ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR ENGINYERIA
UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

Cálculo y Diseño de un Motor Lineal Tubular de Imanes Permanentes

Titulació: **Enginyeria Tècnica Industrial En Electricitat**

AUTOR: Javier Andolz Bielsa
DIRECTOR: Lluís Massagués Vidal
DATA: Setembre 2003.

INFORMACIÓ CONFIDENCIAL

Aquest projecte conté informació confidencial que no ha estat publicada, per obtenir més informació adreçar-se a:

Lluís Massagués Vidal

Teléfon: 977 559 695
Fax: 977 559 605
E-mail: mailto:llmassag@etse.urv.es

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR ENGINYERIA

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

Índice

1.1. Objeto del Proyecto Pág. 1

1.2. Titular Pág. 1

1.3. Antecedentes Pág. 1

1.4. Introducción a las Máquinas Especiales Pág. 2

1.5. Tipología de las Máquinas Eléctricas Lineales Pág. 3

1.6. Principio de Funcionamiento del Motor Lineal Plano Pág. 8

1.7. Diferencias Principales entre los Motores Lineales y los Rotativos Pág. 9

1.8. Efectos Especiales Pág. 10
- 1.8.1. Efectos de los Extremos Pág. 10
  - 1.8.1.1. Efectos de la Longitud Finita Pág. 10
  - 1.8.1.2. Efecto de Ancho Finito Pág. 12
  - 1.8.1.3. Efectos de Penetración Pág. 14

1.9. Factor de Calidad “G” Pág. 16

1.10. Imanes Permanentes Pág. 21
- 1.10.1. Tipos de Imanes Permanentes Pág. 22
  - 1.10.1.1. Imanes de Ferrita Pág. 22
  - 1.10.1.2. Imanes ALNICO Pág. 23
  - 1.10.1.3. Imanes Nd – Fe – B Pág. 23
  - 1.10.1.4. Imanes Sm – Co Pág. 24
- 1.10.2. Direcciones de Orientación Pág. 24
- 1.10.3. Geometría Básica Pág. 25
- 1.10.4. Motores de Imanes Permanentes Pág. 26

1.10.4.1. Motores de Corriente Continua de Imanes Permanentes Pág. 26
1.10.4.2. Motor Síncrono de Imanes Permanentes Pág. 30

1.11. Control de Máquinas mediante la Electrónica de Potencia Pág. 33
1.11.1. Desarrollo de los Componentes Electrónicos Pág. 33
1.11.2. Control Electrónico de Máquinas Eléctricas Pág. 35
1.11.3. Transistores de Unión Bipolares (BJT) Pág. 35
1.11.3.1. El Transistor de Unión Pág. 35
1.11.3.2. Comportamiento Físico de un Transistor Bipolar Pág. 38
1.11.3.3. El Transistor de Unión Bipolar como Interruptor Pág. 39
1.11.3.4. Velocidad de Conmutación del BJT Pág. 40
1.11.4. Transistor de Efecto Campo Pág. 42
1.11.4.1. Transistores de Unión de Efecto Campo Pág. 42
1.11.4.2. Funcionamiento del JFET Pág. 43
1.11.4.3. El MOSFET de Acumulación Pág. 44
1.11.4.4. Estructura del MOS de acumulación Pág. 45
1.11.4.5. Comportamiento Físico del MOSFET de Acumulación Pág. 46
1.11.4.6. El FET como Interruptor Pág. 47

1.12. Estado Actual de las Máquinas Eléctricas Lineales Pág. 48
1.12.1. Motores Lineales de Inducción Pág. 48
1.12.2. Motores Lineales Síncronos Pág. 60
1.12.3. Motores Lineales con Superconductores Pág. 60
1.12.4. Otros Motores Lineales Pág. 63
1.12.5. Características Generales de los Motores Lineales Pág. 66
1.12.6. Motor Lineal Tubular. Limitaciones de otros Motores Lineales Pág. 66

1.13. Descripción del Motor Pág. 67
1.13.1. Introducción Pág. 67
1.13.2. Parte Fija o Estator Pág. 67
1.13.2.1. Circuito Eléctrico Pág. 67
1.13.2.2. Circuito Dieléctrico Pág. 68
1.13.2.3. Circuito Magnético Pág. 69
1.13.3. Parte Móvil Pág. 72
1.13.3.1. Circuito Magnético Pág. 72
1.13.4. Construcción Mecánica Pág. 73
1.13.5. Alimentación Controlada mediante Transistores Pág. 74

1.14. Diagrama de Gantt Pág. 75

1.15. Resumen del Presupuesto Pág. 75

1.16. Bibliografía Pág. 76

Relación de figuras

Fig. 1 Transformación tipológica de un motor de inducción rotativo en un motor lineal plano.

Fig. 2 Motor lineal de inducción plano de simple inductor con lámina conductora para disminuir la reluctancia magnética.

Fig. 3 Motor lineal de inducido plano, de doble inductor, con lámina conductora sólida como inducido.

Fig. 4 Transformación tipológica de un motor de inducción rotativo en un motor lineal tubular. (La flecha indica el sentido del campo magnético).

Fig. 5 Motor lineal tubular trifásico.

Fig. 6 Motor lineal tubular de simple inductor, con cilindro conductor sólido como inducido y cilindro externo de material ferromagnético, para disminuir la reluctancia magnética.

Fig. 7 Motor lineal tubular de simple inductor construido con chapas magnéticas, usando paquetes de chapas en paralelo para disminuir la reluctancia magnética. Aparece fuerza de reluctancia lateral que ha de ser compensada por el sistema de guiado.

Fig. 8 Motor lineal tubular de construcción en cruz, de planchas paralelas, con inductor unilateral externo, construido con chapas magnéticas y un inducido en forma rectangular sólido, relleno de alambres de hierro, para disminuir la reluctancia magnética.

Fig. 9 Evolución de un motor de inducción monofásico rotativo en un motor lineal plano y en un motor lineal tubular.

Fig. 10 Esquema de un motor lineal.

Fig. 11 Esquema de un motor lineal (estator superior parcialmente cortado).

Fig. 12 Corte longitudinal de un motor lineal.

Fig. 13 Distribución de inducción en un motor lineal real.

Fig. 14 Representación esquemática de las corrientes dentro del inducido de un motor lineal. (Inducido lineal equivalente a un rotor de jaula de ardilla).

Fig. 15 Representación esquemática de las corrientes dentro del inducido de un motor lineal. (Inducido lineal macizo).

Fig. 16 Inducido tipo IPN.

Fig. 17 Distribución de las líneas de fuerza del campo magnético dentro del entrehierro de un motor lineal.

Fig. 18 Esquema eléctrico equivalente de un motor lineal.

Fig. 19 Curvas par/velocidad de un motor monofásico. Deducidas según la teoría de los campos rotatorios directo e inverso.

Fig. 20 Representación de un sistema de bobinas acopladas.

Fig. 21 Curva de magnetización de un imán permanente (a) y de un material magnético blando (b).

Fig. 22 Punto de trabajo (1), recta de carga (r) y recta de retorno (1-2).

Fig. 23 Circuito equivalente simplificado.

Fig. 24 Curva par – velocidad a U = cte.

Fig. 25 Circuito equivalente general.

Fig. 26 Motor de flujo axial de inducido impreso.

Fig. 27 Configuraciones básicas del estator.

Fig. 28 Gráfica de pares (*M*).

Fig. 29 Par instantáneo total ($M_{iT} = M_{med} + M_p$).

Fig. 30 Característica par de carga – inercia.

Fig. 31 Corriente convencional positiva en un transistor *pnp* (a) y *npn* (b).

Fig. 32 Símbolo de circuito para transistores *pnp* (a) y *npn* (b).

Fig. 33 Estructura de un transistor *npn* integrado comprendido un sustrato *p*, isla aislada y contactos de aluminio.

Fig. 34 Circuito en base común mostrando las fuentes de polarización V_{EE} y V_{CC}.

Fig. 35 Características tensión – intensidad de una fuente de corriente gobernada, con la onda resultante de una excitación en escalón.

Fig. 36 Componentes de corriente en un transistor con la unión emisor – base con polarización directa y la unión colector – base con polarización inversa.

Fig. 37 Interruptor BJT con su onda de entrada (a); ondas de v_o y de I_c mostrando los tiempos de subida, total, de retardo y de almacenaje durante la interrupción (b).

Fig. 38 Concentración de portadores minoritarios en las regiones de corte, activa directa y de saturación.

Fig. 39 Estructura del transistor (a), y símbolo del transistor de unión de efecto campo, de canal *n* (JFET) (b).

Fig. 40 Transistor de unión de efecto campo, de canal *p*, estructura (a), y símbolo del circuito (b).

Fig. 41 Estructura de un JFET integrado, planar de canal *n*.

Fig. 42 Estructura de un JFET de canal *n* mostrando la región de deplexión que constriñe el canal.

Fig. 43 Característica de salida del JFET de canal *n* 2N4869 (Cortesía de Siliconix Inc.).

Fig. 44 Estructura de MOSFET de acumulación: de canal *n* (a), y de canal *p* (b).

Fig. 45 Transistor de acumulación NMOS polarizado mostrando el canal inducido, con $V_{DS} = 0$ (a), y $V_{DS} > 0$ (b).

Fig. 46 Circuito de transistor de efecto campo metal – oxido – semiconductor con resistencia de carga MOSFET no lineal (a); característica de salida MOSFET con línea de carga no lineal (b).

Fig. 47 Característica de transferencia de tensión (v_o en función de v_i).

Fig. 48 Onda de entrada en escalón de tensión (v_i) (a), y onda de tensión v_o resultante (b).

Fig. 49 La mesa de posicionamiento del DXL Dual Carriage Linear.

Fig. 50 Dimensiones del túnel del metro de Osaka.

Fig. 51 Motor de inducción lineal controlado por un variador de frecuencia.

Fig. 52 Motor lineal tubular de dos componentes (vara y émbolo).

Fig. 53 Motor de inducción lineal Plantinum ® DDL.

Fig. 54 Motor de inducción lineal modelo 406LXR.

Fig. 55 Detalle del motor de inducción lineal modelo 406LXR.

Fig. 56 Motor de inducción lineal SERIES BB.

Fig. 57 Motor de inducción lineal SERIES AA.

Fig. 58 Motor de inducción lineal SERIES AB.

Fig. 59 Croquis de funcionamiento del motor de inducción Hitachi.

Fig. 60 Detalle de superficie utilizada por el motor de inducción Hitachi.

Fig. 61 Dimensiones del túnel y vagón que utiliza el motor Hitachi.

Fig. 62 Croquis de funcionamiento del motor Seraphim.

Fig. 63 Multi – modularidad del motor lineal.

Fig. 64 Ajuste flexible para el funcionamiento.

Fig. 65 Varios movimientos largos.

Fig. 66 Formación abundante.

Fig. 67 Posibilidad de uso de bobinas coreless.

Fig. 68 Sistema de refrigeración eficiente.

Fig. 69 Motor lineal síncrono ESR Pollmeier.

Fig. 70 Croquis de funcionamiento del Linear Motor Car Q & A.

Fig. 71 Sistema de propulsión.

Fig. 72 Sistema de levitación.

Fig. 73 Sistema de guiado.

Fig. 74 Motor Brushless Helmel.

Fig. 75 Motor lineal de c.c. sin escobillas.

Fig. 76 Motor lineal sin escobillas de alto rendimiento.

Fig. 77 Sistema de nano – posicionamiento del grupo Bayside.

Fig. 78 Etapa de nano – posicionamiento del grupo Bayside.

Fig. 79 Esquema eléctrico del devanado del motor ondulado, de simple capa.

Fig. 80 Índices de temperatura de los diferentes hilos esmaltados.

Fig. 81 Chapas en forma de peine.

Fig. 82 Chapas agrupadas en grupos de 4.

Fig. 83 Estator de hierro macizo.

Fig. 84 Curva de desmagnetización del Neodimio 235/160 h.

Fig. 85 Diagrama de Gantt.

1. Memoria Descriptiva

1.1. Objeto del Proyecto

El objeto del presente proyecto es el diseño y cálculo de un motor lineal tubular de imanes permanentes con la finalidad de profundizar en el estudio del cálculo de máquinas, así como de aventurarse en el diseño de una máquina que por sus características morfológicas y de funcionamiento, se diferencia en mucho de las máquinas eléctricas convencionales. Por otro lado se intenta fomentar el estudio y análisis de máquinas especiales con el objetivo de simplificar ciertas aplicaciones que las máquinas convencionales no pueden realizar por si mismas, a menos que empleen sistemas mecánicos complejos.

Actualmente el empleo de tecnologías de ultima generación en las máquinas eléctricas, ha provocado que éstas mejoren su eficiencia, longevidad y precisión. Este avance también implica la necesidad de adquirir los conocimientos necesarios para poder desarrollar y fabricar este tipo de máquinas en nuestro país. Por todo esto, es interesante que las universidades y los centros de investigación continúen con la labor de fomentar el estudio de este tipo de tecnologías para que en un futuro, no muy lejano, seamos capaces de desarrollarlas nosotros mismos, incluso mejorarlas.

1.2. Titular

El presente proyecto se redacta por encargo del Doctor Lluís Massagués Vidal profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (E.T.S.E.) de la Universidad Rovira y Virgili (U.R.V.) de Tarragona, a Javier Andolz Bielsa, NIF 46.136.821 – V con domicilio en la calle Pau Picasso nº 4 y 6 de Roda de Bará en la provincia de Tarragona. Los Titulares del proyecto son por tanto el Doctor Lluís Massagués Vidal ponente del proyecto y Javier Andolz Bielsa autor del mismo.

1.3. Antecedentes

En la Escuela Superior de Ingeniería de Tarragona existen dos precedentes de diseño y construcción de un motor lineal. El primero se trata de un motor de inducción lineal de estator unilateral, data del año1976, construido por el Doctor Don Francisco Javier Vivas Morte, quien fue profesor titular de la Universidad Laboral de Tarragona. El segundo proyecto de diseño y construcción se trata de un motor de inducción lineal de estator bilateral, data del año 1997, construido por Ángel Luis Benítez López, alumno de esta Escuela, con el objetivo de exhibirlo y experimentar con su funcionamiento. En este proyecto se pretende diseñar un motor lineal tubular de imanes permanentes con la pretensión de continuar el legado anterior así como de obtener una máquina un tanto diferente, por su morfología y por su alimentación con corriente continua.

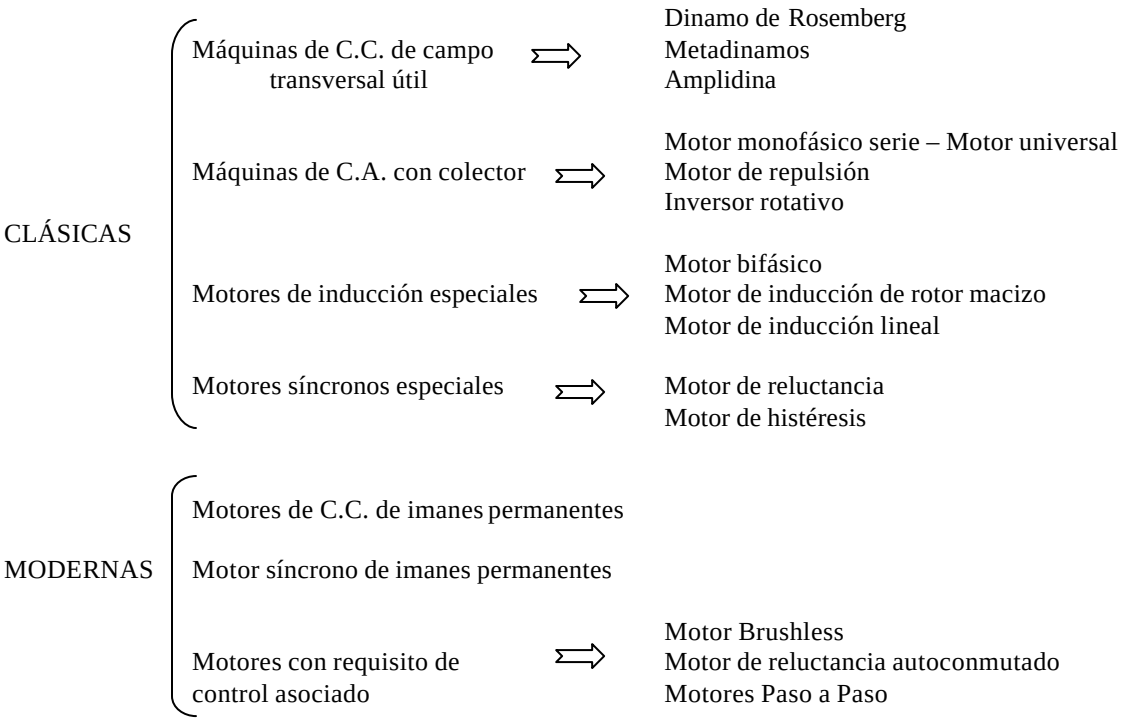
1.4. Introducción a las Máquinas Especiales

Las máquinas eléctricas desempeñan un papel fundamental en todo proceso industrial ya sean transformadores, generadores o motores. La mayor parte de las necesidades de servicio se resuelven con las máquinas que se podrían clasificar como "normales" o comunes, es decir, que tienen configuraciones convencionales. Un ejemplo de lo dicho sería la gran cantidad de motores de inducción trifásicos que hoy en día imperan en nuestras industrias o los grandes generadores síncronos que se instalan en las centrales de generación de energía eléctrica, ya sean nucleares, térmicas o hidráulicas.

Existen, no obstante, determinados campos de aplicación que requieren unas características de respuesta diferentes y que exigen tipos de máquinas de constitución y morfología específicas. Estas máquinas se denominan "especiales" y se clasifican en dos grupos bien diferenciados: clásicas y modernas.

En la segunda mitad del siglo XX se dan una serie de circunstancias relacionadas con la aparición y desarrollo de nuevos materiales y componentes al tiempo que surgen nuevas necesidades operativas, que provocan la fabricación de una serie de máquinas especiales clasificadas como modernas. En efecto, materiales como los imanes permanentes y plásticos; componentes y sistemas electrónicos de potencia y control como transistores, tiristores, circuitos integrados y microprocesadores; nuevas aplicaciones como robótica o informática y técnicas de fabricación apropiada, dan lugar al nacimiento y desarrollo de diversos motores en el campo de las potencias fraccionarias y subfraccionarias entre los que cabe destacar: los servomotores, los motores síncronos de imanes permanentes, los motores paso a paso y los Brushless.

A continuación se describen de forma breve y a modo de esquema, los diferentes tipos de máquinas "especiales" desde la Dinamo de Rosemberg hasta los motores con requisito de control asociado, como serian los motores paso a paso.



En nuestro caso, al ser una máquina lineal tubular de imanes permanentes alimentada con corriente continua, es interesante el estudio de los diferentes tipos de imanes permanentes y el principio de funcionamiento de los motores lineales.

El principio de funcionamiento en que se basan las máquinas lineales es igual al de cualquier otra máquina eléctrica puesto que el sistema que permite la conversión de la energía mecánica en energía eléctrica es la inducción electromagnética. La utilización de este tipo de morfología, abandonando la simetría axial, provoca la aparición de nuevos efectos, todos ellos complican la construcción y diseño de la máquina.

Al diseñar una máquina eléctrica se persigue el objetivo de conseguir la mejor máquina posible, es decir, aquella que cumpla las condiciones y características de calidad aceptadas como esenciales. Alguno de estos requisitos son: un alto rendimiento, una elevada relación entre potencia útil y peso, fiabilidad y un coste competitivo.

El cometido del ingeniero es diseñar y desarrollar equipos o máquinas que sean rentables económicamente, es decir, se persigue la idea de equilibrio entre calidad y rentabilidad. Pero no siempre prima el factor económico constructivo o de servicio, a veces, en determinadas aplicaciones, las ventajas y utilidades que proporcionan las máquinas “especiales” al conjunto de la instalación compensan el elevado coste económico de su construcción.

Por otra parte, ciertas cualidades de una máquina se pueden mejorar a expensas de otras, por ejemplo; es posible aumentar el rendimiento reduciendo la relación potencia-peso, también se puede modificar el factor de potencia por la simple alteración de las dimensiones de las ranuras. El Departamento de Diseño de las empresas fabricantes de máquinas eléctricas intenta satisfacer las necesidades industriales de sus clientes, según las diferentes aplicaciones previstas; por tanto, las máquinas resultantes pueden ser completamente diferentes, aun cuando sean de la misma velocidad y potencia.

1.5. Tipologías de las Máquinas Eléctricas Lineales

Los motores lineales pueden adoptar diversas formas y tamaños muy variados. Los inductores pueden ser planos, de simple o doble capa y tubulares; por lo que se refiere a los inducidos pueden tener una velocidad de sincronismo no uniforme, ser muy delgados, o tener una conductividad variable a lo largo de la dirección del movimiento. Pueden tener más parámetros variables que en un motor rotativo: el entrehierro, diámetro, f.m.m, etcétera.

La transformación tipológica de un motor rotativo en un motor lineal consiste en seccionar por un semiplano axial las coronas magnéticas, tanto del estator como del rotor, de un motor de jaula de ardilla y, a continuación desarrollarlo encima de un plano. Una vez el motor está desarrollado sobre el plano los paquetes magnéticos del estator y el rotor se convierten en paralelepípedos rectangulares separados por un entrehierro plano con sus ranuras enfrentadas.

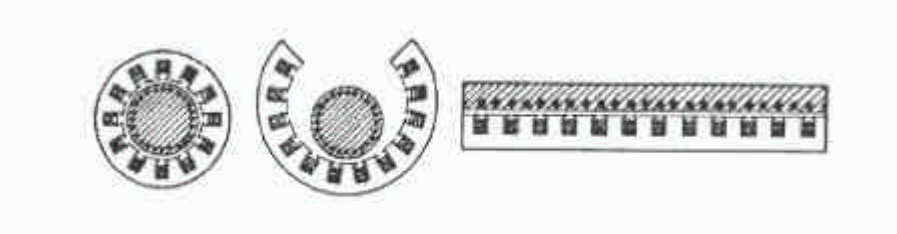


Fig. 1 Transformación tipológica de un motor de inducción rotativo en un motor lineal plano.

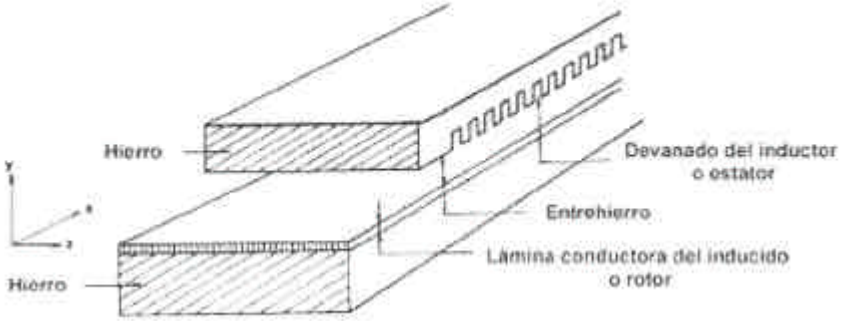


Fig. 2 Motor lineal de inducción plano de simple inductor con lámina conductora para disminuir la reluctancia magnética.

Para doblar la f.m.m. se puede disponer de un segundo inductor al otro lado del rotor *fig. 3*. Si el inducido está compuesto por hierro como en la *fig. 2* se necesita menos f.m.m. para obtener grandes fuerzas, el principal problema es la aparición de esfuerzos destacables de reluctancia en el sentido transversal al avance del inducido. Una buena solución para evitar esos esfuerzos es utilizar un inducido en forma de lámina conductora y sin hierro, para que sólo aparezcan esfuerzos de repulsión.

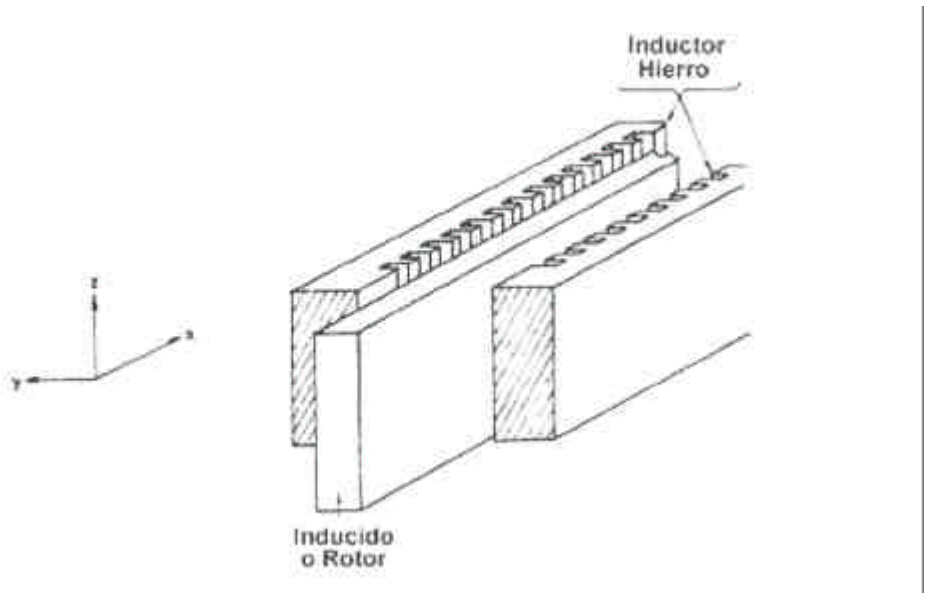


Fig. 3 Motor lineal de inducido plano, de doble inductor, y una lámina conductora sólida como inducido.

Otra ejecución del motor lineal consiste en plegar de nuevo la versión plana anterior alrededor de un eje paralelo a la dirección del movimiento rectilíneo según pone de manifiesto la *fig. 4*.

Esta configuración soluciona la problemática de las cabezas de bobina en el inducido, ya que las corrientes se cierran sobre si mismas.

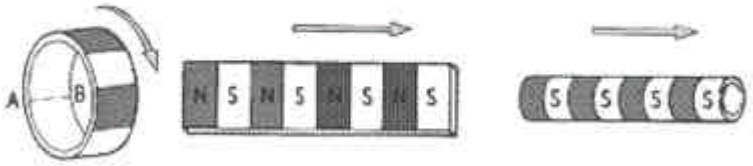


Fig. 4 Transformación tipológica de un motor de inducción rotativo en un motor lineal tubular.
(La flecha indica el sentido del campo magnético)

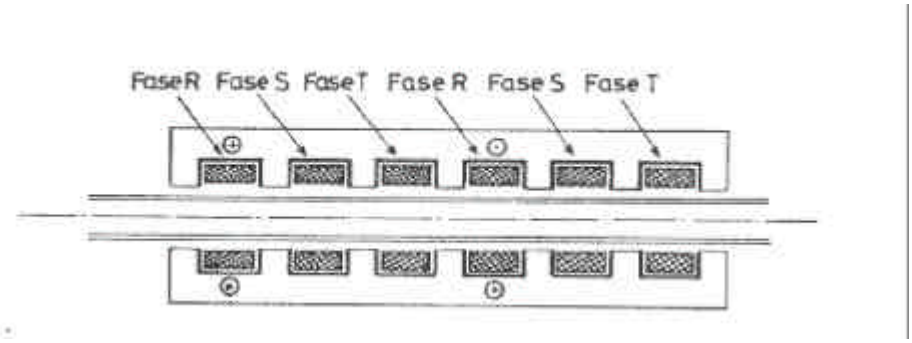


Fig. 5 Motor lineal tubular trifásico.

En el caso de un motor lineal trifásico el devanado está formado por bobinas toroidales alojadas en ranuras radiales, una por bobina, practicadas en el interior de un tubo de material magnético. Conectando las bobinas a un sistema trifásico de forma que sean recorridas sucesivamente por corrientes de sentido inverso, tal como se muestra en la *fig. 5*, en el interior del tubo se tendrá un campo alternativo deslizante a lo largo del eje del tubo. Si en el interior de este tubo colocamos un anillo conductor, las corrientes inducidas bajo la acción del campo magnético darán origen a fuerzas electromagnéticas que tenderán a desplazarlo axialmente.

A continuación se presentan diversas formas que adoptan las máquinas lineales tubulares:

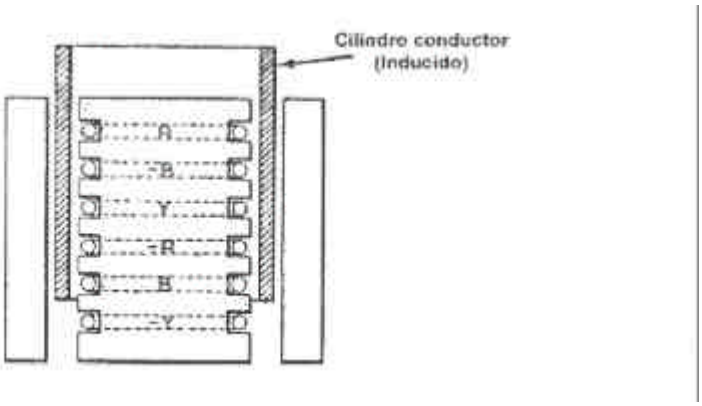


Fig. 6 Motor lineal tubular, de simple inductor con cilindro conductor sólido como inducido y con un cilindro externo de material ferromagnético para disminuir la reluctancia magnética.

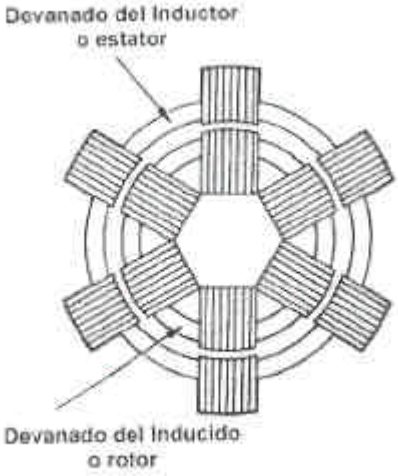


Fig. 7 Motor lineal tubular de simple inductor construido con chapas magnéticas usando paquetes de chapas en paralelo para disminuir la reluctancia magnética. Aparece fuerza de reluctancia lateral que ha de ser compensada por el sistema de guiado.

