

① Original

# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS



## **"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE IMPULSORES DE ALTA VELOCIDAD PARA ULTRACENTRIFUGAS"**

**T E S I S**

que para obtener el Título de

**F I S I C O**

p r e s e n t a :

**HECTOR DE JESUS CRUZ MANJARREZ FLORES ALONSO**

México, D. F.

1981



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## I N D I C E

Introducción .

Capítulo I. Conceptos de Teoría Electromagnética .

I.1. El campo magnético.

I.2. El campo magnético debido a las cargas en movimiento.

I.3. La interacción magnética .

I.4. Ley de inducción de Faraday .

I.5. Ley circuital de Ampere .

Capítulo II. Motores Eléctricos.

II.1. Principio de operación.

II.2. El par motor y el movimiento rotativo.

II.3. El motor de inducción.

a) La estructura.

b) El campo rotativo.

c) Principio de operación.

Capítulo III. Motores de Alta Velocidad.

III.1. Antecedentes

III.2. Motores de alta velocidad.

- 2

encias.

## Introducción.

El diseño y la construcción de un impulsor de alta velocidad tiene como principal objetivo satisfacer las necesidades motrices que se presentan al construir una centrífuga de gas o una bomba turbomolecular. Tanto el diseño, como la construcción del impulsor se realizó tomando en cuenta la experiencia obtenida con algunos modelos de motores eléctricos de tipo comercial experimentados.

El presente trabajo se divide en cuatro partes fundamentales: en la primera, se desarrollan algunos aspectos de la teoría electromagnética que son esenciales para el diseño y la construcción de los estatores de cualquier motor eléctrico; se describe también el fenómeno de inducción, el cual da las bases para el funcionamiento de los motores de inducción. En la segunda parte se presenta un breve estudio de los motores eléctricos culminando con la estructura y teoría de operación de los motores de inducción, ya que éste resultó el más adecuado a las necesidades de la ultracentrífuga de gas.

En la tercera sección se describe en forma detallada el diseño del impulsor así como la solución a los problemas que se presentaron durante el período de construcción ; se describen también detalles de la fuente de alimentación externa, así como los resultados obtenidos de las pruebas preliminares a la integración del impulsor con el resto del equipo.

En la última parte se presentan y discuten los resultados experimentales obtenidos de las pruebas con el impulsor integrado.

Cabe destacar que la elección final de un motor de inducción para ser usado como impulsor de alta velocidad, se basó en las experiencias realizadas durante la etapa experimental.

## CAPITULO I

### Conceptos de Teoría Electromagnética.

Al iniciar el diseño y la construcción de un impulsor de alta velocidad, deben considerarse los fenómenos que intervienen en la conversión de energía eléctrica en energía mecánica, por lo que se describirán brevemente los directamente involucrados con el diseño de las máquinas eléctricas.

#### 1.1.- El campo magnético.

Los primeros fenómenos magnéticos observados fueron los relacionados con las magnetitas, posteriormente en el siglo XIX, el físico danés H.C. Oersted encontró una estrecha relación entre la electricidad y el magnetismo, ya que se producen efectos magnéticos debidos a las cargas eléctricas en movimiento.

Años después, los trabajos simultáneos de M. Faraday y J. Henry demostraron que es posible la obtención de corriente eléctrica a partir de campos magnéticos variables.

Para el estudio del magnetismo se convino en que la representación del campo magnético se hiciera por medio de líneas de inducción magnética. Al número total de ellas que atraviesan una superficie normal unitaria se le asocia la magnitud del campo de inducción.



En el sistema MKS, una línea de inducción magnética recibe el nombre de Weber (W), de tal forma que la magnitud del campo magnético que da expresada en Weber/metro<sup>2</sup> (W/m<sup>2</sup>), unidad que también es llamada Tesla (T). Existen otros sistemas de unidades en donde la magnitud del campo magnético (B) tiene representación, tal es el caso del sistema cgs electro magnético, en donde la inducción magnética se mide en Gauss (G).

si ambos sistemas se comparan, se encuentra la siguiente equivalencia:

$$1 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

Al número total de líneas de inducción magnética que atraviesan una superficie cualquiera se le denomina flujo magnético ( $\Phi$ ) y su magnitud se obtiene a partir de la relación

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot \vec{n} \, da$$

o en términos del ángulo de incidencia ( $\psi$ ) de las líneas con la superficie

$$\Phi = \int B \cos \psi \, da$$

de esta relación se deduce que las unidades de flujo magnético son los Webers.

Las líneas que constituyen el flujo magnético tienen las siguientes propiedades:

- a) Las líneas que forman el flujo nunca se cruzan entre sí.
- b) Cada línea del flujo es continua y cerrada.

1.2. - El campo magnético debido a las cargas en movimiento.

En la práctica las cargas eléctricas en movimiento constituyen la corriente eléctrica que circula por un circuito conductor; dichas cargas son transportadas gracias al fenómeno de conducción.

A la carga ( $Q$ ) que atraviesa una sección de un sistema conductor en la unidad de tiempo ( $t$ ) se le denomina formalmente corriente eléctrica y su expresión matemática está dada como sigue:

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

En el sistema MKS, la unidad de corriente eléctrica ( $I$ ) es el Ampere y es equivalente al paso de un Coulomb ( $C$ ) en un segundo ( $S$ ).

El flujo de corriente eléctrica por un hilo conductor genera un campo magnético en el espacio que lo rodea, la magnitud y dirección se obtiene a partir de la Ley de Ampere:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1.1)$$

en donde se toma la contribución al campo  $\vec{B}$  de una sección del conductor  $d\vec{l}$  por el cual circula la corriente eléctrica  $I$ ,  $\vec{r}$  corresponde al vector de posición que va del elemento del conductor al punto donde quiere determinarse el campo magnético.

La constante  $\mu_0$  es llamada la permeabilidad del espacio libre y su valor es de  $4\pi \times 10^{-7} \text{ W/A}\cdot\text{m}$ .

En la relación (1.1),  $\frac{\mu_0}{4\pi}$  es una constante de proporcionalidad.

### 1.3.- La interacción magnética.

Cuando una carga eléctrica se mueve dentro de una región donde existe un campo de inducción, se ejerce sobre ella una fuerza de origen magnético, la cual queda determinada por la relación de Lorentz.

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1.3)$$

en donde  $\vec{F}$  es la fuerza resultante de la interacción del campo magnético  $\vec{B}$  con una partícula cargada  $q$  y moviéndose con velocidad  $\vec{v}$  dentro de la región. La fuerza resultante es perpendicular a la velocidad de la carga.

Si se considera que la corriente eléctrica está constituida por cargas eléctricas que se mueven por un conductor, existe una fuerza resultante si se hacen interaccionar con un campo magnético. La magnitud y dirección de la fuerza resultante se determina por la relación

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad (1.4)$$

en donde se toma la contribución de cada elemento  $d\vec{l}$  del conductor por el que circula la corriente  $I$  en presencia de un campo magnético  $\vec{B}$ .

Las dos relaciones anteriores se comprueban con los siguientes hechos experimentales:

- a) La fuerza magnética desaparece cuando:
  - i) La velocidad de la partícula es cero.
  - ii) La corriente deja de circular por el conductor.

- b) No existe fuerza magnética si el movimiento de las cargas se realiza paralelamente a las líneas de campo.
- c) La fuerza es máxima, cuando la trayectoria de las cargas es perpendicular a las líneas del flujo.

Estos resultados nos llevan a concluir que la interacción de campos magnéticos con corrientes eléctricas circulantes, pueden producir el movimiento de los conductores.

#### I.4. - Ley de inducción de Faraday.

Se ha presentado ya la forma en que la corriente eléctrica es capaz de producir un campo magnético en el espacio que rodea al conductor, sin embargo los trabajos simultáneos de Faraday y Henry demostraron que el efecto inverso también puede producirse, es decir, a partir de un campo magnético la generación de una corriente eléctrica en un conductor.

Las experiencias de Faraday arrojan una ley experimental que de forma conjunta con la ley de Lenz, proporciona una de las bases fundamentales de la teoría electromagnética.

A partir de la ley de inducción se encuentra que si un circuito cerrado conductor es atravesado por las líneas de un campo magnético que varía con el tiempo, en el circuito se generará una corriente eléctrica. La expresión matemática de esta ley se visualiza en forma simple si se presenta en términos de una fuerza electromotriz  $\mathcal{E}$  y un flujo magnético  $\Phi$ .

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.4)$$

En esta relación  $\mathcal{E}$  representa la fuerza electromotriz (f.e.m.) establecida en el circuito cerrado, por lo que será la causante del flujo de corriente. La  $\frac{d\Phi}{dt}$  representa la variación del flujo magnético en el tiempo.

Debe notarse que la f.e.m. inducida en el circuito conductor se produce mientras el flujo varíe ya que en el caso de flujo magnético constante

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0 .$$

El cambio de flujo magnético puede llevarse a cabo de dos maneras:

- a) Por el movimiento del circuito conductor dentro de un campo magnético.
- b) Por el cambio en valor del campo magnético que atraviesa un circuito fijo.
- c) Por deformaciones producidas en el circuito.

El signo negativo en la relación (1.4) está conectado directamente con la ley de Lenz, en la que se tiene una regla útil para conocer el sentido de la fuerza electromotriz inducida: "El sentido de la fuerza electromotriz inducida es tal, que se opone a la causa que la produce".

Esto quiere decir que si en un circuito rígido la f.e.m. inducida es producto del movimiento transversal de un circuito conductor en un campo magnético estático, el sentido es tal, que se opone a esta causa, creando una corriente en el sentido apropiado para que la fuerza que actúa sobre ésta sea opuesta al movimiento de la espira; si por otro lado la f.e.m. es generada por la variación del flujo que atraviesa el circuito, la corriente producida por ella generará su propio flujo magnético, el cual, dentro del circuito será:

- a) Opuesto al flujo original si éste va en aumento.
- b) Del mismo sentido si el flujo original va disminuyendo.

Por lo tanto, hay una oposición no al flujo mismo, sino a su varia  
ción.

### 1.5.- Ley circuital de Ampere.

Los campos magnéticos son producidos por corrientes eléctricas y su estudio puede realizarse a través de la Ley circuital de Ampere.

$$\oint \frac{\vec{B}}{\mu} \cdot d\vec{l} = i$$

en la relación,  $\vec{B}$  representa el vector de inducción magnética,  $d\vec{l}$  una diferencial de longitud,  $\mu$  es la permeabilidad magnética del medio, la cual puede variar a lo largo del circuito elegido,  $i$  es la corriente total que circula dentro del circuito de integración. La integral debe efectuarse a lo largo del circuito cerrado.

