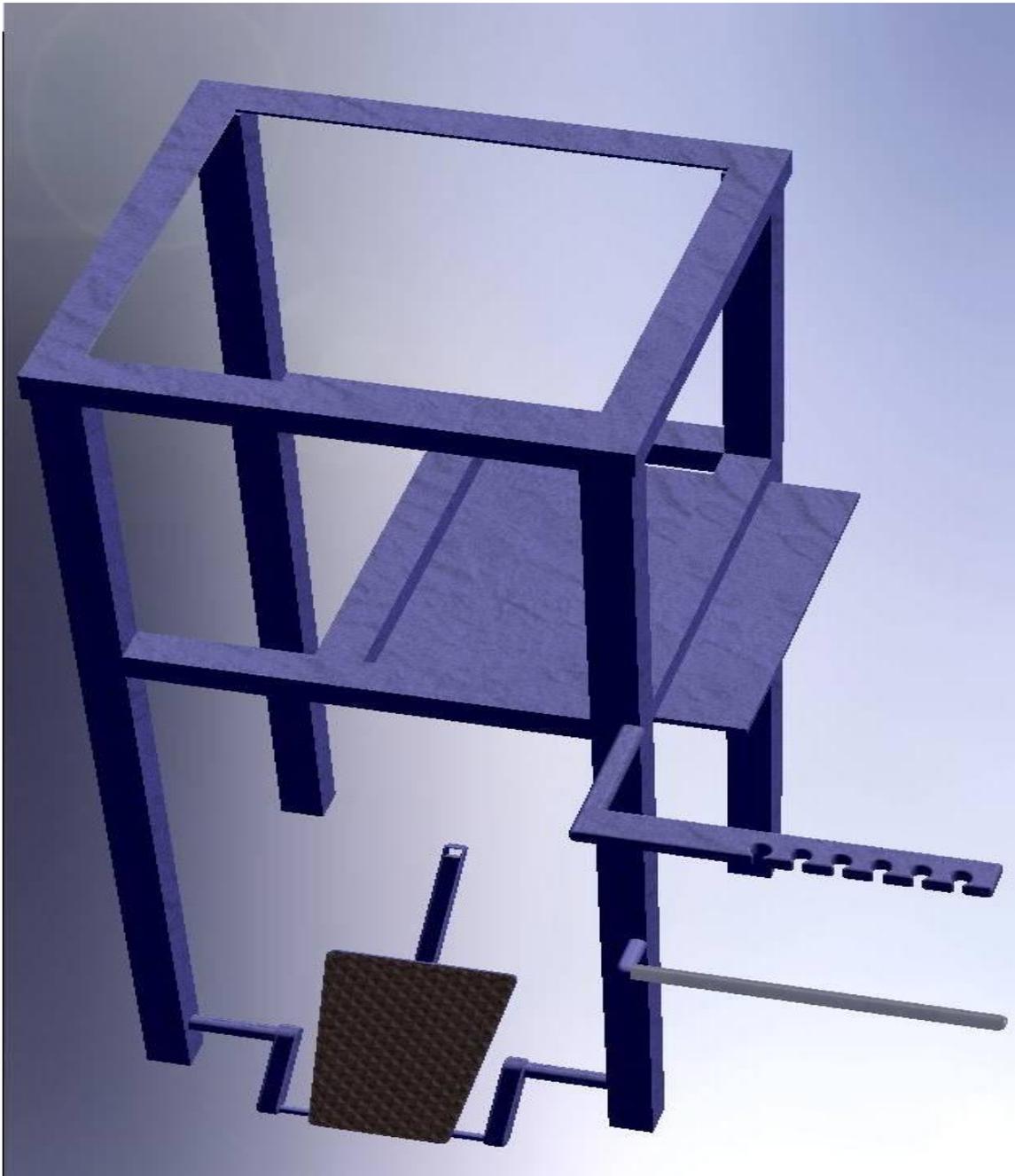


Figura 50. Estructura.

II.3.7.5. Planos de detalle

Con base en el análisis efectuado del sistema propuesto, se muestran a continuación los planos de detalle de los componentes principales.