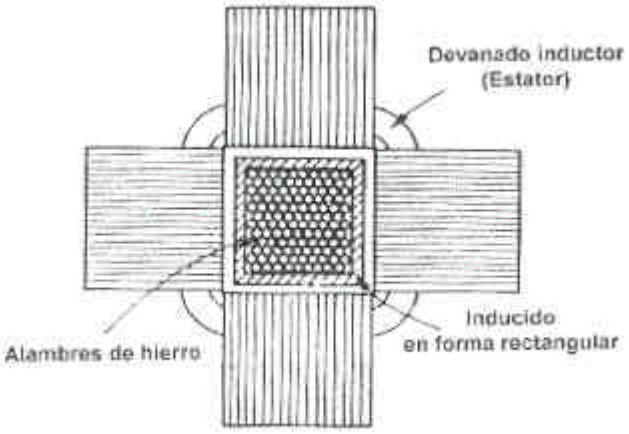
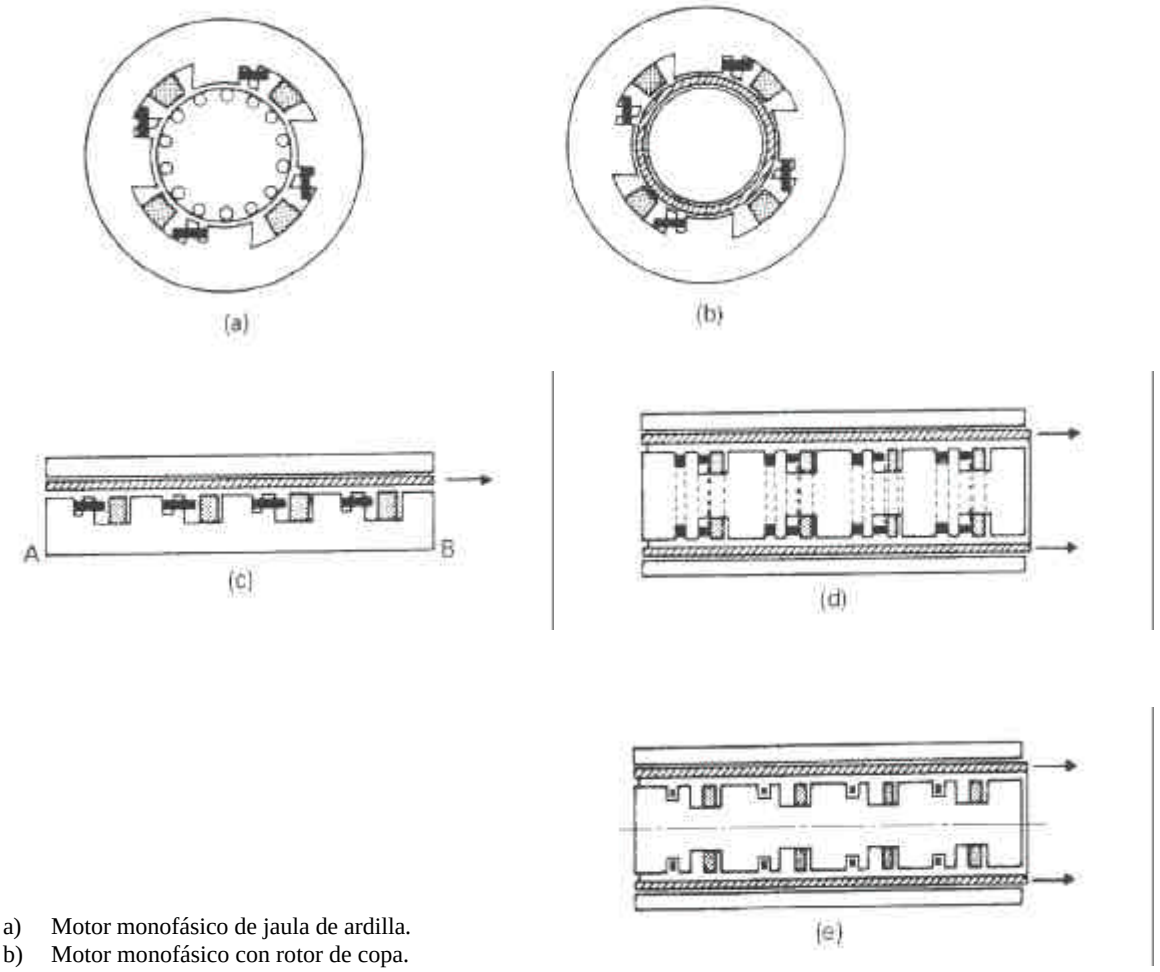


Fig. 8 Motor lineal tubular de construcción en cruz de planchas paralelas con inductor unilateral externo construido con chapas magnéticas y un inducido en forma rectangular sólido, relleno de alambres de hierro, para disminuir la reluctancia magnética.

Todas estas tipologías de motores lineales pueden tener diferentes prestaciones modificando los tipos de devanados eléctricos utilizados, pasos polares, número de fases, etcétera.



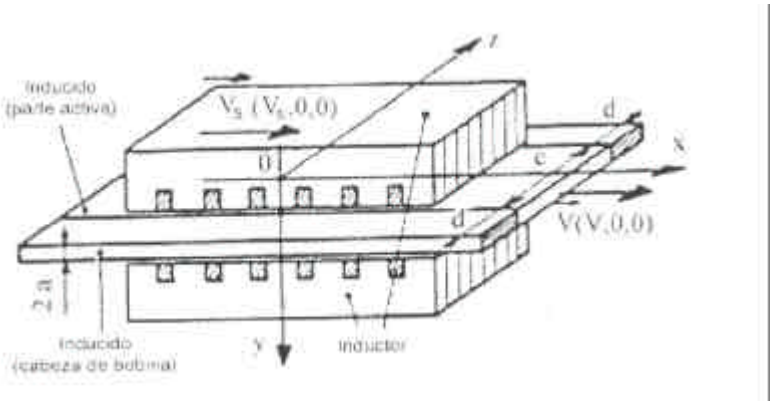
a) Motor monofásico de jaula de ardilla.
b) Motor monofásico con rotor de copa.
c) Motor lineal monofásico con inductor plano.
d) Motor lineal tubular monofásico.
e) Motor lineal tubular monofásico con espira de sombra.

Fig. 9 Evolución de un motor de inducción monofásico rotativo en un motor lineal plano y en un motor lineal tubular.

Poder conseguir el motor lineal tubular monofásico con espira de sombra es una simplificación constructiva importante. De esta manera se simplificaría notablemente la alimentación eléctrica, especialmente en el caso de querer aumentar la frecuencia.

1.6. Principio de Funcionamiento de Motor Lineal Plano

El esquema de la *fig. 10* representa un motor lineal, el desplazamiento del inductor se efectúa según el eje longitudinal *OX* a una velocidad lineal *V*.



V_s: velocidad del campo magnético
V: velocidad mecánica del inducido
2a: grosor del inducido
c: ancho de la parte activa del inducido
d: ancho de la cabeza de bobina

Fig. 10 Esquema de un motor lineal

La corriente de excitación del devanado inductor circula en la dirección *OZ*, creando un campo principal de inducción magnético, en la dirección del eje transversal *OY*. Si estos devanados, están correctamente repartidos y son alimentados por una fuente polifásica de pulsación *w*, el campo magnético principal y la fuerza magnetomotriz se propaga según el eje *OX*, de acuerdo con una onda deslizante a una velocidad sincrónica V_s.

$$V_s = \frac{L \cdot f_1}{p} \quad [m/s] \qquad (1)$$

De esta manera, el flujo magnético correspondiente atraviesa el entrehierro, engendrando fuerzas electromotrices (f.e.m.), y a la vez corrientes. El flujo magnético derivado de estas corrientes se desplaza respecto al inductor y el inducido, pero este mismo flujo magnético permanece inmóvil respecto al flujo principal.

La interacción de los dos flujos crea una fuerza motriz lineal que lleva al inductor a una velocidad *V*, que es inferior a la del campo magnético V_s.

Se define el desplazamiento s de un motor de inducción lineal por la siguiente relación:

$$s = \frac{V_s - V}{V} \qquad (2)$$

Donde: V_s ? velocidad de sincronismo
V ? velocidad del inducido

El principio fundamental de funcionamiento es entonces como el de una máquina rotativa, que tiene un acoplamiento magnético asíncrono. La concepción eléctrica de los devanados inductores de los motores lineales y la de los motores rotativos es la misma, es decir, siguen los mismos principios.

Generalmente no sucede lo mismo con los devanados inducidos. El inducido puede ser asimilado como una lámina conductora de ancho *c + 2d* y un grosor *2a*. Por una parte el ancho *c*, se encuentra completamente dentro del campo magnético principal, que es la parte activa donde se generan las corrientes inducidas. Trasladándose a las máquinas rotativas este ancho *c* se puede equiparar con los conductores localizados en las ranuras del rotor. Mientras que las dos bandas laterales *d*, situadas una en cada lado de la parte activa *c*, y por tanto fuera del campo magnético principal, detectan una función análoga a la de las cabezas de bobinas comunes de las máquinas rotativas. Estos anchos forman parte del circuito de cerramiento de las corrientes inducidas.

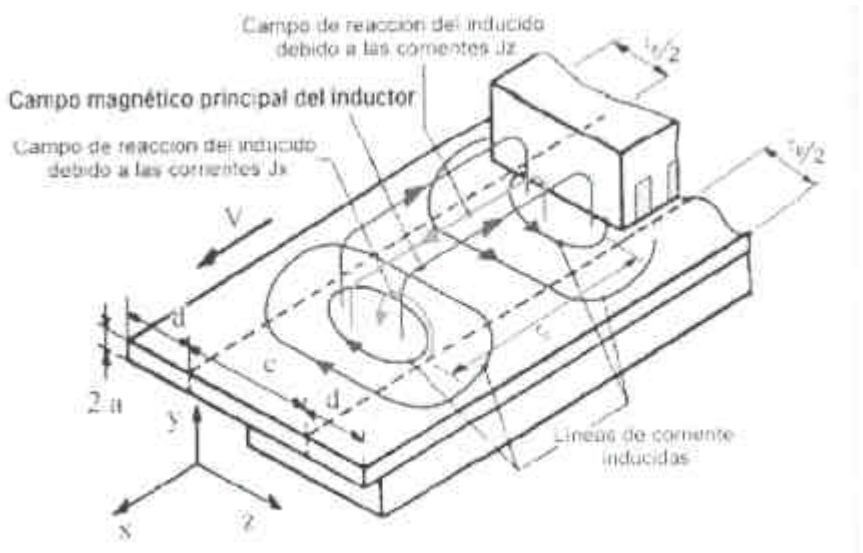


Fig. 11 Esquema de un motor lineal (estator superior parcialmente cortado).

1.7. Diferencias Principales entre los Motores Lineales y los Rotativos

Las principales diferencias entre los motores lineales y los motores rotativos son:

- El inductor está abierto por los dos extremos.

- El inducido es generalmente macizo y sin hierro. Al no tener ranuras, permite los pasos y entrehierros progresivos, estatores alargados o acortados y otros efectos. Un inducido sin hierro nos permite un circuito magnético diferente, sin esfuerzos de reluctancia entre rotor y estator, una disminución del momento de inercia, pero también un aumento del entrehierro.

- El entrehierro es importante y ocupado en gran parte por el inducido y las dos holguras mecánicas, pudiendo llegar a ser 10 veces mayor que en las máquinas

rotativas. Tener un entrehierro muy grande obliga a aumentar el nº de espiras o la corriente para aumentar la f.m.m. y poder mantener una inducción de trabajo en él. El aumento de espiras nos hace incrementar la X_1, y un aumento de la corriente nos hace elevar la temperatura de la máquina.

- El inductor puede ser bilateral, con el consiguiente aumento de la relación potencia / peso.

Todas estas particularidades, repercuten en el funcionamiento de las máquinas lineales y se incluyen dentro de los efectos especiales, que posteriormente se comentarán.

Por una parte, el campo giratorio de las máquinas rotativas corresponde en una primera aproximación al campo deslizante de las máquinas lineales, perturbado por las formas particulares de los circuitos magnético y eléctrico, debidas a los efectos de las extremidades.

Por otra parte, la componente principal del campo inductor no atraviesa obligatoriamente el entrehierro en la dirección normal, debido a los efectos de penetración.

1.8. Efectos Especiales

1.8.1. Efectos de los Extremos

La forma de onda en los motores lineales puede ser representada aproximadamente por una onda deslizante que varía solamente en fase y módulo, en numerosos puntos. A lo largo del entrehierro sufre perturbaciones causadas por los efectos de las extremidades, que a su vez se pueden clasificar en dos categorías:

- El **Efecto de Longitud Finita**, debido principalmente a las discontinuidades magnéticas de entrada y salida de la máquina.

- El **Efecto de Ancho Finito** o efecto propio, debido al cierre de las corrientes en el interior de la parte activa del inducido.

1.8.1.1. Efecto de la Longitud Finita

La *fig. 12* representa una sección longitudinal de un motor de inducción lineal con representación de ciertas líneas del campo magnético.

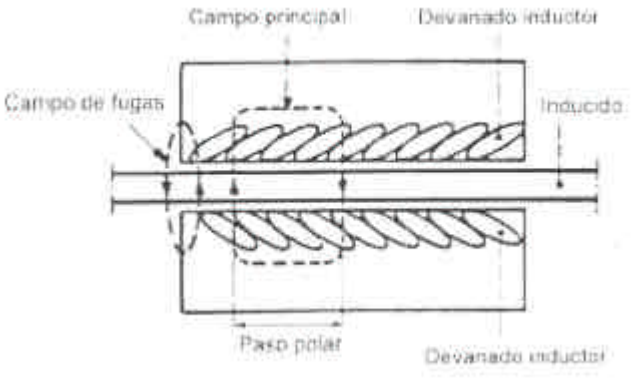


Fig. 12 Corte longitudinal de un motor lineal

Si se examina solamente la distribución del campo magnético del inductor, sin tener en cuenta la influencia de las corrientes inducidas, las corrientes de excitación crean dentro del entrehierro una onda de inducción deslizante B que, por un circuito magnético infinitamente largo, será sensiblemente equivalente a la onda giratoria de las máquinas rotativas y tendrá la expresión.

$$B = B_m^{\,j(w\cdot t - k\cdot x)} \qquad (3)$$

Pero las dimensiones finitas del inductor implican una variación brusca de la permeabilidad magnética en las extremidades, que se traduce no solamente en un campo de fugas o de dispersión, sino que además, aparecen componentes pulsatorias parásitas que se propagan por el interior de la máquina.

En carga, la distorsión del campo se incrementa por los fenómenos propios que se producen en el inducido. El más importante es el debido a las corrientes salientes de los extremos de la máquina. En efecto, el inducido de una máquina lineal puede asimilarse como una lámina conductora infinita que se desarrolla dentro de un campo magnético, en él, solamente en un instante de tiempo, está localizado entre los inductores de longitud finita.

Las corrientes pueden entonces circular por los extremos, dentro de las partes de inducido situadas bajo el campo magnético principal. De esta forma, en los elementos que se localizan justo antes de la entrada y justamente después de la salida de los inductores, se inducen fuerzas electromotrices parásitas. La perturbación se entiende dentro de una distancia determinada que depende esencialmente de la velocidad del inducido y de si el número de polos de los inductores es par o bien impar.

A una cierta distancia, las fuerzas electromotrices f.e.m. de los efectos de longitud finita se unen a la f.e.m. inducidas por el campo magnético principal. El campo de inducción resultante de la superposición de los campos inductores y de la reacción de inducido, que contiene la onda fundamental deslizante y los términos parásitos, se expresa en la forma compleja siguiente.

$$B = B_m^{\,j(w\cdot t - k\cdot x)} \sum_n B_{mn}^{\,a_n \cdot x} \qquad (4)$$

Donde: B_{mn} ? amplitud compleja de las ondas parásitas
a_n ? exponente complejo dependiente de las dimensione del motor y de sus características magnéticas y eléctricas

De acuerdo con la expresión determinada, los términos parásitos corresponden, dentro del caso general, con las ondas deslizantes atenuadas. Donde las velocidades son diferentes a V_c. Dentro del caso particular donde a_n es real, las componentes resultantes son pulsatorias.

En la *fig.13* se muestra la distribución del valor eficaz de la inducción teórica calculada por programación con la obtenida realmente en un motor lineal.

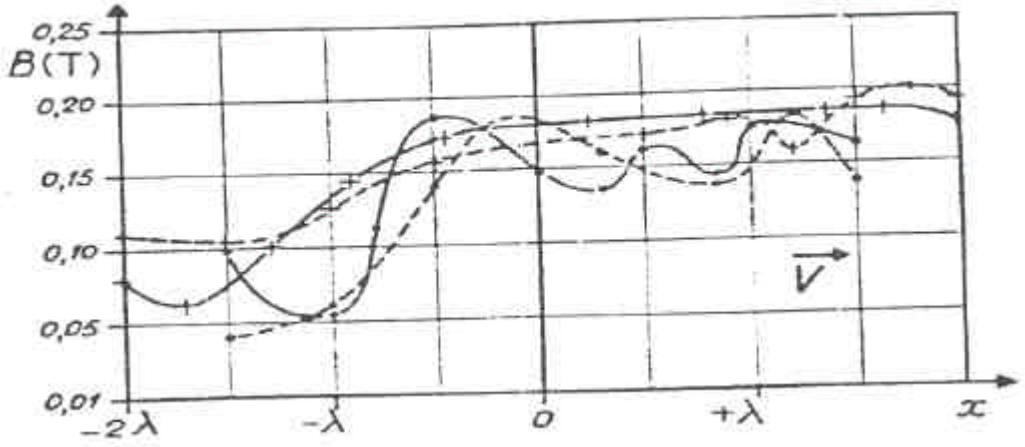


Fig. 13 Distribución de Inducción en un motor lineal real

Se puede comprobar que las componentes parásitas disminuyen la inducción de entrada y la aumentan a la salida de la máquina. De esta forma, las líneas de repartición de la inducción dentro del entrehierro, podrán ser modificadas profundamente de una manera desfavorable, si no se prevée una corrección para paliar los efectos de la longitud finita.

1.8.1.2. Efecto de Ancho Finito

La onda principal de inducción que se está definiendo engendra dentro del inducido una onda deslizante de f.e.m. que cambia de signo en cada paso polar, provocando de esta forma el cierre de las corrientes correspondientes. Si la banda conductora que representa el inducido corresponde a un desarrollo plano de un rotor de jaula de ardilla, donde cada barra está separada de las otras por un aislante, todas las corrientes inducidas se cerrarán como se indica en la *fig.14*, por las barras conductoras laterales (equivalentes a los anillos de cortocircuito de un rotor de jaula de ardilla).

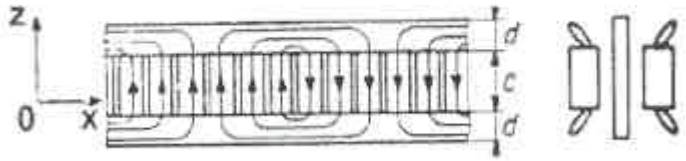


Fig. 14 Representación esquemática de las corrientes dentro del inducido de un motor lineal.
(Inducido lineal equivalente a un rotor de jaula de ardilla)

El cambio de sentido de las corrientes entre las diferentes barras se hace entonces por las conexiones frontales como en una máquina rotativa. Sin embargo, dentro de un caso general, donde la parte útil del inducido está constituida por un conductor único, la corriente se cierra en parte por las bandas laterales *d*, y parcialmente por el interior de la zona activa *c*.

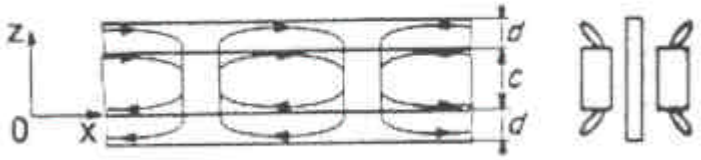


Fig. 15 Representación esquemática de las corrientes dentro del inducido de un motor lineal.
(Inducido lineal macizo)

Estas corrientes traducen el efecto de la anchura disminuyendo la componente útil (según el eje *OZ*) de la corriente inducida, y a la vez la potencia del motor. Su importancia depende de la anchura relativa de las partes, donde cambian y se anulan las f.e.m.s. útiles, así como de la resistividad de las bandas laterales de cierre.

La cabeza de bobina rotórica *d* es de vital importancia, pues de ella depende principalmente la R_2 y la X_2. Si la zona *d* (cabeza de bobina) es muy grande, X_2 aumenta y si es insuficiente, R_2 aumenta. En rotores planos, debe tener una disminución equivalente al paso polar como mínimo, para permitir la circulación de las corrientes rotóricas con densidad de corriente uniforme.

En el caso de utilizar rotores con extremos ensanchados, de forma parecida a la de las vigas con sección IPN, estos ensanchamientos deben tener la sección equivalente necesaria para la cabeza de bobina. Esta sección ha de ser la misma que la de cada circuito principal de corriente rotórica, es decir: $1/2 \cdot t_p$, *2a*.

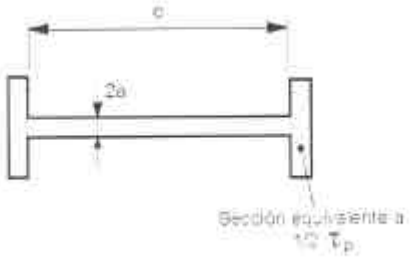


Fig. 16 Inducido tipo IPN

Esta geometría del inducido tipo IPN minimiza la X_2 a igualdad de R_2, al describir la I_2 una espira más cerrada.

1.8.1.3. Efectos de Penetración

Dentro de un motor ideal, despreciando los defectos en los extremos, el campo de inducción resultante es de la forma:

$$B = \sum_m B_n^{[j(w\cdot t - k\cdot x)]} \qquad (5)$$

Cuando este campo pasa a través del inducido en movimiento, el campo sufre una denominación que se traduce en un achatamiento de las líneas de fuerza. Introduciendo el deslizamiento g y el número de Reynols magnético, la disminución de la componente útil de la inducción según el eje OY es de la forma:

$$g = \frac{V_v - V}{V} \qquad (6)$$

$$\Re_m = \frac{m \cdot V_c}{k \cdot r} \qquad (7)$$

Donde se puede definir el grueso crítico a_0 del entrehierro correspondiente a una reducción de la inducción B_y; esta profundidad de penetración, es semejante al efecto pelicular y viene dado por la relación:

$$a_0 = \frac{K_0}{g \cdot \Re_m} \qquad (8)$$

con:

$$K_0 \neq f(g, \Re_m) \qquad (9)$$

Esta expresión muestra que el efecto es más pronunciado, en los motores lineales con inducido magnético, con deslizamientos elevados.

La *fig. 17* muestra que para un motor caracterizado por $\hat{A}_m = 50$ y $a = 10^{-2}$ $[m]$ del trazado de las líneas de inducción para $g = 0$ y $g = 0.7$, aparece, en el primer caso un efecto de la penetración que se traduce en un achatamiento de las líneas de fuerza.

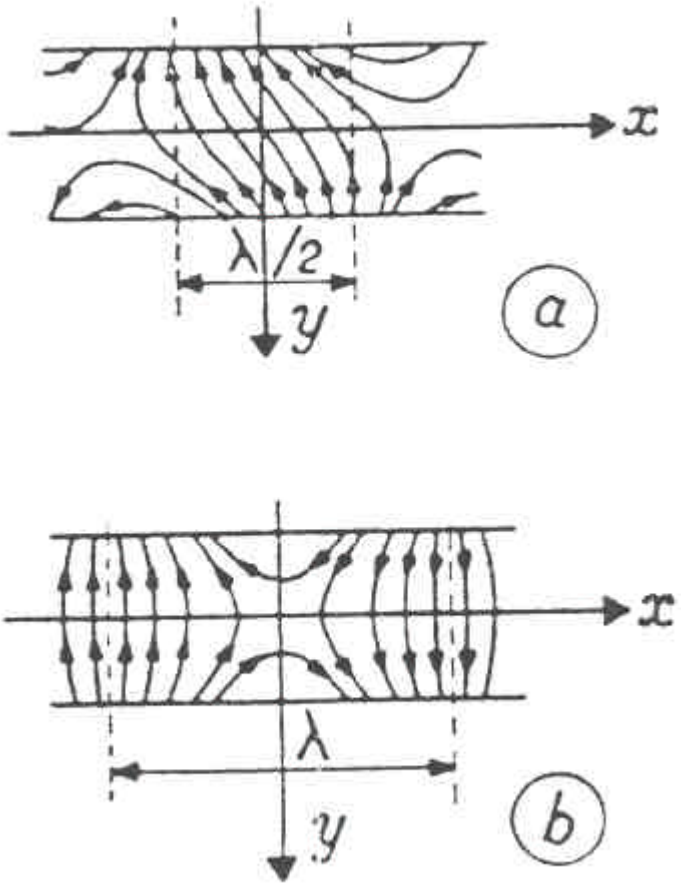


Fig. 17 Distribución de las líneas de fuerza del campo magnético dentro del entrehierro de un motor lineal.

Es posible tener en cuenta los efectos de la penetración, en función del esquema monofásico equivalente, del motor lineal ideal. La *fig.18* representa este esquema del motor lineal ideal con los siguientes coeficientes:

- R_c y X_c: representan la resistencia y la reactancia del inductor
- R_i y X_i: representan la resistencia y la reactancia del inducido
- X_m: representa la reactancia de acoplamiento magnético entre el inductor y el inducido.
- Z_{mp}: es una componente de la impedancia de magnetización propia del motor lineal. La parte real representa las pérdidas electromagnéticas habituales y las que provoca el achatamiento de las líneas de fuerza dentro del entrehierro, la parte imaginaria representa la disminución resultante de los efectos de penetración del acoplamiento magnético.

- K_r: es un coeficiente corrector X_i introducido por la parte real, de las pérdidas por efecto Joule y por la parte imaginaria, del aumento debido al efecto de penetración de las pérdidas magnéticas.

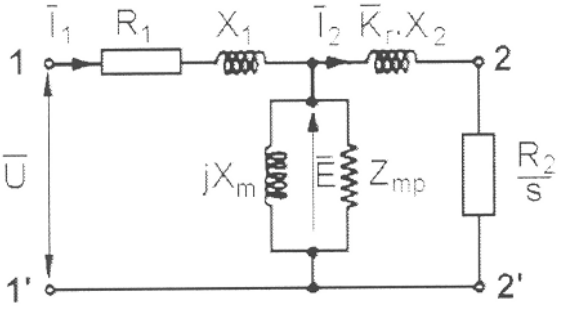


Fig. 18 Esquema eléctrico equivalente de un motor lineal

Las influencias de los coeficientes Z_{mp} y K_r y por lo tanto del efecto de penetración, son prácticamente despreciables cuando:

$$\frac{p \cdot a}{t} \cdot g \cdot \Re_m << 1 \qquad (10)$$

Se puede considerar entonces, como un plano paralelo al campo magnético dentro del entrehierro de un motor lineal, donde el paso polar es grande frente a la cantidad de $a \cdot g \cdot \Re_m$ que aparece así, con un entrehierro equivalente.

A través del esquema teórico anterior se pueden extraer conclusiones de tipo energético para un motor real, perturbado por los efectos de las extremidades. El campo es puramente deslizante, se pueden por el contrario deducir parámetros concernientes a los fenómenos referentes al acoplamiento magnético; por ejemplo, el factor de potencia de la máquina se ha representado teniendo en cuenta el efecto de penetración.

$$\cos j = \frac{g \cdot \Re_m}{\sqrt{1+g^2 \cdot \Re_m^{\,2}}} \cdot \sqrt{\left(1+\frac{X_c}{X_m}\right)^2 + \left(\frac{X_c}{X_m} \cdot g \cdot \Re_m\right)^2} \qquad (11)$$

1.9. Factor de Calidad “G”

Cualesquiera que sean los aspectos de una máquina electromagnética que se deseen estudiar, es evidente que el fundamento constructivo consistirá en la combinación de un circuito magnético enlazado por un circuito eléctrico, y a partir de ellos, se deducirán todas las propiedades de dicha máquina.

Si hay que definir la calidad de una máquina, desde el punto de vista general, es evidente que dicho término debe englobar aspectos vitales que no se refieren sólo al rendimiento, ya que este puede aumentar a costa de otras características, tales como la relación potencia / peso, el factor de potencia o el costo.

El factor de calidad debe expresar la capacidad de una máquina para transformar potencia de una forma a otra. En el campo de la mecánica, la potencia es igual al producto de la fuerza por la velocidad. En el campo de la electricidad, la fuerza es igual al producto de la corriente por el flujo magnético, $F = k \cdot (I \cdot f)$.
En los circuitos eléctricos se precisa una f.e.m. que haga circular una corriente. Los circuitos magnéticos precisan de una corriente para que se produzca un flujo. Por consiguiente, el factor de calidad será algo que estará relacionado con la facilidad de obtener cierta corriente, *I*, a partir de una f.e.m. dada, *E*, así como con la facilidad de obtener cierto flujo, f, de una cierta corriente, *I*, de manera que entre otras relaciones el factor de calidad *G* es proporcional al producto:

$$\left(\frac{I}{E}\right)\cdot\left(\frac{f}{\Gamma}\right) \qquad (12)$$

Los paréntesis también significan lo siguiente: I/E es igual al $1/R$, según se deduce de la ley de Ohm; y f/Γ es proporcional a la inversa de la reluctancia, pero en particular de la inductancia, *L*, de una simple espira que rodea al circuito magnético, de manera que *G* viene a ser proporcional al cociente de L/R que posee las dimensiones de un tiempo.

Resulta interesante que el factor de calidad sea una magnitud adimensional, por lo que a continuación se estudia dicha proporcionalidad a fin de descubrir lo que representa el término L/R.

Fuerza es igual al producto de *B* por *I* y la longitud del conductor es igual al producto de *B* por la longitud del conductor y por la longitud de su recorrido a lo largo del entrehierro, según la dirección de la fuerza, de manera que $f \cdot I$ es el trabajo realizado por la fuerza.

Pero el factor de calidad se ha definido anteriormente como la capacidad de una máquina para transformar potencia de una forma a otra, es por lo tanto lógico que la expresión final de *G* deba contener la velocidad angular *w*, la cual tiene dimensiones $1/tiempo$, con todo esto el factor de calidad queda expresado por la siguiente ecuación:

$$G = \frac{L \cdot w}{R} \cdot t \text{ , siendo } t = \frac{L}{R} \qquad (13)$$

El primer aspecto que se puede observar es que el factor de calidad *G* es independiente del número de espiras del circuito eléctrico, siempre que el área de la sección transversal total de los conductores permanezca constante, ya que la resistencia y la inductancia son entonces proporcionales al cuadrado del número de espiras.

En una máquina existen normalmente dos o más circuitos eléctricos que enlazan con un circuito magnético común, y por lo tanto es importante saber a cuál de ellos se refieren los valores de *L* y *R*.

A cada régimen de funcionamiento de la máquina le corresponderá un valor determinado de la intensidad de corriente. Si se trata de una máquina asíncrona, podemos considerar que esta corriente llega a ella dividida entre las ramas siguientes:

1) La constituida por una reactancia magnetizante $j \cdot X_m$.
2) La de una resistencia R_m, que equivale a las pérdidas en el hierro.
3) La de la resistencia de rotor, en serie con la inductancia de dispersión y con la resistencia equivalente de carga.

$$\left[\left(\frac{R_2}{s}\right) + j \cdot X\right] \qquad (14)$$

Básicamente, en lo que respecta al funcionamiento de una máquina, se puede decir que el mecanismo de conversión electromagnético en sí comienza en el punto de intervención del circuito magnético. En otras palabras, la acción electromagnética es independiente del valor de la impedancia del circuito primario, $M = k \cdot (R_2 / s \cdot X_2)$. El único caso en que la impedancia del circuito primario tendrá importancia será cuando se desea realizar alguna medición a la entrada a dicho circuito. En este caso, el circuito primario está naturalmente involucrado, pero en los demás el circuito eléctrico al que nos habremos de referir es el secundario, es decir, el circuito del rotor, y en ausencia de reactancia de dispersión secundaria, el valor de *G* vendrá dado simplemente por X_m / R_2 .

$$G = \frac{X_m}{R_2} \qquad (15)$$

A fin de aclarar el significado de expresiones tales como mecanismo de la conversión, acción electromagnética y operación fundamental, se da ahora un ejemplo particular que revele, de paso, la importancia del factor de calidad de los motores de inducción. Sea un motor de inducción monofásico; el error más común es el de suponer que en el entrehierro el bobinado del estator produce un campo magnético pulsatorio del tipo $B \cdot sen(wt)$, distribuido senoidalmente a lo largo del desarrollo periférico del entrehierro. Dicho campo puede teóricamente ser dividido en dos componentes iguales, pero girando en sentidos opuestos. La acción de cada campo giratorio se considera entonces por separado, obteniéndose dos curvas que nos relacionan la velocidad con el par motor, *fig. 19*, una para el campo que gira hacia delante y otra para el que va hacia atrás. El par útil viene dado por las ordenadas de la zona rayada e igualmente pueden deducirse gran número de propiedades, las cuales, si bien son correctas cualitativamente, no lo serán cuantitativamente. Por ejemplo, a la vista de la *fig. 19* puede decirse que:

a) la máquina no tiene arranque
b) la máquina podrá girar en cualquier sentido de la marcha
c) la velocidad para el funcionamiento de la máquina en vacío es ligeramente inferior a la velocidad de sincronísmo.