En el caso de una bobina de  $N$  espiras, la expresión toma la for  
ma

$$\oint \frac{\vec{B}}{\mu} \cdot d\vec{l} = Ni$$

en la que  $Ni$  es la fuerza magnetomotriz a lo largo del circuito.

El análisis de un circuito magnético se realiza tomando en cuenta la permeabilidad del medio o medios involucrados así como su longitud.

En la figura 1.1 se muestra un circuito magnético en el que inter  
vienen dos medios en serie.

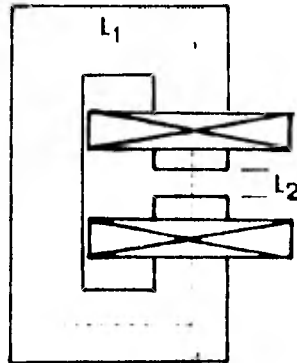


Fig. 1.1

Circuito Magnético

el hierro con longitud  $L_1$  y un entrehierro de aire de longitud  $l_2$ .

Aplicando la ley de Ampere se encuentra

$$\frac{B L_1}{\mu_H} + \frac{B l_2}{\mu_A} = N i$$

reduciendo

$$B \left( \frac{L_1}{\mu_H} + \frac{l_2}{\mu_A} \right) = N i$$

y finalmente

$$B = N i \frac{\mu_H \mu_A}{\mu_H l_2 + \mu_A L_1}$$

que corresponde al campo de inducción en el circuito magnético.

## CAPITULO II.

### Motores Eléctricos.

El estudio de motores que se presenta a continuación está dirigido fundamentalmente a los motores de inducción sin embargo, como el principio de operación de las máquinas eléctricas rotativas está directamente relacionado con los descubrimientos de Oersted acerca de la interacción de un campo magnético con una corriente eléctrica y por consiguiente, regidos por la Ley de Ampere, es pertinente hacer el análisis de un circuito motor básico y llegar al caso de los motores de inducción.

#### II.1.- Principios de operación.

En 1821, el físico inglés M. Faraday construyó el primer motor eléctrico basándose en los descubrimientos de Oersted. Diez años más tarde siguiendo el mismo razonamiento pero en sentido inverso, encontró el principio del generador eléctrico.

El motor básico de Faraday disponía de un conductor capaz de girar libremente alrededor del extremo de un imán recto, el extremo inferior del conductor era sumergido en un depósito de mercurio, haciendo posible el movimiento del conductor y al mismo tiempo mantenía cerrado el circuito eléctrico.



Al hacer circular una corriente eléctrica por el conductor, interactuaba con el campo magnético del imán, dando como resultado el movimiento del hilo alrededor de la barra.

A pesar de que la energía mecánica resultante de esta interacción no podía aprovecharse para accionar algún mecanismo externo debido a la deficiente disposición de sus componentes, se demostró que podía obtenerse un movimiento constante.

En la actualidad se sabe que en un motor práctico el rotor debe contar a las líneas de fuerza del imán y no simplemente girar por fuera de ellas.

El principio de operación de un motor eléctrico se describe en forma simple si se hace referencia al circuito motor básico que se presenta en la Fig. 2.1.

El circuito está formado por dos caras polares paralelas dispuestas en el mismo plano, entre ellas, existe un espacio donde las líneas de campo son paralelas entre sí y perpendiculares a las caras. En este entrehierro se sitúa un alambre conductor recto, paralelo a las caras polares y por el que circula una corriente eléctrica.

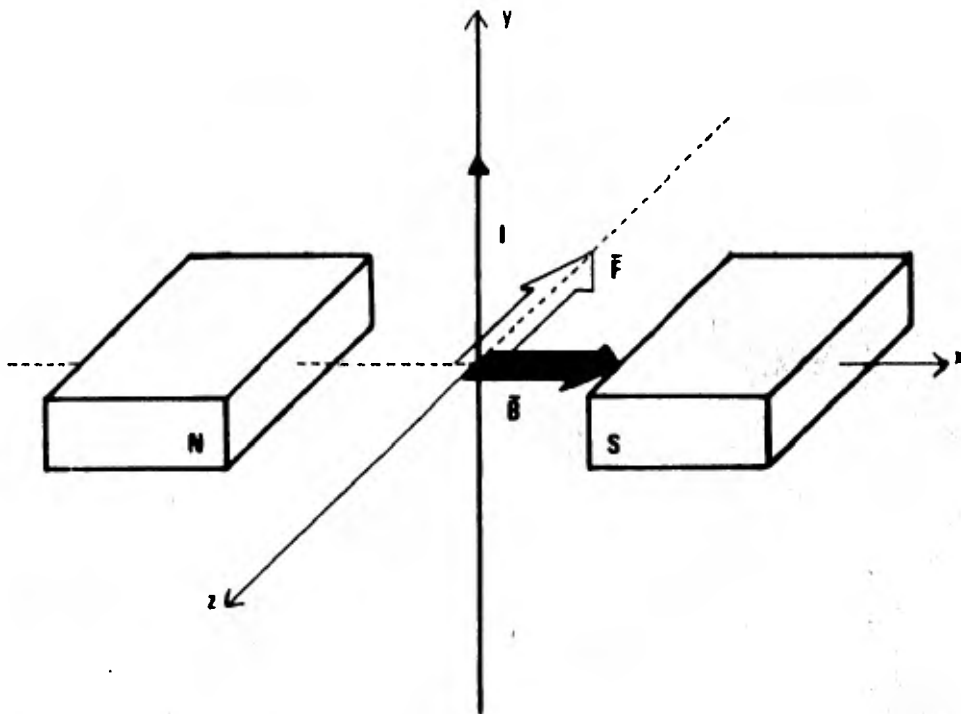


Fig. 2.1

Círculo Motor Básico.

Al circular la corriente ( $I$ ) por el conductor en la dirección positiva de  $y$ , interacciona con el campo magnético  $\underline{B}$  (en la dirección positiva del eje  $x$ ) dando como resultado la presencia de una fuerza de origen magnético ( $F$ ).

La magnitud y dirección de la fuerza se determina con la relación

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

de tal forma que  $\vec{F} = F_x \hat{i} + F_y \hat{j} + F_z \hat{k}$ , si el conductor se confunde con el eje  $y$ , entonces  $d\vec{l} = dy \hat{j}$ . Las componentes en  $y$  y  $z$  del campo magnético ( $\vec{B}$ ) son nulas, así que  $\vec{B} = B_x \hat{i}$ .

Sustituidos los valores en la relación 2.1 se encuentra que la fuerza resultante es:

$$F = -I_y B_x \hat{h}$$

lo que quiere decir que la fuerza resultante está dirigida en sentido negativo del eje  $Z$  y su magnitud depende directamente del campo magnético y de la corriente que circula por el conductor.

Si el fenómeno se analiza en términos de líneas de campo se llega al siguiente resultado:

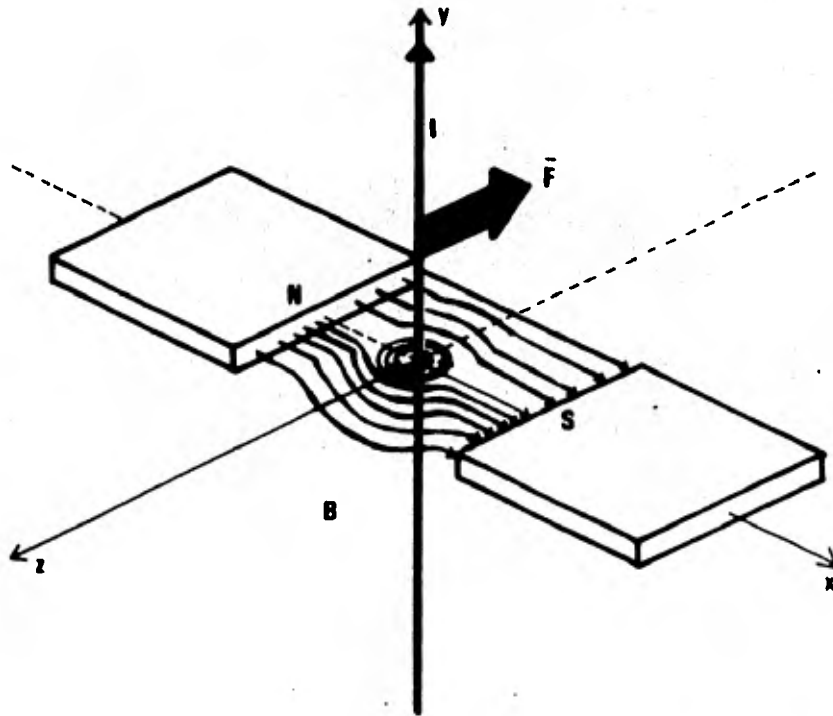


Fig. 2.2

Interacción de los Campos Magnéticos en un Circuito Motor

Al circular la corriente eléctrica (I) en sentido positivo de y por el conductor recto, se genera en el espacio que lo rodea un campo magnético, cuya magnitud y sentido se determina a partir de la relación

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^3} \quad (2.2)$$

Las líneas de campo resultantes de este circuito, circundan al conductor y su dirección es en el sentido contrario al giro de las manecillas del reloj. (Fig. 2.2)

Como puede apreciarse en la figura, en un lado del conductor las líneas de campo debidas a la corriente I siguen la misma dirección que las líneas del campo principal y opuestas en el otro; esto da como resultado una concentración y un enrarecimiento de líneas en uno y otro lados. El exceso de líneas produce una fuerza sobre el conductor que trata de moverlo hacia la región de menor densidad de campo.

La magnitud y dirección de la fuerza es congruente con el análisis anterior.

Cabe mencionar que cuando el conductor se ha movido hasta una posición fuera del flujo magnético, la fuerza cesa. Si la corriente circula en dirección opuesta, la fuerza sobre el conductor actúa en sentido contrario.

## II.2.- El par motor y el movimiento rotativo.

En un motor práctico sin importar su clase, debe producirse un movimiento rotativo constante, para lo cuál es necesario que se produzca un par de fuerzas.