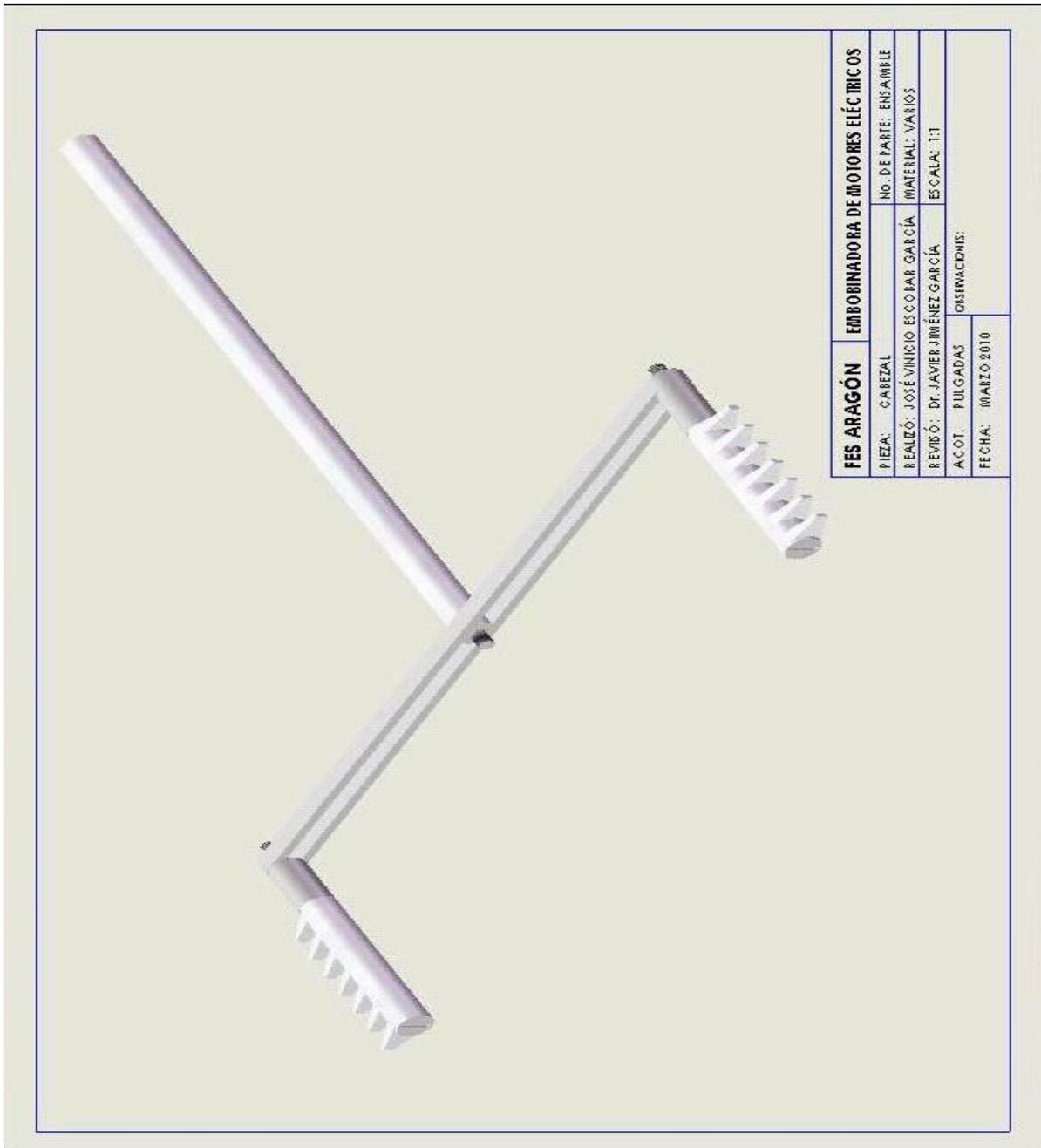
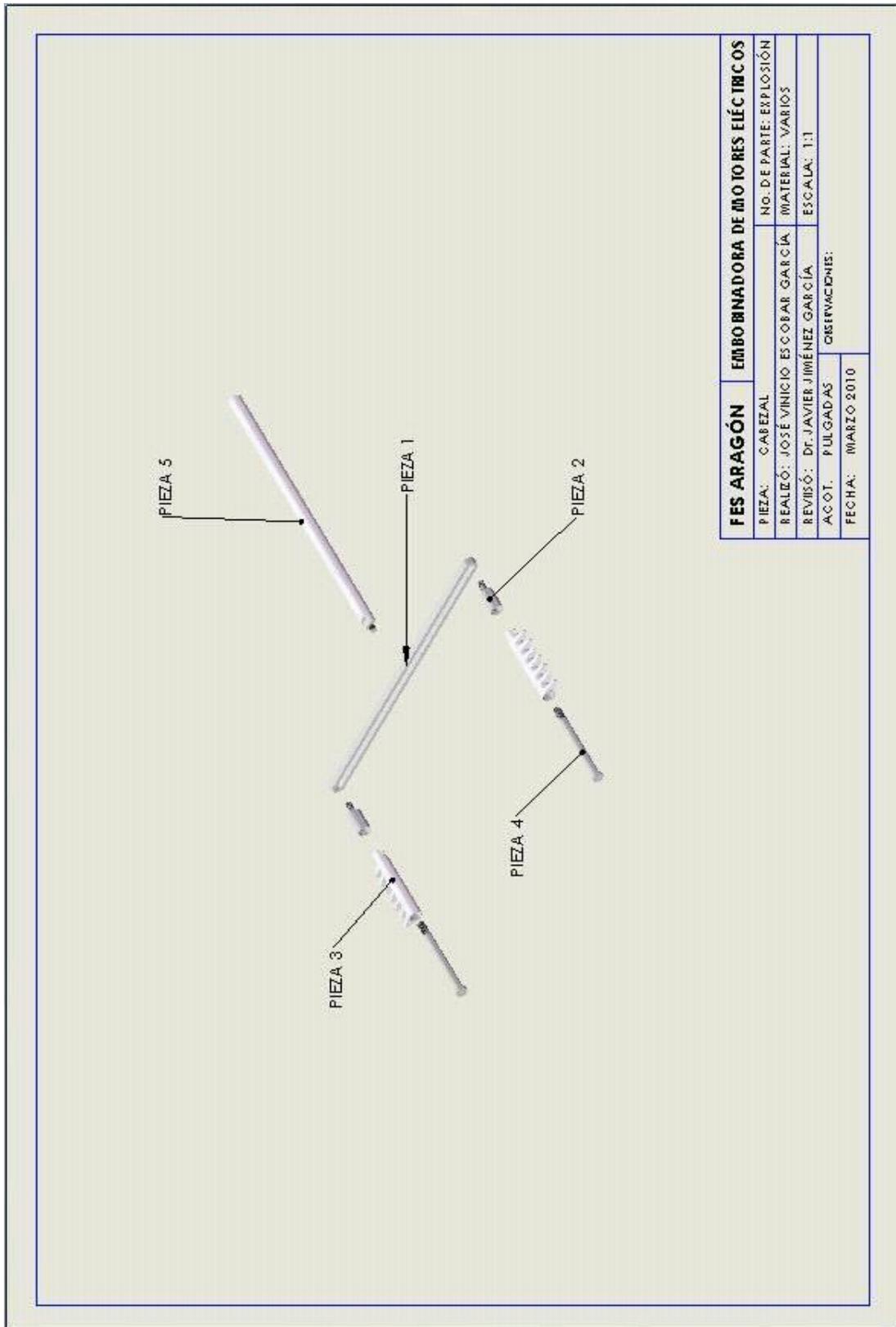


Figura 51. Plano ensamble cabezal.