Siguiendo con estos argumentos falsos podemos también preguntarnos qué es lo que fija la forma de las curvas par / velocidad de la *fig. 19.*

Fig. 19 Curvas par / velocidad de un motor monofásico.
Deducidas según la teoría de los campos rotatorios directo e inverso.

En el supuesto de que la máquina este alimentada a tensión constante, sería lógico que el valor en la curva de par hacia delante se encontrase en el instante en que el valor del deslizamiento fuese más o menos igual a R_2X_2; salvo, pues, que X_2 exceda a R_2, las curvas serían del tipo que muestra la *fig. 19* con lo cual el par resistente, resultaría siempre superior al par motor y la máquina nunca lograría arrancar. Sin embargo, este argumento debe incurrir en algún error fundamental, puesto que el resultado de aumentar la inductancia de dispersión es hacer que la máquina sea peor, ya que el flujo de dispersión constituye una imperfección. A pesar de ello, se deduce aparentemente que la máquina funcionaría mejor, ya que al aumentar el valor de X_2 la velocidad de marcha en vacío se aproxima a la de sincronismo. Podría concluirse que para que la máquina funcione como un motor de inducción monofásico es preciso que $R_2/X_2 < 1$; y puesto que R_2 constituye a su vez otra imperfección, cabe añadir que debería ser una máquina muy extraordinaria aquella cuyo funcionamiento, dependa de la relación de dos imperfecciones.

El error se encuentra en el planteamiento inicial, al considerar que el flujo es solamente pulsatorio, puesto que estudiando la máquina desde el punto de vista teórico del campo transversal, se descubre inmediatamente que para todas las velocidades distintas de cero existe una componente rotativa del campo resultante, la cual no aparecería en la teoría del flujo pulsante. Esta última, solamente sería cierta para el caso de una máquina cuyo estator estuviera alimentado íntegramente en paralelo, de modo que cada diente fuese abrazado por una bobina independiente conectada a la fuente de tensión alterna y con las características precisas para que se obtuviera una distribución senoidal de inducción. Entre otras cosas, ello implicaría que los dientes situados sobre los ejes transversales deberían llevar sus bobinas en cortocircuito. Ciertamente, en estas condiciones se cumpliría que la máquina sólo funcionaría cuando la reactancia de dispersión excediese de ciertos valores. En la práctica, el flujo sobre dichos ejes puede alcanzar cualquier valor, ya que el estator lleva bobinas del tipo que se presenta en la *fig. 20* y los flujos pueden desarrollarse independientemente.

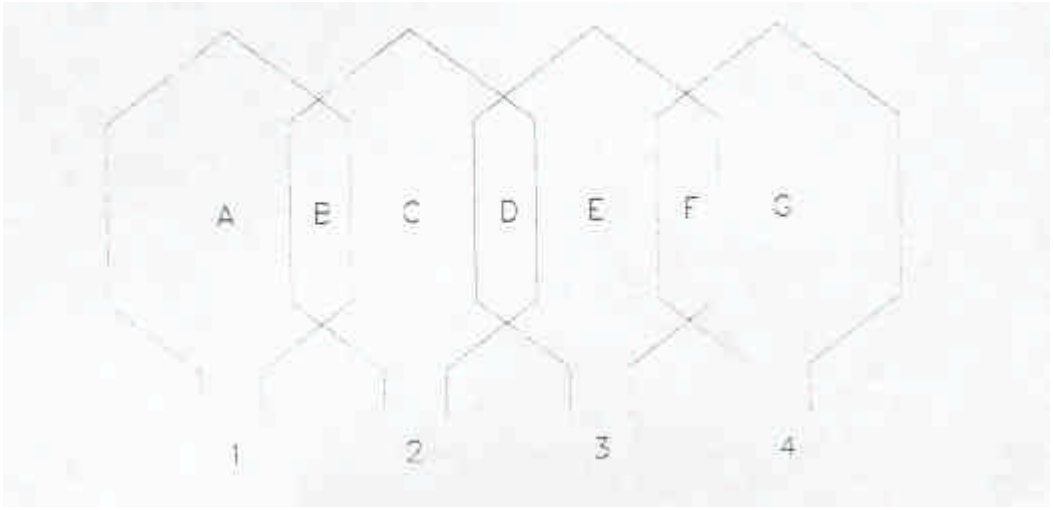


Fig. 20 Representación de un sistema de bobinas acopladas

Incluso si el estator contiene simplemente un par de bobinas ocurrirá que habrá bastante espacio al margen de las máquinas y el flujo en los ejes transversales será impuesto por el rotor al girar. No existe error alguno en la subdivisión del flujo pulsante en otros dos rotativos de sentidos opuestos, en tanto que solamente exista dicho flujo, pero ello no ocurre en un motor monofásico, a menos que el rotor esté bloqueado. Por otra parte, si la teoría propuesta se basa en una distribución especial de la capa de corriente del estator y esta capa es pulsatoria, entonces puede suponérsela dividida en sus componentes rotativas, con lo cual los resultados obtenidos también serán correctos. El criterio por el cual puede decirse que la máquina será capaz de funcionar (con el mismo grado de aproximación que cuando utilizamos los argumentos falsos) se basa en que $R_2/X_2 < 1$.

Este resultado es, sin embargo, muy diferente del anterior, puesto que ya se ha visto que la mejor máquina es aquella que tiene el mayor valor de X_m y el menor de X_2, confirmándose así que la máquina de mejor calidad es aquella en la cual la velocidad de funcionamiento es más próxima a la de sincronismo.

El argumento falso antes considerado constituye un ejemplo de la confusión que se origina por efecto de estar excesivamente familiarizados con los sistemas a tensión constante, ya que se piensa fácilmente que un motor monofásico es equivalente a dos máquinas polifásicas de tamaño mitad cada una de ellas, montadas sobre un mismo eje mecánico, de manera que sus campos giran en sentidos opuestos y conectadas eléctricamente en paralelo. El hecho es que las dos máquinas polifásicas ficticias deben suponerse conectadas en serie para llegar a un resultado correcto. Ello también nos muestra la aplicación del factor de calidad, pues, despreciando en primera aproximación el flujo de dispersión, el criterio por el que sabremos si una máquina será capaz de funcionar viene dado por la condición de $G>1$. Dado el carácter serie de la máquina, la impedancia del estator no es una característica decisiva para su correcto funcionamiento. Afectará, sin embargo, al rendimiento y al factor de potencia de la máquina en cuestión.

El ejemplo del motor de inducción monofásico será quizá suficiente para justificar la elección del factor de calidad en lo que concierne al estudio del circuito eléctrico secundario.

1.10. Imanes Permanentes

Se considera imán el material que posee o ha adquirido la propiedad de atraer el hierro. Antiguamente ya se conocía el imán natural (magnetita) y posteriormente se han obtenido campos magnéticos con materiales ferromagnéticos excitados por bobinas recorridas por corrientes eléctricas, de forma que al cesar éstas, el material magnético guarda lo que se llama el magnetismo remanente.

Los imanes permanentes deben tener un ciclo de histéresis caracterizado por una elevada inducción magnética (B_r) y una elevada fuerza coercitiva (H_c).

La circulación de una corriente por un conductor no es la única forma de crear un campo magnético. Existen materiales, denominados magnéticos duros, que son capaces de mantener un campo magnético en ausencia de f.m.m. externa. Son los denominados imanes permanentes. Su ciclo de histéresis es mucho más ancho que en los materiales magnéticos blandos, esta es la principal diferencia entre ambos, se puede observar en la *fig. 21*.

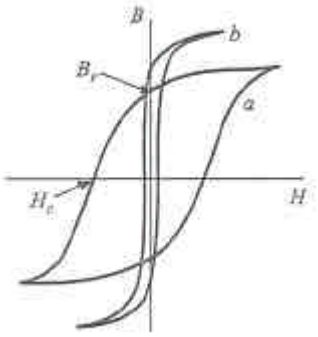


Fig. 21 Curva de magnetización de un imán permanente (a) y de un material magnético blando (b)

El valor de la inducción en el punto B_r se denomina inducción remanente. Si cerrásemos externamente el circuito magnético del imán mediante una pieza ferromagnética de permeabilidad infinita y de la misma sección que el imán, la inducción remanente sería el valor de la densidad de flujo en dicho circuito. El punto H_c recibe el nombre de campo coercitivo. Representa el valor del campo que habría que aplicar mediante una f.m.m. externa para que la densidad de flujo en dicho circuito magnético se anulase.

Así como la inducción remanente nos indica la capacidad de obtener densidad de flujo más o menos elevada, el campo coercitivo nos indica la capacidad de mantener las propiedades magnéticas del imán incluso en presencia de fuerzas magnetomotrices desmagnetizantes. Los materiales magnéticos más utilizados en la actualidad, en imanes permanentes, son compuestos a base de ferritas, aleaciones de níquel y cobalto (denominados genéricamente ALNICO), tierras raras (Sm-Co) y aleaciones Nd-Fe-B.

Cuando el circuito magnético externo al imán permanente no tiene permeabilidad infinita, se produce en él una caída de tensión magnética que, vista desde el interior del imán, somete a éste a una f.m.m. desmagnetizante igual y de signo contrario. El punto de trabajo de un imán permanente se encuentra, por tanto, en el segundo cuadrante de su curva de magnetización y la forma que esta curva, presente en dicho cuadrante, determina en buena medida el comportamiento del imán. El punto de trabajo se puede obtener por intersección de la característica B-H del imán y la línea que representa la reluctancia del circuito magnético externo. En máquinas eléctricas, el circuito magnético incluye siempre uno o dos entrehierros de aire y por tanto dicha línea es a todos los efectos una recta (se considera el circuito magnético lineal) denominada *recta de carga*.

Como en cualquier material ferromagnético, el ciclo de histéresis no es único, sino que presenta una infinitud de trayectorias "anilladas" que tienen básicamente la misma forma que el ciclo de histéresis general. Esto quiere decir que si el punto de funcionamiento del imán es el punto 1 *fig. 22*, y está sometido a una variación alternativamente creciente y decreciente del campo externo H, el punto no se desplaza sobre la característica inicial, sino que sigue la trayectoria 1-2-1 describiendo un ciclo de histéresis interno. En la zona del trabajo del segundo cuadrante estos internos suelen ser muy estrechos y se aproximan por una recta, denominada *recta de retorno* o *recta de retroceso*.

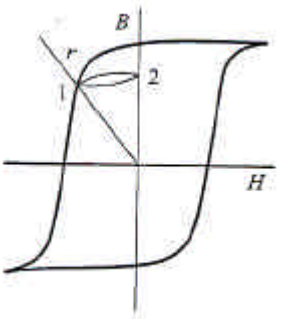


Fig. 22 Punto de trabajo (1), recta de carga (r) y recta de retorno (1-2)

El producto $B.H_{max}$ determina el producto de máxima energía que puede suministrar un imán cuando opera en un punto de trabajo determinado. En resumen, los imanes permanentes una vez excitados deben guardar un magnetismo relativamente elevado y ofrecer una gran resistencia a perderlo.

1.10.1. Tipos de Imanes Permanentes

1.10.1.1. Imanes de Ferrita

- Descripción general: la Ferrita está compuesta por una mezcla de óxido de hierro y óxido de estroncio. Tiene una excelente resistencia a la corrosión y puede trabajar a temperaturas desde – 40 *ºC* a 250 *ºC*.

Es un imán permanente cerámico y puede ser isotrópico (se puede imantar en cualquier dirección), o anisotrópico (solo se puede imantar en la dirección de orientación), con lo cual se consiguen unos valores magnéticos más altos.

- Ventajas de usar la Ferrita:
  - Bajo coste de producción
  - Puede trabajar en temperaturas extremas (- 40 *ºC* a + 250 *ºC*)
  - Fácil magnetización en distintas orientaciones

- Desventajas:
  - Baja inducción
  - Dificultad de mecanizado

- Aplicaciones comunes:
  - Juguetería
  - Altavoces
  - Cierres magnéticos
  - Seguridad

1.10.1.2. Imanes ALNICO

- Descripción general: ALNICO describe una familia de materiales que derivan de la compresión de aluminio, níquel, cobalto y acero con variación en su composición según las necesidades de dureza.
  El ALNICO puede trabajar a temperaturas superiores a 500 *ºC*, pues es muy resistente a la oxidación

- Ventajas de usar ALNICO:
  - Trabajar a elevadas temperaturas (+ 500 *ºC*)
  - Elevada inducción a precio medio
  - Fácil de magnetizar
  - Compatible con pintura o chapado de los sistemas

- Desventajas:
  - Baja fuerza coercitiva
  - Es un material duro y quebradizo difícil de mecanizar
  - Las materias primas que lo componen son consideradas estratégicas por lo que su precio fluctúa considerablemente encareciendo el producto

- Aplicaciones comunes: Para sistemas que trabajen a elevadas temperaturas y no requieran demasiada fuerza magnética.

1.10.1.3. Imanes de Nd – Fe – B

- Descripción general: Sus componentes son, neodimio (Nd), hierro (Fe) y boro (B), es el imán de Tierras Raras más potente. Los productos de NdFeB son más económicos, fáciles de mecanizar y menos frágiles que los de SmCo y así

mismo su densidad es un 13 % menor que en los actuales imanes de SmCo. Representan la tercera generación de imanes permanentes

- Ventajas de usar NdFeB:
  - Altos valores magnéticos que permiten realizar medidas muy reducidas con extraordinaria potencia.
  - Economía
  - Adecuados para ser usados a temperatura ambiente.

- Desventajas:
  - No se puede trabajar a altas temperaturas (200 ^{o}C)
  - Propensos a la oxidación.

- Aplicaciones comunes: En los últimos 10 años, los imanes de NdFeB se han hecho muy populares en las industrias de alta tecnología:
  - Audio: Para los pequeños altavoces de los sistemas de Hi – Fi , consiguiendo que éstos sean más compactos y de mayor potencia.
  - Componentes magnéticos: Muy usados en interruptores, enganches y otros componentes magnéticos.
  - Motores: Debido a su alta energía y su pequeño tamaño, juegan un importante papel en toda clase de motores, starters y servomotores.

1.10.1.4. Imanes Sm – Co

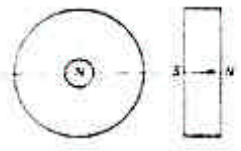
- Descripción general: El samario (Sm) cobalto (Co) son materias primas escasas y por lo tanto muy costosas. Los imanes permanentes de estos compuestos tienen un mayor precio y unos valores magnéticos inferiores a los de NdFeB.

- Ventajas de usar SmCo:
  - Se puede trabajar a temperaturas elevadas (+200 ^{o}C).
  - Es más resistente a la oxidación que el NdFeB.

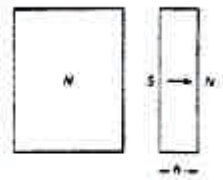
- Desventajas:
  - Material es costosos y más quebradizos que el NdFeB

- Aplicaciones comunes: Se utiliza en aplicaciones que trabajen a altas temperaturas o que estén en un ambiente oxidante.

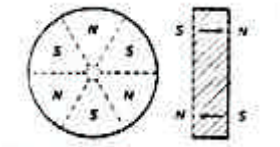
1.10.2. Direcciones de Orientación



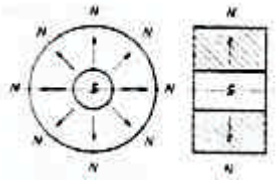
Orientación axial



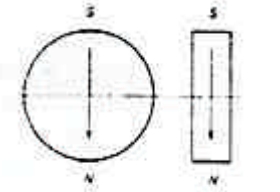
Imantado a través del espesor



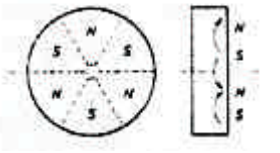
Imantación axial en segmentos con polos alternativos (Dibujo: configuración 6 polos)



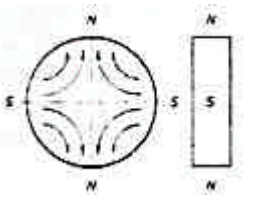
Orientación radial



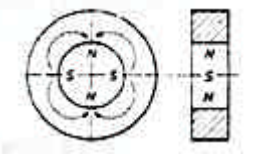
Orientación a través del diámetro



Orientación lateral en una cara. (Dibujo: configuración 6 polos)

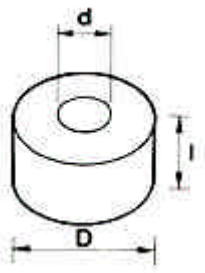


Orientación multipolar en la superficie exterior (Dibujo: configuración 4 polos)

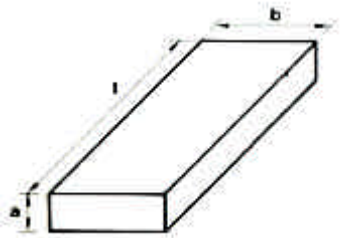


Orientación multipolar en la cara interior (Dibujo: configuración 4 polos)

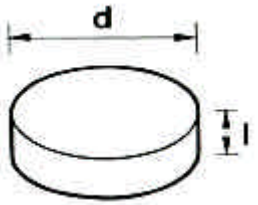
1.10.3. Geometría Básica



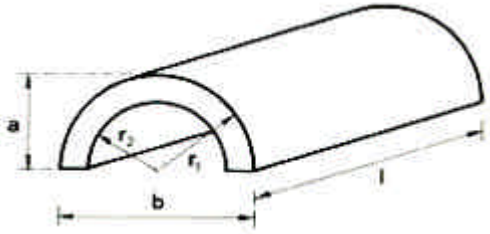
Anillo



Bloque



Disco



Segmento

1.10.4. Motores de Imanes Permanentes

1.10.4.1. Motores de Corriente Continua de Imanes Permanentes

En estos motores los imanes permanentes situados en el estator determinan el campo magnético y sustituyen a los polos con bobinas inductoras de los motores de corriente continua convencionales. El inducido se alimenta por una fuente de corriente continua a través del colector y escobillas.

El principio de funcionamiento es el mismo que en los motores de c.c. convencionales, el campo magnético interacciona con las corrientes del inducido provocando la aparición de un par unidireccional. En régimen de funcionamiento estacionario, el flujo creado por los imanes permanentes se mantiene constante y por tanto la f.e.m. y el par interno resultan proporcionales respectivamente a la velocidad y la corriente del inducido:

$$\begin{aligned} E &= C_1 \cdot f \cdot n \rightarrow f = cte \rightarrow E = k_1 \cdot n \rightarrow k \cdot \Omega \\ M_i &= C_2 \cdot f \cdot I_i \rightarrow f = cte \rightarrow M_i = k_2 \cdot I_i \rightarrow k.I_i \end{aligned} \qquad (16)$$

En régimen permanente el circuito equivalente simplificado considera únicamente las perdidas por efecto Joule en la resistencia interna.

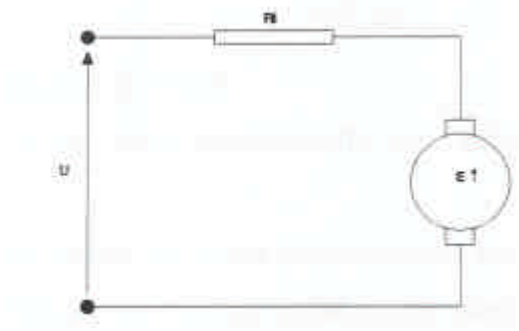


Fig. 23 Circuito equivalente simplificado

Relacionando términos se obtiene la curva par – velocidad que resulta ser una recta decreciente (a tensión constante).

$$M_i = \left(\frac{k}{R_i}\right)\cdot U - \left(\frac{k^2}{R_i}\right)\cdot \Omega \rightarrow U = cte \rightarrow M_i = k' - k''\cdot\Omega \qquad (17)$$

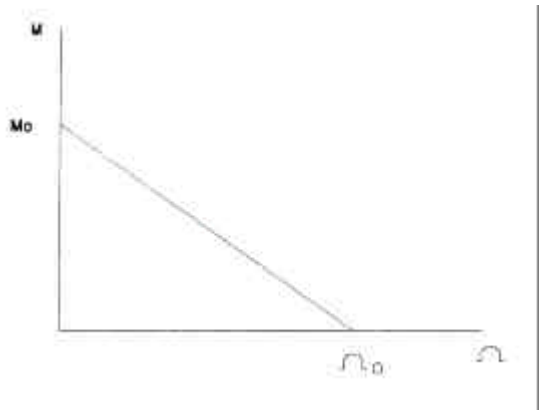


Fig. 24 Curva par – velocidad a U = cte

El circuito equivalente general también tiene en cuenta, la caída en escobillas u_E (mediante un diodo) y el conjunto de las prácticas fijas en el hierro y mecánicas (con R_{Fe}).

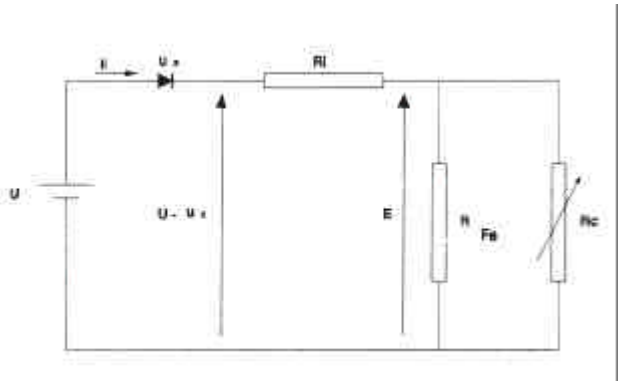


Fig. 25 Circuito equivalente general

R_c ? representa la carga aplicada al motor

Los motores de c.c. de imán permanente se utilizan en gran medida como servomotores. Un servomotor es un motor de altas prestaciones en transistores, que requiere baja inercia para poder responder rápidamente a cambios bruscos de velocidad sin grandes potencias.

En estos motores, generalmente de potencia fraccionaria, prevalece la capacidad de respuesta sobre los aspectos económicos y cada aplicación específica supone un diseño adecuado para conseguir resaltar alguna cualidad en su funcionamiento.

El campo magnético se obtiene frecuentemente con imanes permanentes de ALNICO a pesar de sus limitaciones, por su capacidad de desmagnetizarse a voluntad permitiendo un montaje más cómodo. En estos motores se deben tener ciertas precauciones al realizar la magnetización y desmagnetización, en operaciones de montaje y desmontaje, ya que en caso contrario pueden producirse daños que afecten a sus características de funcionamiento: par y velocidad.

Los motores de c.c. de imanes permanentes se construyen con gran diversidad de formas y diseños. En la versión más parecida al motor convencional, el estator es una carcasa tubular de material ferromagnético, en cuyo interior se disponen los imanes permanentes en forma de sectores cilíndricos, completando el conjunto los escudos laterales, cojinetes, portaescobillas y escobillas.

El rotor convencional es cilíndrico con ranuras profundas troqueladas en las chapas, en las que se alojan los conductores del inducido en situación profunda, para reducir el momento de inercia con buenos pares de trabajo. También se fabrican “rotores sin ranuras” (Minertia Motors, Hiper – Servo Motors). Éstos son de gran longitud y pequeño diámetro, las bobinas están fijadas alrededor del núcleo cilíndrico ferromagnético de chapas, mediante resinas de epoxy y cintas de vidrio. Las fuerzas se ejercen sobre los conductores, el par no presenta oscilaciones por ranura, tiene poca inductancia e inercia y la transferencia térmica es excelente, pero requiere mayor volumen de imán por ser mayor el entrehierro.
Los rotores largos de reducido diámetro se usan en baja inercia siempre que sea la velocidad elevada y el reducido par lo permita.

Existen, no obstante, otras soluciones al problema de encontrar una favorable relación potencia – inercia que implica longitudes cortas y grandes diámetros de inducido en términos relativos que suponen un volumen prismático elevado pero con poca inercia.

Una construcción interesante son los motores *sin carcasa* de accionamiento directo del par, *Inland,* diseñado para estar directamente fijado a la carga que acciona. Su inducido, corto y de gran diámetro, igual al del colector, está rodeado por una montura inductora de imán permanente.

En la gama de rotores cilíndricos destacan los motores de *bobina móvil* por su especial construcción y su alta velocidad de respuesta. En esta versión el núcleo interior de hierro dulce, que rodeado por el inducido cierra el circuito magnético, queda fijado con el estator de forma que al girar el rotor sólo se mueven los conductores del devanado inducido, *de copa o Drag up,* con objeto de obtener una inercia muy baja. El imán suele ser de ALNICO y en algunas versiones constituye el cilindro interior.

En estos inducidos, el entrehierro es grande y el esfuerzo se aplica directamente sobre el conductor de tipo laminar que normalmente necesita un cubo soporte suficientemente rígido para que las vibraciones sean admisibles, aunque ello aumenta ligeramente la inercia. Con estas construcciones se obtienen aceleraciones de 0 a 1200 min^{-1} en 1 *ms.*

Entre los motores de c.c. de la gama de potencias fraccionarias, cabe citar otra configuración especial y original, los *motores de flujo axial* de *inducido impreso* (*fig. 26*). Son motores con rotor de disco y estator bilateral con imanes permanentes en uno de los bloques. El disco rotórico gira entre dos magnéticamente activos que crean el flujo axial con fuertes intensidades de campo y otro que contiene también las escobillas y actúa de culata cerrando el circuito magnético.

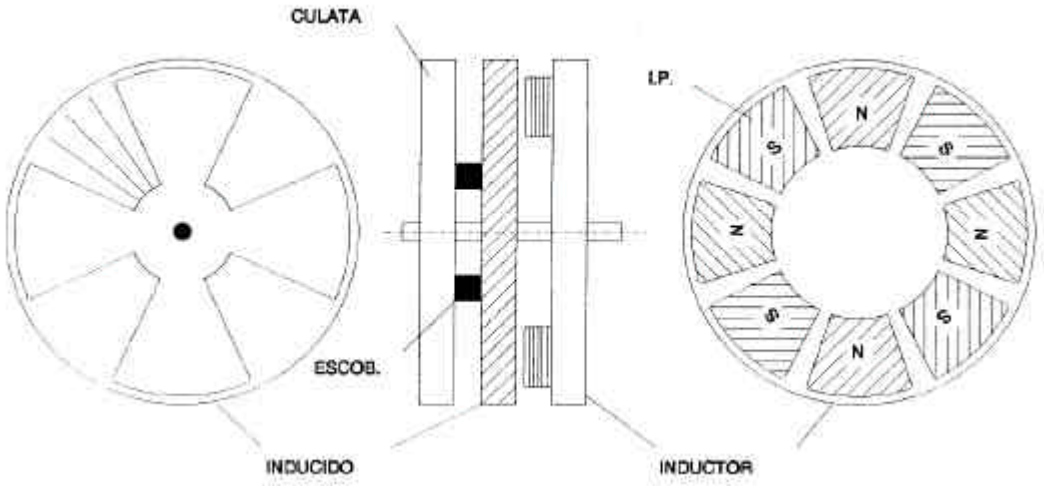


Fig. 26 Motor de flujo axial de inducido impreso

El rotor no suele tener hierro pasivo sino que es un disco de material plástico que contiene los conductores del inducido, en ambos lados de forma radial, obtenidos por técnicas de los circuitos impresos. Las escobillas se apoyan directamente sobre los conductores, que actúan también como colector. No hay ranuras y dientes, la inductancia es pequeña, siendo la constante de tiempo eléctrica pequeña y la mecánica también gracias a su baja inercia. Así mismo las características térmicas son excelentes (*fig. 26*).

Los motores de bobinado impreso se emplean en potencias fraccionarias en movimientos intermitentes, como en cintas de papel, para aparatos registradores, posicionadores y reguladores de servos.

Otras opciones constructivas de motores de flujo axial son el inducido "*Pancake*" que es un disco y el inducido "con tres devanados".

En general, la morfología de los motores de flujo axial responde con buenas prestaciones y ventajas respecto a los de copa, en aspectos magnéticos, eléctricos, térmicos y mecánicos. Teniendo en cuenta razones tecnológicas, constructivas y de aplicación, los inducidos de copa son mejores en potencias y diámetros pequeños y el disco es favorable para potencias superiores a los 100 *W.*

1.10.4.2. Motor Síncrono de Imanes Permanentes (M.S.I.P.)

El motor síncrono con imanes permanentes empieza a desarrollarse en los años 50, gracias a la mejora de las características de los imanes permanentes y hoy con el apoyo de la electrónica responde a aplicaciones en el campo de la industria textil, vidrio y robótica entre otros, siendo notable su aportación en la gama de las pequeñas y medianas potencias.

El estator del motor síncrono de imanes permanentes es de chapas y en él se dispone del devanado trifásico. El rotor generalmente cilíndrico contiene una jaula de ardilla para el arranque y los imanes permanentes dispuestos convenientemente con diversos diseños, sustituyen a las bobinas de excitación propias de los motores síncronos clásicos. Según la dirección de magnetización se distinguen dos configuraciones básicas y otras mixtas (*fig. 27*).

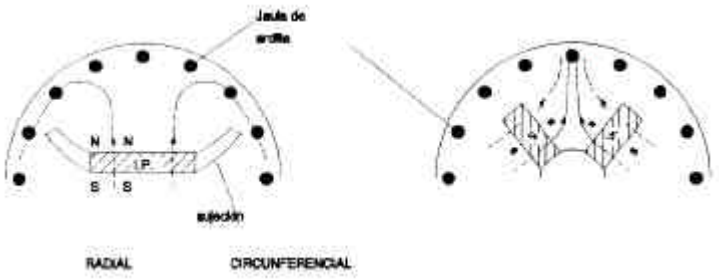


Fig. 27 Configuraciones básicas del estator

La radial se usa preferentemente para pequeñas inducciones y grandes corrientes de carga y la circunferencial, con gran número de polos, con imanes de baja remanencia. El entrehierro es relativamente grande y los imanes permanentes suponen un aumento del mismo desde el punto de vista magnético.

Según la ubicación del rotor pueden ser: interior, periférica y de pinza polar, todas ellas con diseños variados.

Los materiales más usados como imanes permanentes son: ferritas de bario y estroncio y aleaciones de manganeso – aluminio – carbono o hierro – cromo – cobalto, en las que se busca un compromiso de cualidades magnéticas mecánicas y económicas.

El principio de funcionamiento es básicamente el mismo que el de los motores síncronos convencionales. El devanado del estator, alimentado con una fuente de corriente alterna trifásica, provoca un campo giratorio que en condiciones normales de funcionamiento interacciona con el campo que en este caso lo determina, el imán permanente situado en el rotor, dando lugar a un par y en su caso a un movimiento en el sentido y la velocidad del campo giratorio.

El régimen permanente de M.S.I.P. se caracteriza por una velocidad dependiente de la frecuencia $n = n_1 = 60 \cdot \frac{f_1}{p}$ que coincide con la velocidad del campo giratorio, con un par dependiente directamente de la tensión y con buenos valores del factor de potencia y

rendimiento. Conviene que la intensidad, par máximo, factor de potencia, rendimiento, estabilidad, etc. sean satisfactorios, sobre todo si se alimentan a través de inversores cuyo coste suele ser superior al del propio motor y esos buenos resultados obligan a la optimización de los recursos en lo que se refiere a tamaño, diseño, materiales y coste.

El régimen transitorio tiene lugar tanto en el proceso de arranque como en el frenado o cambios de velocidad.