La descripción detallada de la producción del par y del movimiento rotativo se hace con el circuito que se presenta a continuación (Fig. 2.3)

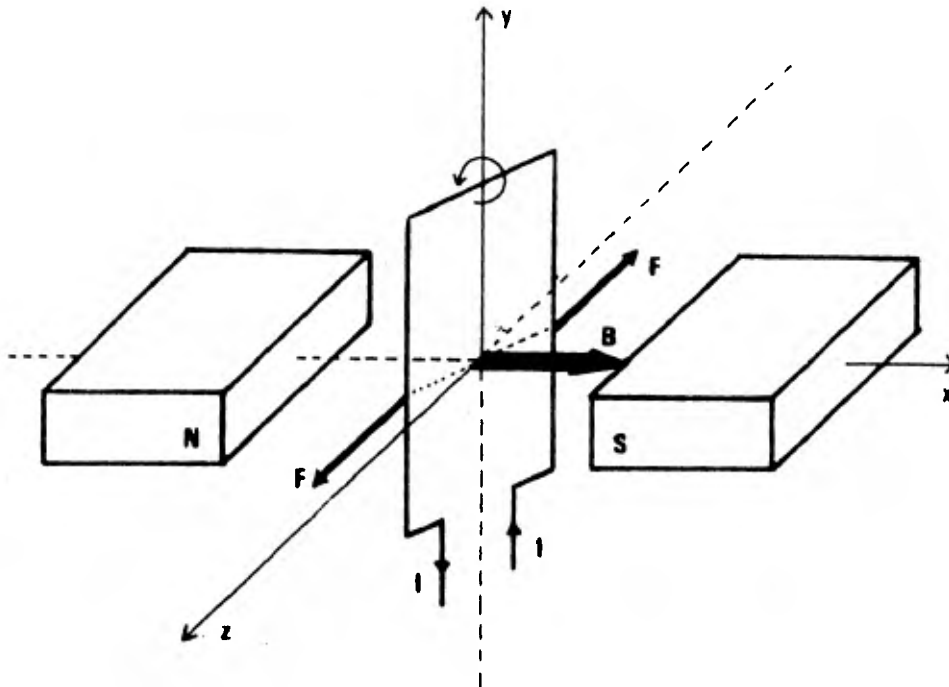


Fig. 2.3

Circuito Motor para una Espira.

En este circuito, la disposición de las caras polares se conserva, pero el conductor tiene la forma de una espira con un eje de rotación dentro de la región del flujo magnético, con esto se logra que los dos segmentos rectos de la espira corten al flujo.

Al circular una corriente  $I$  por la espira, en uno de los lados seguirá en dirección positiva de  $y$  y por el otro, en sentido contrario. Al hacer el análisis de la fuerza ejercida sobre cada uno de los conductores se encuentra que en un segmento de la espira,

$$\vec{F} = I l B_x \hat{k}$$

y en el otro  $\vec{F} = -I l B_x \hat{k}$

es decir, las fuerzas son de igual magnitud pero de sentido diferente.

El par de fuerzas que se origina de la interacción puede producir el movimiento de la espira alrededor de su eje de rotación, sin embargo, este movimiento resulta oscilatorio ya que la dirección de la corriente eléctrica permanece constante y al pasar por el plano neutro, la fuerza cambia de sentido. (Fig. 2.4).

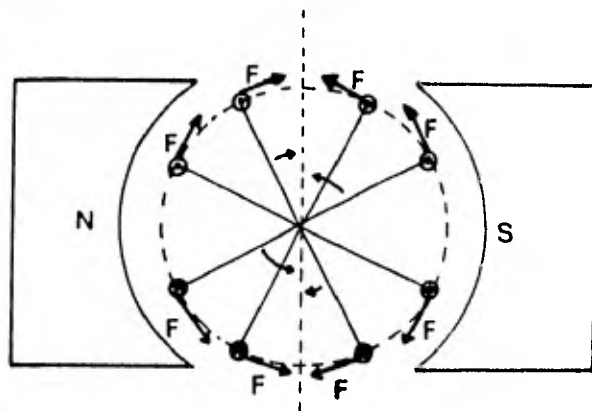


Fig. 2.4

Diagrama de Fuerzas Resultantes en una Espira Conductora.

\*(el punto • indica que la corriente circula en dirección positiva de  $y$ )

La solución a este problema se obtiene agragando al circuito eléctrico un dispositivo conmutador capáz de cambiar el sentido de la corriente cuando la espira ha pasado por el plano neutro.

En el caso de motores de inducción, el funcionamiento es el mismo excepto por el conmutador en el elemento rotativo.

II.3.- El motor de inducción.

a) La estructura.

En su forma más generalizada, el motor de inducción consiste de dos elementos básicos: El estator y el rotor. El primero de ellos sirve de base a los devanados que reciben la energía eléctrica del circuito de alimentación, el segundo, contiene los devanados en los cuáles se produce la corriente inducida por el estator.

El estator.

El núcleo del estator está formado por láminas troqueladas de Hierro al silicio en proporción del 1 a 3%, y con espesores que varían entre 0.35 y 0.48 mm. El núcleo es ranurado en toda su superficie cilíndrica interior. Para pequeños diámetros, las ranuras son parcialmente cerradas y los dientes tienen caras paralelas; si por el contrario, el diámetro es grande, las ranuras son del tipo abierto.

En las ranuras del estator se insertan las espiras del devanado de cobre previamente aisladas con el objeto de evitar los cortos circuitos entre ellas y la estructura laminar. Así, cada uno de los dientes forma un polo magnético cuando se proporciona una corriente eléctrica al devanado.

El rotor.

El rotor de los motores de inducción puede ser de dos clases:

- a) El rotor devanado
- b) El rotor jaula de ardilla

En ambos casos, el núcleo está formado por láminas al igual que el estator y a diferencia de éste, tiene las ranuras en su superficie cilíndrica

exterior, las cuales contienen a las bobinas si se trata de un rotor devanado o a las barras de cobre o aluminio si se trata de un rotor jaula de ardilla.

El devanado del rotor jaula de ardilla lo completan dos anillos a los extremos del núcleo que se funden al mismo tiempo que las barras constituyendo una estructura compacta.

Existen restricciones en cuanto al número de ranuras en el estator en relación con el número de ranuras del rotor, siendo la principal, que ambos números no sean iguales, ya que si lo fuesen, la reluctancia del circuito magnético variaría desde un máximo cuando los dientes están frente a las ranuras a un mínimo cuando los dientes están frente a los dientes, ocasionando pérdidas en el núcleo y provocaría la tendencia del rotor a cerrarse con el estator. El mejor medio de evitar esta situación es que el número de dientes del rotor sea primo relativo al número de dientes del estator.

Como es costumbre construir las chapas del estator de forma tal que los dientes y las ranuras sean paralelas al eje del rotor, las chapas del elemento rotativo se construyen ligeramente oblicuas con el fin de eliminar las vibraciones, el ruido del motor y la acción de amarre entre los dos elementos.

El núcleo de rotor y del estator se construyen apilando laminaciones con el objeto de reducir las pérdidas por corrientes parásitas.

El entre hierro o separación entre los dientes del estator y del rotor debe hacerse lo más corto posible con el fin de aumentar al máximo el campo magnético y el flujo entre el devanado primario (estator) y el secundario (rotor).



b) El campo rotativo.

Los motores de inducción son alimentados con una fuente externa de corriente alterna esta propiedad es aprovechable para producir campos giratorios en los polos magnéticos del estator, ya que tienen períodos de ascenso y descenso siguiendo un patrón senoidal.

Un ciclo completo es de  $360^\circ$  y se repite según la frecuencia de alimentación.

Cuando se aplican dos potenciales alternos pueden estar en fase o desfasados; esta situación se describe en función del ángulo relativo entre ellas en un instante determinado.

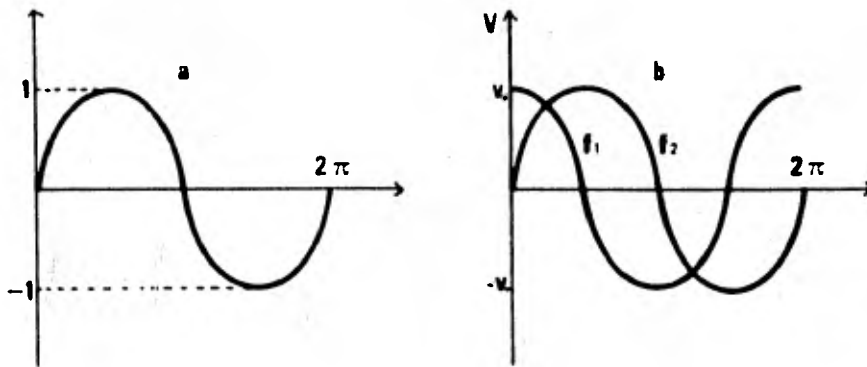


Fig. 2.5

a) Representación de un ciclo de una onda senoidal. b) Dos potenciales con patrón senoidal desfasados  $\pi/2$ .

La Fig. 2.5.a muestra un ciclo de  $360^\circ$  con patrón senoidal, la frecuencia determina el número de ciclos por unidad de tiempo (Hertz ó cl

culos/seg.); en la Fig. 2.5.b se muestran dos patrones senoidales desfasados 90°, con la misma frecuencia y amplitud.

Los voltajes alternos se expresan a través de la relación

$$V = V_0 \cos \omega t \quad (2.6)$$

en la cual  $V_0$  es el voltaje máximo o valor pico,  $\omega = 2\pi f$  corresponde a la frecuencia angular expresada en radianes por segundo y  $f$  la frecuencia expresada en Hertz. (1 Hertz = 1 ciclo/seg.)

Si el voltaje  $V$  es aplicado a un circuito, la corriente eléctrica asociada es de la forma

$$I = I_0 \cos \omega t + \psi \quad (2.7)$$

en donde  $I_0$  es el valor pico de la corriente,  $\omega t + \psi$  la fase y  $\psi$  el desfase de la corriente  $I$  respecto del voltaje  $V$ .

Cuando un voltaje alterno es aplicado a un circuito puramente resistivo, la potencia disipada en la resistencia es

$$P_{\text{instantánea}} = VI = \frac{V_0^2 \cos^2 \omega t}{R} = I_0^2 R \cos^2 \omega t \quad (2.8)$$

y el promedio de la potencia disipada por ciclo es entonces

$$P_{\text{promedio}} = \frac{V_0^2}{2R} \quad (2.9)$$

y en términos del valor efectivo o r.m.s.

la potencia promedio resulta

$$P_{\text{promedio}} = \frac{V_{\text{r.m.s.}}^2}{R}$$

Si un voltaje alterno se aplica al estator de un motor de inducción, la corriente asociada a él, genera en los polos magnéticos una fuerza magnetomotriz que produce y mantiene el campo magnético, sin embargo, este campo es alterno y no rotativo, como en el motor de inducción se requiere de un campo giratorio, la solución es entonces aplicar a un segundo devanado otro voltaje alterno desfasado respecto al primero.

La Fig. 2.6 muestra el estator de un motor de inducción al que se le aplican dos corrientes alternas desfasadas  $\pi/2$ , la fase  $F_1$  alimenta los polos horizontales y la fase  $F_2$  a los polos verticales.