FES ARGÓN		EMBOBINADORA DE MOTO RES ELÉCTRICOS	
PIEZA:	CABEZAL	NO. DE PARTE:	EXPLOSIÓN
REALIZÓ:	JOSÉ VINICIO ESCOBAR GARCÍA	MATERIAL:	VARIOS
REVISÓ:	DR. JAVIER JIMÉNEZ GARCÍA	ESCALA:	1:1
ACOT.	PULGADAS	OBSERVACIONES:	
FECHA:	MARZO 2010		

Figura 52. Plano cabezal en explosión.

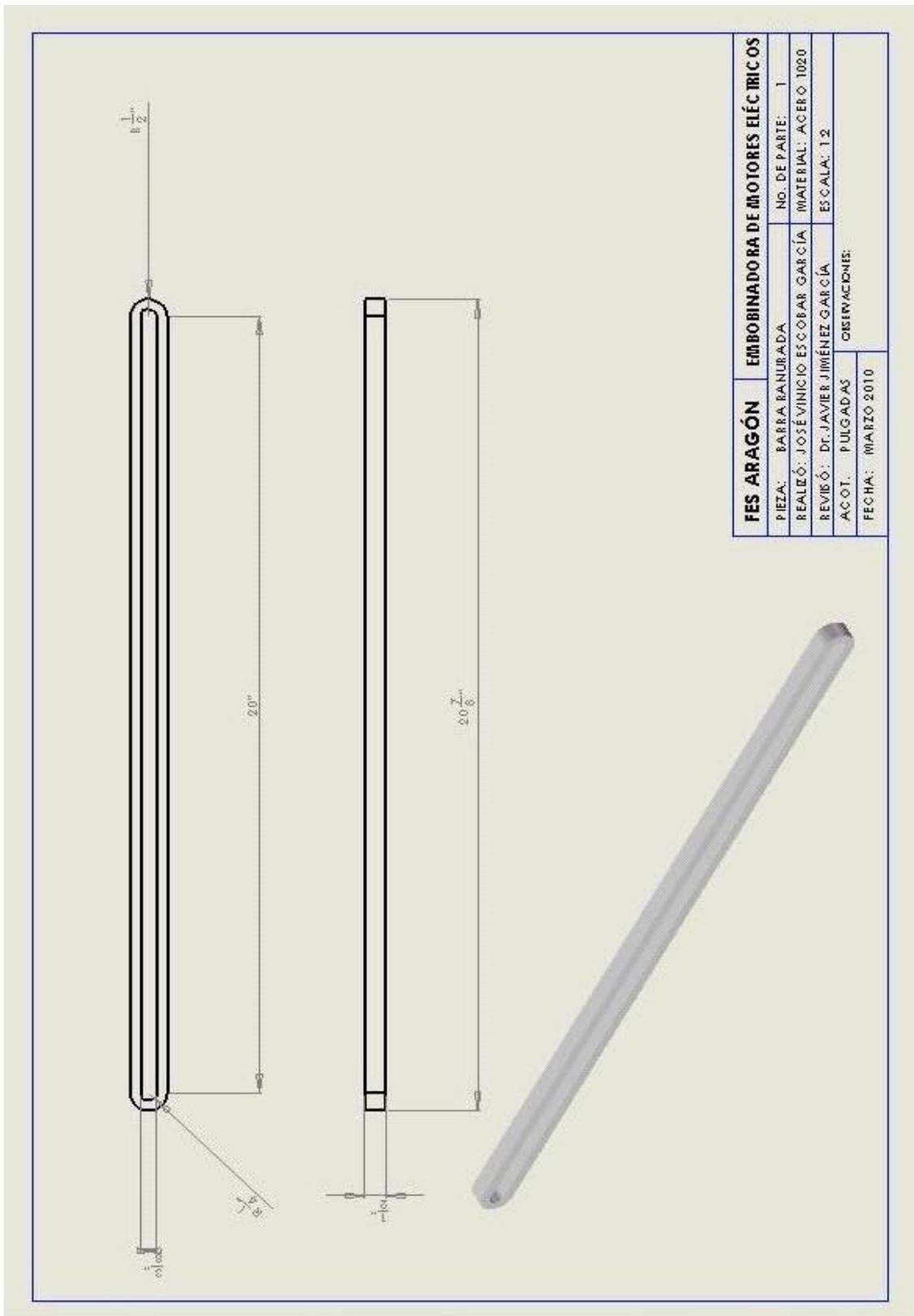


Figura 53. Plano de la base ranurada.