El arranque se resuelve fundamentalmente con la jaula de ardilla dispuesta en la periferia del rotor (par de jaula M_j). En el proceso de aceleración, los imanes permanentes generan un pequeño par antagonista (par de frenado de imanes permanentes M_{fip}) que se intenta reducir con diseños adecuados, pero una vez sincronizado son los imanes permanentes los que proporcionan el par de funcionamiento síncrono junto con una pequeña aportación de par de reluctancia (*fig. 28*).

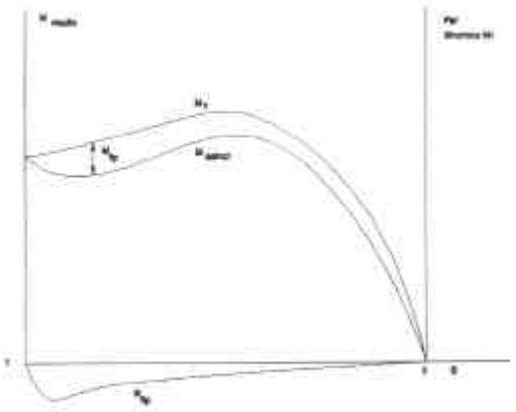


Fig. 28 Gráfica de pares (M)

El par de arranque se compone básicamente de un par medio (M_{med}) que acelera el rotor y un par pulsante (M_p) que provoca vibraciones y zumbidos pero que al final del proceso es el causante del par sincronizante que engancha al rotor a la velocidad sincrónica. Así pues, en el proceso de aceleración el par instantáneo total M_{iT} se compone del par medio y del pulsante (*fig. 29*).

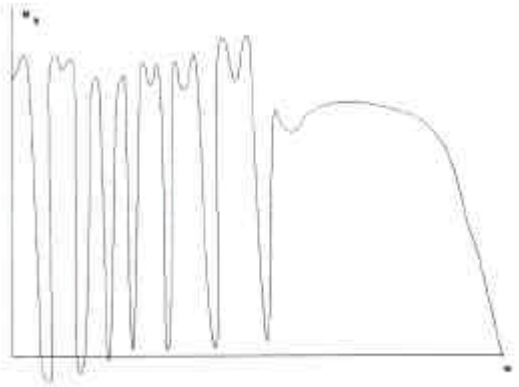


Fig. 29 Par instantáneo total ($M_{iT} = M_{med} + M_p$)

Las vibraciones y zumbidos desaparecen en sincronismo.

En el proceso de arranque la reacción de inducido es desmagnetizante aunque la jaula de ardilla actúa como elemento protector. La capacidad de arranque o de sincronización es un parámetro característico de los M.S.I.P. En parte depende de la forma y longitud de los imanes y del diseño de la jaula. Se expresa mediante una curva que indica la inercia de carga que puede ser sincronizada para un par de carga dado, es decir que los puntos definidos por la combinación de una cierta inercia y un par de carga dado, situados más allá de la curva, no pueden ser sincronizados por dicho motor. La capacidad de sincronización de los M.S.I.P. es mayor en los motores de reluctancia (*fig. 30*).

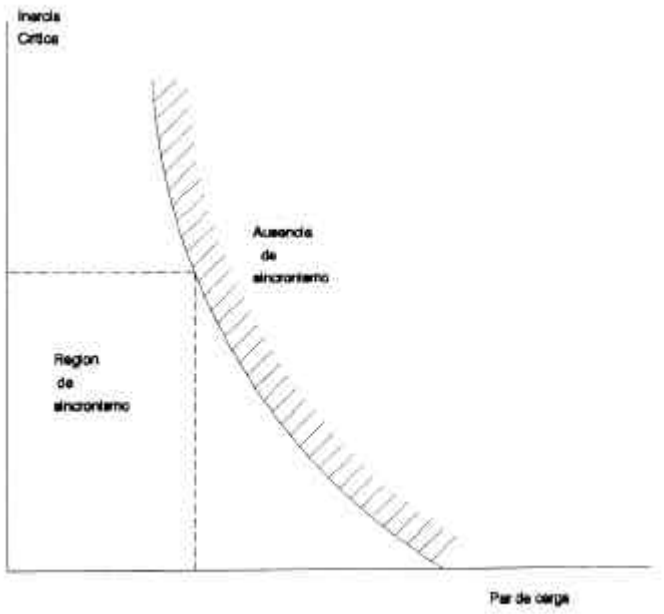


Fig. 30 Característica par de carga - Inercia

La máxima demanda de corriente se produce en el arranque y conviene limitarla sobre todo si se alimenta con un inversor.

El frenado de los M.S.I.P. se consigue cortocircuitando los terminales del estator mediante un contactor o mejor conectándolos a una resistencia exterior de forma que actuando como generador disipe la potencia en calor debido a las pérdidas por efecto Joule. Este frenado dinámico puede mejorarse conectando capacidades externas, pero en general las ventajas no justifican el coste adicional correspondiente. El frenado a contracorriente, por inversor de fases, reduce el tiempo de frenado pero también supone encarecer la instalación.

La regulación de velocidad se obtiene por variación de la frecuencia de las corrientes de alimentación, mediante equipos electrónicos (inversores).

Los M.S.I.P. responden a las siguientes características:
- Velocidad sólo dependiente de la frecuencia.
- No precisa energía magnetizante.
- Par motor proporcional a la tensión.
- Capacidad de sincronización frente a sobrecargas eventuales.

- Alto rendimiento que supone ahorro energético.
- Buen factor de potencia que reduce la demanda de *kVA* y supone ahorro en instalación y en convertidor de frecuencia.
- El producto ($h \cdot cos\ j$) es elevado y supone un factor de mérito superior en un 30 % al de inducción, hasta potencias del orden de 8 *kW*.
- Poco calentamiento (pérdidas menores que los de inducción en un 25 % aprox.).
- Frenado sencillo y económico.
- Ausencia de escobillas y fácil mantenimiento.
- Funcionamiento silencioso y suave a altas velocidades.
- Capacidad de arranque y resintonización.
- Mejores que los de reluctancia (más baratos y con ventaja en ambientes difíciles).
- Con inversores detectores de posición se obtiene una regulación de la velocidad y posición excelentes.

Los inconvenientes se derivan fundamentalmente del precio y limitaciones de los imanes permanentes así como de los elementos de regulación y control asociados al motor.

Considerando las cualidades y limitaciones de los M.S.I.P., compiten con ventaja con los motores asíncrono, síncrono convencional y de reluctancia; en la industria textil, la del vidrio, accionamientos de compresores, bombas y convertidores de frecuencia. Incluso en aplicaciones que supongan mejora del factor de potencia, en la gama de pequeñas y medianas potencias y altas velocidades muy especialmente en robótica combinados con los dispositivos complementarios necesarios.

1.11. Control de Máquinas mediante la Electrónica de Potencia

1.11.1. Desarrollo de los Componentes Electrónicos

La electrónica de potencia, que trata sobre la conversión y el control de la energía eléctrica, ha permitido grandes avances en la regulación de las máquinas eléctricas, tanto en lo que se refiere a generadores como a motores. Se puede decir que la electrónica de potencia comienza en 1903 cuando Cooper-Hewitt, trabajando con lámparas de vapor de mercurio, descubre el efecto rectificador de las mismas y su utilización para la c.a. en c.c.; más tarde, en 1908, el alemán Schäefer construye *rectificadores de vapor de mercurio*, con envoltura metálica, que permitirán rectificar potencias más elevadas. Aunque durante los dos decenios siguientes se desarrollan diferentes tipos de rectificadores metálicos y mecánicos (en 1923 Presser inventa el rectificador de selenio y en 1925 Grondahl descubre el rectificador de óxido de cobre), solamente se utilizan en pequeñas potencias y no pueden por ello competir con los rectificadores de vapor de mercurio, en la conversión de grandes potencias.

La rectificación o conversión de la c.a. a c.c. era y es necesaria para aquellas aplicaciones en las que el proceso productivo requiere c.c., tal es el caso, como ya se ha indicado antes, en los procesos electroquímicos y en la tracción eléctrica.

En 1928 aparece el *tiratrón* y el *rectificador de vapor de mercurio controlado (ignitrón)*, que permite regular la c.c. que produce el rectificador, haciendo posible la

sustitución de los grupos Ward – Leonard rotativos por convertidores estáticos. En la década de 1930 – 40 se establecen claramente los principios de funcionamiento de los *inversores* (convertidores estáticos c.c. – c.a.) por Prince, Fitzgerald, Henderson y Sabbah y los *cicloconvertidores* (convertidores de c.a. a c.a. de diferente frecuencia sin efectuar el paso intermedio de la c.c.) por el ruso Rissik, que se utilizaron en algunos ferrocarriles europeos en tracción eléctrica monofásica con motores de c.a. de colector a una frecuencia de 16 2/3 *Hz.*

El 23 de Diciembre de 1947, los científicos John Bardeen y Walter H. Brattain, de los Laboratorios de la Bell Telephone de E.E.U.U. descubren el *transistor de unión*, cuya teoría de funcionamiento es desarrollada por William Shockley, asentando la base de la electrónica de semiconductores que se irá desarrollando más adelante. En la década de 1950 se empiezan a construir rectificadores de estado sólido, a base de silicio, que fueron sustituyendo progresivamente a los rectifiadores de vapor de mercurio para potencias pequeñas y medias.

La verdadera revolución en la electrónica de potencia comienza con el descubrimiento en 1956 del *tiristor o SCR (semiconductor controlled rectifier)* por J. L. Moll de los Laboratorios Bell, que comercializó la Compañía General Electric a comienzos de 1958. A partir del tiristor, que permite la rectificación controlada en forma de regulador de fase, se desarrollan otros dispositivos tales como el *triac (bidirectional triode thyristor)*, el *LASCR* o SCR activado por luz *(Light activated silicon controlled rectifier)*, el *diac (bidirectional diode thyristor)*, y otros como el *transistor uniunión UJT (unijunction transistor)*, el *PUT (programmable unijunction transistor)*, etcétera. A partir de 1960 las potencias de estos dispositivos controlados de silicio van aumentando, por lo que poco a poco se van imponiendo en la regulación de todo tipo de máquinas eléctricas.

Los componentes modernos más importantes, que se utilizan en la regulación de máquinas eléctricas son: los *GTO (gate turn-off thyristor, es decir, tiristores de apagado por puerta)*, los *IGBT (insulated gate bipolar transistor, o transistor bipolar de puerta aislada)* que son transistores que combinan las ventajas de los tipo bipolar y los de tecnología *MOSFET (metal – óxido semiconductor y de efecto de campo)*. En 1988 la General Electric anuncia un dispositivo denominado *MCT (MOS controlled thyristor o tiristor controlado MOS)* al que los técnicos auguran un gran futuro en las aplicaciones para el control de velocidad de máquinas eléctricas.

Aparte de los desarrollos de componentes electrónicos de alta potencia, conviene destacar otros dispositivos y técnicas electrónicas que intervienen en los lazos de regulación de máquinas y cuya génesis descansa en el descubrimiento del *circuito integrado*. En el año 1971 la empresa americana Intel construye el primer *microprocesador* del mundo (el 4004), que se llamó entonces "ordenador microprogramable en un chip" y más tarde, en 1972, se le da el nombre definitivo de microprocesador.

La electrónica de potencia requiere una formación multidisciplinar en áreas tan diversas como: dispositivos semiconductores, circuitos convertidores, máquinas eléctricas, electrónica analógica y digital, teoría del control, diseño asistido por ordenador y microprocesadores.

1.11.2. Control Electrónico de Máquinas Eléctricas

Inicialmente y hasta hace pocos años, los sistemas de mando de máquinas eléctricas se realizaban con automatismos a base de relés y contactores. Con la llegada del microprocesador el control industrial está cambiando a gran velocidad y se están sustituyendo los relés por *autómatas programables* (programmable controllers o controladores programables). El programa de los automatismos con relés se realizaba con un cableado que unía las conexiones de las bobinas con los contactos de trabajo y reposo de los relés. Los autómatas programables hacen posible la sustitución de este cableado por un teclado que permite una programación muy simple por parte del usuario y que se une a transductores y motores por medio de interfaces adecuados. Este cambio de tecnología hace posible una modificación rápida del funcionamiento de un circuito, utilizando una secuencia de instrucciones (programa o software).

Los autómatas programables permiten el control de las máquinas eléctricas (por ejemplo: maniobras de arranque y parada), pero no su regulación (es decir no permiten un control y una regulación precisa de la velocidad en el caso de motores, o una regulación de tensión en generadores). Para realizar estas operaciones se debe utilizar los componentes electrónicos tipo: tiristores, GTOs, Triacs, IGBT, MCT, etcétera.

1.11.3. Transistores de Unión Bipolares (BJT)

1.11.3.1. El Transistor de Unión

El transistor bipolar de unión (*BJT*), llamado también transistor de unión o transistor bipolar es un dispositivo de tres elementos formado por dos uniones unidas a una capa semiconductora común. Los dos tipos de transistores de unión están representados en la *fig. 31*. En el transistor *pnp* de la *fig. 31-a*, la región común de tipo *n* está entre dos capas de tipo *p*. Análogamente en el transistor *npn* de la *fig. 31-b*, hay una región *p* entre dos capas de tipo *n*. Los tres elementos de un *BJT* se denominan *emisor*, *base* y *colector* y se indican con los símbolos de la *fig. 32*. La flecha en el emisor señala la dirección de la corriente cuando la unión emisor – base está con polarización directa. En ambos casos, se consideran positivas las corrientes I_E, I_B e I_C cuando se dirigen hacia el interior del transistor. En la figura se indica también la tensión entre cada par de terminales mediante un doble subíndice. Así por ejemplo V_{CB} representa la caída de tensión entre el colector (*C*) y la base (*B*).

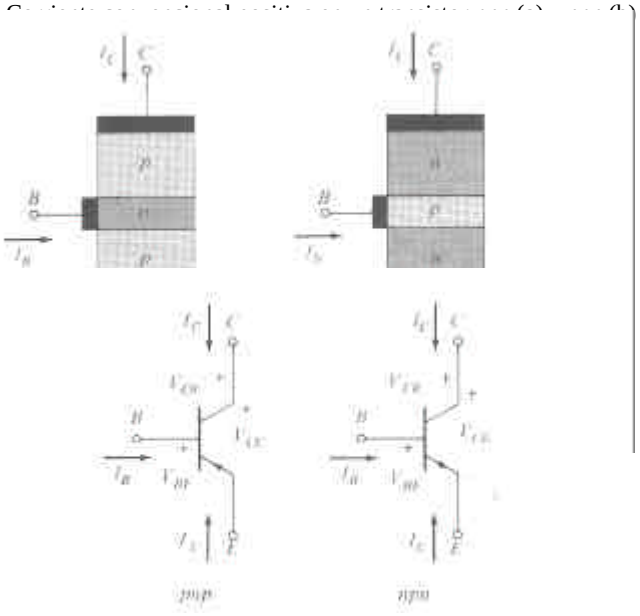


Fig. 32 Símbolo de circuito para transistores *pnp* (a) y *npn* (b)

La representación del transistor bipolar de la *fig.32-b* muestra una estructura simétrica que nos permite elegir como emisora a cualquiera de las regiones *n*. Sin embargo, en un transistor real como el *npn* planar de un circuito integrado, como el de la *fig. 33*, el emisor y el colector tienen diferencias marcadas.

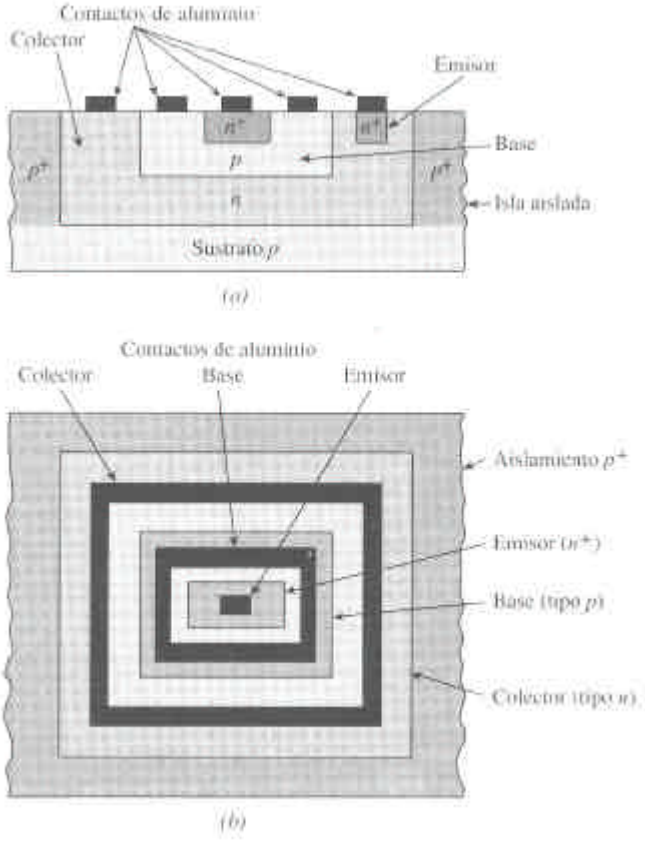


Fig. 33 Estructura de un transistor *npn* integrado comprendido un sustrato *p*, isla aislada y contactos de aluminio

La *fig. 33-a* representa la sección recta del transistor, distinguiendo con el sombreado las distintas concentraciones de impurezas. En la vista superior de la *fig. 33-b* puede verse cómo están hechos los contactos del aluminio a las regiones de colector, base y emisor. Obsérvese cómo, debido al dopado selectivo del bloque de silicio, queda una región *p* entre dos *n* formando así un transistor *npn*. El nombre de *"transistor planar"* o plano proviene del hecho de que los tres terminales *C*, *B* y *E* van conectados a los contactos del aluminio al colector, base y emisor respectivamente, estando *los tres contactos sobre un mismo plano*.

Tal como se aprecia en la *fig. 33* la superficie ocupada por el emisor es notablemente menor que la del colector. Esta diferencia es debida a que en la mayor parte de aplicaciones del *BJT* la región de colector manipula más potencia que el emisor, por lo que precisa más superficie para disipar el calor. La segunda diferencia estriba en las densidades de dopado de las regiones de emisor y de colector. Generalmente, el emisor sirve como fuente de cargas móviles. Se emplea una densidad de dopado alta (y de ahí la designación n^+) para resaltar la facultad de hacer más portadores asequibles. Es decir, cuando la unión emisor – base tiene polarización directa, el emisor inyecta electrones a la base desde donde se desplazan hacia el colector. Si el diodo colector –

base está polarizado inverso, los electrones portadores, minoritarios en la base, son barridos al interior de la región del colector donde se convierten en el mayor componente de la corriente del colector. Al colector, como su nombre indica, no se le pide normalmente que ceda muchos portadores, por lo que su nivel de dopado no necesita ser tan alto como para el emisor (la pequeña región n^+ del colector ayuda a formar un buen contacto óhmico). La región de la base se dopa a un nivel intermedio entre los del emisor y el colector.

1.11.3.2. Comportamiento Físico de un Transistor Bipolar

Las prestaciones esenciales de un *BJT* como elemento de un circuito pueden apreciarse considerando la situación representada en el *fig. 34*. En ella hay un transistor *pnp* con unas fuentes de tensión que polarizan en sentido directo la unión emisor – base (V_{EB} positiva) y en sentido inverso la unión colector – base (V_{CB} negativa). El campo eléctrico queda confinado en la región de deplexión, siendo nulo en el resto del semiconductor. Por tanto, el potencial es constante en cada región (emisor, base o colector) y no existen corrientes de conducción. En consecuencia, en un *BJT* las componentes de la corriente son todas corrientes de difusión.

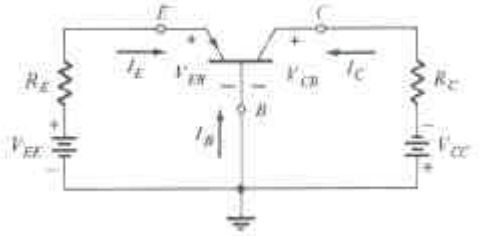


Fig. 34 Circuito en base común mostrando las fuentes de polarización V_{EE} y V_{CC}

Imaginemos de momento un transistor ideal cuya base esté tan ligeramente dopada en comparación con la región de emisor, que podamos despreciar todas las corrientes debidas a los electrones. Supondremos también que el espesor de la región de la base es pequeño frente a la longitud de difusión, de tal forma que podamos depreciar también la recombinación en esta región. En este transistor ideal, una tensión directa V_{EB} inyecta huecos a la base, y todos éstos pasan a través de la base a la región del colector. Esta acción tiene la consecuencia de que la corriente de colector sea igual a la del emisor $|I_C| = |I_E|$ para cualquier tensión inversa de colector V_{CB}. Las características de salida de este transistor ideal son las de la *fig. 35* con $i_2 = -I_C$, $I_1 = I_E$, y $v_2 = -V_{CB}$.

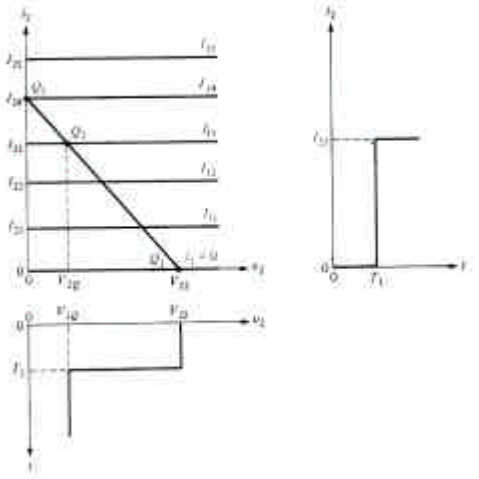


Fig. 35 Características tensión – intensidad de una fuente de corriente gobernada, con la onda resultante de una excitación en escalón

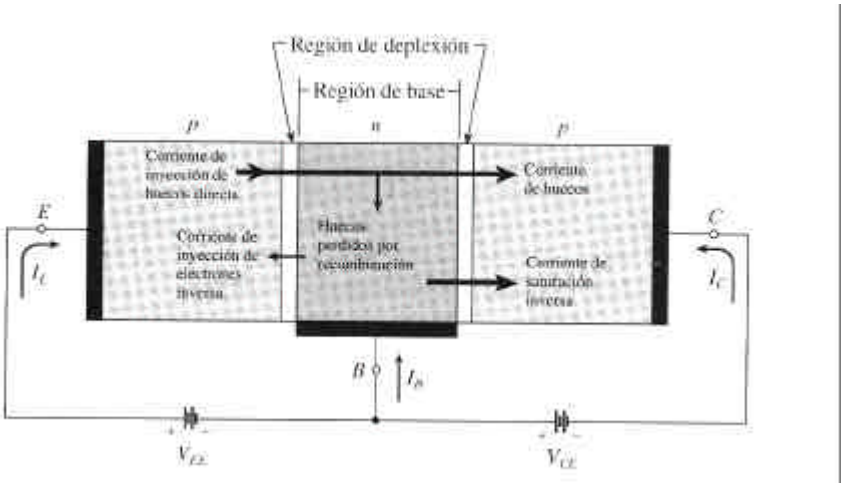


Fig. 36 Componentes de corriente en un transistor con la unión emisor – base con polarización directa y la unión colector – base con polarización inversa

Consideremos ahora el comportamiento de un transistor práctico (no ideal) en el circuito de la *fig. 36*. Ya no podemos olvidarnos de la recombinación o los efectos de la concentración de electrones en el transistor real. En esta figura están señaladas las diversas componentes de corriente en un transistor *pnp* polarizado para corresponder al circuito de la *fig. 34*. En esta situación volveremos a suponer que no existe campo eléctrico en el semiconductor fuera de la región de deplexión, con lo que aparecen las tensiones V_{EB} y V_{CB} en las uniones de emisor y de colector respectivamente. La unión emisor – base polarizada en directo inyecta muchos huecos en la base (inyección directa) donde se convierten en portadores minoritarios. De los electrones que cruzan la unión desde la base al emisor (inyección inversa) se mantienen pocos al diseñar el transistor, dopando menos la base que el emisor. En la estrecha región de base los huecos se difunden hacia la unión colector – base, y un pequeño numero de ellos se recombinan con electrones, siendo ésta una parte de la corriente de la base. Los huecos que llegan a la unión colector – base son enviados al interior del colector debido a la polarización inversa. En las condiciones de polarización de la *fig. 36*, estos huecos constituyen la mayor componente de la I_C. Sin embargo, hay otra pequeña componente de la corriente de colector debida a los portadores generados térmicamente. Los huecos generados de esta forma, en la región de la base, penetran en el colector y los electrones generados térmicamente en el propio colector se introducen en la base. Estas dos corrientes térmicas constituyen la corriente de saturación inversa de la unión colector – base indicada en la *fig. 36*. En consecuencia, tal como se ve en esta figura, es evidente que la corriente del colector esta formada de dos componentes, una debida a los huecos inyectados en el diodo emisor – base y la otra atribuida a los portadores generados térmicamente que cruzan la unión colector – base.

1.11.3.3. El Transistor de Unión Bipolar como Interruptor

El circuito de la *fig. 37-a* es el de un simple interruptor. La onda de tensión de entrada v_s representada en la figura, se emplea para controlar el estado del interruptor (entre colector y emisor). Para $t < T_1$, $v_s = -V_1$ y el diodo emisor – base tiene polarización inversa. Si despreciamos las componentes de corriente inversa, ya que el diodo colector – base esta polarizado en inverso, el *BJT* está en corte y no hay corriente alguna en ningún punto del circuito. En consecuencia $v_o = V_{CC}$, y siendo $i_C = 0$ esto no es más que un interruptor abierto. En la práctica $i_C \approx I_{CO}$ y $v_o = V_{CO} - I_{CO} \cdot R_L$. Sin embargo, siendo I_{CO} del orden de los nanoamperios y R_L del orden del los kiloohmios, siendo v_o diferirá de V_{CC} en tan sólo unos pocos milivolt, y por tanto a efectos prácticos v_o es igual a V_{CC}.

La tensión de entrada pasa a ser V_2 cuando $T_1 < t < T_2$. El valor de V_2 se elige de forma que el transistor esté por lo menos en el límite de la saturación. Obsérvese que la corriente en un interruptor cerrado viene determinada por los elementos externos V_{CC} y R_L. Para $V_{CC} >> 0.3\ V$, $i_C = V_{CC} / R_L$.

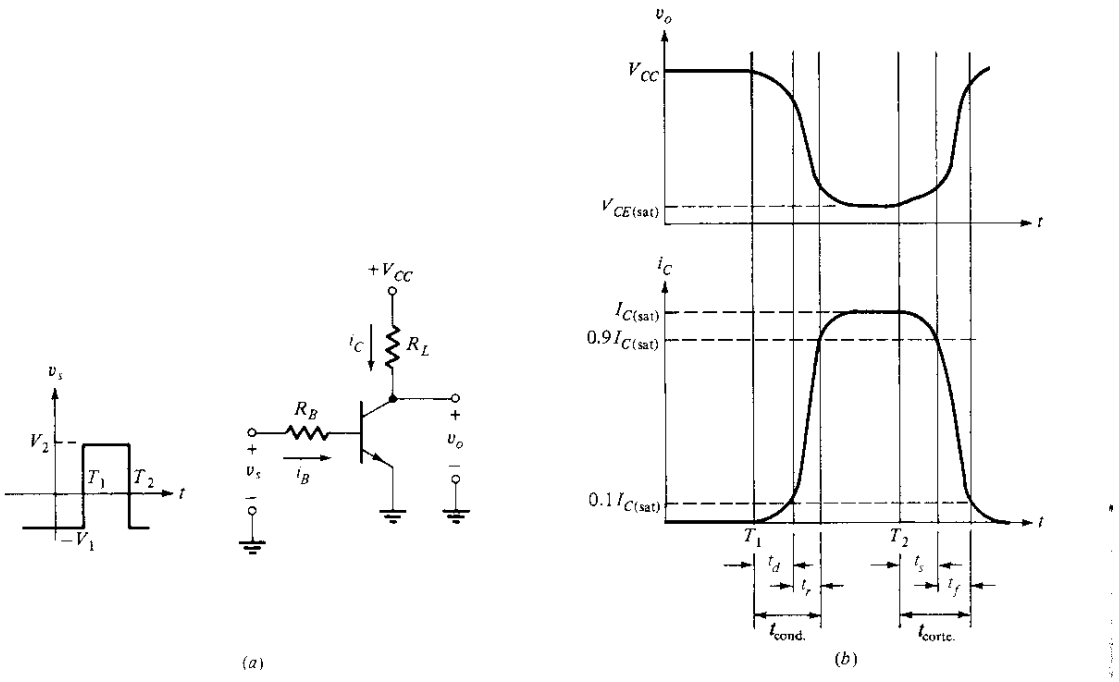


Fig. 37 (a) Un interruptor BJT con su onda de entrada; (b) Ondas de v_o y de I_c mostrando los tiempos de subida, total, de retardo y de almacenaje durante la interrupción.

En el momento $t = T_2$ la onda de entrada cae nuevamente a $-V_1$ ocasionando eventualmente que el transistor retorne al estado de corte. En la *fig. 37* están representadas las curvas de v_o e i_c.

La naturaleza de las características de la conmutación es verdaderamente deducible de la característica de transferencia del circuito, que es una gráfica de v_o en función de v_s.

1.11.3.4. Velocidad de Conmutación del BJT

En la descripción de la *fig. 37-a* se muestran a los estados del interruptor (ON y OFF). Ahora nos referimos a los transitorios en las ondas, *fig. 37-b*.

Como se aprecia en esta figura, la corriente no responde inmediatamente a la señal de entrada, sino que por el contrario hay un retraso. El tiempo que transcurre durante este retraso junto con el necesario para que la corriente alcance el 10 % de su valor máximo (saturación) constituye el tiempo de retraso t_d. La onda de corriente tiene un tiempo de subida t_r no nulo, que es el tiempo necesario para que la corriente suba a través de la región activa desde el 10 al 90 % de $I_{C\,(sat)}$.

El tiempo total de conmutación t_{ON} es la suma de los tiempos de retraso y de subida, $t_{ON} = t_d + t_r$. Cuando la señal de entrada retorna a su estado inicial en el momento que $t = T_2$ tampoco la corriente responde inmediatamente. El intervalo que transcurre desde la transición de la onda de entrada hasta que i_C haya bajado hasta el 90 % de I_{CS} se denomina *tiempo del almacenamiento* t_s. A este tiempo le sigue el tiempo de caída t_f que es el necesario para que i_C caiga desde el 90 al 10 % de $t_{C\,(sat)}$. El tiempo corte I_{OFF} es la suma de los tiempos de almacenamiento y de caída $t_{OFF} = t_s + t_f$. Comentaremos ahora las razones físicas de cada uno de estos intervalos: su cálculo exacto es complejo.

Tres factores contribuyen al tiempo de retraso: ***(1)*** cuando se aplica la señal a la entrada del transistor se necesita un cierto tiempo para cargar la capacidad de transición de la unión del emisor de forma que el transistor pueda pasar del corte a la región activa, ***(2)*** aún cuando el transistor haya llegado al punto en que los portadores minoritarios hayan comenzado a cruzar la unión de colector hacia la base, se necesita algún tiempo antes de que estos portadores puedan cruzar la región de la base a la unión del colector y ser reconocidos como corriente de colector, y ***(3)*** se necesita algún tiempo para que la corriente de colector suba hasta el 10 % de su valor máximo.

Los tiempos de subida y de bajada son debidos al hecho de que si para saturar el transistor o para llevarlo de saturación a corte se emplea una corriente de base escalonada, la corriente de colector debe cruzar la región activa. La corriente de colector crece y decrece según una curva exponencial cuya constante de tiempo es t_r, se puede demostrar que $t_r = b_0 \cdot \left(C_m \cdot R_L + 1/w_T\right)$ siendo C_m la capacidad de transición del colector y w_T la frecuencia a la que la ganancia de corriente es la unidad.