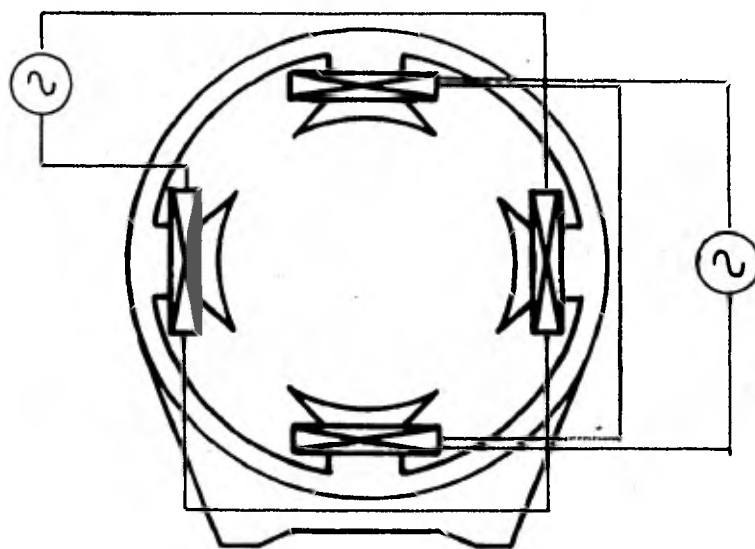


Fig. 2.6

Diagrama Simple de un Estator.

Si la corriente  $I_1$  y la corriente  $I_2$  están desfasadas entre sí  $\pi/2$  pero con igual frecuencia y amplitud, el campo magnético resultan

te en los polos del estator es: (Fig. 2.7).

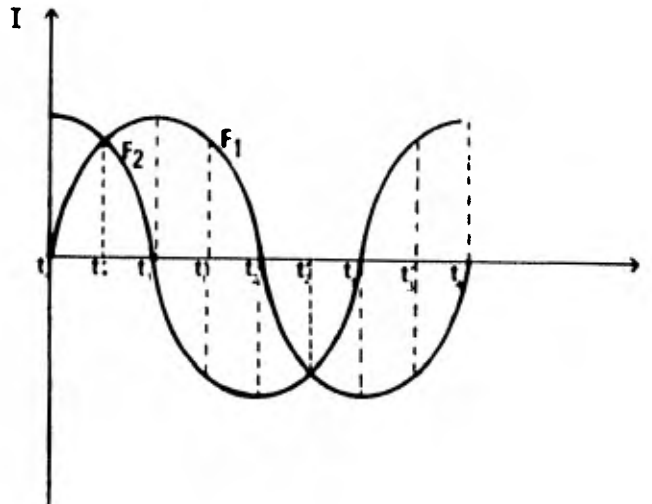


Fig. 2.7

Gráfica de Corrientes Alternas desfasadas

Al tiempo  $t_0$  se obtiene una corriente máxima en la fase 2, lo que produce un campo máximo en los polos horizontales, sin producirse campo en los verticales puesto que la corriente en la fase 1 es nula. Fig. 2.8.a

En el siguiente instante  $t'_0$ , la corriente en los polos horizontales empieza a aumentar, produciéndose un campo de igual magnitud que en los verticales puesto que por ellos circula todavía corriente. La contribución de los cuatro polos da como resultado un campo magnético en la dirección que se muestra en la figura 2.8.b.

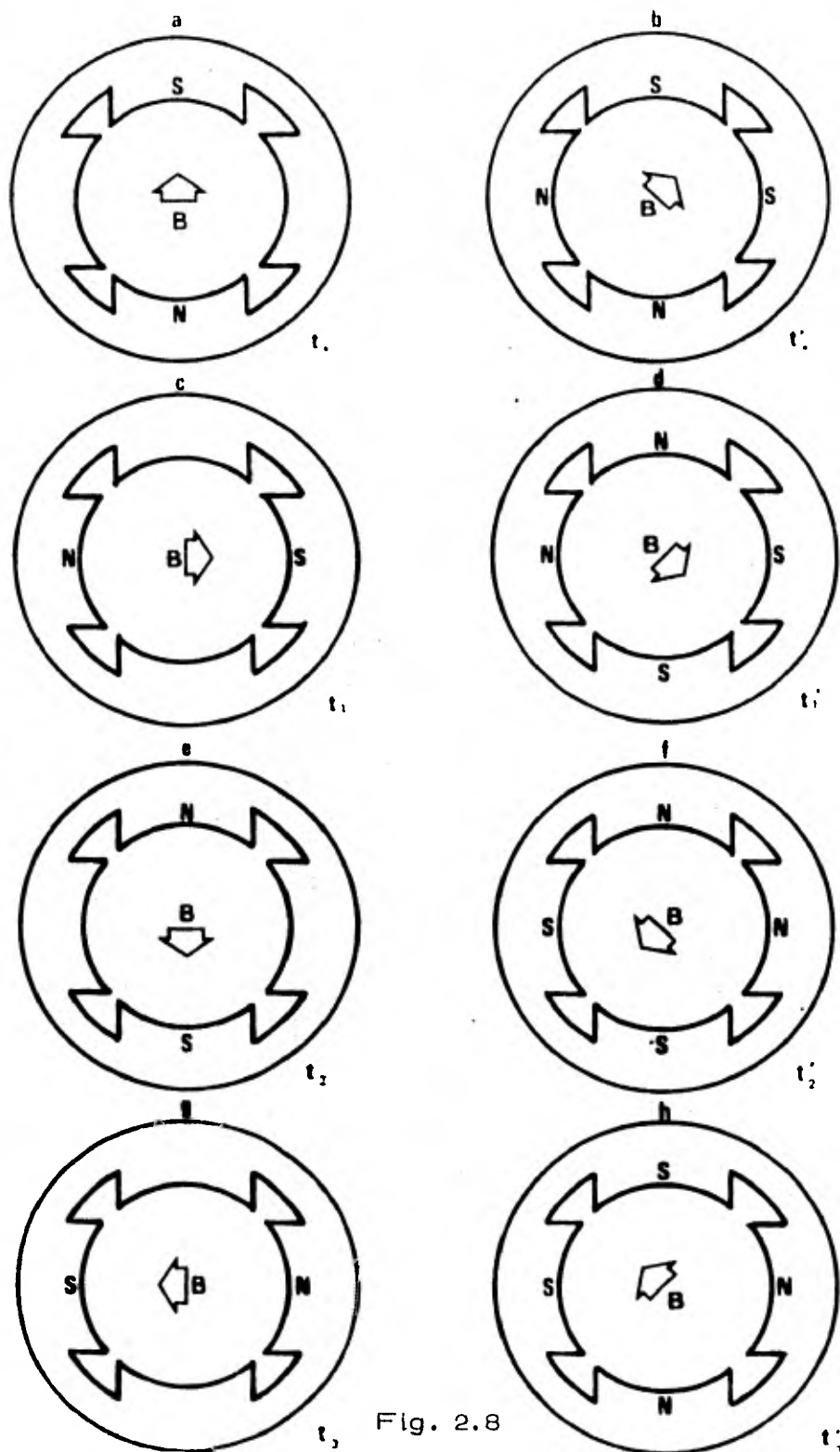


Fig. 2.8

Diagrama de Rotación del Campo Magnético en un Estator.

Al tiempo  $t_1$  la fase 2 es cero y por tanto no existe campo magnético en los polos verticales, encontrándose un campo máximo en los polos horizontales debido al máximo de corriente en la fase 1. (Fig. 2.8.c)

Al instante  $t_1'$  existe una corriente tanto en los polos horizontales como en los verticales, el campo resultante se muestra en la Fig. 2.8.d.

En el instante  $t_2$  la corriente en la fase 1 es cero, encontrándose un máximo en la corriente de la fase 2, por lo que existirá un campo magnético en los polos verticales.

Al tiempo  $t_2'$  la corriente en ambas fases es diferente de cero, lo que da como resultado un campo magnético en los cuatro polos.

En  $t_3$  la fase 2 es cero, por lo que no existe campo en los polos verticales, no así en los horizontales en donde la corriente es máxima.

En el tiempo  $t_3'$  la corriente en ambas fases es diferente de cero, por lo que existe un campo resultante.

La posición del campo magnético al tiempo  $t_4$  coincide con la posición al tiempo  $t_0$ . lo que indica que el campo resultante es cíclico y su velocidad angular depende de la frecuencia de alimentación.

Dado que el campo giratorio se fundamenta en la aplicación de dos corrientes alternas desfasadas entre si  $\pi/2$ , el problema de alimentación con corriente monofásica se puede resolver cambiando la fase mediante un circuito apropiado.

### c) Principios de operación.

El motor de inducción recibe este nombre, debido a que su funcion

namiento se basa en el principio de inducción electromagnética.

El principio de inducción se hace presente en esta clase de motores eléctricos, cuando las barras que forman las espiras del rotor jaula de ardilla cortan las líneas del flujo magnético producidas en los polos del estator. La reacción de las espiras al cambio del flujo que las atraviesan, pueden analizarse con la siguiente figura.

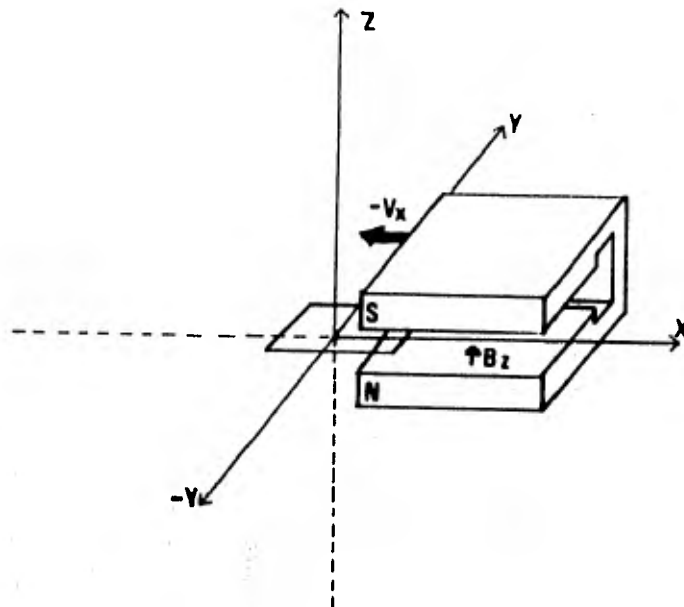


Fig. 2.9

Representación esquemática del cambio de Flujo Magnético en una Espira Conductora.

La figura muestra un campo  $\vec{B} = B_x \hat{k}$  que se mueve con una velocidad  $\vec{V} = -V_x \hat{i}$  producido por un par de caras polares opuestas y paralelas al plano  $x-y$ ; este arreglo produce el mismo efecto sobre una espira fija con su plano perpendicular al flujo, que el producido por un campo mag

nético rotativo en el estator de un motor de inducción, sobre las espiras del rotor jaula de ardilla.