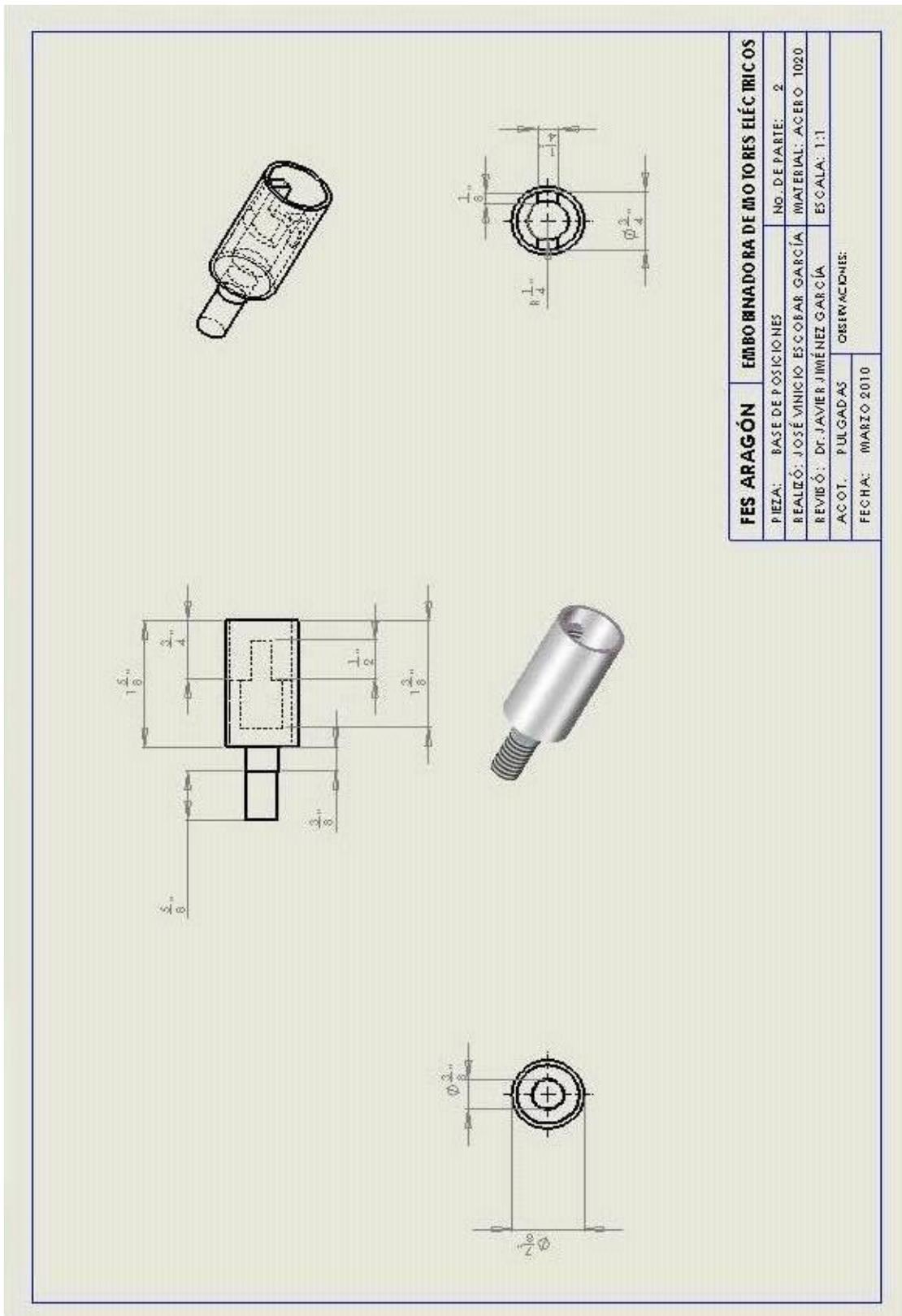


Figura 54. Plano base de posición.