La demora del transistor en responder al borde posterior del impulso durante un tiempo t_s es debida al hecho de que un transistor en saturación tiene un exceso de portadores minoritarios almacenados en la base lo que le impide responder hasta que este exceso sea eliminado. En la *fig. 38*, está indicada la densidad de carga almacenada en diferentes condiciones de trabajo.

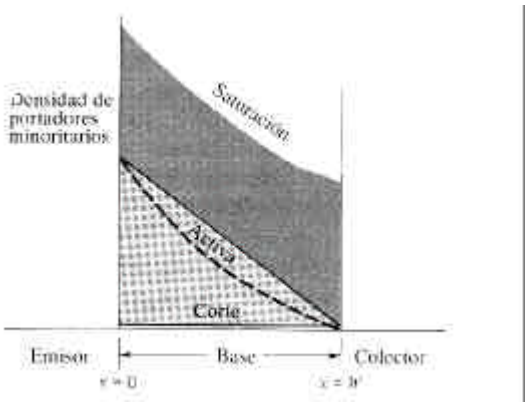


Fig. 38 Concentración de portadores minoritarios en las regiones de corte, activa directa y de saturación

Consideremos que el transistor está en su región de saturación y que en el momento $t = T_2$ se emplea un impulso en escalón para pasar el transistor a corte, como en la *fig. 37*. Puesto que el proceso de corte no puede comenzar hasta que la densidad anormal de portadores (zona más sombreada de la *fig. 38*) haya sido eliminada, puede transcurrir un tiempo relativamente largo t_s antes de que el transistor responda a la señal de corte en la entrada. En casos extremos, este tiempo de almacenamiento puede ser varias veces superior a los tiempos de subida o de caída en la región activa. Es evidente que cuando los transistores se empleen en aplicaciones en las que la rapidez sea apremiante, será ventajoso reducir el tiempo de almacenamiento. Para evitar la saturación del transistor y por tanto eliminar el tiempo de almacenamiento, existe un método que consiste en emplear un diodo Schottky juntamente con el *BJT*. Este dispositivo compuesto se denomina transistor Schottky.

1.11.4. Transistores de Efecto Campo

1.11.4.1. Transistores de Unión de Efecto Campo

En la *fig. 39* vemos la estructura básica de un JFET de canal n^1. Los terminales de *drenaje* y de *fuente* los constituye el contacto óhmico en los extremos de una barra semiconductora de tipo *n*. Se puede obligar a que los portadores mayoritarios, electrones, fluyan a lo largo de la barra aplicando una tensión entre drenaje y fuente. El tercer terminal, denominado *puerta* se forma conectando eléctricamente las dos zonas sombreadas p^+. La zona tipo *n* comprendida entre las dos p^+ se denomina *canal* y por ella circulan los portadores mayoritarios entre fuente y drenaje.

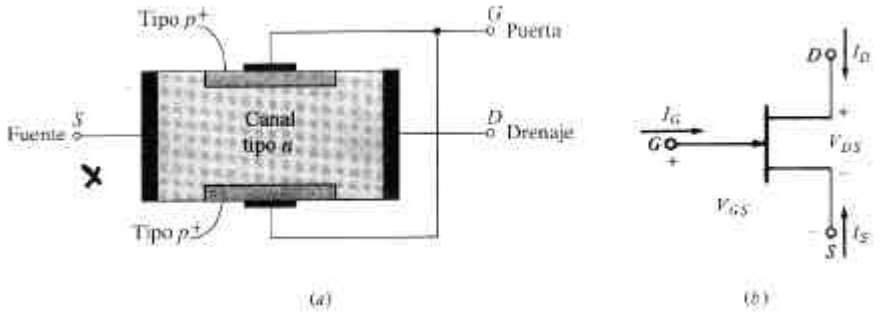


Fig. 39 (a) Estructura, y (b) símbolo del transistor de unión de efecto campo, de canal *n* (JFET)

En la *fig. 39-b* se han señalado las convenciones normalizadas para los terminales positivos de corrientes y tensiones y en ella figura también el símbolo de un JFET de canal *n*. La estructura y símbolo para un JFET de canal *p* los podemos ver en la *fig. 40.*

Las estructuras representadas en la *fig. 39* y *fig. 40* permiten describir la actuación de los JFET. La *fig. 41* corresponde a la sección recta de un JFET plano integrado, de canal *n*. La vista superior muestra cómo se hacen los contactos de aluminio con las regiones de fuente, drenaje y puerta.

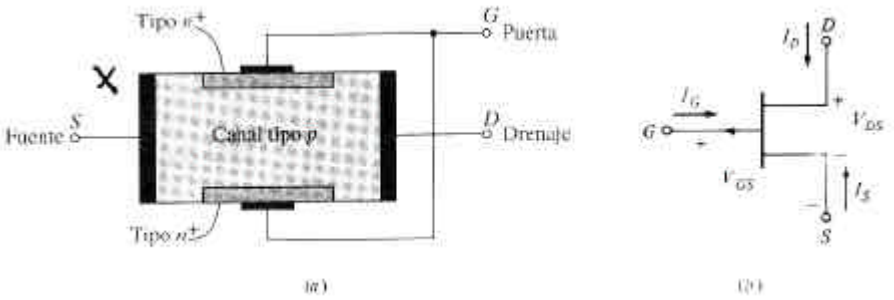


Fig. 40 Transistor de unión de efecto campo, de canal *p*, (a) estructura, y (b) símbolo del circuito

1.11.4.2. Funcionamiento del JFET

Consideremos la representación gráfica del dispositivo del canal n de la *fig. 39*, reproducido para mayor conveniencia en la *fig. 42-a*. El diagrama esquemático de la *fig. 42-b* corresponde al dispositivo de la *fig. 42-a*, en configuración de fuente común. Aun cuando nuestro estudio está dirigido hacia un dispositivo de canal *n* es aplicable igualmente al caso de canal *p* si admitimos que las polaridades de las tensiones y el sentido de las corrientes de éste son opuestos a los de un JFET de canal *n*.

Observemos que las regiones de puerta y el canal forman una unión *pn* que en su funcionamiento como JFET se mantiene con polarización inversa. Una tensión puerta – fuente. Hay que recordar que a ambos lados de una unión *pn* con polarización inversa (la región de deplexión) hay zonas de carga espacial. Los portadores de corriente se han propagado a través de la unión dejando sólo iones positivos descubiertos en el lado *n* e iones negativos en el *p*. Cuando crece la polarización inversa de la unión también lo hace el espesor de la región de cargas descubiertas inmóviles. Ahora podemos justificar el uso de la región de puerta p^+. La región de deplexión se extiende más en la zona de menor dopado. Así el uso de p^+ forma una capa de carga espacial que está casi totalmente en el canal *n*. La conductividad de esa región es normalmente cero por la falta de portadores de corriente. Por tanto el ancho efectivo del canal de la *fig. 42* irá disminuyendo al aumentar la polarización inversa.

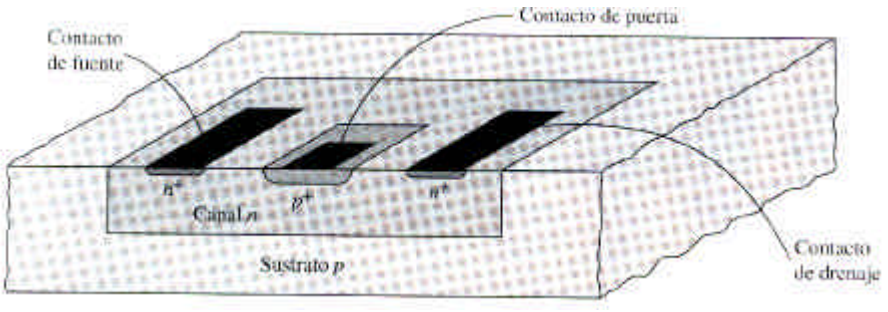


Fig. 41 Estructura de un JFET integrado, planar de canal *n*

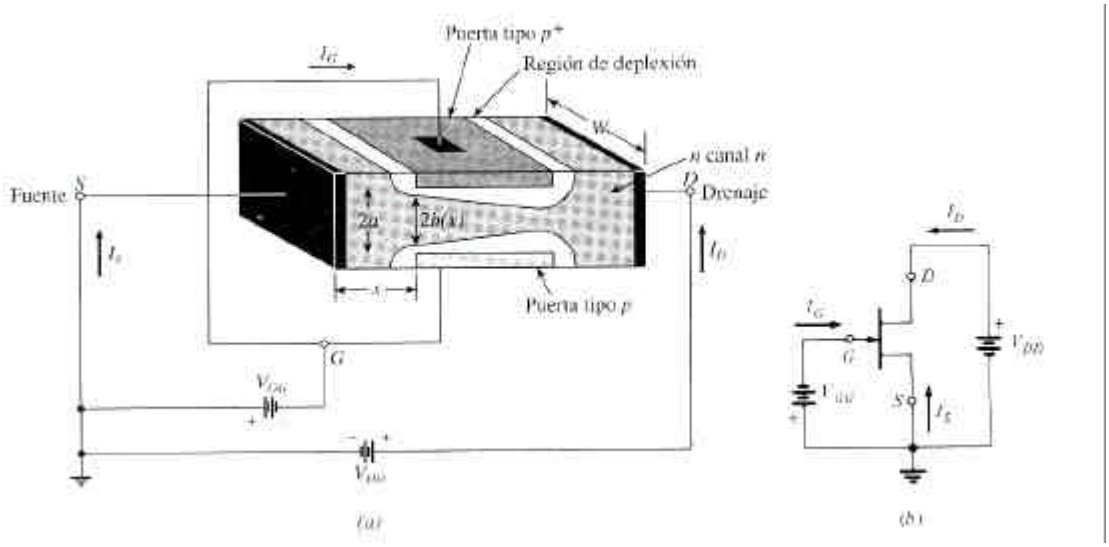


Fig. 42 Estructura de un JFET de canal *n* mostrando la región de deplexión que constriñe el canal

A una determinada tensión puerta – fuente $V_{GS} = V_p$ llamada *tensión de estricción* el ancho del canal queda reducido a cero porque han sido eliminadas del mismo todas las cargas libres. En consecuencia, para una determinada tensión drenaje-fuente, la corriente de drenaje será función de la tensión de polarización inversa de la unión de puerta. Para describir este dispositivo se emplea la voz de *efecto campo*, porque el gobierno de la corriente es el efecto de la extensión del campo, asociado con la región de deplexión, al aumentar la polarización inversa.

1.11.4.3. El MOSFET de Acumulación

En un transistor de unión de efecto campo, la sección efectiva del canal está gobernada por un campo eléctrico aplicado al canal a través de una unión *pn*. Empleando un electrodo de puerta metálico separado del canal semiconductor por una capa de óxido se obtiene un dispositivo de efecto campo básicamente distinto. Esta disposición metal – óxido – semiconductor (MOS) permite controlar las características del canal por un campo eléctrico creado al aplicar una tensión entre la puerta y el sustrato. Un dispositivo de esta índole se denomina MOSFET o Transistor MOS. Su importancia queda patente por el hecho de fabricarse más circuitos integrados con MOS que con cualquier otro elemento semiconductor.

Existen dos tipos de transistores MOS. El MOSFET de *deplexión* cuyo comportamiento es similar al del JFET; con tensión de puerta nula y una tensión del drenaje dada, la corriente alcanza su máximo, decreciendo luego con la tensión de puerta aplicada (de la polaridad apropiada) como en la *fig. 43*.

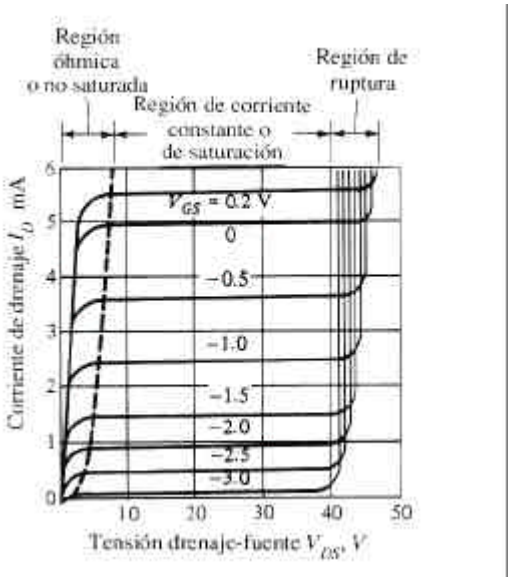


Fig. 43 Característica de salida del JFET de canal *n* 2N4869 (Cortesía de Siliconix Inc.)

El segundo tipo, llamado MOSFET de *acumulación* no acusa ninguna corriente cuando la tensión de puerta es nula, aumentando la corriente de salida al aumentar la tensión de puerta. Ambos tipos pueden ser de canal *p* o de canal *n*.

1.11.4.4. Estructura del MOS de Acumulación

La *fig. 44-a* representa esquemáticamente la estructura de un MOSFET de acumulación de canal *n* y la *fig. 44-b* la de uno de canal *p*. Los elementos representados en la *fig. 44* se conocen comúnmente como transistores NMOS y PMOS, respectivamente. Como se ve en la *fig. 44-a* las dos zonas de tipo *n* embebidas en el sustrato tipo *p* (el cuerpo) son los electrodos de fuente y de drenaje. La región comprendida entre fuente y drenaje es el canal que está cubierto con una fina capa de dióxido de silicio (SiO_2). La puerta la forma el electrodo metálico situado sobre la capa de óxido. Actualmente, en la fabricación del MOSFET se utiliza una capa conductora de polisilicio para la puerta en lugar del metal dibujado en la *fig. 44*. Sin embargo, los principios físicos que determinan el funcionamiento del MOSFET son los mismos para ambos tipos de puerta.

La puerta metálica junto con la capa aislante de óxido y el canal semiconductor forman un condensador plano paralelo. Debido a la capa aislante de dióxido a este dispositivo se le llama también transistor de efecto campo y puerta aislada (IGFET). Esta capa aislante determina una resistencia de entrada extraordinariamente alta para el MOSFET (de 10^{10} a 10^{15} Ω).

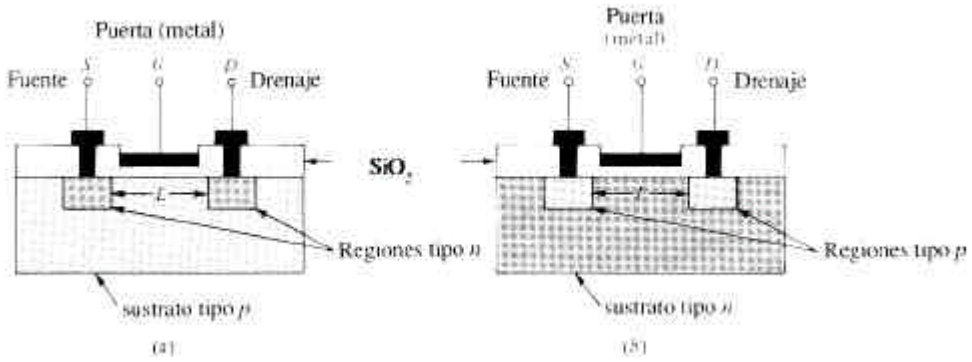


Fig. 44 Estructura de MOSFET de acumulación: (a) de canal *n*, y (b) de canal *p*

1.11.4.5. Comportamiento Físico del MOSFET de Acumulación

En la *fig. 45-a* se ve un transistor NMOS en el que la fuente y el sustrato están conectados a tierra y la tensión drenaje – fuente V_{DS} se sitúa en cero. La tensión positiva aplicada a la puerta crea un campo eléctrico dirigido perpendicularmente a través del óxido. Este campo acaba en cargas negativas "inducidas" en la proximidad de la superficie semiconductora como se ve en la *fig. 45-a*. Puesto que el sustrato tipo *p* contiene muy pocos electrones las cargas positivas superficiales son principalmente electrones procedentes de la fuente y drenaje de tipo *n*. Estas cargas móviles negativas, que son portadores minoritarios en el sustrato tipo *p*, forman una capa de inversión, que se logra únicamente si V_{GS} supera el nivel umbral V_T. Las cargas inducidas bajo el óxido forman un canal *n*. A medida que crece la tensión de puerta hacia V_T también crece el número de cargas negativas inducidas en el semiconductor y, en consecuencia aumenta la conductividad del canal. Aplicando una tensión positiva entre drenaje y fuente nace una corriente en el canal inducido, entre drenaje y fuente. Así, la corriente de drenaje se acrecienta por la tensión positiva de puerta, y al dispositivo se le llama MOSFET de acumulación.

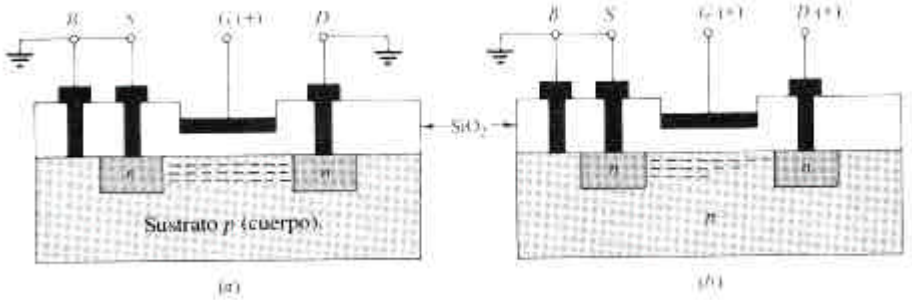


Fig. 45 Transistor de acumulación NMOS polarizado mostrando el canal inducido, con (a) $V_{DS} = 0$, y (b) $V_{DS} > 0$

Consideremos ahora la situación en la que V_{DS} aumenta desde cero manteniéndose V_{GS} a un valor positivo constante mayor que V_T (es decir, que $V_{GS} - V_T > 0$). Con valores pequeños de V_{DS} ($V_{DS} < V_{GS} - V_T$) un aumento de V_{DS} va acompañado de un aumento de la corriente de drenaje I_D. El comportamiento del MOSFET es el de una resistencia y a esta zona se le denomina región óhmica. A medida que crece V_{DS} la caída de tensión a lo largo del canal también crece y por tanto disminuye la tensión a través del óxido de puerta y el lado de drenaje del canal $V_{GD} = V_{DS} - V_{GS}$. Esta diferencia de tensión reducida rebaja el campo a través del extremo de drenaje del dieléctrico, lo que se

traduce en menos inversión de cargas en la porción del canal inducido. El canal se está cerrando e I_D crece mucho más despacio que el aumento de V_{DS} en la región óhmica cerca del origen. Idealmente una vez llegado a la estricción, un nuevo incremento de V_{DS} no afecta a I_D habiéndose llegado a la corriente de saturación. Esta región de saturación es de naturaleza similar a la velocidad de saturación en un JFET. El valor de I_D que se alcanza en saturación depende de V_{GS}. Los incrementos de $V_{GS} > V_T$ aumentan los valores de saturación de I_D.

1.11.4.6. El FET como Interruptor

Los transistores de efecto campo metal – óxido – semiconductor se emplean mucho en circuitos digitales por su forma de trabajar a manera de interruptor. Para exponer el funcionamiento del MOSFET, como interruptor gobernado, emplearemos el circuito de la *fig. 46-a*. La onda de tensión de entrada tiene la forma en escalón representada en la *fig. 48-a*. Para $t < T$ la tensión de entrada es de 1.5 *V*, y por tanto, de la característica de transferencia de la *fig. 47* deducimos que $v_o = 4$ *V*. La corriente I_{D1} es cero como se desprende de la recta de carga de la *fig. 46-b*. Esta es la característica de un interruptor abierto ya que la tensión a través de él es "apreciable" mientras que la corriente es nula.

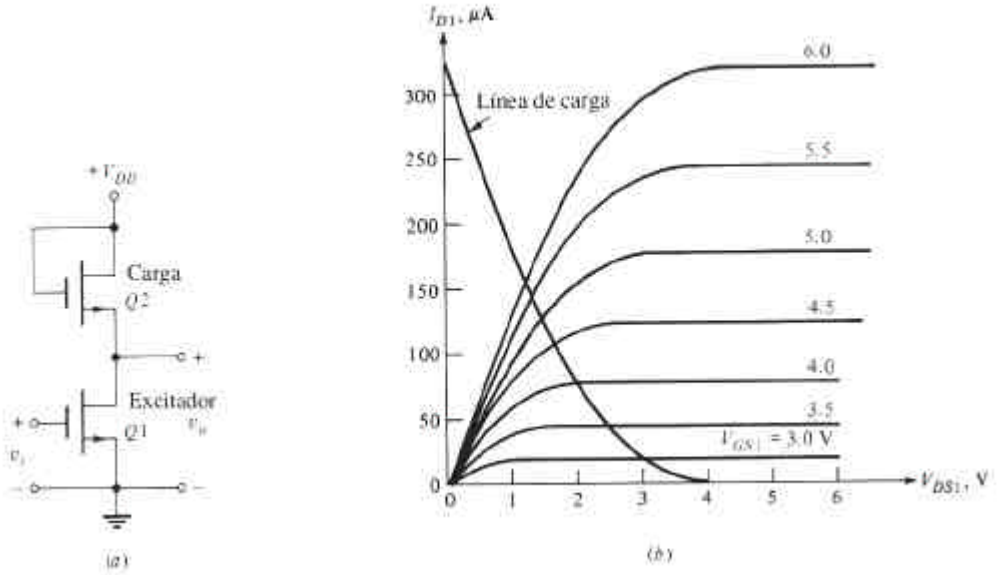


Fig. 46 (a) Circuito de transistor de efecto campo Metal – Oxido – Semiconductor con resistencia de carga MOSFET no lineal; (b) Característica de salida MOSFET con línea de carga no lineal.

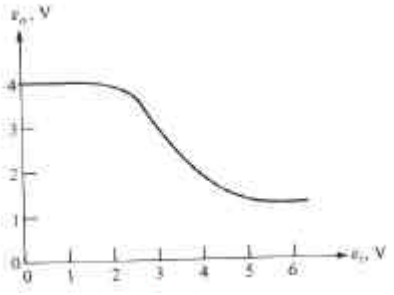


Fig. 47 Característica de transferencia de tensión (v_o en función de v_i)

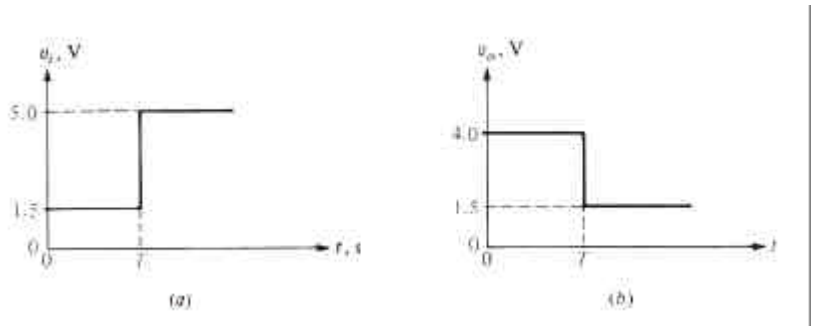


Fig. 48 (a) Onda de entrada en escalón de tensión (v_i), y (b) Onda de tensión v_o resultante

Para $t > T$ la tensión de entrada es de 5 V resultando v_o =1.5 V (*fig. 47*) e I_{D1} =125 mA (*fig. 46-b*). Esta situación se aproxima a la de un interruptor cerrado ya que existe una corriente apreciable con poca tensión entre terminales (drenaje y fuente). La onda de salida es la de la *fig. 48-b*.

Los dos estados posibles del interruptor pueden deducirse de la característica de transferencia dada en la *fig. 47*. Mientras $v_i \leq V_T = 2V$, la tensión de salida es de 4 V y la corriente nula, según la *fig. 46*.

Las tensiones de entrada superiores a unos 5 V apenas introducen variaciones ni en v_o ni en I_{D1}. En consecuencia la corriente de salida depende casi exclusivamente de la característica de carga y la V_{DD} del drenaje. La pequeña variación de la tensión de salida al variar la de entrada queda patente en el "allanamiento" de la característica de transferencia de la *fig. 47* con $v_i \leq 5V$.

Un interruptor real no puede cambiar de estado instantáneamente (*fig. 48-b*).

1.12. Estado Actual de las Máquinas Eléctricas Lineales

1.12.1. Motores Lineales de Inducción

- ***DXL Dual Carriage Linear – motor Table***

  La mesa de posicionamiento del DXL Dual Carriage Linear – motor contiene una plataforma de precisión para el traslado y posicionamiento de dos carros independientes dentro del mismo itinerario lineal.

Fig. 49 La mesa de posicionamiento del DXL Dual Carriage Linear

Características:

- Motores lineales sin engranajes y sin cables móviles.
- Base de precisión y formas de sustento comunes a los dos carros.
- Codificadores ópticos de resolución extremadamente alta con salida digital.
- *"Servo drives"* digitales preconfigurados compatibles con todos los controladores de movimiento estándar que hay en la industria.
- La cubierta *"hardshell"* protege los componentes internos (IP30).
- Sensor de posición alineado con el codificador.
- Sensores de final de recorrido ajustables con salidas seleccionables.
- La superficie de referencia a las herramientas está alineada dentro 25 *"microns"* del verdadero itinerario.

Aplicaciones:

El DXL se puede usar en muchas aplicaciones de movimientos de precisión pero es especialmente efectivo para aplicaciones de fusión de fibras que requieren una resolución extremadamente alta y control preciso de la velocidad. Otras aplicaciones incluyen la fabricación de material médico y aplicaciones de imagen en la distancia focal que debe ser controlada con precisión.

- ***Linear Induction Motor (LIM):*** *Sistema de propulsión del metro de Osaka*

Este nuevo sistema de propulsión utiliza un motor de inducción lineal controlado por un variador de frecuencia (VVVF Variable Voltaje Variable Frequency) y no consta de una adhesión típica, es decir, fricción entre guías o raíles.

Este sistema fue introducido en el metro de la ciudad de Osaka en mayo de 1990, con la intención de reducir el coste del sistema de metros, así como de estar en la vanguardia de la tecnología.

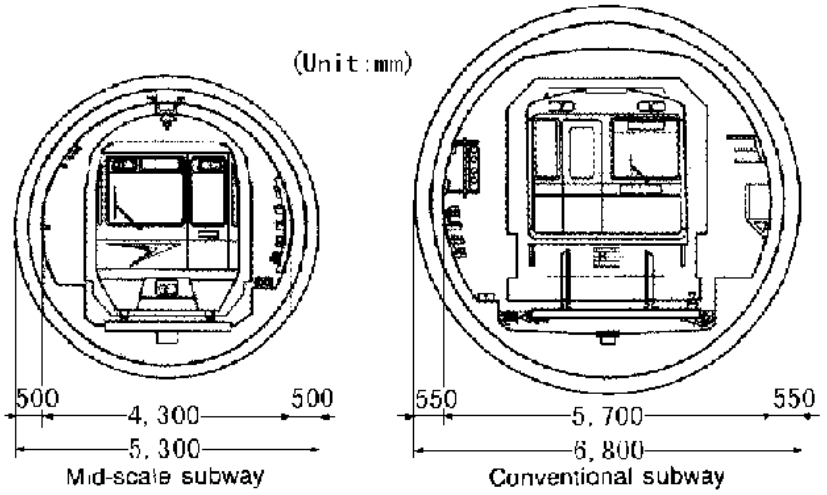


Fig. 50 Dimensiones del túnel del metro de Osaka

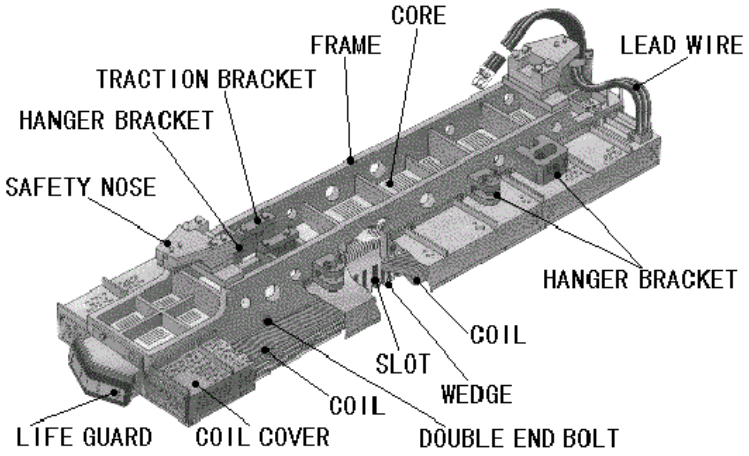


Fig. 51 Motor de inducción lineal controlado por un variador de frecuencia

- ***Tubular Linear Motor***

El motor lineal tubular sólo tiene dos componentes, la vara y el émbolo. Esta simple configuración produce un empuje lineal que es usado como base para cualquier solución de propulsión.

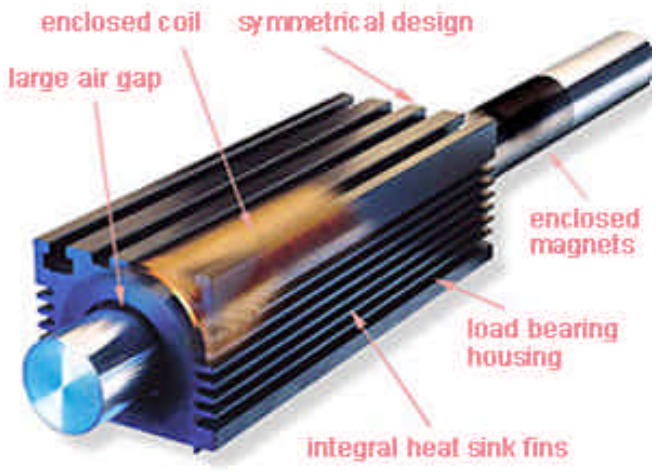


Fig. 52 Motor lineal tubular de dos componentes (vara y émbolo)

Características:

- Diseño simétrico:
  - Instalación simple
  - Sección compacta

- Gran entrehierro de aproximadamente 1 *mm* nominal.
- Imanes y bobinas incluidos.
- Cubierta portadora rugosa.
- Aletas integrales del disipador de calor.
- Características adicionales:
  - Reparación mecánica simple, número mínimo de piezas móviles.
  - Suave retroceso (inercia) y ningún desgaste.
  - Gama ancha de velocidad > 10 *m/s*.
  - Alteración, alta fuerza del motor.
  - Alise, movimiento virtualmente silencioso.
  - Libre de mantenimiento.

➢ ***Platinum ® DDL***

Fig. 53 Motor de inducción lineal de la casa Plantinum ® DDL

Ventajas:

- Mantenimiento nulo.
- Se eliminan tornillos, cajas de engranajes, estante y piñones, correas y poleas.
- Contragolpe y conformidad cero.
- Alta tiesura.
- Gran precisión en posicionamiento.
- Ensamblaje mecánico compacto.
- Pocos elementos mecánicos.
- Velocidad muy suave.
- Operación silenciosa.

➢ ***406LXR Linear Motor Driven Table***

Fig. 54 Motor de inducción lineal modelo 406LXR

Fig. 55 Detalle del motor de inducción lineal modelo 406LXR

La tabla combina las características deseadas de colocación de alta velocidad y precisión, en un paquete discreto fiable. La respuesta rápida, la alta aceleración, la traducción lisa, y el breve tiempo que se sitúa describen las características de funcionamiento del 406LXR, mientras que la capacidad de repetición, la gran exactitud, y la alta resolución describen sus cualidades de posicionamiento. El funcionamiento óptimo se alcanza como resultado de la tecnología *"slotless"* del motor dirigida conjuntamente con los elementos y los componentes mecánicos, todo esto describe el funcionamiento de regeneración.