La reacción de la espira debe analizarse en tres momentos críticos:

- a) Cuando el flujo dentro de la espira aumenta.
- b) Cuando el flujo dentro de la espira es constante.
- c) Cuando el flujo dentro de la espira disminuye.

a) Si el flujo en la espira comienza a aumentar  $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ , por lo tanto, se produce en el circuito una fuerza electromotriz que dará origen a una corriente en sentido tal, que el campo producido por ella se oponga al aumento del flujo (Fig. 2.10).

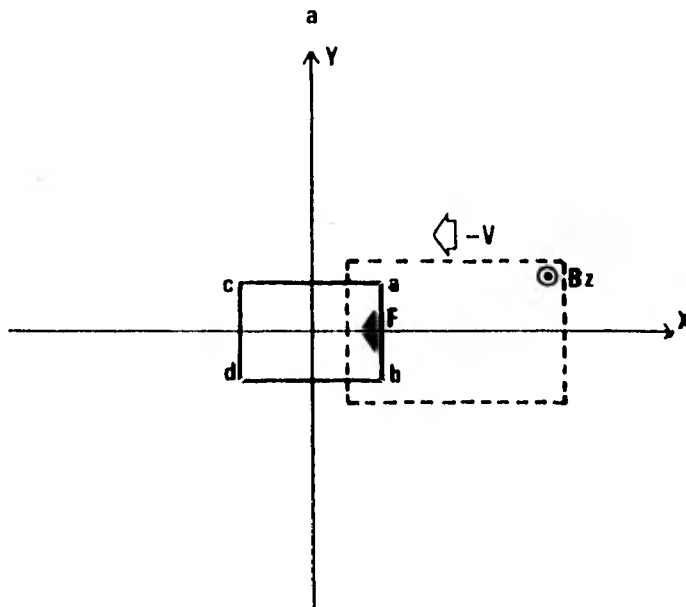


Fig. 2.10

Diagrama de una Espira Conductor en un Campo Magnético variable.

Si se considera que el flujo magnético es en la dirección  $Z$ , se



produce en la espira una corriente en sentido a-b, y su campo tiene dirección contraria al campo original, lo que tenderá a disminuir el flujo a través del área de la espira.

La corriente producida en la espira al interactuar con el campo que la produce, da como resultado la presencia de una fuerza cuya magnitud y sentido están determinadas por

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad (2.10)$$

esta fuerza resulta en el sentido  $-X$  y su magnitud es

$$|\vec{F}| = I l a \cdot b B_z$$

b) Cuando la espira queda totalmente embebida en la región del campo magnético (Fig. 2.11) la variación del flujo a través de la espira es cero, es decir  $\frac{d\Phi}{dt} = 0$ . Esto significa que dentro del circuito no circula corriente eléctrica y por tanto no existe fuerza resultante.

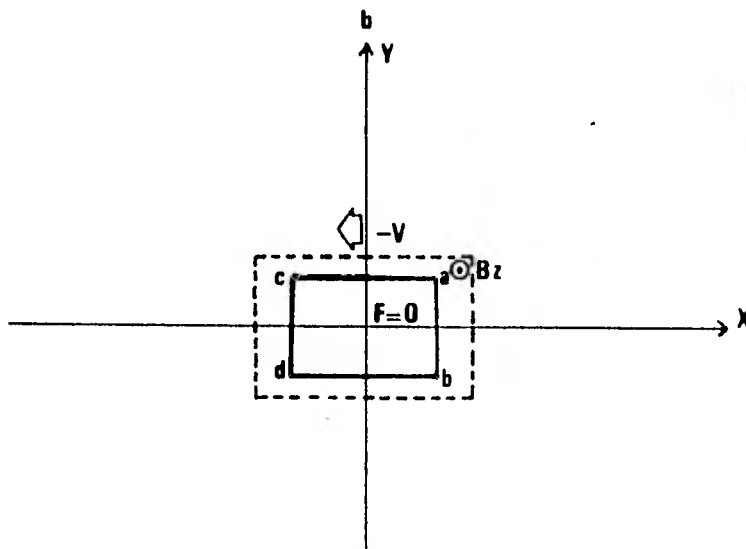


Fig. 2.11

Diagrama de una Espira Conductor en un Campo Magnético variable.

c) Una vez que el campo magnético se ha movido a una posición tal, que el flujo a través de la espira comienza a disminuir  $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ , se produce en la espira una corriente eléctrica en sentido c-d. (Fig. 2.12). El campo magnético producido por ella tiende a aumentar el flujo a través de la espira. La presencia de corriente eléctrica en un campo magnético da como resultado la aparición de una fuerza cuya magnitud esta determinada

$$d\vec{F} = -I dl_y \hat{j} \times B_z \hat{k}$$

encontrando que ésta resulta en dirección  $-x$  y magnitud  $|\vec{F}| = I l_{c-d} B_z$ .

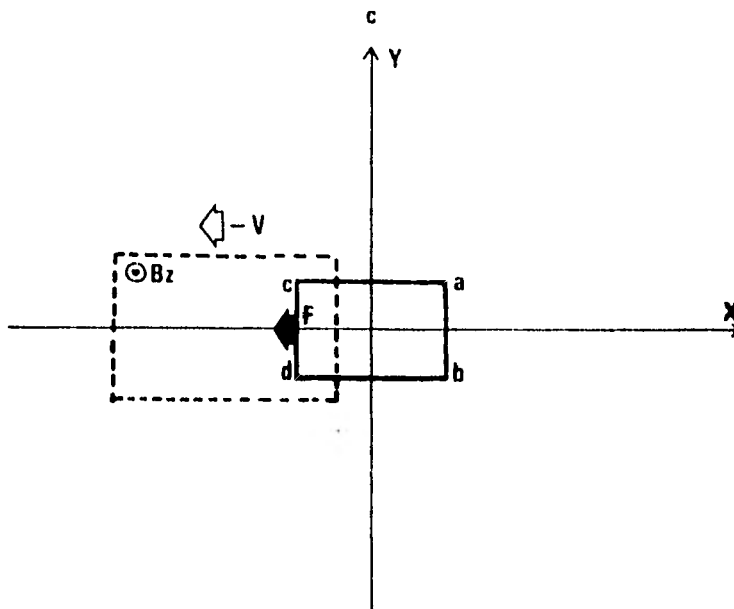


Fig. 2.12

Diagrama de una Espira Conductor en un Campo Magnético Variable.

Tanto al entrar como al salir de la región del campo magnético, en la espira aparece una fuerza que puede producir el movimiento de ella. Ambas fuerzas resultan en la misma dirección en todo momento.

La aparición de fuerzas debidas a la variación de flujo a través de una espira, constituye básicamente el principio de operación del motor de inducción ya que si se considera el rotor jaula de ardilla, éste posee en toda su superficie cilíndrica una serie de espiras de un material conductor, y la variación del flujo a través de ellas se debe a la rotación del campo magnético. En el caso del rotor jaula de ardilla la fuerza que aparece sobre cada una de las barras tiende a moverlo provocando un par, y por tanto el movimiento del mismo. La Fig. 2.13 muestra en una vista superior la disposición de los dos elementos básicos y las fuerzas que resultan de la variación del flujo.

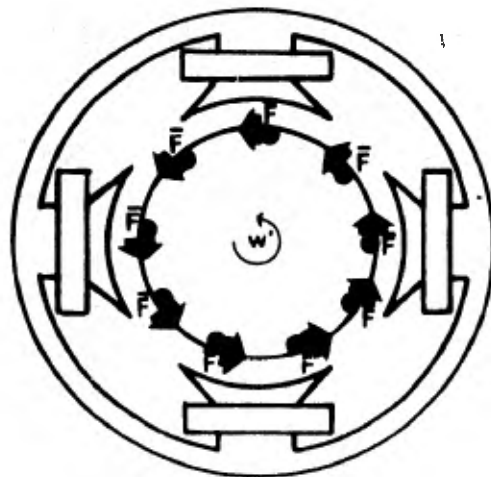


Fig. 2.13

Diagrama de Fuerzas Resultantes en el Rotor Jaula de Ardilla.

El principio de operación de los motores de inducción, así como algunos fenómenos de excentricidad, o amplitud en el entrehierro son fácilmente visualizados con el método gráfico, en el que intervienen las líneas de flujo y las líneas equipotenciales formando redes.

La Fig. 2.14 muestra el flujo y las "equipotenciales"  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  notándose en los picos de los polos un aumento considerable de líneas. La perpendicularidad entre las líneas de campo y equipotenciales se conserva.

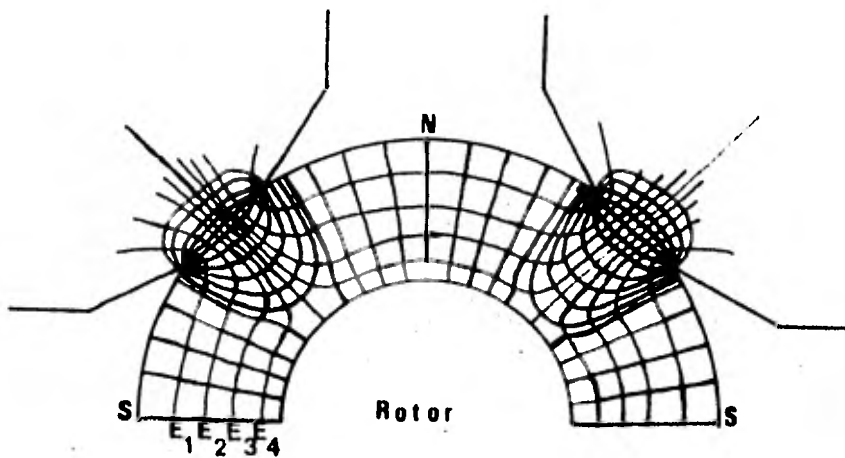


Fig. 2.14

Esquema del Campo Magnético entre el Estator y el Rotor Sólido.

Si han de agregarse ahora las espiras en el rotor jaula de ardilla, las corrientes que circulan por ellas, producen sus propios campos alterando la configuración mostrada en la Fig. 2.14.

La operación del motor de inducción puede visualizarse también, analizando la interacción del campo rotativo con los campos producidos por

las corrientes inducidas en el rotor jaula de ardilla.

La Fig. 2.15 muestra en una vista superior la disposición de una sección de los dos elementos básicos del motor de inducción, destacando la presencia de los devanados del estator y las barras del rotor.