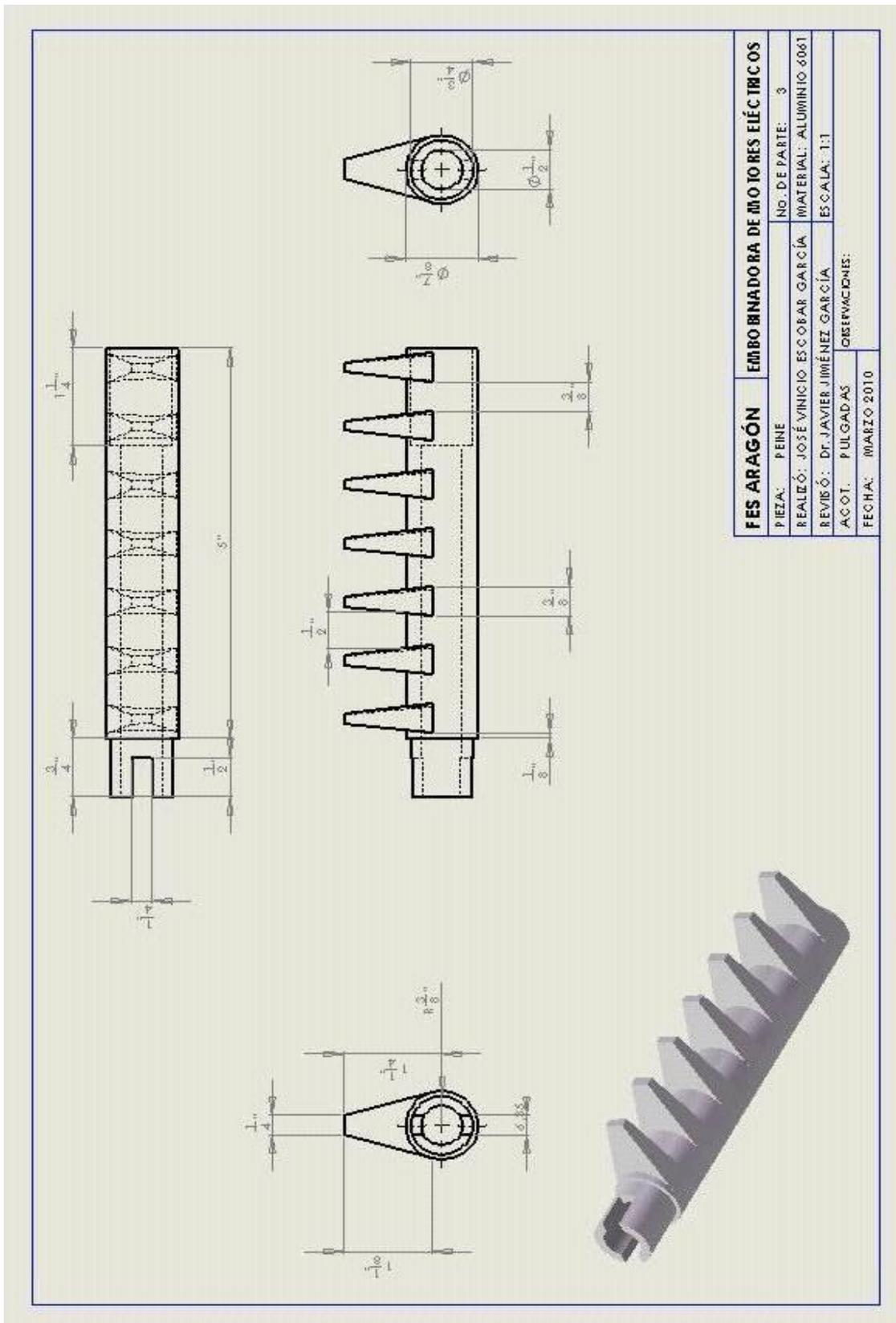


Figura 55. Plano del peine.

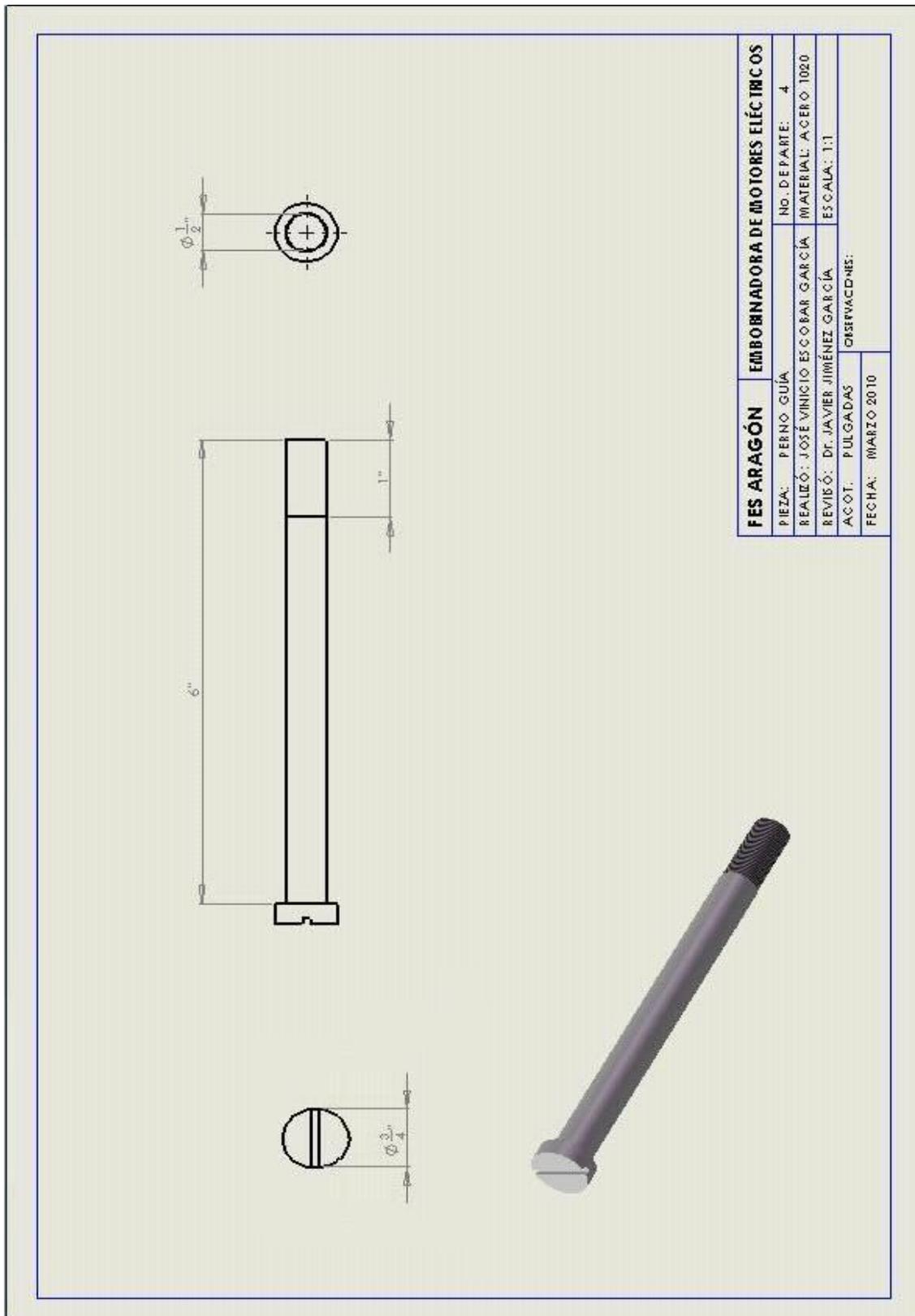


Figura 56. Plano del perno guía.