- ***Sigle axis SERIES BB***

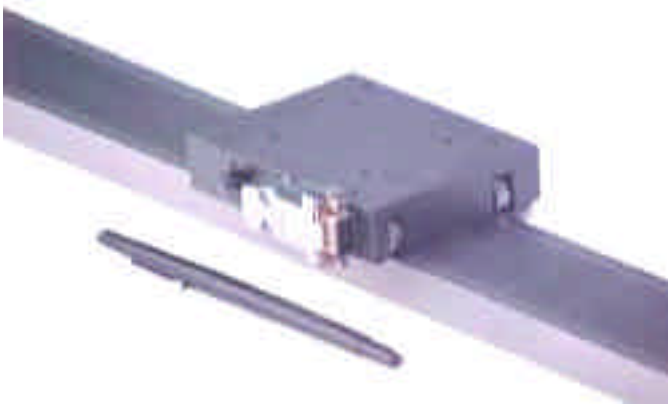


Fig. 56 Motor de inducción lineal SERIES BB

Características:

- Perfil pequeño.
- Pieza móvil corta.
- Cojinetes mecánicos, de rodillo, incorporados.
- No ajuste del entrehierro.
- Solución lineal del movimiento por el coste más bajo.
- Compatible con *"stepping motors drives"*.

- ***Single axis SERIES AA***

Fig. 57 Motor de inducción lineal SERIES AA

Características:

- Alta fuerza.
- Cojinete de aire de alta tiesura.
- Cojinetes de aire en todas las superficies.
- Compatible con *"stepping motors drives"*.

- ***Single axis SERIES AB***

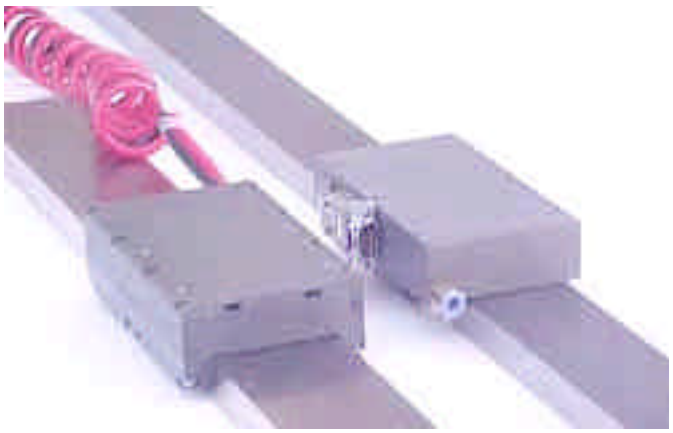


Fig. 58 Motor de inducción lineal SERIES AB

Características:

- Perfil pequeño.
- Pieza móvil corta.
- Cojinete de aire de alta tiesura.
- Compatible con *"stepping motors drives"*.
- Cojinete de rodillo lateral cargado magnéticamente.

➢ ***Linear Motor Driven System***

Características:

- *Sistema de propulsión no adherente:*

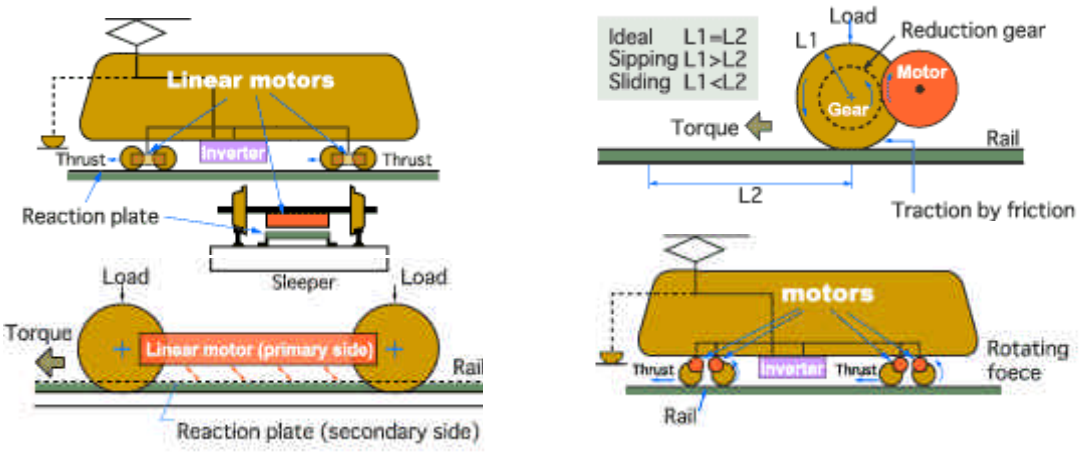


Fig. 59 Croquis de funcionamiento del motor de inducción de la casa Hitachi

- Los trenes aceleran y deceleran rápidamente.
- Los trenes pueden afrontar desniveles importantes (alrededor del 8 %).
- Condiciones atmosféricas adversas no afectan en las operaciones.
- Costes de trabajo se reducen.

- *Superficie usada del motor lineal:*

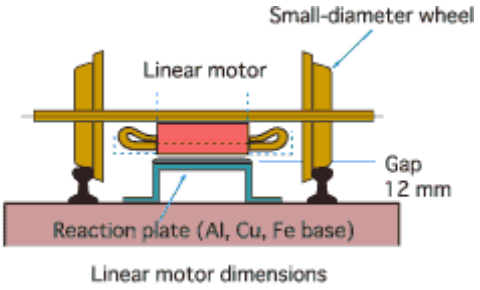


Fig. 60 Detalle de superficie utilizada por el motor de inducción de la casa Hitachi

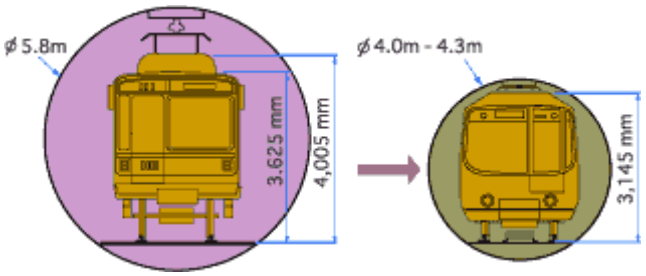


Fig. 61 Dimensiones del túnel y vagón que utiliza el motor Hitachi

- Simplifica el trabajo de mantenimiento.
- Cojinetes, engranajes de reducción y acopladores sin necesidad de mantenimiento.
- Ruedas de pequeño diámetro, distancia entre ejes corta.
- Utiliza frenos completamente eléctricos para detenerse.
- Reduce mantenimiento de frenos.
- Reduce secciones transversales del túnel bajando el piso del vagón.

➢ ***Motor de Inducción de Seraphim***

El monocarril es accionado por un motor de inducción linear (LIM). Ésta es una versión nueva y mejorada, Seraphim (motor de inducción puesto en fase carril dividido en segmentos). El motor de Seraphim fue diseñado originalmente para lanzar los satélites en órbita.

Funcionamiento:

Etapas explicativas del desarrollo del motor de inducción lineal

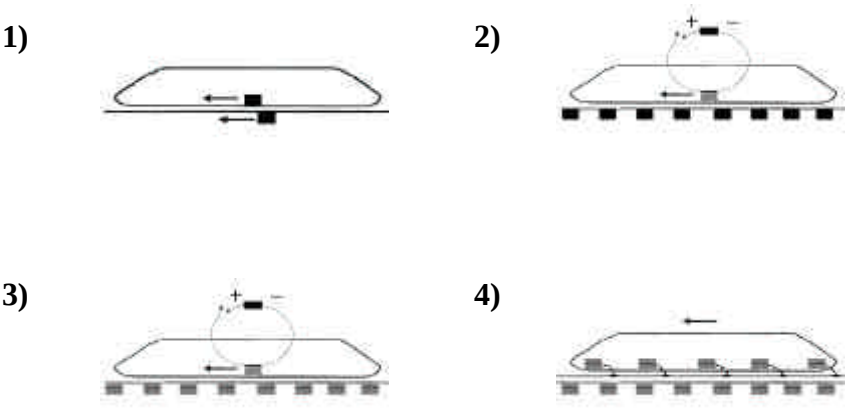


Fig. 62 Croquis de funcionamiento del motor Seraphim

Ventajas:

Las ventajas del motor de inducción lineal con respecto a los motores de inducción lineal convencionales son las siguientes:

- No tiene piezas móviles.
- La propulsión está al lado de las fuerzas electromecánicas, es decir, entre las bobinas activas del vehículo y el carril; no a través de tracción entre las ruedas y el carril.
- Aparece una componente vertical que es capaz de sustentar el 90 % del peso del vehículo.
- Permite una holgura entre las bobinas y el carril guía, es decir, aumenta el rango de tolerancias del carril reduciendo de esta forma el coste de construcción y mantenimiento.
- Muy baja fricción magnética que mejora la eficacia del motor.
- Más pequeño, ligero y compacto que un motor de inducción lineal convencional, todo ello implica un coste de construcción inferior.
- La eficacia del motor aumenta con la velocidad.

➢ ***Motor lineal Multi – Módulo***

Características:

- *Multi – Modularidad del motor lineal:* Las placas de las bobinas de tamaño compacto y la placa del imán consiguen un manejo más flexible y un diseño más libre.

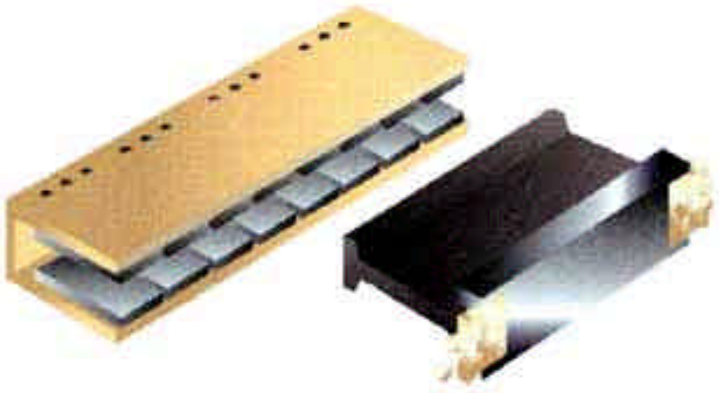


Fig. 63 Multi – Modularidad del motor lineal

- *Ajuste flexible para el funcionamiento:* Las bobinas se pueden interconectar si los requisitos de funcionamiento requieren una composición de máquinas.

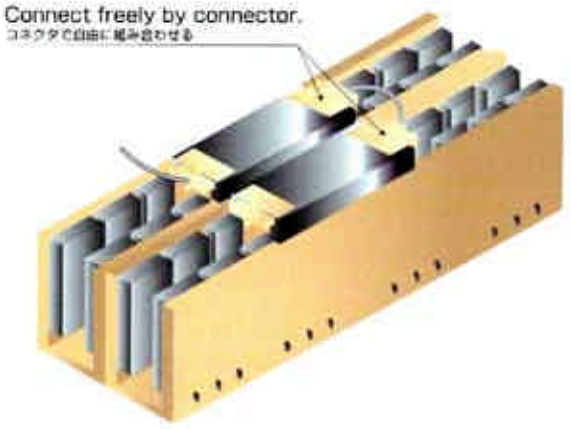


Fig. 64 Ajuste flexible para el funcionamiento

- *Varios movimientos largos:* La placa del imán modular resuelve aplicaciones de varios movimientos. Se puede utilizar más de un carro en un solo eje-x.

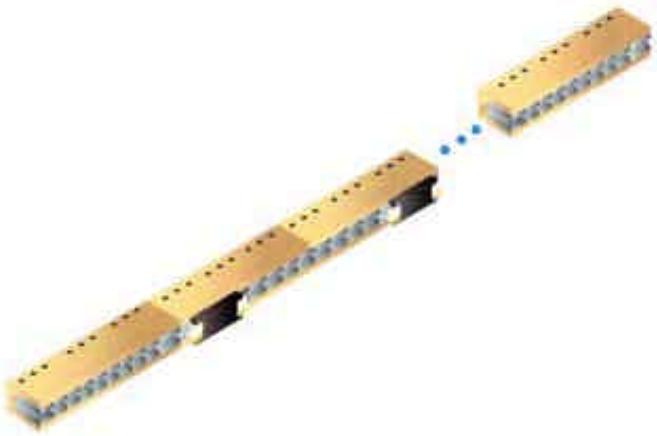


Fig. 65 Varios movimientos largos

- *Formación abundante:* Se producen 12 series del motor lineal Multi – Módulo que abarcan un rango desde los 12 *N* hasta los 168 *N*.

Fig. 66 Formación abundante

- *Posibilidad de uso de bobinas coreless:* El funcionamiento del motor puede mejorar con la utilización de bobinas coreless y duplicar el imán de ambos lados que no tiene ninguna energía de absorción magnética. Esta constitución del motor proporciona una alta aceleración de la máquina.

Fig. 67 Posibilidad de uso de bobinas coreless

- *Sistema de refrigeración eficiente:* El sistema de refrigeración de las bobinas compactas reduce considerablemente el calentamiento del motor.

Fig. 68 Sistema de refrigeración eficiente

1.12.2. Motores Lineales Síncronos

- ***Synchronous linear motor with iron core***

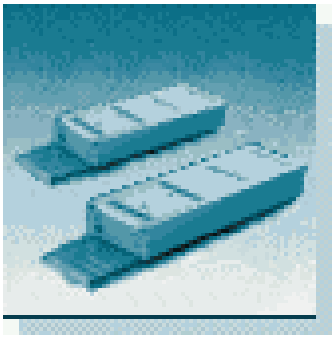


Fig. 69 Motor lineal síncrono de la casa ESR Pollmeier

Características:

- Manejo directo con uniformidad, fuerza lineal.
- Tamaño compacto.
- Peso ligero.
- Gran aceleración.
- Suave deslizamiento.
- Velocidad superior a 10 *m/s.*
- Pequeñas pérdidas térmicas.
- Refrigeración con aire o agua dependiendo de la potencia demandada.
- Protección térmica a través de sensores de temperatura integrados.
- Buena dinámica y precisión en combinación con una alta resolución de codificadores ópticos.

1.12.3. Motores Lineales con Superconductores

- ***Linear Motor Car Q & A***

"Superconducting Magnetically – Levitated Linear Motor Car" es el sistema de alta velocidad del transporte más prometedor del siglo XXI. Es un vehículo con los requerimientos de alta velocidad y masificación del transporte. Es el sistema más avanzado, que tiene menos ruido y vibración además de asegurar un viaje seguro y cómodo.

Características:

- *Superconductividad:*

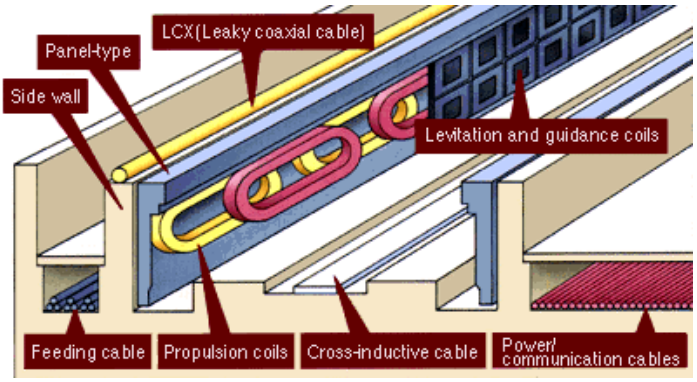


Fig. 70 Croquis de funcionamiento del Linear Motor Car Q & A

Cuando ciertos metales se refrigeran por debajo de una temperatura específica, su resistencia eléctrica desaparece. Éste fenómeno se conoce como la superconductividad. Si se aplica a una bobina compuesta por este material superconductor, continua fluyendo la corriente sin pérdidas. Esta bobina puede generar un campo magnético muy superior al de los imanes permanentes.
Como ejemplo, podríamos adoptar un paquete de conductores extremadamente finos, de niobio – titanio que se encajan en una matriz de cobre para mejorar la estabilidad de la superconductividad. Para refrigerar estos conductores se podría utilizar helio líquido.

- *Sistema de propulsión:*

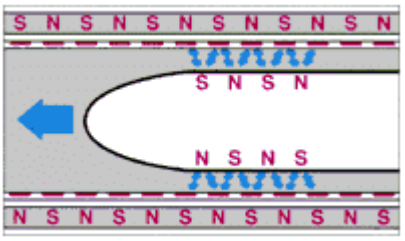


Fig. 71 Sistema de propulsión

Pasando la corriente a través de bobinas del sistema de propulsión instalado en el suelo, se produce un campo magnético (polos norte y sur), de esta manera el tren es propulsado adelante debido a las fuerzas de repulsión producidas por los polos opuestos (entre los imanes superconductores instalados en el suelo y los imanes del vagón).

- *Sistema de Levitación:*

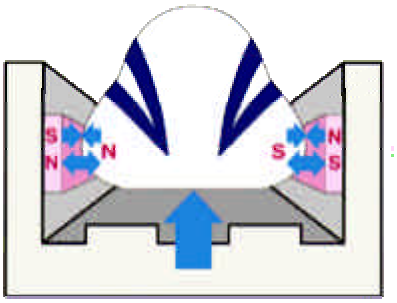


Fig. 72 Sistema de Levitación

Cuando por los imanes superconductores alojados en los vagones pasa una determinada intensidad, se produce la fuerza de levitación electrodinámica que actúa sobre ellos.

- *Sistema de guiado:*

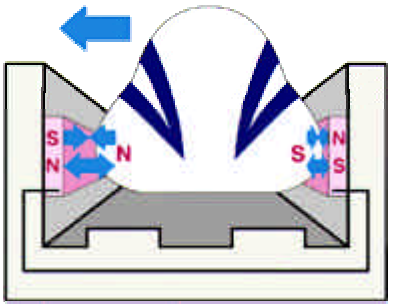


Fig. 73 Sistema de guiado

Las bobinas que producen la levitación y constituyen el sistema de guiado se encuentran dispuestas a ambos lados del carril y están conectadas entre sí. Las fuerzas antagónicas producidas por los imanes superconductores fijan la dirección del convoy.

1.12.4. Otros Motores Lineales

- ***Brushless Linear Motor***

Empresa: Helmel's MICROSTAR DCC®

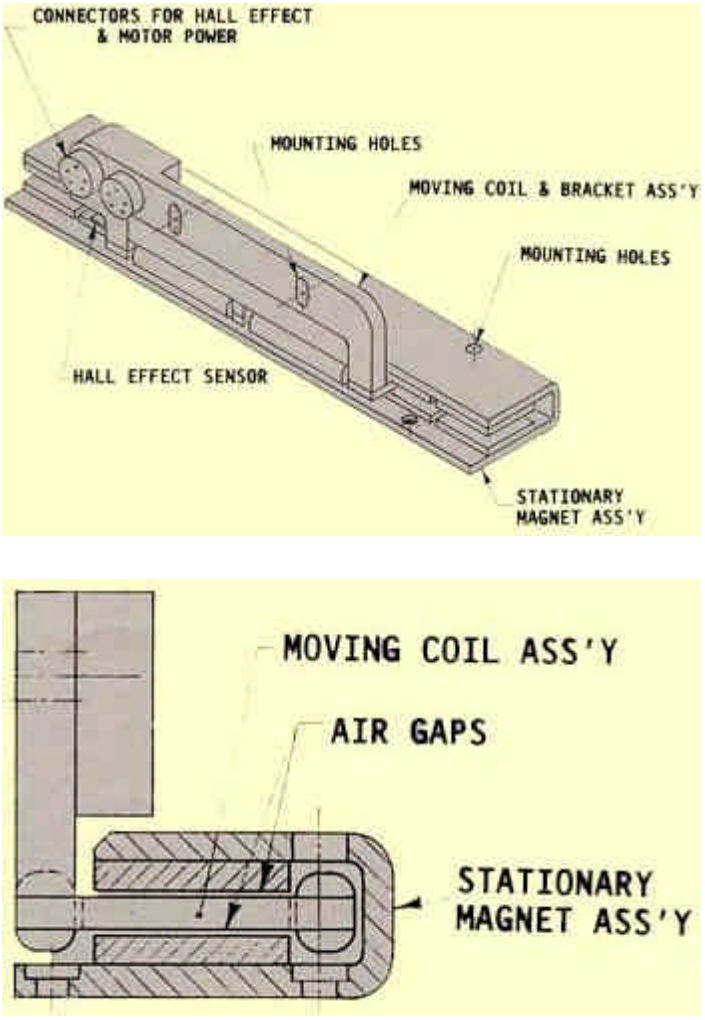


Fig. 74 Motor Brushless de la casa Helmel

Características:

- Ningún contacto entre las piezas móviles, de esta manera se elimina la fricción.
- Sin escobillas para la alta confiabilidad.
- Ninguna histéresis.
- Ningún contragolpe (poca inercia).
- Operación reservada, ningún ruido.
- Ningún movimiento dentado para inhibir el movimiento liso.
- Alta servo tiesura.
- Alta aceleración, por encima de 4 *g*.
- Calor generado mínimo.

- ***Motor lineal de CC sin escobillas***

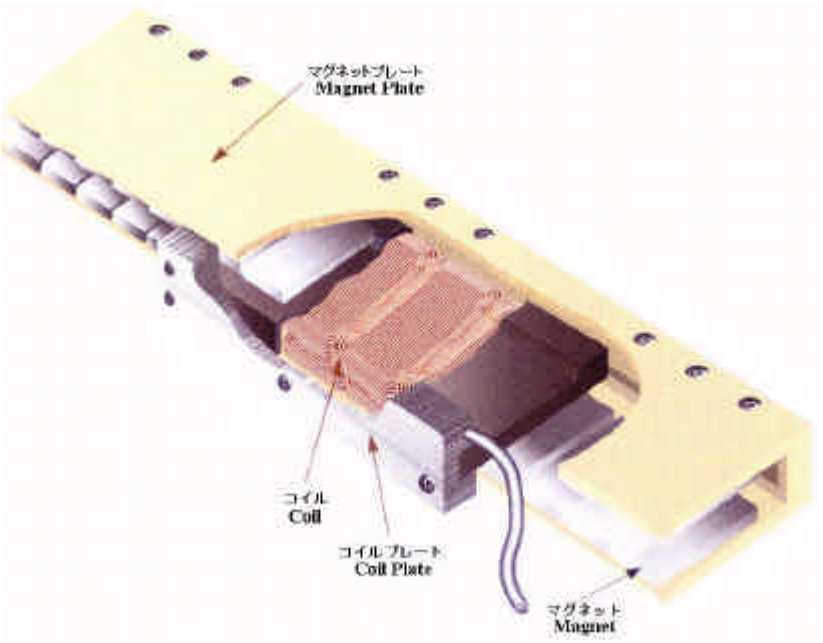


Fig. 75 Motor lineal de c.c. sin escobillas

Características:

- *Estructura simple y compacta:* Una transmisión de energía más eficaz del motor se conseguirá a través de una estructura de impulsión directa, que es más simple que el *"ball – screw"* que requiere de una estructura más complicada.

- *Alta rigidez y precisión:* Desaparecen los efectos del retroceso, de errores o de un retraso del sistema de detección. Su sistema de control acorta su tiempo de colocación y logran una colocación más exacta.

- *Control de los carros en un solo eje-X:* Fijar todos los movimientos en un solo eje-X da lugar al control exacto, que es imposible por el sistema *"ball – screw"*.

- *Excelente aceleración y velocidad:* Tanto si el sistema funciona a altas o bajas velocidades es capaz de mantener una velocidad constante. La excelente aceleración se consigue mediante una transmisión eficaz.

- ***Motores Lineales Sin Escobillas de Alto Rendimiento***

Fig. 76 Motor lineal sin escobillas de alto rendimiento

Características:

- Base de hierro y sin entrehierro que proporciona una gran fuerza.
- Sin componentes o piezas móviles como piñones, tornillos o poleas.
- Alta tiesura.
- Gran exactitud de posicionamiento.
- Constitución de pocos elementos.
- Gran aceleración.
- Velocidad muy suave.
- Operación sin ruidos.
- Perfil estrecho.

- ***Series De Nanoposicionamiento***

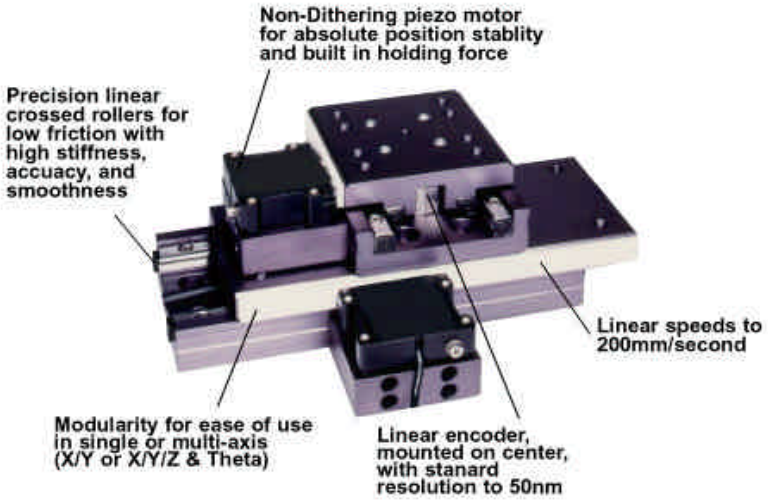


Fig. 77 Sistema de nano – posicionamiento del grupo Bayside

El grupo de movimiento de Bayside introduce una línea de etapas para el mercado óptico de la fibra. Las etapas de nanoposicionamiento de Bayside se diseñan específicamente para resolver los requisitos y exigencias del uso.

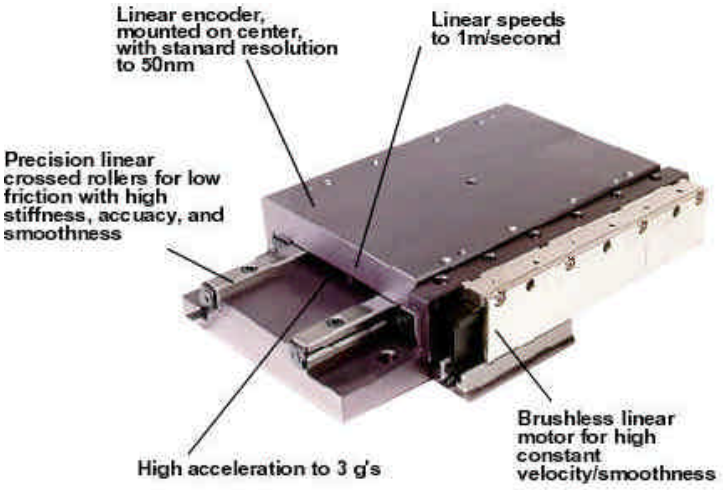


Fig. 78 Etapa de nano – posicionamiento del grupo Bayside

1.12.5. Características Generales de los Motores Lineales

MOTOR LINEAL	CONVERSIÓN ROTATIVO / LINEAL
Impulso directo	Requiere mecanismo rotativo / lineal
Mantenimiento mínimo	Más mantenimiento
Sin partes móviles internas	Más utilizado
Movimiento virtualmente silencioso	Ruidoso
Muy poca inercia	Gran inercia

1.12.6. Motor Lineal Tubular. Limitaciones de otros Motores Lineales

Tradicionalmente, los motores eléctricos lineales han sido diseñados para convertir las partes rotativas en partes lineales. Literalmente esto es lo mismo que el equivalente imaginario de partir de un estator y rotor convencionales y convertirlos en una lámina.
A pesar de que esto nos da una solución, también aparecen unas cuantas desventajas o inconvenientes inherentes.

Desventajas de otras soluciones – 4 diseños convencionales:

1) Linear Stepping Motors
   - Lazo abierto o servo tiesura baja.
   - Limitada relación fuerza – velocidad.

2) Platen Type Linear Motors
   - Gran tamaño.
   - Grandes fuerzas entre el estator y la armadura.
   - Pista magnética expuesta.

3) Linear Induction Motors
   - Gran tamaño.
   - Alto consumo de electricidad.
   - Normalmente requiere refrigeración compleja.
   - Grandes fuerzas entre estator y armazón.

4) U shaped Linear Brushless Motors
   - Disipación de calor limitada a partir de las bobinas del armazón emparedado.
   - Uso parcial del flujo magnético.
   - Rigidez mecánica limitada.

1.13. Descripción del Motor

1.13.1. Introducción

El prototipo que se pretende construir es un motor lineal tubular de imanes permanentes, está formado por una parte fija o estator y una parte móvil. A continuación se describen con detalle estas partes así como las dificultades que han aparecido y como se han solventado.

1.13.2. Parte Fija o Estator

1.13.2.1. Circuito Eléctrico

El circuito eléctrico está constituido por 12 pares de bobinas A y B. El conjunto de bobinas A están conectadas en paralelo, así como las bobinas denominadas B.

Según E. R. Laithwaite el devanado debe estar constituido, como mínimo, por 5 pares de polos para que el comportamiento de la máquina pueda ser considerado como aceptable.

Desde un punto de vista constructivo tenemos:

- Número de ranuras: $n = 24$
- Número de pares de polos: $p = 12$
- Número de fases: $m = 1$
- Número de ranuras por polo y fase: $n_{pf} = 1$
- Número de bobinas: $B = n = 24$
- Número de grupos del bobinado: $G = 2p \cdot m = 24$
- Número de bobinas por grupo: $U = \frac{B}{G} = 1$
- Paso de ranuras: $Y_k = \frac{n}{2p} = 1$
- Paso de bobinas: $Y_B = 1 \div 3$ (diametral)

El devanado de un motor lineal tubular es de mejores prestaciones eléctricas que el de los motores lineales planos o los rotativos, dado que las cabezas de bobina se reducen a un único conductor, que une dos bobinas de dos ranuras diferentes.

El diseño gráfico del devanado no responde a la teoría de devanados convencionales, por eso para su mejor comprensión visual se dibujará de la siguiente forma:

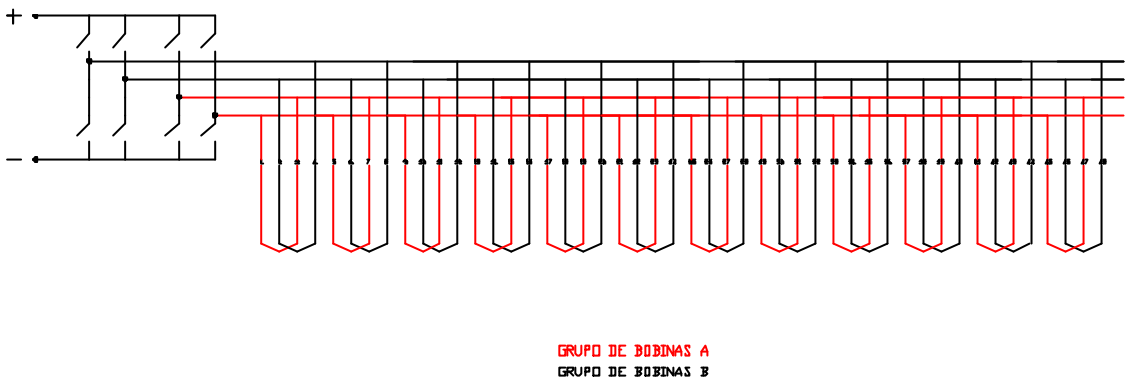


Fig. 79 Esquema eléctrico del devanado del motor

Las ranuras 1 y 3 corresponden a la misma bobina, de esta manera las 48 ranuras, que están dibujadas en la *fig. 79*, representan las 24 ranuras la máquina.