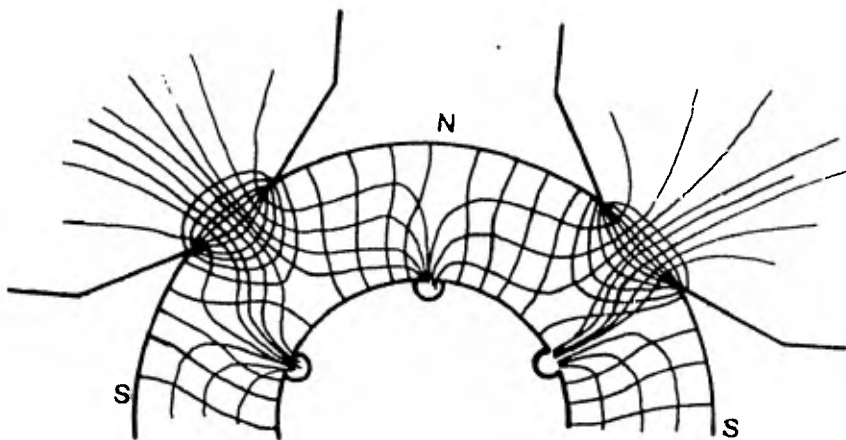


Fig. 2.15

Esquema del Campo de un Estator y un Rotor Jaula de Ardilla.

Cuando se aplica corriente eléctrica al estator de un motor práctico de inducción se genera un campo magnético rotativo en las caras polares del estator. Al iniciar la rotación del campo, las líneas del flujo cortan las espiras del rotor, generando en ellas una corriente eléctrica por inducción electromagnética. La corriente circulante es alta debido a la baja resistencia de las espiras. Esta condición da como resultado la producción de campos magnéticos muy intensos en los espacios entre las barras.

Esto quiere decir que el rotor jaula de ardilla generará sus propios

polos magnéticos, los cuales interactúan con los del campo rotativo. La fuerza resultante de la interacción es siempre tangencial a la superficie cilíndrica y con el mismo sentido de giro.

Dado que el rotor jaula de ardilla sigue al campo principal, es fácil pensar que si no existiera carga en el rotor, ni fricción, la velocidad del rotor igualaría a la velocidad del campo rotativo. Sin embargo, la ley de inducción establece que la generación de f.e.m. en una espira conductora existe, si y solo si se presenta una variación de flujo a través de ella, por lo que al girar el rotor a velocidad síncrona no existe variación en el flujo a través de las espiras y la fuerza desaparece. A la diferencia de velocidades que existe entre el campo rotativo y la velocidad del rotor se le denomina deslizamiento; por esta razón los motores de inducción son llamados también asíncronos.

La fuerza de torsión que obra sobre el rotor jaula de ardilla está dada por

$$T = \frac{\pi \phi^2 \omega_s R}{2[R^2 + (L\omega_s \pi/2)^2]} \quad (2.11)$$

en la cuál  $R$  y  $L$  representan respectivamente la resistencia ohmica y la inductancia de las espiras del rotor jaula de ardilla,  $\phi$  el flujo magnético y  $\omega_s$  la velocidad angular de desplazamiento la cual se obtiene a partir de la diferencia entre la velocidad angular ( $\omega$ ) con la que rota el campo magnético y la velocidad angular ( $\omega'$ ) del rotor jaula de ardilla, es decir

$$\omega_s = \omega - \omega'$$

Si la relación de torsión se grafica en función de  $\omega'$  se obtiene la siguiente curva. (Fig. 2.16)

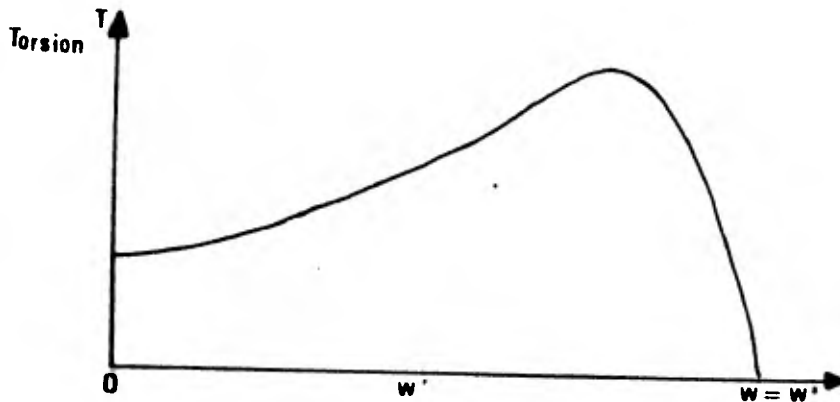


Fig. 2.16

Gráfica de la Fuerza de Torsión que actúa sobre el Rotor.

En esta figura puede apreciarse que cuando el rotor está en reposo ( $\omega' = 0$ ) la torsión es pequeña pero en el sentido de rotación del campo. Cuando  $\omega'$  se incrementa, el denominador decrece más rápidamente que el numerador y la torsión aumenta obteniéndose el máximo cuando

$$\omega_s = \frac{2R}{\pi L}$$

sin embargo, cualquier incremento posterior de  $\omega'$ , tiende a reducir la torsión sobre el rotor, llegando a cero cuando la velocidad angular del rotor es sincrónica con la velocidad angular del campo. ( $\omega_s = 0$  ó  $\omega' = \omega$ )

## CAPITULO III.

### Motores de Alta Velocidad.

#### III.1. Antecedentes.

Para elegir el impulsor de alta velocidad, se tenía una serie de opciones en donde se encontraban motores de corriente alterna y de corriente directa. Este grupo se vió reducido al analizar las necesidades motrices de las centrífugas y de las bombas turbomoleculares, las cuales no son compatibles con motores de tipo comercial. Estos requerimientos están enfocados a tres aspectos: a) La operación, b) La estructura y c) El mantenimiento.

En cuanto a los requisitos de operación destacan; el bajo consumo de potencia eléctrica, así como el desarrollo de muy altas velocidades (hasta de 60000 r.p.m.) las cuales deben ser constantes y reguladas durante periodos de operación muy largos. El par motor debe ser constante durante su operación. La estructura del impulsor debe ser simple y sin contactos mecánicos, lográndose un mínimo de pérdidas por fricción; esta estructura está directamente relacionada con el mantenimiento, puesto que al no existir partes que sufren desgaste durante el funcionamiento, el mantenimiento puede considerarse casi nulo.

Una vez analizadas las necesidades, se inició una etapa experimental en donde se probaron tres motores con características comerciales.



Los motores que se probaron fueron: un motor de corriente directa y dos de corriente alterna. El motor de corriente directa respondió favorablemente a la excitación y desarrolló una alta velocidad así como un alto par de arranque, sin embargo se encontraron algunos inconvenientes como son: requiere de conmutadores eléctricos así como de un regulador de velocidad, lo que va en oposición a las consideraciones estructurales antes mencionadas. Se probó también un motor síncrono con rotor de polos permanentes; este modelo reportó resultados favorables en cuanto a su operación y estructura, sin embargo requiere de un complicado circuito para la regulación de la velocidad, así como de conmutadores ópticos para el aumento de la misma.

Por último se probó un motor de inducción con rotor jaula de ardilla arrojando los siguientes resultados: La velocidad de operación depende directamente de la frecuencia aplicada, del número de fases y número de polos. La potencia eléctrica alterna es administrada por un oscilador y amplificada posteriormente con un circuito electrónico simple. Una vez fijada la frecuencia, la velocidad va aumentando asintóticamente hasta el valor determinado como límite, ya que debe girar abajo de la velocidad sincrónica.

Ya que en los motores de Inducción la potencia útil trasmitida desde el estator al rotor se efectúa mediante el fenómeno de inducción electromagnética, no requiere de conmutadores, eliminando totalmente la fricción en el elemento rotativo, con lo que el mantenimiento resulta casi nulo. Por la manufactura del rotor jaula de ardilla se asegura un período de vida muy largo, ya que su construcción es sólida y compacta.

De estos tres modelos se eligió al que ofreció mayores posibilidades de éxito, por lo que se procedió a realizar las modificaciones de un motor de inducción comercial, para ser operado a muy altas velocidades.

### III.2.- Motores de alta velocidad.

Las velocidades de giro de los motores eléctricos dependen fundamentalmente de las condiciones siguientes:

- a) Estructura del estator, que incluye la forma, el número de dientes y ranuras, así como del diámetro interno y del entrehierro.
- b) Estructura del rotor, donde se escoge el tipo de rotor, el número de barras y los materiales empleados, así como las medidas físicas de la longitud y diámetro del núcleo.
- c) Devanados en el estator y el rotor, que involucra el número de espiras por polo, el material y calibre de los conductores, así como el número de fases.
- d) Las características eléctricas de alimentación sobre todo de las frecuencias con que se alimenta a los devanados.

Cuando se desea adaptar un motor comercial con características específicas, para ser operado a muy alta velocidad, se requiere modificar algunas de sus partes para lograr este objetivo.

El modelo originalmente probado, correspondió a un motor de inducción de fase dividida con rotor jaula de ardilla y con las siguientes especificaciones.

Voltaje de alimentación . . . . .	115 V., C.A.
Frecuencia de alimentación . . . . .	60 Hertz.
Corriente . . . . .	0.46 Amp.
Velocidad nominal . . . . .	30 r.p.s.
Potencia . . . . .	0.0167 H.P.
Capacitor . . . . .	4 $\mu$ fd

Las medidas físicas de la estructura del estator como del rotor se presentan a continuación:

Datos estructurales del núcleo laminado del estator.

Espesor de las laminaciones . . . . .	0.4 mm.
Material . . . . .	Hierro al Silicio.
Diámetro externo . . . . .	73 mm.
Diámetro interno . . . . .	41 mm.
Longitud del núcleo . . . . .	36 mm.

Ranuras

No. Total . . . . .	16
Profundidad . . . . .	10.5 mm
Ancho máximo . . . . .	8 mm.
Ancho mínimo . . . . .	4 mm.
Abertura en el extremo . . . . .	1.5 mm.
Ancho del diente . . . . .	4 mm.
Ancho del diente en la cara polar . . . . .	6 mm.

Datos estructurales del rotor jaula de ardilla.

Núcleo laminado.

Espesor de las laminaciones . . . . .	0.4 mm.
Diámetro . . . . .	40.8 mm.
Longitud total . . . . .	40.7 mm.
Longitud del laminado . . . . .	36 mm.

Barras y anillos terminales.

No. total de barras . . . . .	8
Material . . . . .	Aluminio
Oblicuidad . . . . .	$\sim 10^\circ$
Anillos terminales . . . . .	2, fundidos con las barras.