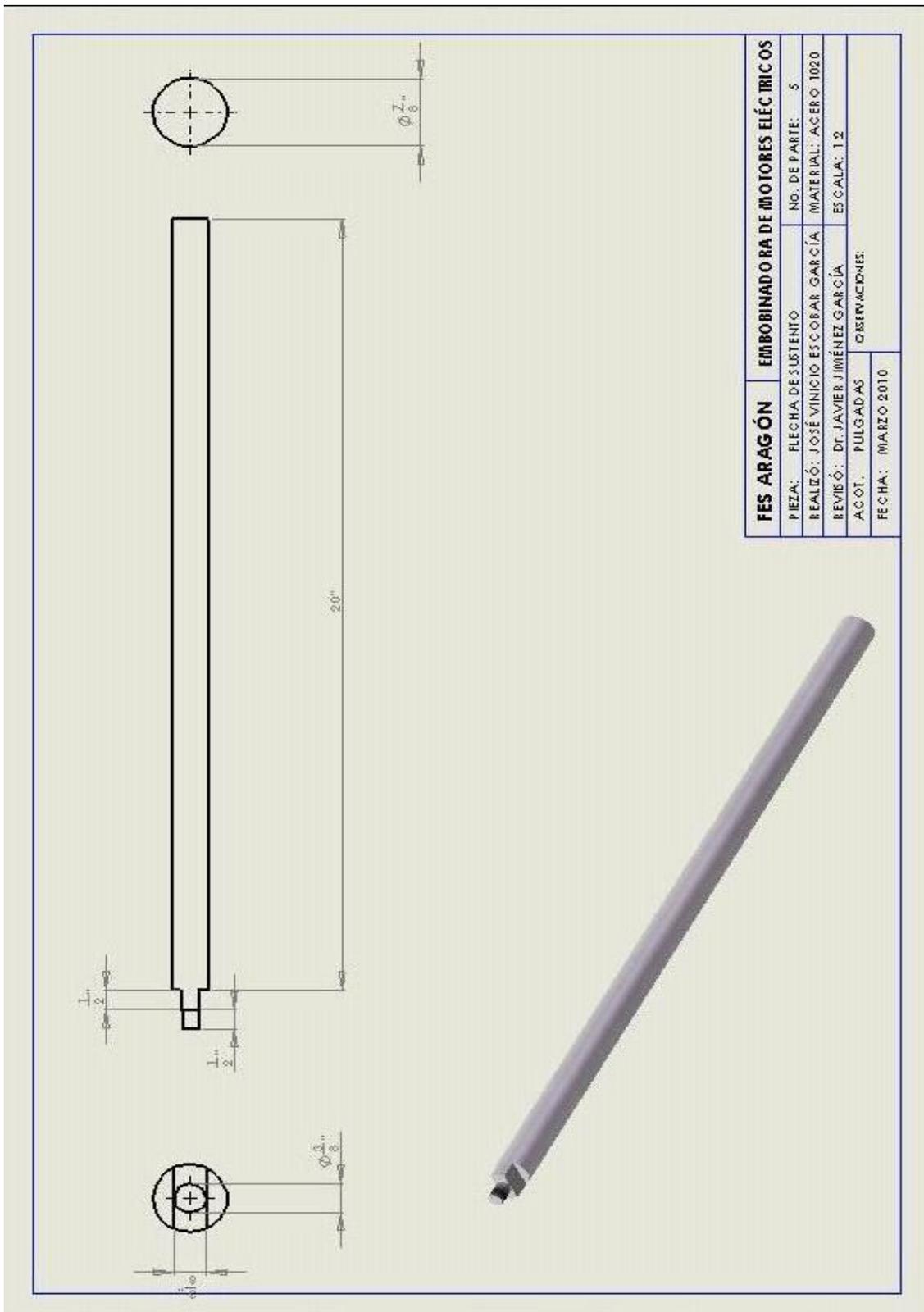


Figura 57. Plano de la flecha de sustento.

II.3.8. Prototipos y pruebas

Con base en la Investigación de campo, el análisis y cálculo matemático de sus componentes, así como en la adecuada selección de materiales para usos mecánicos, se procedió a la fabricación de los componentes de la máquina embobinadora, para obtener el prototipo planteado.

A continuación se muestran los componentes de la máquina, el prototipo y las pruebas efectuadas en campo en donde se observa su funcionalidad, figuras 58, 59, 60, 61 y 62.



Figura 58. Peine, modelo para fabricación.



Figura 59. Barra graduada en acero 1020.



Figura 60. Cabezal armado.