En cada ranura hay 54 conductores, según los cálculos realizados para una alimentación de 48 V y las bobinas están conectadas en paralelo. Los conductores utilizados son del modelo PIRESOLD FS (PIRELLI), tienen las siguientes características:

- Diámetro: $D = 0.560mm \pm 0.006mm$
- Diámetro medio: $D_{med} = 0.606mm$
- Sección: $s = 0.2463mm^2$
- Tensión de perforación: $E_{i,\Delta} = 1200V$
- Clase de aislamiento: Clase – F (155 ^{o}C)

1.13.2.2. Circuito Dieléctrico

Los aislantes utilizados son de tres tipos: para separar las estructuras macizas de hierro que contienen las bobinas, para aislar la ranura de los conductores que contiene y el aislante de los conductores.

El aislante utilizado para separar las estructuras es el TEFLÓN, evita que las bobinas A actúen sobre las B y viceversa, es decir, que se produzcan fugas de flujo magnético entre bobinas.

El aislante utilizado para recubrir el interior de las ranuras, según cálculos realizados en el estudio de la elección de la tensión de alimentación del motor, corresponde al RANUREX 1019 – A, Clase F – H (*>155 ºC*) con un espesor normal de 0.11 *mm*.

El aislante utilizado en los conductores de PIRELLI se escogerá en función de la temperatura máxima que soporta el aislante (*fig. 80).*

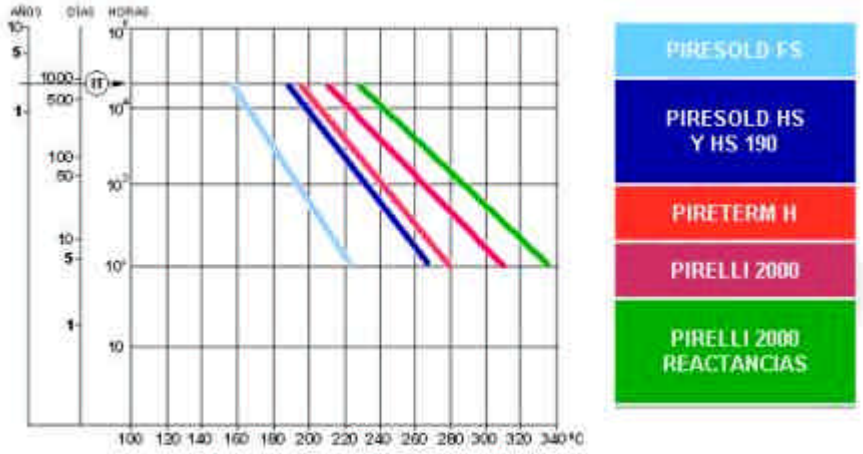


Fig. 80 Índices de temperatura de los diferentes Hilos Esmaltados

El conductor esmaltado que se utilizará es PIRESOLD FS, con las siguientes características: compuesto de resinas de poliuretano modificado, bobinas de hilos muy finos y clase térmica F – 155º C.

1.13.2.3. Circuito Magnético

Las dimensiones físicas del circuito magnético por polo, son las siguientes:

- Diámetro exterior del yugo: $D_{ext} = 30mm$
- Diámetro interior del yugo: $D_{\text{int}} = 29mm$
- Longitud del yugo: $l_y = 6mm$
- Altura del yugo: $h_y = 0.25mm$
- Altura total del yugo: $h_{yTOT} = 0.5mm$
- Altura del diente: $h_d = 6mm$
- Altura total del diente: $h_{dTOT} = 12mm$
- Entrehierro: $\partial = 1mm$
- Entrehierro total: $\partial_T = 5 \cong 6mm$
- Longitud del yugo: $l_{yi} = 3mm$
- Altura del yugo: $h_{yi} = 4mm$

- Altura total del yugo: $h_{yiTOT} = 8mm$

Si se considera una inducción en el entrehierro de 0.6 *T*, para la cual se requiere una excitación total de $q_T = 3159.79Av$, el número de conductores por ranura, según estos datos, asciende a 220 *c/r*, pero el espacio libre de las ranuras solamente permite colocar 54 *c/r*.

Debido a este hecho la inducción en el entrehierro disminuirá. Consideramos que la inducción varia de forma lineal con la intensidad del campo magnético, *H*, y éste de forma lineal con los conductores. Por lo tanto al pasar de 220 a 54 conductores por ranura la inducción en el entrehierro será de $\hat{B}_{do} = 0.146T$.

El circuito magnético del estator está constituido por 24 ranuras que forman los 12 pares de bobinas A y B, que alimentaremos mediante un control electrónico formado por transistores MOSFET (POWER MOS). El material utilizado en el circuito magnético es hierro aunque hay diferentes opciones constructivas.

La primera opción es la utilización de chapas en forma de peine como se puede apreciar en la *fig. 81*, dispuestas según la dirección del eje del motor y formando un cilindro. Estas chapas se pueden organizar individualmente o en grupos de 3 o 4.

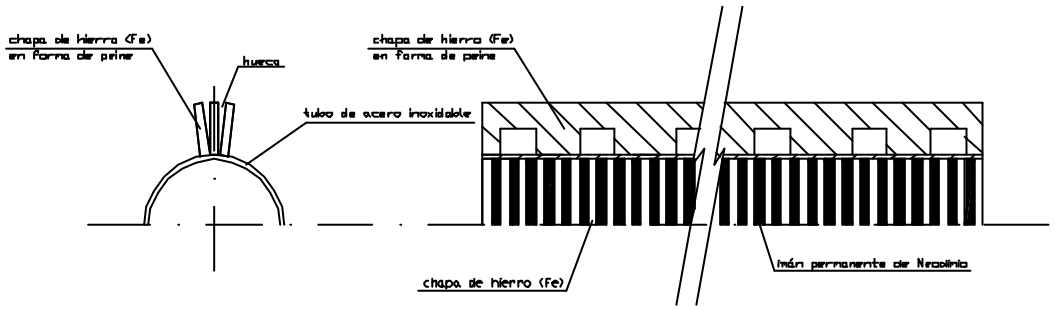


Fig. 81 Chapas en forma de peine

Esta morfología tiene dos problemas importantes: el primero es la aparición de un espacio hueco entre las chapas (al seguir el trazado de una circunferencia) y el segundo es la aparición de zonas donde el entrehierro es mayor, es decir, el entrehierro es irregular.

La segunda opción es la utilización mixta de chapas en forma de arandelas, de 0.5 mm ó 1 mm de grosor, y de estructura maciza. Se utiliza un tubo macizo exterior para mejorar el flujo magnético como se puede apreciar en la *fig. 82*.

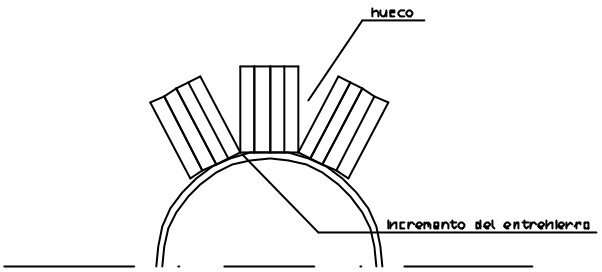


Fig. 82 Chapas agrupadas en grupos de 4

Tanto en ésta como en la anterior solución hay inconvenientes, es decir, complicaciones en el montaje de la máquina. Es difícil empaquetar de manera exacta y precisa todas las chapas, este error de empaquetado se llama factor de empilado.

Para disminuir este problema se pueden unir varias chapas mediante un cordón de soldadura como se muestra en la siguiente figura (*fig. 83*).

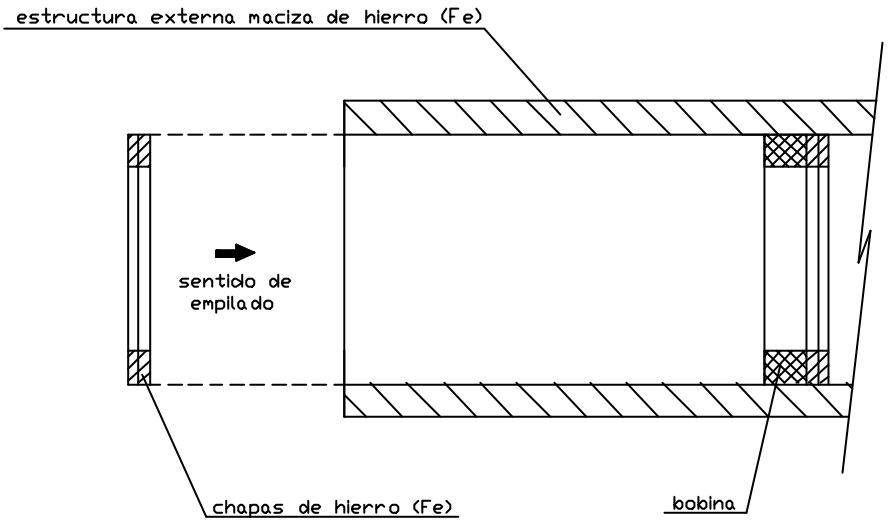


Fig. 83 Estator de hierro macizo

La tercera y última opción es que toda la parte fija (estator) sea de hierro macizo. Aunque no disminuye las corrientes de Foucault, como en las dos soluciones anteriores, simplifica mucho el montaje de la máquina y por tanto su precio final.

La solución adoptada es la tercera, es decir, se utilizará una estructura fija (estator) maciza de hierro, con el objetivo de simplificar el montaje y disminuir el coste final del prototipo. El hecho de utilizar hierro macizo no afecta en mucho las pérdidas por histéresis o en el hierro ya que se trabaja con pequeñas inducciones.

1.13.3. Parte Móvil

1.13.3.1. Circuito Magnético

La parte móvil está constituido por 119 discos de Hierro y 118 de Neodimio apilados alternativamente formando un cilindro de las siguientes dimensiones: 15 *mm* de diámetro y 237 *mm* de largo. Los imanes y chapas se introducirán dentro de un cilindro de acero inoxidable con el diámetro exterior de 16 *mm* y el interior de 15 *mm*.

La elección del tipo de imanes permanentes a utilizar en el prototipo se ha realizado según lo explicado anteriormente (apartado *"1.10 Imanes permanentes"*). El imán elegido ha sido Neodimio por su alto poder magnético y por factores económicos.

Las dimensiones de los materiales que forman el cilindro de la parte móvil son de igual diámetro y anchura, 15 *mm* de diámetro y 1 *mm* de ancho. El hecho de utilizar sólo dos materiales en su construcción simplifica bastante el proceso. Los imanes se orientarán de manera que los polos queden enfrentados unos con otros, con el objetivo de crear líneas de campo magnético fijo. La utilización de los discos de hierro que separan los imanes es fundamental para mantener la distancia entre ellos, por dos razones. La primera es, que la fuerza de repulsión que aparece entre los imanes con los polos enfrentados es muy grande y de esta manera el hierro sirve de unión, porque ambos imanes se adhieren a su superficie. La segunda razón es la necesidad de mantener los imanes a una distancia de seguridad para evitar su desmagnetización.

A diferencia de la mayoría de motores que se fabrican actualmente y utilizan imanes permanentes en la parte móvil, los imanes permanentes tienen la facultad de crear un campo magnético fijo de gran magnitud sin la necesidad de estar excitados de ninguna manera. Esto nos beneficia en el sentido de que el campo magnético resultante, será la composición del campo magnético creado por el estator y del campo creado por la parte móvil. De esta manera se consigue paliar los problemas que nos causa el gran entrehierro que los motores lineales tienen en común.

El producto de máxima energía nos indica la máxima energía que el imán puede suministrar cuando se encuentra en un determinado punto de trabajo. El cálculo de dicho producto se representa en la *fig. 84*:

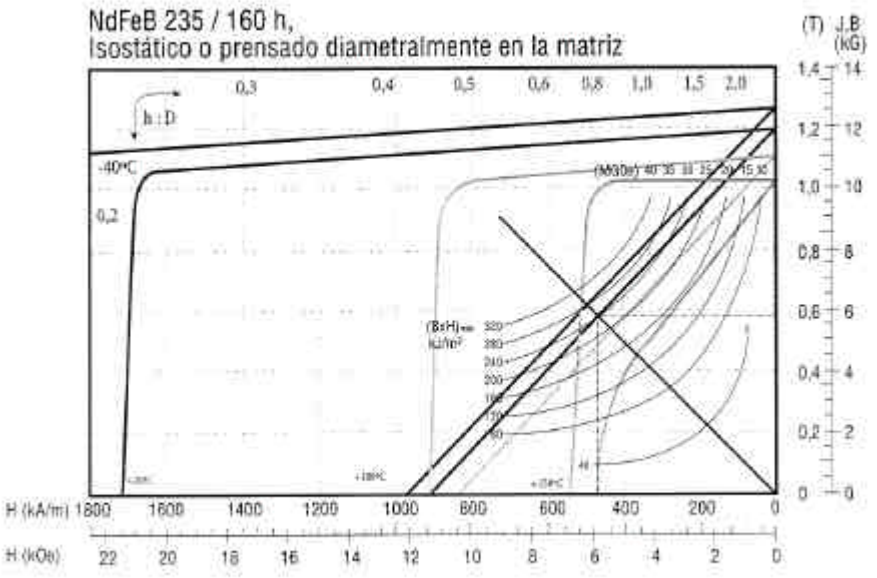


Fig. 84 Curva de desmagnetización del Neodimio *235/160 h*

El producto de máxima energía según la gráfica anterior, es aquel que encierre la superficie más grande. El cuadrado es la forma geométrica de la que se obtiene una mayor superficie, por tanto el producto de máxima energía es igual a $(B_m \cdot H_m)_{MAX} \approx 240\,kJ/m^3$.

Interesa que la recta de trabajo del imán permanente oscile entre el punto de máxima energía, con la finalidad de poder utilizar el imán de menores dimensiones. La recta de trabajo depende de la permeancia (*?d*) del circuito magnético.

Los imanes permanentes se desplazan junto con los discos interiores de hierro y con el cilindro de acero inoxidable (no magnético) que los recubre. Al desplazarse, la recta de trabajo variará en función de la permeancia (*?d*) y ésta en función del entrehierro. Se obtendrán dos rectas, una para cada situación y se adopta como recta de trabajo la media entre ellas.

Por tanto, la inducción en el entrehierro, que se obtiene en estas condiciones de trabajo, es $\hat{B}_{do} = 1.45 \times 10^{-3} T$.

Como se ha comentado anteriormente la inducción resultante en el entrehierro será la suma de la inducción obtenida a través del estator y de la obtenida a través de la parte móvil. De esta manera se alcanza una inducción total en el entrehierro de $\hat{B}_{do} = 0.16T$.

1.13.4. Construcción Mecánica

El prototipo está formado, como ya se ha comentado, por un estator y una parte móvil que se desliza a través del primero. Para conseguir que la parte móvil se deslice por dentro del estator con gran suavidad se instalará un cilindro de teflón mecanizado para

asegurar un guiado correcto y fino, para mejorar el deslizamiento es aconsejable utilizar algún tipo de lubricante.

Las tolerancias se expresan en micras, $1mm = 0.001mm$, representando su máximo la desviación superior de la medida constructiva, y su valor mínimo la desviación inferior, ambos valores con relación a la medida constructiva. Las tolerancias recomendadas para el montaje del prototipo son IT – 6 (series de tolerancias fundamentales) para la fabricación de mecánica de precisión.

En los extremos de la parte móvil se adecuarán dos roscas de métrica 8 mm (M – 8), de esta manera se podría enroscar un tornillo sin fin de igual métrica para utilizar el prototipo como máquina herramienta.

1.13.5. Alimentación controlada mediante transistores

Se utilizará una fuente de tensión de corriente continua para suministrar los 48 V necesarios para alimentar al motor, se instalará un regulador de velocidad a partir de transistores de potencia, éstos trabajarán como interruptores y de esta manera se realizará el control de la máquina.

La conmutación de los transistores al trabajar como interruptores es variable, es decir, la frecuencia de la tensión de alimentación es variable pero también controlable. La frecuencia es un parámetro del que dependen algunos otros como la velocidad, las pérdidas en el hierro o por histéresis, etc..

En el apartado 11 se explica el funcionamiento de los transistores de unión bipolares (BJT) y transistores MOSFET. En nuestro caso, el control del motor requiere de transistores de potencia capaces de aguantar los 48 V en corriente continua y una intensidad de 0.694 A.

La principal diferencia entre estos dos tipos de transistores es que los transistores bipolares consumen más corriente de base que los MOSFET. Este aspecto afecta al tipo de refrigeración, ya que al consumir más corriente se calientan mucho más.

Los transistores que se emplearán en el control de la alimentación son los FET – POWER MOS de canal N y modelo STN2NF06, con las siguientes características:

- Tensión de ruptura : $V_{(BR)DSS} = 60V$
- Intensidad: $I_D = 3A$
- Resistencia: $R_{DS(on)} = 0.08\Omega$
- Resistencia térmica: $R_{TH} = 60^{o}C/W$
- Potencia total disipada: $P_D = 2.5W$

1.14. Diagrama de Gantt

El objetivo del diagrama de Gantt es desglosar las diferentes tareas y asignarles un tiempo de montaje para poder calcular el tiempo que se necesita para construir el prototipo.

TAREAS	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14
CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR														
CONSTRUCCIÓN DEL ESTATOR														
BOBINADO DEL MOTOR														
ENSAMBLAJE DEL MOTOR														
ENSAYOS														

Fig. 85 Diagrama de Gantt

El tiempo de montaje del motor es de cinco jornadas de ocho horas, lo que significan unas cuarenta horas de trabajo. Por otra parte se realizarán una serie de ensayos y pruebas con el objetivo de editar un manual de funcionamiento y características del motor. Los ensayos se estiman en cinco jornadas de ocho horas. Al ser un tiempo alzado, se deberá justificar su coste. (ver *Documento 4. Presupuesto*).

1.15. Resumen del Presupuesto

Capítulo 1: Construcción del Estator ..... 3.797,43 €
Capítulo 2: Construcción de la Parte Móvil ..... 1.694,46 €
Capítulo 3: Mano de Obra ..... 19.562,70 €

Presupuesto de Ejecución Material ..... 25.054,60 €

Precio de Ejecución Material ..... 25.054,60 €
Gastos Generales ..... 13 % ..... 3.257,10 €
Beneficio Industrial ..... 6 % ..... 1.503,28 €

Presupuesto de Contrato ..... 29.815,00 €

Presupuesto de Contrato ..... 29,815,00 €
Impuesto sobre el valor añadido (I.V.A.) ..... 16 % ..... 4.770,40 €

Presupuesto de Licitación .....**34.585,40 €**

El precio total del presupuesto asciende a TRENTA Y CUATRO MIL QUINIENTOS OCHENTA Y CINCO euros con CUARENTA céntimos.

1.16. Bibliografía

Corrales Martín, J. Cálculo Industrial de Máquinas Eléctricas; Tomo 1, Tomo 2. Ed. Marcombo. España. 1982.

Fraile Mora, J. Máquinas Eléctricas. S. Pub. Rev. Obras Públicas. Madrid. 1992.

Millman, J., Grabel A. Microelectrónica. Ed. Hispano Europea. España. 1993.

Santibáñez Huertas, P., Garcia Amorós, J. Máquinas Eléctricas Especiales. Universidad Rovira y Virgili de Tarragona. España. 1997.

Larburu Arrizabalaga, N. Máquinas Prontuario: Técnicas, Máquinas y Herramientas. Ed. Paraninfo. España. 1991.

Massagués Vidal, Ll. Aportaciones al estudio de los motores de inducción magnetohidrodinámica. Tesis Doctoral. España. 2001.

Direcciones de Internet:

www.pirelli.es
www.st.com
www.ima.es

Roda de Bará, 1 Septiembre de 2003

Autor

Javier Andolz Bielsa

Director Técnico del Proyecto

Dr. Lluís Massagués Vidal

Memoria de Cálculo

CONFIDENCIAL

Aquesta part del projecte conté informació confidencial i no ha estat publicada, per obtenir informació adreçar-se a:

Lluís Massaguès Vidal

Teléfon: 977 559 695
Fax: 977 559 605
E-mail: mailto:llmassag@etse.urv.es

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR ENGINYERIA

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

Planos

CONFIDENCIAL

Aquesta part del projecte conté informació confidencial i no ha estat publicada, per obtenir informació adreçar-se a:

Lluís Massaguès Vidal

Teléfon: 977 559 695
Fax: 977 559 605
E-mail: mailto:llmassag@etse.urv.es

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR ENGINYERIA

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

Índice

4.1. Mediciones Pág. 1
4.1.1. Capítulo 1: Construcción del Estator Pág. 1
4.1.2. Capítulo 2: Construcción de la Parte Móvil Pág. 1
4.1.3. Capítulo 3: Otros Conceptos Pág. 2

4.2. Precios Unitarios Pág. 2
4.2.1. Capítulo 1: Construcción del Estator Pág. 2
4.2.2. Capítulo 2: Construcción de la Parte Móvil Pág. 4
4.2.3. Capítulo 3: Otros Conceptos Pág. 5

4.3. Presupuesto Parcial Pág. 5
4.3.1. Capítulo 1: Construcción del Estator Pág. 5
4.3.2. Capítulo 2: Construcción de la Parte Móvil Pág. 6
4.3.3. Capítulo 3: Otros Conceptos Pág. 7

4.4. Resumen del Presupuesto Pág. 8

4. Presupuesto

4.1. Mediciones

4.1.1. Capítulo 1: Construcción del Estator

Código	Descripción	Cantidad	Unidad
ES1001	Cilindro embellecedor exterior de hierro F-111 con una apertura de 15 grados, de diámetro exterior 31mm, de diámetro interior 30 mm y 237 mm de longitud total.	1	Ud.
ES1002	Cilindro exterior de hierro F-111 con una apertura de 170 grados, de diámetro exterior 7 mm, de diámetro interior 5 mm y 237 mm de longitud total.	1	Ud.
ES1003	Pieza torneada de hierro F-111 de diámetro exterior 30 mm, de diámetro interior 17 mm para disponer el bobinado.	24	Ud.
ES1004	Aro de Teflón para aislar los bobinados de diámetro exterior 30 mm, de diámetro interior 17 mm y de 1 mm de ancho.	12	Ud.
ES1005	Aro de Teflón para aislar los bobinados de diámetro exterior 30 mm, de diámetro interior 17 mm y de 3 mm de ancho.	11	Ud.
ES1006	Aislante de ranura RANUREX 1019-A, clase F-H (>155 ºC) con un espesor normal de 0.11 mm.	0.2	m^2
ES1007	Conductor esmaltado de la casa PIRELLI modelo PIRESOLD FS compuesto de resinas de poliuretano modificado, clase térmica F-155 ºC, sección 0.2463 mm2	5	m
ES1008	Punto de soldadura de estaño.	175	Ud.
ES1009	Cordón de soldadura	2	Ud.
ES1010	Bornes para conexión de los dos devanados del motor.	4	Ud.

4.1.2. Capítulo 2: Construcción de la Parte Móvil

Código	Descripción	Cantidad	Unidad
PM2001	Cilindro exterior de acero inoxidable, de diámetro exterior 16 mm, de diámetro interior 15 mm y 237 mm de longitud total.	1	Ud.
PM2002	Cilindro exterior de teflón torneado, de diámetro exterior 17 mm, de diámetro interior de 16 mm y 237 mm de longitud total.	1	Ud.
PM2003	Imán de Neodimio en forma de disco de diámetro de 15 mm y 1 mm de ancho.	118	Ud.

PM2004	Disco de hierro F-111 de diámetro 15 mm y de 1 mm de ancho.	119	Ud.
PM2005	Rosca métrica M-8	1	Ud.
PM2006	Punto de soldadura de estaño.	237	Ud.
PM2007	Cordón de soldadura	237	Ud.

4.1.3. Capítulo 3: Mano de Obra

Código	Descripción	Cantidad	Unidad
X3001	Ingeniero Técnico Industrial (diseño y cálculo de la máquina)	335	Horas
X3002	Ingeniero Industrial (diseño y cálculo de la máquina)	60	Horas
X3003	Técnico de Montaje (construcción)	40	Horas
X3004	Ensayo de la máquina (alzada a justificar)	1	Ud.

4.2. Precios Unitarios

4.2.1. Capítulo 1: Construcción del Estator

Código	Descripción	Unidad	Precio
ES1001	Cilindro embellecedor exterior de hierro F-111 con una apertura de 15 grados, de diámetro exterior 31mm, de diámetro interior 30 mm y 237 mm de longitud total.	Ud.	51.80 €

CINCUENTA Y UN euros con OCHENTA céntimos

ES1002	Cilindro exterior de hierro F-111 con una apertura de 170 grados, de diámetro exterior 7 mm, de diámetro interior 5 mm y 237 mm de longitud total.	Ud.	29.45 €

VEINTINUEVE euros con CUARENTA Y CINCO céntimos

ES1003	Pieza torneada de hierro F-111 de diámetro exterior 30 mm, de diámetro interior 17 mm para disponer el bobinado.	Ud.	148.35 €

CIENTO CUARENTA Y OCHO euros con TREINTA Y CINCO céntimos

ES1004	Aro de Teflón para aislar los bobinados de diámetro exterior 30 mm, de diámetro interior 17 mm y de 1 mm de ancho.	Ud.	1.99 €

UN euro con NOVENTA Y NUEVE céntimos

ES1005	Aro de Teflón para aislar los bobinados de diámetro exterior 30 mm, de diámetro interior 17 mm y de 3 mm de ancho.	Ud.	2.70 €

DOS euros con SETENTA céntimos

ES1006	Aislante de ranura RANUREX 1019-A, clase F-H (>155 ºC) con un espesor normal de 0.11 mm.	m^2	11.55 €

ONCE euros con CINCUENTA Y CINCO céntimos

ES1007	Conductor esmaltado de la casa PIRELLI modelo PIRESOLD FS compuesto de resinas de poliuretano modificado, clase térmica F-155 ºC, sección 0.2463 mm2	m	6.70 €

SEIS euros con SETENTA céntimos

ES1008	Punto de soldadura de estaño.	Ud.	0.30 €

TRENTA céntimos

ES1009	Cordón de soldadura	Ud.	0.85 €

OCHENTA Y CINCO céntimos

ES1010	Bornes para conexión de los dos devanados del motor.	Ud.	3.05 €

TRES euros con CINCO céntimos

4.2.2. Capítulo 2: Construcción de la Parte Móvil

Código	Descripción	Unidad	Precio
PM2001	Cilindro exterior de acero inoxidable, de diámetro exterior 16 mm, de diámetro interior 15 mm y 237 mm de longitud total.	Ud.	70.45 €

SETENTA euros con CUARENTA Y CINCO céntimos

PM2002	Cilindro exterior de teflón torneado, de diámetro exterior 17 mm, de diámetro interior de 16 mm y 237 mm de longitud total.	Ud.	45.85 €

CUARENTA Y CINCO euros con OCHENTA Y CINCO céntimos

PM2003	Imán de Neodimio en forma de disco de diámetro de 15 mm y 1 mm de ancho.	Ud.	9.85 €

NUEVE euros con OCHENTA Y CINCO céntimos

PM2004	Disco de hierro F-111 de diámetro 15 mm y de 1 mm de ancho.	Ud.	1.20 €

UN euro con VEINTE céntimos

PM2005	Rosca métrica M-8	Ud.	0.51 €

CINCUENTA Y UN céntimos

PM2006	Punto de soldadura de estaño.	Ud.	0.30 €

TRENTA céntimos

PM2007	Cordón de soldadura	Ud.	0.85 €

OCHENTA Y CINCO céntimos

4.2.3. Capítulo 3: Mano de Obra

Código	Descripción	Unidad	Precio
X3001	Ingeniero Técnico Industrial (diseño y cálculo de la máquina)	Horas	36.06 €

TRENTA Y SEIS euros con SEIS céntimos

X3002	Ingeniero Industrial (diseño y cálculo de la máquina)	Horas	60.01 €

SESENTA euros con UN céntimo

X3003	Técnico de Montaje (construcción)	Horas	22.05 €

VEINTIDÓS euros con CINCO céntimos

X3004	Ensayo de la Máquina (alzada a justificar)	Ud.	3000 €

TRES MIL euros

4.3. Presupuesto Parcial

4.3.1. Capítulo 1: Construcción del Estator

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio Total
ES1001	Ud.	Cilindro embellecedor exterior de hierro F-111 con una apertura de 15 grados, de diámetro exterior 31mm, de diámetro interior 30 mm y 237 mm de longitud total.	1	51.80 €	51.80 €
ES1002	Ud.	Cilindro exterior de hierro F-111 con una apertura de 170 grados, de diámetro exterior 7 mm, de diámetro interior 5 mm y 237 mm de longitud total.	1	29.45 €	29.45 €
ES1003	Ud.	Pieza torneada de hierro F-111 de diámetro exterior 30 mm, de diámetro interior 17 mm para disponer el bobinado.	24	148.35 €	3560.40 €

ES1004	Ud.	Aro de Teflón para aislar los bobinados de diámetro exterior 30 mm, de diámetro interior 17 mm y de 1 mm de ancho.	12	1.99 €	23.88 €
ES1005	Ud.	Aro de Teflón para aislar los bobinados de diámetro exterior 30 mm, de diámetro interior 17 mm y de 3 mm de ancho.	11	2.70 €	29.70 €
ES1006	m^2	Aislante de ranura RANUREX 1019-A, clase F-H (>155 ºC) con un espesor normal de 0.11 mm.	0.2	11.55 €	2.30 €
ES1007	m	Conductor esmaltado de la casa PIRELLI modelo PIRESOLD FS compuesto de resinas de poliuretano modificado, clase térmica F-155 ºC, sección 0.2463 mm2	5	6.70 €	33.50 €
ES1008	Ud.	Punto de soldadura de estaño.	175	0.30 €	52.50 €
ES1009	Ud.	Cordón de soldadura	2	0.85€	1.70 €
ES1010	Ud.	Bornes para conexión de los dos devanados del motor.	4	3.05 €	12.20 €

Capítulo 1: Construcción del Estator 3797.43 €

El total del capítulo de Construcción del Estator asciende a un total de TRES MIL SETECIENTOS NOVENTA Y SIETE euros con CUARENTA Y TRES céntimos.

4.3.2. Capítulo 2: Construcción de la Parte Móvil

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio Total
PM2001	Ud.	Cilindro exterior de acero inoxidable, de diámetro exterior 16 mm, de diámetro interior 15 mm y 237 mm de longitud total.	1	70.45 €	70.45 €
PM2002	Ud.	Cilindro exterior de teflón torneado, de diámetro exterior 17 mm, de diámetro interior de 16 mm y 237 mm de longitud total.	1	45.85 €	45.85 €
PM2003	Ud.	Imán de Neodimio en forma de disco de diámetro de 15 mm y 1 mm de ancho.	118	9.85 €	1162.30 €
PM2004	Ud.	Disco de hierro F-111 de diámetro 15 mm y de 1 mm de ancho.	119	1.20 €	142.80 €

PM2005	Ud.	Rosca métrica M-8	1	0.51 €	0.51 €
PM2006	Ud.	Punto de soldadura de estaño.	237	0.30 €	71.10 €
PM2007	Ud.	Cordón de soldadura	237	0.85 €	201.45 €

Capítulo 2: Construcción de la Parte Móvil 1694.46 €

El total del capítulo de Construcción de la Parte Móvil asciende a un total de MIL SEISCIENTOS NOVENTA Y CUATRO euros con CUARENTA Y SEIS céntimos.