El devanado original del motor de inducción estaba compuesto de dos circuitos eléctricos conectados en paralelo, cada uno de ellos conteniendo cuatro series de espiras enrolladas concéntricamente en los dientes de la armadura del estator, formando así cuatro polos magnéticos por circuito. Para diferenciar las características eléctricas de uno y de otro circuito, se tomará un devanado primario (D) y un devanado secundario (D').

Características eléctricas de los devanados D y D' del motor de inducción original.

Resistencia eléctrica. . . . .	D = 55 $\Omega$
(Puramente ohmica)	D' = 135 $\Omega$
Inductancia. . . . .	D = 103 mH
(Len Henry)	D' = 221 mH
Reactancia Inductiva. . . . .	D = 38.8 $\Omega$
(frecuencia 60 Hertz)	D' = 89.3 $\Omega$
Impedancia. . . . .	D = 67.3 $\Omega$
	D' = 158.6 $\Omega$

Estos valores se obtuvieron con un puente de impedancias y sin el rotor jaula de ardilla.

Los valores de  $L$  se obtuvieron también con el rotor jaula de ardilla en posición normal de funcionamiento, encontrándose los siguientes valores:

Resistencia Ohmica. . . . .	D = 55 $\Omega$
	D' = 135 $\Omega$
Inductancia. . . . .	D = 158.6 mH.
	D' = 270 mH.
Reactancia Inductiva. . . . .	D = 59.7 $\Omega$
	D' = 101.7 $\Omega$
Impedancia. . . . .	D = 81.1 $\Omega$
	D' = 169.0 $\Omega$

esto con el objeto de tener mayor cantidad de datos como base para la construcción del nuevo devanado.

Una vez descritas las condiciones de operación del motor original, así como las constantes de la estructura y devanado se procede a establecer las condiciones de operación del motor modificado capaz de desarrollar altas velocidades.

Condiciones de operación.

Voltaje de alimentación. . . . .	14 V <sub>rms</sub> C.A.
Frecuencia de alimentación. . . . .	2000 Hertz
Velocidad esperada. . . . .	1000 revoluciones por seg.

El motor a desarrollar es de inducción, de fase dividida con capacitor. Cabe aclarar que los valores numéricos obtenidos no son comparables con los del modelo original ya que las condiciones de operación de uno y otro son diferentes.

El núcleo laminado del estator se conservó con sus parámetros originales salvo en las caras polares, ya que por condiciones magnéticas y mecánicas tuvo que reducirse el ancho del diente de 6 mm, a 5.6 mm. El núcleo laminado del rotor fue modificado radicalmente, ya que se escogió el rotor jaula de ardilla de otro motor similar pero con menores dimensiones, lo que proporciona una estabilidad mecánica considerable tomando en cuenta el soporte magnético empleado.

Las dimensiones del segundo rotor jaula de ardilla se presentan a continuación:

Espesor de las laminaciones. . . . .	0.4 mm.
--------------------------------------	---------

Diámetro externo. . . . .	38.8 mm.
Longitud total. . . . .	33.5 mm.
Longitud del núcleo laminado. . . . .	26.5 mm.

Barras.

No. total. . . . .	14
Material. . . . .	Aluminio
Longitud. . . . .	33.5 mm.
Oblicuidad. . . . .	~10° respecto al eje de rotación.
Ancho. . . . .	3.8 mm.

Anillos Terminales.

Material. . . . .	Aluminio fundido con las barras.
-------------------	----------------------------------

El diseño y la construcción del devanado del estator se realizó a partir de las condiciones de operación, tomando en cuenta que tanto la alimentación alterna, como la frecuencia, han de modificarse en forma considerable.

Dado el tipo de alimentación del motor de inducción, es fundamental observar los fenómenos que se manifiestan en los circuitos eléctricos cuando una corriente alterna circula por ellos.

Los ciclos de ascenso y descenso en los valores de la corriente generan fuerzas electromotrices en el circuito opuestas al cambio, siendo la relación de voltaje aplicado la siguiente:

$$v = L \frac{di}{dt} \tag{3.1}$$

en donde  $v$  (volts) es el voltaje aplicado al circuito,  $L$  la inductancia, la cual es una constante del circuito y depende de la forma, longitud y material, así como de los elementos próximos a él,  $\frac{di}{dt}$  corresponde a la variación

de la corriente respecto del tiempo ( $t$ ).

Si la corriente es de la forma

$$i = i_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

entonces el voltaje  $v$  aplicado resulta

$$v = L \frac{d}{dt} i_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

ó

$$v = \omega L i_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

en la cual se puede reemplazar  $i_0 \sin(\omega t + \varphi)$  por  $i$ , quedando la relación como

$$v = \omega L i \quad (3.2)$$

en donde  $\omega L$  es un término de carácter resistivo y denominado reactancia inductiva ( $X_L$ ).

El término  $X_L$  aparece en los circuitos alimentados con corriente alterna y puede deducirse que su valor aumenta, a medida que la frecuencia de alimentación crece.

Por supuesto, el circuito eléctrico se construye con elementos materiales que tienen asociada una resistencia eléctrica ( $R$ ) la que depende de la longitud ( $l$ ), el área de la sección transversal ( $A$ ) y una constante del material llamada conductividad ( $g$ ) la expresión es la siguiente:

$$R = \frac{l}{g A} \quad (3.3)$$

Para el caso del cobre, que es el material empleado usualmente en

la construcción de los devanados, la resistencia eléctrica (Ohm-metro) resulta:

$$R = \frac{l \times 1.69 \times 10^{-8}}{A}$$

Puesto que los devanados del motor de inducción tienen una resistencia (R) debida al material, así como una reactancia inductiva resultante del tipo de alimentación, la Ley de Ohm para circuitos alternos se expresa como

$$V = Z I \quad (3.4)$$

en donde  $Z$  corresponde a la impedancia del circuito y es igual a:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (3.5)$$

y sus unidades son de resistencia eléctrica (Ohms).

Ya que el voltaje que ha de emplearse para excitar los devanados es considerablemente menor y la frecuencia es mucho mayor, caben destacar las siguientes consideraciones para la construcción del devanado.

- a) La potencia aplicada al devanado será, si no igual, si del orden de la potencia aplicada al motor original por lo que, la resistencia  $R$  debe disminuir.
- b) Si la resistencia  $R$  del devanado disminuye tendiendo a cero, entonces la inductancia ( $L$ ) disminuye considerablemente, sin embargo, por la frecuencia tan alta que ha de suministrarse, la reactancia aumenta.



Otro de los puntos importantes al calcular el devanado es el análisis del circuito magnético del sistema estator-rotor, el cual, para una mejor comprensión puede basarse en la siguiente figura ilustrativa. (Fig. 3.1)

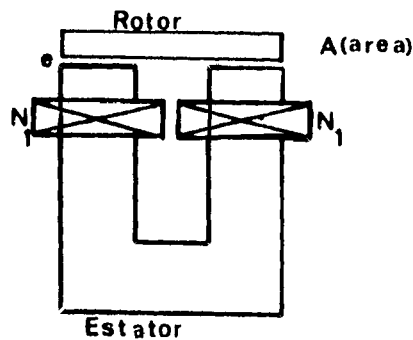


Fig. 3.1

Esquema del Circuito Magnético Estator-Rotor

Este circuito consta de dos elementos; el rotor, representado esquemáticamente en la parte superior y el estator en la parte inferior. Ambos elementos están separados por un entrehierro  $e$  y el campo es producido por un par de bobinas con  $N_1$  espiras cada una.

Si se aplica la ley circuital de Ampere a este circuito se obtiene:

$$\frac{B_{Fe} l_{Fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{B 2e}{\mu_0} = 2 N_1 i$$

en donde el subíndice  $Fe$  significa que se trata de la porción de hierro del circuito.

Debido a que  $\mu_{Fe} \gg \mu_0$  el primer término  $\frac{B_{Fe} l_{Fe}}{\mu_{Fe}}$

resulta despreciable con respecto al segundo, por lo que el campo  $B$  resulta prácticamente

$$B = \frac{N_1 i \mu_0}{e} \quad (3.6)$$

Si el área de la cara polar es  $A$ , el flujo magnético será

$$\Phi = BA = \frac{AN_1 i \mu_0}{e}$$

y el flujo por el número de espiras que atraviesa

$$2N_1 \Phi = \frac{2AN_1^2 \mu_0 i}{e}$$

sin embargo  $2N_1 \Phi = Li$  con  $L$  la inductancia del circuito, así que:

$$L = \frac{2AN_1^2 \mu_0}{e}$$

Si el voltaje aplicado a la bobina  $N_1$  es alterno, tendrá la forma  $V_1 = V_0 \sin \omega t$

y la corriente que circula

$$i_0 = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}}$$

Si la frecuencia  $f$  es alta,  $R$  la resistencia óhmica es despreciable y la corriente resulta

$$i_0 \approx \frac{V_0}{\omega L}$$

Como en el caso de corriente alterna

$$V_1 = -\frac{di}{dt} L$$

entonces

$$i = -\frac{V_0}{\omega L} \cos \omega t$$

Sustituyendo el valor de la corriente en la relación del campo (3.6)

se obtiene:

$$B = -\frac{V_0}{4A\omega N_1} \cos \omega t$$

lo que implica que al aumentar  $\omega$  considerablemente, el campo  $B$  en un circuito disminuye, por lo que puede escogerse alguna de las dos alternativas o ambas:

- a) Reducir el número de espiras en los devanados.
- b) Aumentar el voltaje.

Dados los elementos con que se cuenta para la alimentación se optó por la primera alternativa, reduciendo el número de espiras, aumentando el calibre del conductor y por supuesto aceptando un aumento de corriente circulante para el voltaje aplicado.

Con el antecedente presentado antes, se logró obtener un devanado con las características que se muestran a continuación. (Al igual que el devanado original, se hace un análisis independiente de cada juego, diferenciando los por D y D')

Resistencia. . . . .	D = 7.8 $\Omega$
	D' = 7.8 $\Omega$
Inductancia. . . . .	D = 9.17 mH.
	D' = 7.81 mH.

Si la frecuencia de alimentación es de 2000 Hertz, entonces  $X_L$ ,

para el devanado D resulta

$$X_L = \omega L$$
$$X_L = 2\pi fL$$
$$X_L = 113 \Omega$$

y para el devanado D' la reactancia  $X'_L$  resulta  $X'_L = 87.96 \Omega$

Puesto que la ley de Ohm en circuitos alternos involucra al término resistivo  $Z$ , es procedente encontrar su valor

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

así para el devanado D

$$Z = 113.2 \Omega$$

y para el devanado D' se obtiene

$$Z' = 88.31 \Omega$$

Debido a que los devanados D y D', al igual que en el motor original están conectados en paralelo a la misma fuente, entonces la impedancia total  $Z_T$  en la ley de Ohm

$$V = Z_T I$$

tiene que obtenerse a partir de

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z'}$$

resultando  $Z_T = 49.5 \Omega$

El devanado, al igual que el original está constituido por dos juegos de cuatro conjuntos de espiras conectadas en serie, por tanto el estator estará formado por ocho polos. Cada conjunto de espiras está enrollado en forma concéntrica y con paso 1-4 constituyendo así cada polo del estator.