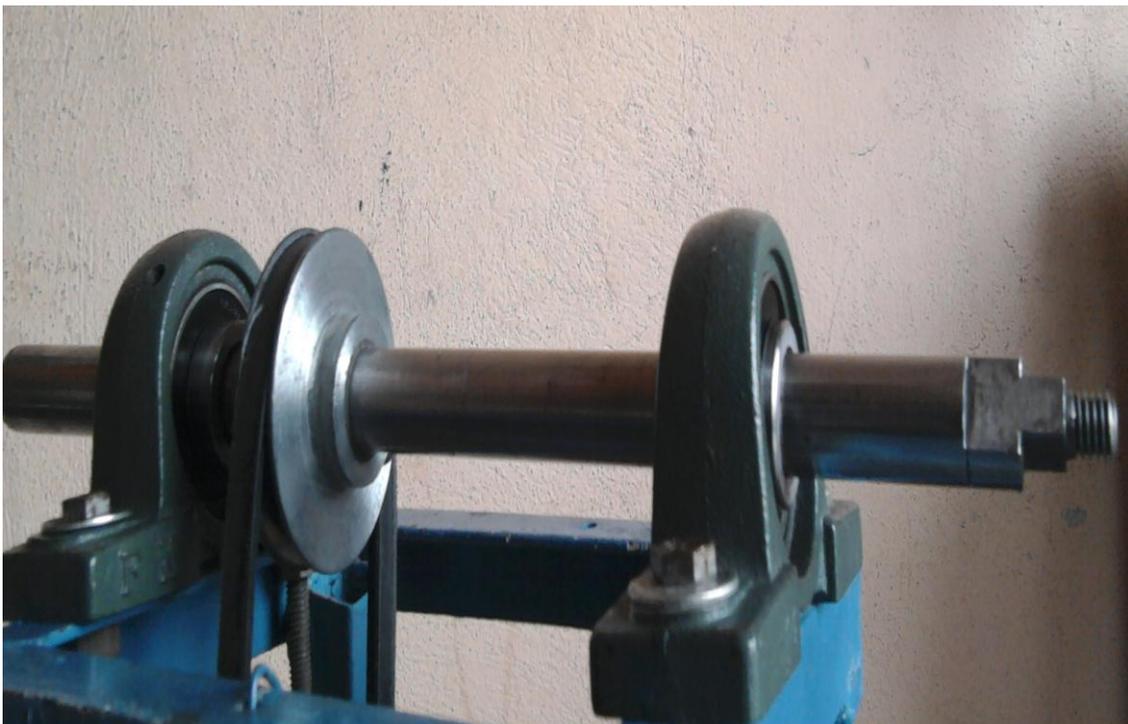


Figura 61. Montaje del sistema de transmisión.



Figura 62. Sistema montado para operar.

Para efectuar la validación experimental se trasladó el prototipo de la máquina embobinadora a una de las empresas consultoras para la realización de este proyecto.

Cabe mencionar que desde su instalación el prototipo tuvo una gran aceptación por parte de los empresarios, ya que se percataron de que el sistema en conjunto no conlleva grandes complicaciones al momento de su operación, siendo funcional y sin sistemas de control complejos.

A continuación se muestran al empresario operando directamente el equipo después de una breve explicación de su funcionamiento, figuras 63, 64, 65, 66 y 67.



Figura 63. Empresario realizando bobina de grupo.



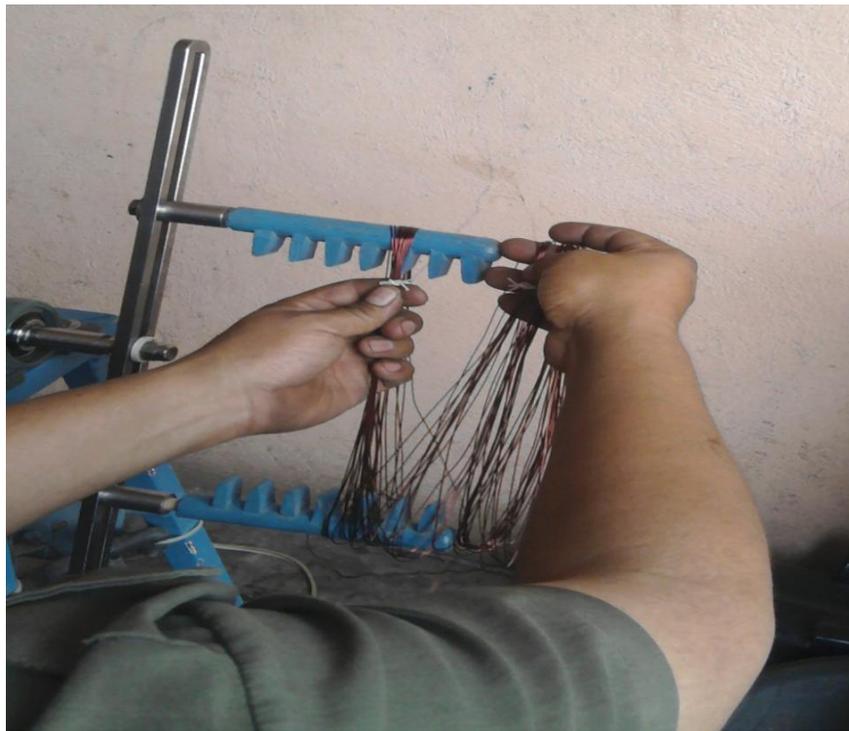
Figura 64. Empresario completando el grupo de bobinas.



Etapa A



Etapa B



Etapa C

Figura 65. Proceso de extracción de bobinas.



Figura 66. Grupo de bobinas.