4.3.3. Capítulo 3: Mano de Obra

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio Total
X3001	Horas	Ingeniero Técnico Industrial (diseño y cálculo de la máquina)	335	36.06 €	12080.10 €
X3002	Horas	Ingeniero Industrial (diseño y cálculo de la máquina)	60	60.01 €	3600.6 €
X3003	Horas	Técnico de Montaje (construcción)	40	22.05 €	882.00 €
X3004	Ud.	Ensayo de la máquina (alzada a justificar)	1	3000 €	3000 €

Capítulo 3: Otros Conceptos 19562.7 €

El total del capítulo de Construcción de la Parte Móvil asciende a un total de CATORCE MIL SETECIENTOS SESENTA Y DOS euros con CUARENTA céntimos.

4.4. Resumen del Presupuesto

Capítulo 1:	Construcción del Estator	3.797,43 €
Capítulo 2:	Construcción de la Parte Móvil	1.694,46 €
Capítulo 3:	Mano de Obra	19.562,70 €
Presupuesto de Ejecución Material		25.054,60 €

Precio de Ejecución Material		25.054,60 €
Gastos Generales	13 %	3.257,10 €
Beneficio Industrial	6 %	1.503,28 €
Presupuesto de Contrato		29.815,00 €

Presupuesto de Contrato		29,815,00 €
Impuesto sobre el valor añadido (I.V.A.)	16 %	4.770,40 €
Presupuesto de Licitación		**34.585,40 €**

El precio total del presupuesto asciende a TRENTA Y CUATRO MIL QUINIENTOS OCHENTA Y CINCO euros con CUARENTA céntimos.

Roda de Bará, 1 Septiembre de 2003

Autor

Javier Andolz Bielsa

Director Técnico del Proyecto

Dr. Lluís Massagués Vidal

Índice

5.1. Condiciones generales Pág. 1
5.1.1. Introducción Pág. 1
5.1.2. Reglamentos y normas Pág. 1
5.1.3. Materiales Pág. 1
5.1.4. Ejecución de las obras Pág. 2
5.1.4.1. Comienzo Pág. 2
5.1.4.2. Plazo de ejecución Pág. 2
5.1.4.3. Libro de ordenes Pág. 2
5.1.5. Interpretación y desarrollo del proyecto Pág. 2
5.1.6. Obras complementarias Pág. 3
5.1.7. Modificaciones Pág. 3
5.1.8. Obra defectuosa Pág. 3
5.1.9. Medios auxiliares Pág. 4
5.1.10. Conservación de las obras Pág. 4
5.1.11. Recepción de las obras Pág. 4
5.1.11.1. Recepción provisional Pág. 4
5.1.11.2. Plazo de garantía Pág. 4
5.1.11.3. Recepción definitiva Pág. 4
5.1.12. Contratación de la empresa Pág. 5
5.1.12.1. Modo de contratación Pág. 5
5.1.12.2. Presentación Pág. 5
5.1.12.3. Selección Pág. 5
5.1.13. Fianza Pág. 5

5.2. Condiciones económicas Pág. 5
5.2.1. Abono de la obra Pág. 5
5.2.2. Precios Pág. 6
5.2.3. Revisión de los precios Pág. 6
5.2.4. Penalizaciones Pág. 6
5.2.5. Contrato Pág. 6
5.2.6. Responsabilidades Pág. 6

5.2.7. Rescisión del contrato Pág. 7
5.2.8. Liquidación en caso de rescisión de contrato Pág. 7

5.3. Condiciones facultativas Pág. 8
5.3.1. Normas a seguir Pág. 8
5.3.2. Personal Pág. 8
5.3.3. Reconocimientos y ensayos previos Pág. 8
5.3.4. Ensayos Pág. 9
5.3.5. Ensayos de aparamenta Pág. 9
5.3.6. Ensayo del motor Pág. 10
5.3.7. Varios Pág. 10

5.4. Condiciones técnicas Pág. 10
5.4.1. Generalidades de los equipos eléctricos Pág. 10
5.4.2. Cuadros eléctricos Pág. 12
5.4.2.1. Características Pág. 13
5.4.3. Motor eléctrico Pág. 13
5.4.3.1. Pruebas de recepción a realizar al motor Pág. 14
5.4.3.2. Documentación Pág. 14
5.4.4. Red de puesta a tierra Pág. 15

5. Pliego de Condiciones

5.1. Condiciones generales

5.1.1. Introducción

El presente pliego de condiciones tiene por objeto definir al Contratista el alcance del trabajo y la ejecución cualitativa del mismo.

El trabajo eléctrico consistirá en la instalación para la alimentación eléctrica en corriente continua de un motor lineal tubular de imanes permanentes. Los trabajos mecánicos son fundamentalmente su construcción y todo lo que conlleva el funcionamiento del motor en cuestión.

El alcance del trabajo del Contratista incluye el diseño, preparación de los planos, diagramas, especificaciones, lista de materiales y requisitos para la adquisición y realización de los diferentes trabajos.

5.1.2. Reglamentos y normas

Todas las unidades de obra se ejecutarán cumpliendo las prescripciones indicadas en los Reglamentos de Seguridad e Higiene en el Trabajo y Normas Técnicas de obligado cumplimiento para este tipo de instalaciones, tanto de ámbito comunitario, nacional, autonómico y municipal así como las otras que se establezcan en la Memoria Descriptiva del mismo.

Se adaptarán además a las instrucciones técnicas complementarias oportunas en cada circunstancia que forman parte de los Reglamentos y de las Normas citadas.

5.1.3. Materiales

Todos los materiales empleados serán de primera calidad. Cumplirán las especificaciones técnicas pertinentes. Tendrán las características indicadas en el proyecto y en las normas técnicas generales, y además se ajustarán a las de la Compañía Distribuidora de Energía Eléctrica, para este tipo de materiales.

Toda especificación o característica de materiales que figuren en uno solo de los documentos del Proyecto, aún sin figurar en los otros es igualmente obligatoria.

En caso de existir contradicción u omisión en los documentos del proyecto, el Contratista tendrá la obligación de ponerlo de manifiesto al Técnico Director de la obra, quien decidirá sobre el particular. En ningún caso podrá suplir la falta directamente, sin la autorización expresa.

Una vez adjudicada la obra definitivamente y antes de iniciarse ésta, el Contratista presentará al Técnico Director los catálogos, cartas muestra, certificados de garantía o

de homologación de los materiales que vayan a emplearse. No podrán utilizarse materiales que no hayan sido aceptados por el Técnico Director.

5.1.4. Ejecución de las obras

5.1.4.1. Comienzo

El contratista dará comienzo a la obra en el plazo que figure en el contrato establecido con la Propiedad, o en su defecto a los quince días de la adjudicación definitiva o de la firma de contrato.

El contratista está obligado a notificar por escrito o personalmente en forma directa al Técnico Director la fecha de comienzo de los trabajos.

5.1.4.2. Plazo de ejecución

La obra se ejecutará en el plazo que se estipule en el contrato suscrito con la Propiedad o en su defecto en el que figure en las condiciones de este pliego.

Cuando el Contratista, de acuerdo, con alguno de los extremos contenidos en el presente Pliego de Condiciones, o bien en el contrato establecido con la Propiedad, solicite una inspección para poder realizar algún trabajo ulterior que esté condicionado por la misma, vendrá obligado a tener preparada para dicha inspección, una cantidad de obra que corresponda a un ritmo normal de trabajo.

Cuando el ritmo de trabajo establecido por el Contratista, no sea normal, o bien a petición de una de las partes, se podrá convertir una programación de inspecciones obligatorias de acuerdo con el plan de obra.

5.1.4.3. Libro de ordenes

El Contratista dispondrá en la obra de un Libro de Ordenes en el que se escribirán las que el Técnico Director estime darle a través del encargado o persona responsable, sin perjuicio de las que le dé por oficio cuando lo crea necesario y que tendrá la obligación de firmar el enterado.

5.1.5. Interpretación y desarrollo del proyecto

La interpretación técnica de los documentos del Proyecto corresponde al Técnico Director. El Contratista está obligado a someter a éste cualquier duda, aclaración o contradicción que circunstancias ajenas, siempre con la suficiente antelación en función de la importancia del asunto.

El Contratista se hace responsable de cualquier error de la ejecución motivado por la omisión de esta obligación y que consecuentemente deberá rehacer a su costa los trabajos que correspondan a la correcta interpretación del Proyecto.

El Contratista está obligado a realizar todo cuanto sea necesario para la buena ejecución de la obra, aún cuando no se halle explícitamente expresado en el Pliego de Condiciones o en los documentos de Proyecto.

El Contratista notificará por escrito o personalmente en forma directa al Técnico Director y con suficiente antelación las fechas en que quedarán preparadas para inspección, cada una de las partes de obra para las que se ha indicado la necesidad o conveniencia de la misma o para aquellas que, total o parcialmente deban posteriormente quedar ocultas. De las unidades de obra que deban quedar ocultas, se tomarán antes de ello, los datos precisos para su medición, a los efectos de liquidación y que sean suscritos por el Técnico Director de hallarlos correctos. De no cumplirse este requisito, la liquidación se realizará en base de los datos o criterios de medición aportados por éste.

5.1.6. Obras complementarias

El Contratista tiene la obligación de realizar todas las obras complementarias que sean indispensables para ejecutar cualquiera de la unidades de obra especificadas en cualquiera de los documentos de Proyecto, aunque en él, no figuren explícitamente mencionadas dichas obras complementarias. Todo ello sin variación del importe contratado.

5.1.7. Modificaciones

El Contratista está obligado a realizar las obras que se le encarguen resultantes de modificaciones de proyecto, tanto en aumento como disminución o simplemente variación, siempre y cuando el importe de las mismas no altere en más o menos de un 25 % del valor contratado.

La valoración de las mismas se hará de acuerdo con los valores establecidos en el presupuesto entregado por el Contratista y que ha sido tomado como base del contrato. El Técnico Director de obra está facultado para introducir las modificaciones de acuerdo con su criterio, en cualquier unidad de obra, durante la construcción, siempre que cumpla las condiciones técnicas referidas en el Proyecto y de modo que ello no varíe el importe total de la obra.

5.1.8. Obra defectuosa

Cuando el Contratista halle cualquier unidad de obra que no se ajuste a lo especificado en el Proyecto o en este Pliego de Condiciones, el Técnico Director podrá aceptarlo o rechazarlo; en primer caso, éste fijará el precio que crea justo con arreglo a las diferencias que hubiera, estando obligado el Contratista a aceptar dicha valoración, en el otro caso, se reconstruirá a expensas del Contratista la parte mal ejecutada sin que ello sea motivo de reclamación o de ampliación del plazo de ejecución.

5.1.9. Medios auxiliares

Serán de cuenta del Contratista todos los medios y máquinas auxiliares que sean precisas para la ejecución de la obra. En el uso de los mismos estará obligado a hacer cumplir todos los Reglamentos de Seguridad e Higiene en el Trabajo que sea vigente y a utilizar los medios de protección a sus operarios.

5.1.10. Conservación de las obras

Es obligación del Contratista la conservación en perfecto estado de las unidades de obra realizadas hasta la fecha de recepción definitiva por la Propiedad, y corren a su cargo lo gastos derivados de ello.

5.1.11. Recepción de las obras

5.1.11.1. Recepción provisional

Una vez terminadas las obras, tendrá lugar la recepción provisional y para ello se practicará en ellas un detenido reconocimiento por el Técnico Director y las Propiedad en presencia del Contratista, levantado acta y empezando a transcurrir desde ese día el plazo de garantía si se halla en estado de ser admitida.

De no ser admitida se hará constar en el acta y se darán instrucciones al Contratista para subsanar los defectos observados, fijándose un plazo para ello, expirado el cual, se procederá a un nuevo reconocimiento a fin de proceder a la recepción provisional.

5.1.11.2. Plazo de garantía

El plazo de garantía será como mínimo de un año, contando desde la fecha de la recepción provisional, o bien el que se establezca en el contrato también contando desde la misma fecha. Durante este periodo queda a cargo del Contratista la conservación de las obras y arreglo de los desperfectos causados por asiento de las mismas a por mala construcción.

5.1.11.3. Recepción definitiva

Se realizarán después de transcurrido el plazo de garantía de igual forma que el provisional. A partir de esta fecha cesará la obligación del Contratista a conservar y reparar a su cargo las obras si bien sustituirán las responsabilidades que pudieran tener por defectos ocultos y deficiencias de causa dudosa.

5.1.12. Contratación de la empresa

5.1.12.1. Modo de contratación

El conjunto de las instalaciones las realizarán las empresas contratadas por el Técnico Director.

5.1.12.2. Presentación

Las empresas seleccionadas presentarán sus proyectos y correspondientes presupuestos en el plazo de una semana.

5.1.12.3. Selección

La empresa escogida será anunciada la semana siguiente a la conclusión del plazo de entrega. Dicha empresa será escogida de mutuo acuerdo entre el Propietario y Director de la obra, sin posible reclamación por parte de las otras empresas concursantes.

5.1.13. Fianza

En el contrato se establecerá la fianza que el Contratista deberá depositar en garantía del cumplimiento del mismo, o se convendrá una retención sobre los pagos realizados a cuenta de obra ejecutada.

De no estipularse la fianza en el contrato se entiende que se adoptará como garantía una retención del 5 % sobre los pagos a cuenta citados.

En el caso de que el Contratista se negase a hacer por su cuenta los trabajos para ultimar la obra en las condiciones contratadas, o a atender la garantía, la Propiedad podrá ordenar ejecutarlas a un tercero, abandonando su importe con cargo a la retención o fianza, sin perjuicio de las acciones legales que tenga derecho la Propiedad si el importe de la fianza no bastase.

La fianza retenida se abonará al Contratista en un plazo no superior a treinta días una vez firmada el acta de recepción definitiva de la obra.

5.2. Condiciones económicas

5.2.1. Abono de la obra

En el contrato se deberá fijar detalladamente la forma y plazos en que se abonarán las obras. Las liquidaciones parciales que puedan establecerse a buena cuenta, sujetos a las certificaciones que resulten de la liquidación final. No suponiendo, dichas liquidaciones, aprobación ni recepción de las obras que comprenden.

Terminadas las obras se procederá a la liquidación final que se efectuará de acuerdo con los criterios establecidos en el contrato.

5.2.2. Precios

El Contratista presentará, al formalizarse el contrato, la relación de los precios de las unidades de obra que integran el proyecto, los cuales de ser aceptados tendrán valor contractual y se aplicarán a las posibles variaciones que puedan haber.

Estos precios unitarios, se entiende que comprenden la ejecución total de la unidad de obra, incluyendo todos los trabajos aún los complementarios y los materiales así como la parte proporcional de impulsión fiscal, las cargas laborales y otros gastos repercutibles.

5.2.3. Revisión de los precios

En el contrato se establecerá si el Contratista tiene derecho a revisión de precios y la fórmula a aplicar para calcularla. En defecto de esta última, se aplicará a juicio del Técnico Director alguno de los criterios oficiales aceptados.

5.2.4. Penalizaciones

Por retraso en los plazos de entrega de las obras, se podrán establecer tablas de penalización cuyas cuantías y demoras se fijarán en el contrato.

5.2.5. Contrato

El contrato se formalizará mediante documento privado, que podrá elevarse a escritura pública a petición de cualquiera de las partes. Comprenderá la adquisición de todos los materiales, transporte, mano de obra, medios auxiliares para la ejecución de reconstrucción de las unidades defectuosas, la realización de las obras complementarias y las derivadas de las modificaciones que se introduzcan durante la ejecución, estas últimas en los términos previstos.

La totalidad de los documentos que componen el Proyecto Técnico de la obra serán incorporados al contrato y tanto el Contratista como la Propiedad deberán firmarlos en testimonio de los que conocen y aceptan.

5.2.6. Responsabilidades

El Contratista es el responsable de la ejecución de las obras en las condiciones establecidas en el Proyecto y en el contrato. Como consecuencia de ello vendrá obligado a la eliminación de lo mal ejecutado y a su reconstrucción correctamente sin que sirva de excusa el que el Técnico Director haya examinado y reconocido las obras.

El Contratista es el único responsable de todas las contravenciones que él o su personal cometan durante la ejecución de las obras u operaciones relacionadas con las mismas. También es responsable de los accidentes o daños que por errores, inexperiencia o empleo de métodos inadecuados se produzcan a la propiedad a los vecinos o a terceros en general.

El Contratista es el único responsable del incumplimiento de las disposiciones vigentes en la materia laboral respecto de su personal y por tanto los accidentes que puedan sobrevenir y los derechos que puedan derivarse de ellos.

5.2.7. Rescisión del contrato

Se considerarán causas suficientes de rescisión de contrato las siguientes:

Primera: Muerte o incapacitación del Contratista.
Segunda: La quiebra del Contratista.
Tercera: Modificación del proyecto cuando produzca alteraciones en más o menos de un 25 % del valor contratado.
Cuarta: Modificación de las unidades de obra en número superior al 40 % del original.
Quinta: La no iniciación de las obras en el plazo estipulado cuando sea por causas ajenas a la Propiedad.
Sexta: La suspensión de las obras ya iniciadas siempre que el plazo de suspensión sea mayor a seis meses.
Séptima: Incumplimiento del plazo de ejecución de la obra sin haberse llegado a completar ésta.
Octava: Terminación del plazo de ejecución de la obra sin haberse llegado a completar ésta.
Novena: Actuación de mala fe en la ejecución de los trabajos.
Décima: Destajar o subcontratar la totalidad o parte de la obra a terceros sin la autorización del Técnico Director y la Propiedad.

5.2.8. Liquidación en caso de rescisión de contrato

Siempre que se rescinda el contrato por causas anteriores o bien por acuerdo de ambas partes, se abonará al Contratista las unidades de obra ejecutadas y los materiales acopiados a pie de obra que reúnan las condiciones y sean necesarios para la misma.

Cuando se rescinda el contrato llevará implícito la recepción de la fianza para obtener los posibles gastos de conservación del periodo de garantía y los derivados del mantenimiento hasta la fecha de nueva adjudicación.

5.3. Condiciones facultativas

5.3.1. Normas a seguir

El diseño de la instalación estará de acuerdo con las experiencias o recomendaciones expuestas en la última edición de los siguientes códigos:

- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión e Instrucciones Complementarias.
- Normas UNE.
- Normas IEC.
- Normas CENELEG.
- Normas DIN.
- Plan Nacional y Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el trabajo.
- Normas de la Compañía Suministradora de Energía.
- Lo indicado en este Pliego de Condiciones con preferencia a todos los códigos y normas.

5.3.2. Personal

El Contratista tendrá al frente de la obra un encargado con autoridad sobre los demás operarios y conocimientos acreditados y suficientes para la ejecución de la obra.

El encargado recibirá, cumplirá y transmitirá las instrucciones y ordenes del Técnico Director de la obra.

El Contratista tendrá en la obra el número y clase de operarios que haga falta para el volumen y naturaleza de los trabajos que se realicen, los cuales serán de reconocida aptitud y experimentados en el oficio. El Contratista estará obligado a separar de la obra a aquel personal que, a juicio del Técnico Director, no cumpla con sus obligaciones, realice el trabajo defectuosamente, bien por falta de conocimientos o por obrar de mala fe.

5.3.3. Reconocimientos y ensayos previos

Cuando lo estime oportuno el Técnico Director podrá encargar y ordenar el análisis, ensayo o comprobación de los materiales, elementos o instalaciones, bien sea en fábrica de origen, laboratorios oficiales o en la misma obra, según crea más conveniente, aunque éstos no estén indicados en este pliego.

En el caso de discrepancia, los ensayos o pruebas se efectuarán en el laboratorio oficial que el Técnico Director de obra designe.

Los gastos ocasionados por estas pruebas y comprobaciones serán por cuenta del Contratista.

5.3.4. Ensayos

Antes de la puesta en marcha del sistema eléctrico, el Contratista tendrá que hacer los ensayos adecuados para probar, a la entera satisfacción del Técnico Director de obra, que todo equipo, aparatos y cableado han sido instalados correctamente de acuerdo con las normas establecidas y están en condiciones satisfactorias de trabajo.

Todos los ensayos serán presenciados por el Ingeniero que representa al Técnico Director de obra.

Los resultados de los ensayos serán pasados en certificados indicando fecha y nombre de la persona a cargo del ensayo, así como categoría profesional.

Los cables antes de ponerse en funcionamiento, se someterán a un ensayo de resistencia de aislamiento entre las fases y entre fase y tierra, que se hará de forma siguiente.

Alimentación a motor y cuadro. Con el motor desconectado medir la resistencia de aislamiento desde el lado de salida del arrancador.

Maniobra del motor. Con los cables conectados a las estaciones de maniobra y a los dispositivos de protección y mando, medir la resistencia de aislamiento entre fases y tierra solamente.

5.3.5. Ensayos de aparamenta

Antes de poner la aparamenta bajo tensión, se medirá la resistencia de aislamiento de cada embarrado entre fases y entre fases y tierra. Las medidas deben repetirse con los interruptores en posición de funcionamiento y contactos abiertos.

Todo relé de protección que sea ajustable será calibrado y ensayado, usando contactor de ciclos, caja de carga, amperímetro y voltímetro, según se precise.

Se dispondrá, en lo posible de un sistema de protección selectiva. De acuerdo con esto, los relés de protección de elegirán y coordinarán para conseguir un sistema que permita actuar primero el dispositivo de interrupción más próximo a la falta.

El Contratista preparará curvas de coordinación de los relés y calibrado de éstos para todos los sistemas de protección previstos.

Se comprobarán los circuitos secundarios de los transformadores de intensidad y tensión aplicando corriente o tensión a los arrollamientos secundarios de los transformadores y comprobando que los instrumentos conectados a estos secundarios funcionan.

Todos los interruptores automáticos se colocarán en posición de prueba y cada interruptor será cerrado y disparado desde su interruptor de control. Los interruptores deben ser disparados por accionamiento manual y aplicando corriente a los relés de protección. Se comprobarán todos los enclavamientos.

5.3.6. Ensayo del motor

Se medirá la resistencia de aislamiento de los arrollamientos del motor antes y después de conectar los cables de fuerza.

Se comprobará el sentido de desplazamiento de la máquina.

El motor deberá ponerse en marcha sin estar acoplado y se medirá la intensidad consumida.

Después de acoplarse el equipo mecánico accionado por el motor, se volverán a poner en marcha con el equipo mecánico en vacío, y se volverá a medir la intensidad.

5.3.7. Varios

Se comprobará la puesta a tierra para determinar la continuidad de los cables de tierra y sus conexiones y se medirá la resistencia de los electrodos de tierra.

Se comprobarán todas las alarmas del equipo eléctrico para comprobar el funcionamiento correcto de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes.

5.4. Condiciones técnicas

5.4.1. Generalidades de los equipos eléctricos

El ofertante será el responsable del suministro de los equipos elementos eléctricos. La mínima protección será IP54, según DIN 40050, garantizándose una protección contra depósitos nocivos de polvo y salpicaduras de agua, garantía de protección contra derivaciones.

Al objeto de no dejar descender la temperatura en el interior de los cuadros eléctricos por debajo de la condensación, se preverá calefacción con termostato a $30^{o}C$ con potencia calorífica aproximada de $300W/m^3$, garantizándose una disminución correcta del calor en aquellos de gran de volumen. Mínima temperatura $20^{o}C$.

Se preverán prensaestopas de aireación en las partes inferiores de los armarios. En los armarios grandes, en la parte inferior y superior, para garantizar mejor la circulación del aire.

Así mismo no se dejará subir la temperatura en la zona de los cuadros eléctricos y de instrumentación por encima de los $35^{o}C$ por lo que el ofertante deberá estudiar dicha condición, y los medios indicado en el proyecto, ventilación forzada y termostato ambiental, para que si no los considera suficiente prevea acondicionamiento de aire por refrigeración, integrada en los cuadros o ambiental para la zona donde están situados.

Así pues todos los armarios incorporarán además como elementos auxiliares propios, los siguientes accesorios:

- Ventilación forzada e independiente del exterior.
- Resistencia de calentamiento.
- Refrigeración, en caso de que se requiera.
- Dispositivo químico-pasivo de absorción de la humedad.
- Iluminación interior.
- Seguridad de intrusismo y vandalismo.
- Accesibilidad a todos sus módulos y elementos.

Se tendrán en cuenta las condiciones ambientales de uso. Por ello, se aplicará la clasificación 721-2 de polvo, arena, niebla salina, viento, etc. según norma IEC 721.

Para determinar los dispositivos de protección en cada punto de la instalación se deberá calcular y conocer.

La intensidad de empleo en función del factor de potencia, simultaneidad, utilización y factores de aplicación previstos e imprevistos. De éste último factor se fijará un factor, y éste se expresará en la oferta.

La intensidad de cortocircuito.
El poder de corte del dispositivo de protección con la aparamenta situado aguas abajo.

La selectividad a considerar en cada caso, con otros dispositivos de protección situados aguas arriba.

Se determinará la sección de fase y la sección de neutro en función de protegerlos contra sobrecargas, verificándose.

La intensidad que pueda soportar la instalación será mayor que la intensidad de empleo previamente calculada.

Las caídas de tensión en el punto más desfavorable de instalación serán inferiores a la caída de tensión permitida, considerados los casos más desfavorables, como por ejemplo tener todos los equipos en marcha con las condiciones ambientales extremas.

Las secciones de los cables de alimentación general y particular tendrán en cuenta los consumos de las futuras ampliaciones.

Se verificará la relación de seguridad V_C / V_L , tensión de contacto menor o igual a la tensión límite permitida según los locales MI-BT021, protección contra contactos directos e indirectos.

La protección contra sobrecargas y cortocircuitos se hará, preferentemente, con interruptores automáticos de alto poder de corte de cortocircuito, con un valor de corte de 20 *A*, y tiempo de corte inferior a 5 *ms*.

Cuando se empleen fusibles con limitadores de corriente, éstos se adaptarán a las distintas clases de receptores, empleándose para ello los más adecuados, ya sean aM, gG, gL o gT, según norma UNE 21-103.

La protección contra choque eléctrico será prevista, y se cumplirá con las normas UNE 20-383 y la MI-BT021.

La determinación de la corriente admisible en las canalizaciones y su emplazamiento será, como mínimo, según lo establecido en MI-BT004. La corriente de las canalizaciones será 1.5 veces la corriente admisible.

Las caídas de tensión máximas autorizadas serán según MI-BT017, siendo el máximo, en el punto más desfavorable, el 5 %. Esta caída de tensión se calculará considerados alimentados todos los aparatos de utilización susceptibles de funcionamiento simultáneamente, en las condiciones atmosféricas más desfavorables.

Los conductores eléctricos usarán los colores distintivos según normas UNE, y serán etiquetados y numerados para facilitar su localización e interpretación en los planos y en la instalación.

El ofertante debe detallar en su oferta todos los elementos y equipos eléctricos ofrecidos, indicando el nombre del fabricante.

Además de las especificaciones requeridas y ofrecidas, se debe incluir en la oferta:
- Memorando los cálculos de carga, de tierra, y otros que ayuden a clasificar la calidad de las instalaciones ofertadas.
- Diseños preliminares y planos de los sistemas ofertados.

En los planos se emplearán simbología normalizada en UNE 20004. Se tenderá a homogeneizar el tipo de esquema, numeración de bornes de entrada y de salida y en general todos los elementos y medios posibles de forma que facilite el mantenimiento de las instalaciones.

5.4.2. Cuadros eléctricos

En los cuadros eléctricos se incluirán pulsadores frontales en marcha y parada, con señalización del estado de cada aparato (funcionamiento y avería).

El Contratista razonará el tipo elegido, indicando las siguientes características:

- Estructura de los cuadros, con dimensiones, materiales empleados con sus secciones o espesores, protección antioxidante, pinturas.
- Compartimentos en que se dividen.
- Elementos que se alojan en los cuadros detallando los mismos.
- Interruptores automáticos.
- Salida de cables, relés de protección, aparatos de medida y elementos auxiliares.

Protecciones que como mínimo, serán:
- Mínima tensión, en el interruptor general automático.

- Sobrecarga en cada receptor.
- Cortocircuitos en cada receptor.
- Defecto a tierra, en cada receptor superior a 10 *CV*.

Se proyectarán y razonarán los enclavamientos en los cuadros, destinados a evitar falsas maniobras y para protección contra accidentes del personal, así como en el sistema de puesta a tierra del conjunto de las cabinas.

La distribución del cuadro será de tal forma que la alimentación sea la celda central y a ambos lados se vayan situando las celdas o salidas cuando sea necesario.

En las tapas frontales se incluirá un sinóptico con el esquema unifilar plastificado incluyendo los aparatos de indicación marcha, protección y título de cada elemento con letreros también plastificados.

Se indicarán los fabricantes de cada uno de los elementos que componen los cuadros y el tipo de los mismos.

5.4.2.1. Características

- Fabricante: A determinar por el Contratista.
- Tensión nominal de empleo: 380 *V*.
- Tensión nominal de aislamiento: 750 *V*.
- Tensión de ensayo: 2500 *V* durante 1 segundo.
- Protección contra agentes exteriores: IP54, según IEC, UNE, UTE y DIN.

5.4.3. Motor eléctrico

El devanado cumplirá con aislamiento de clase F.

Las formas constructivas no cumplirán las normas DIN 42950.

Los datos a facilitar son los siguientes:

- Tipo y fabricante.
- Tensión de funcionamiento.
- Refrigeración del motor.
- Sistemas de arranque, en función de la intensidad nominal de arranque y de la nominal de funcionamiento.
- Protecciones térmicas, instalándose las adecuadas para proteger al motor frente a una elevación anormal de la temperatura.
- Protecciones eléctricas del motor.
- Aislamientos.
- Tipos de rodamientos y sistemas de lubricación.
- Velocidad, indicándose la velocidad de régimen y la variación mínima en el caso de motores de velocidad variable.
- Enclavamientos, automatismo de arranque y parada.

El motor estará equipado, como mínimo, los siguientes equipos:

- Guarda-motor con su protección térmica.
- Interruptor automático diferencial, con protección magneto-térmica.
- Interruptor automático.
- Señalización de marcha y disparo térmico.

5.4.3.1. Pruebas de recepción a realizar al motor

Como mínimo se efectuarán las siguientes comprobaciones:

- Ensayo de cortocircuito.
- Ensayo de vacío.
- Ensayo de calentamiento.
- Rendimientos a $^{2}/_{4}$, $^{3}/_{4}$ y $^{4}/_{4}$ de plena carga.
- Factor de potencia a $^{2}/_{4}$, $^{3}/_{4}$ y $^{4}/_{4}$ de plena carga.
- Pérdidas globales.
- Par máximo.
- Par inicial o de arranque.

5.4.3.2. Documentación

Tras las pruebas se dará la siguiente documentación:

Documentación planos:

- Planos de dimensiones, secciones longitudinales y transversales del motor.
- Plano del devanado con datos sobre el mismo.
- Planos del rotóricos y estatóricos.

Otros documentos:

- Curva características de marcha acelerada.
- Pérdidas en el entrehierro y él para de giro en casos de cortocircuitos, homopolares y tripolares.
- Planos de los circuitos amperimétricos y de conexionado de dispositivos de medición.
- Lista de materiales de los mismos.
- Protocolo de pruebas, incluidos análisis de los diagramas.
- Protocolo de puesta en marcha.
- Instrucciones de montaje y mantenimiento y lista de repuestos recomendados.

5.4.4. Red de puesta a tierra

En las instalaciones se efectuará una red de tierras. En el conjunto de líneas y tomas de tierra tendrán unas características tales, que las masas metálicas no podrán ponerse a una tensión superior a 24 *V*, respecto a tierra.

Las instalaciones de toma de tierra, seguirán las normas establecidas en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias.

Los materiales que compondrán la red de tierra estarán formados por placas, electrodos, terminales, cajas de pruebas con sus terminales de aislamiento y medición, etc.

La resistencia mínima no alcanzará los ohmios.

Roda de Bará, 1 Septiembre de 2003

Autor

Javier Andolz Bielsa

Director Técnico del Proyecto

Dr. Lluís Massagués Vidal