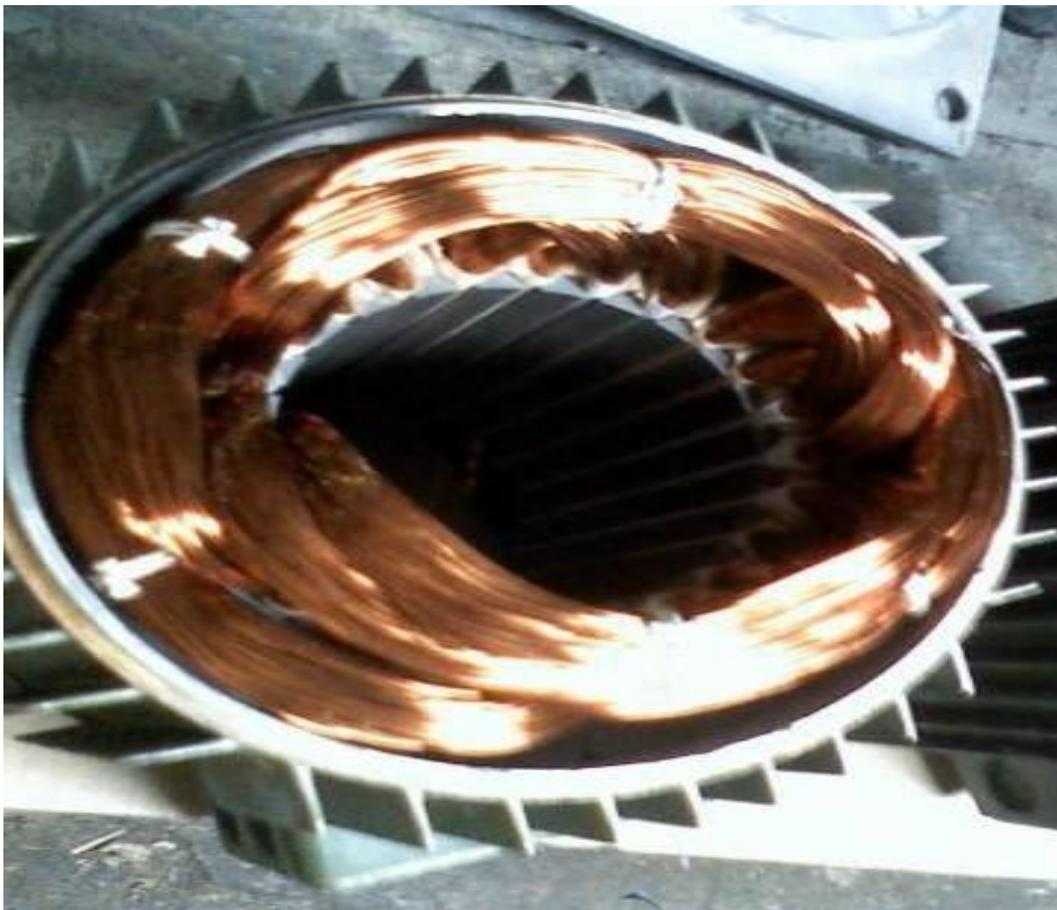


Figura 67. Bobinas instaladas en el estator.

Conclusiones

1. Con base en la metodología de investigación se diseñó una máquina embobinadora para motores eléctricos que satisface las necesidades iniciales planteados por los empresarios del ramo.
2. El costo de inversión de la máquina se encuentra por debajo de los \$15,000.00 00/100 MN, costo máximo propuesto, lo que permitirá que su adquisición sea factible para el sector empresarial del mantenimiento y reparación de motores eléctricos.
3. La máquina embobinadora cubre un 90% de la demanda de los empresarios especializados en el ramo. Debido a que se pueden realizar tanto embobinados en motores de inducción trifásicos y monofásicos
4. La máquina diseñada es totalmente ergonómica, ya que sus mecanismos permiten ajustar las bobinas de manera equilibrada, modificar las dimensiones de los hilos de alambre, con una extracción al final del proceso, en dos sencillos pasos (jalar y rotar); todo ello bajo la supervisión y condiciones del operario.
5. La máquina cuenta con un sistema de seguridad confiable, donde el operario tiene el control de todo el proceso, mediante el paro instantáneo del equipo y con los mecanismos perfectamente resguardados para evitar accidentes.
6. Debido a la morfología del equipo, no se requiere de un técnico especializado para su mantenimiento, ya que éste es muy simple y se puede realizar directamente en la misma empresa.

7. Con base en el análisis matemático, la selección de materiales determinada y las pruebas de validación experimental, se demostró que el sistema mecánico funciona adecuadamente para las condiciones de operación planteadas en los requerimientos.

8. El proyecto permite demostrar que las universidades pueden incidir con éxito en aspectos tan importantes, como es la innovación tecnológica en el diseño de máquinas, inmersos en un contexto de mayor conciencia de la investigación en el país, implementando acciones y ubicando los requerimientos esenciales que se pueden cubrir con el sector productivo para generar fuentes de trabajo, bienestar social y la reducción de la enorme dependencia tecnológica.

Bibliografía

- [1] MILEAF, Harry. "Electricidad"; Ed. Limusa Noriega; Tomo 7; México, D. F; 1999.
- [2] SERRANO, Iribarnegaray, Luis. "Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas"; Ed. Marcombo Editores; Barcelona, España; 1990.
- [3] SILVIO Labosco, Orlando; Pereira da Costa Dias, José Luiz. "Selección y aplicación de motores eléctricos"; Ed. Alfaomega; México, D. F; 1998.
- [4] CHAMPAN, Stephen J. "Máquinas eléctricas"; Ed. McGraw-Hill; Bogota, Colombia; 2000.
- [5] GURU, Bhag S.; HIZIROGLU, Hüsenyin R. "Máquinas eléctricas y Transformadores"; Ed. Alfaomega; México, D. F; 2003.
- [6] PONCE, Cruz, Pedro; Sampe Lopez, Javier. "Máquinas eléctricas y técnicas modernas de control"; Ed. Alfaomega; México, D. F; 2008.
- [7] AGUAYO, González, Francisco, Soltero, Sánchez, Víctor Manuel, "Mitología del diseño industrial", Ed. Alfaomega, México, 2003.
- [8] MOTT, R. L, "Diseño de elementos de máquinas", Ed. Prentice Hall, México, 1996.
- [9] NORTON, Robert L, "Diseño de máquinas", Ed. Prentice Hall, México, 1999.
- [10] NORTON, Robert L, "Diseño de maquinaria", Ed. McGraw-Hill, México, 2002.

- [11] KALPAKJIAN, Sarape, y Schmith, Steven R., "Manufactura, ingeniería y tecnología", Ed. Prentice Hall, México, 2002.
- [12] JIMÉNEZ, García, J., (2008): "Resistencia al desgaste de una aleación de aluminio termotratable". Memorias de las XVII Jornadas Metalúrgicas de la Sociedad Argentina de Metales. San Carlos Bariloche, Argentina. p. 450-453. 13-16 de abril.

Páginas WEB

- [13] http://es.wikipedia.org/wiki/Regla_de_la_mano_derecha [17 Octubre 2009 1:43pm.]
- [14] http://www.portalplanetasedna.com.ar/motor_electrico.htm [19 Octubre 2009 7:26pm.]
- [15] <http://www.biografica.info/redei/trabajo-sobre-motores> [20 octubre 2009 3:50pm.]