La Fig. 3.2 muestra en forma esquemática el enrollamiento concéntrico de las espiras en las ranuras del estator.

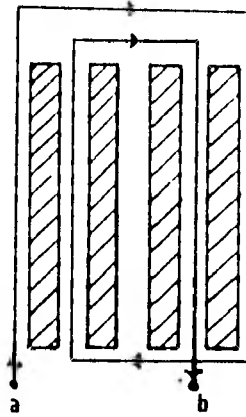


Fig. 3.2

Diagrama Esquemático de los Enrollamientos en las Ranuras del Estator.

La siguiente figura (Fig. 3.3) representa el diagrama de las espiras en los polos del estator, así como la dirección de los conductores.

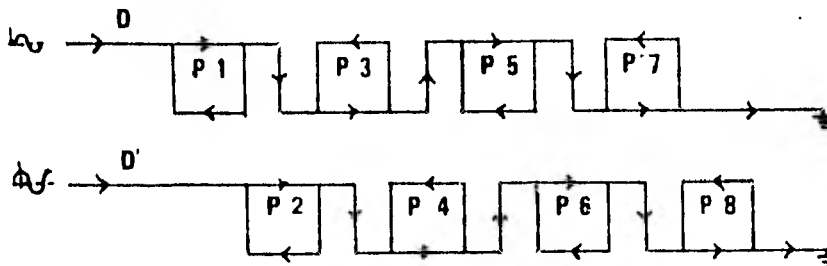


Fig. 3.3

Diagrama de Enrollamientos.

Como puede observarse, el sentido de los enrollamientos es el mismo tanto en D como en D' ; esto, da como resultado, que al paso de la corriente se genere un campo magnético rotativo.

Es fácil deducir que la inserción de las espiras en las ranuras del estator debe efectuarse con extremo cuidado con el fin de evitar que el barniz usado como aislante eléctrico se desprenda y produzca pérdidas por cortos circuitos en los devanados y con el hierro.

La alimentación del motor de inducción se hace con un oscilador de frecuencia variable amplificando la señal posteriormente; esto quiere decir que se trata de alimentación monofásica, sin embargo, el motor requiere de dos señales alternas desfasadas entre sí, por lo que se empleará un capacitor electrolítico para este propósito.

El diagrama de bloques del sistema se presenta en la Fig. 3.4.

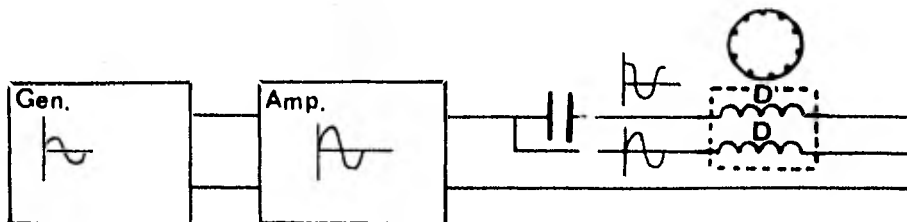


Fig. 3.4

Diagrama de Bloques del Sistema.

La secuencia en el diagrama de bloques del sistema, de una onda senoidal es la siguiente:

La onda es generada en el oscilador y transmitida posteriormente

al circuito amplificador; en este elemento la onda conserva su frecuencia original, aumentando únicamente la amplitud o valor pico. Posteriormente se conectan en paralelo los devanados, uno de ellos es afectado por un capacitor en serie. Si el valor de éste es apropiado, se produce un retraso de fase de  $90^\circ$  con respecto al voltaje aplicado al otro devanado.

Esta división de fase hace el papel de dos osciladores independientes, produciendo así, el campo magnético rotativo a partir de corriente monofásica.

## CAPITULO IV.

### Resultados y Sugerencias.

#### IV.1.- Resultados.

Concluído el período de construcción del impulsor de alta velocidad se procedió a integrarlo a un sistema en donde la barra del rotor se mantiene suspendida y centrada magnéticamente, pudiendo girar libremente y sin fricción. Constituido el sistema, se desarrollaron diversas experiencias con el objeto de determinar experimentalmente la capacidad del condensador que dió lugar al desfaseamiento de  $90^\circ$  entre los voltajes alternos aplicados a los devanados cuando se proporciona una frecuencia determinada; así mismo, se encontró la velocidad angular máxima ( $\omega'$ ) que adquiere el rotor y su relación con la velocidad angular ( $\omega$ ) del campo magnético rotativo. Finalmente y apoyado en las pruebas de velocidad, se obtuvo la aceleración angular ( $\alpha$ ), la torca ( $\tau$ ) y la eficiencia del motor.

Los resultados experimentales que a continuación se presentan, se obtuvieron con la ayuda de instrumentos electrónicos. El método seguido fué el siguiente: Previo al inicio de las pruebas, se oscureció una sección del rotor con el objeto de generar una señal en forma de pulsos en un detector óptico; esta señal fué enviada a un contador universal, el cual muestra digitalmente el número de pulsos que recibe del detector en la unidad de tiempo (1



seg.). Cada pulso corresponde a una vuelta completa o revolución. Con un convertidor D-A, la señal del detector fue transmitida a un graficador  $x-t$  con el que se obtuvieron los trazos de las diferentes experiencias. Se obtuvieron así las curvas de velocidad angular respecto del tiempo, información que permitió encontrar los resultados que se exponen a continuación.

La tabla No. 1 muestra los valores de la capacidad adecuados a cada frecuencia para que se produzca el desfase de  $90^\circ$  entre los voltajes alternos aplicados a cada uno de los devanados.

CAPACIDAD ( $\mu\text{F}$ )	FRECUENCIA (Hz)
102	85
35	200
24	280
16	340
8	560
3	970
1.5	1500
0.68	2000

Tabla No. 1

Relación Capacidad frecuencia.

Puede observarse que existe un solo valor de capacidad y disminuye a medida que la frecuencia aumenta.

Es claro que la velocidad angular de campo rotativo ( $\omega$ ) depende

directamente de la frecuencia de alimentación, del número de polos y del número de fases; esta dependencia se expresa por la relación:

$$\omega = \frac{f \times 120}{N_p \text{ Polos} / N_f \text{ Fases}} \quad (\text{r.p.m.})$$

en donde  $\omega$  es la velocidad del campo expresada en revoluciones por minuto,  $f$  la frecuencia de alimentación expresada en Hertz y el número de polos y el número de fases depende de como esté conformado el devanado del estator y de las fuentes disponibles.

Para este caso, se tiene un estator de 8 polos y voltajes alternos desfasados  $90^\circ$  entre sí; de aquí se deduce que la máxima velocidad angular del campo rotativo es:

$$\omega = 30f \quad (\text{r.p.m.})$$

o bien en revoluciones por segundo

$$\omega = \frac{1}{2} f$$

Debido a que se trata de un motor de inducción, la velocidad angular  $\omega'$  del rotor siempre será menor que la velocidad sincrónica ( $\omega$ ). Las siguientes gráficas presentan los resultados encontrados en dos de las experiencias realizadas.

En la Fig. 4.1a se aplicó una frecuencia de 85 Hertz, por lo que la velocidad angular del campo resulta de

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{1}{2} f \\ \omega &= 42.5 \text{ r.p.s.} \end{aligned}$$

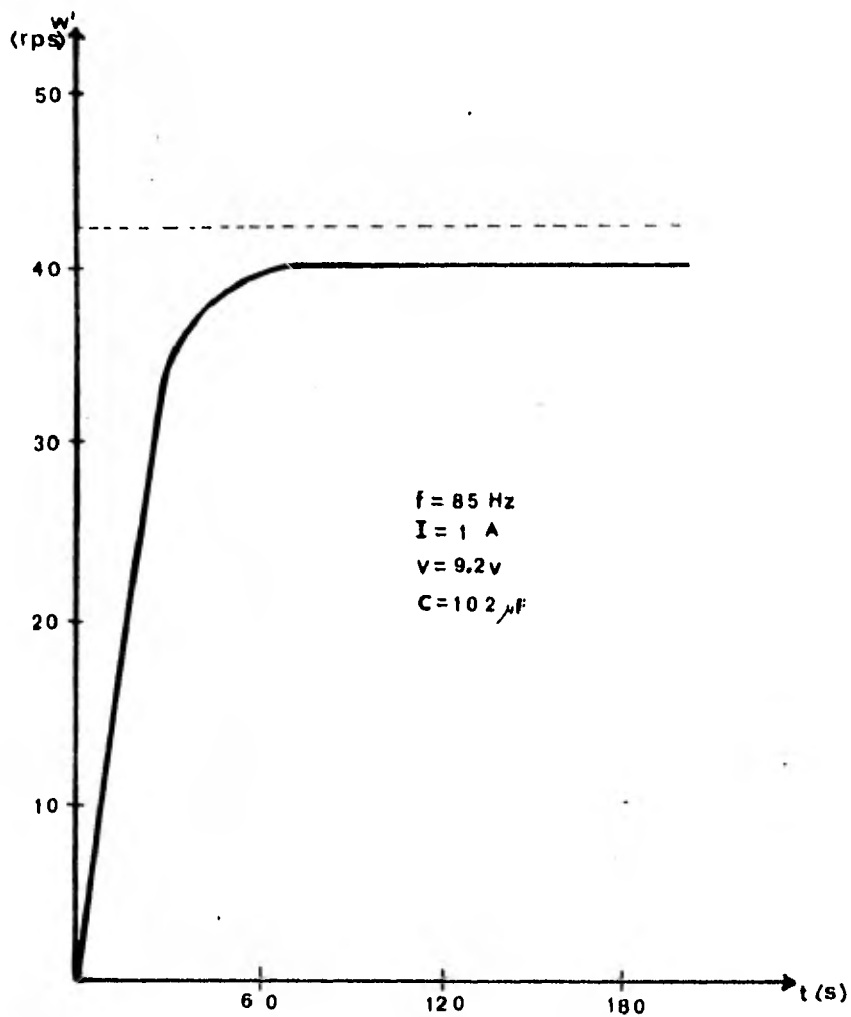


Fig. 4.1.a

Comportamiento del Motor de Inducción con una Frecuencia de Alimentación fija.

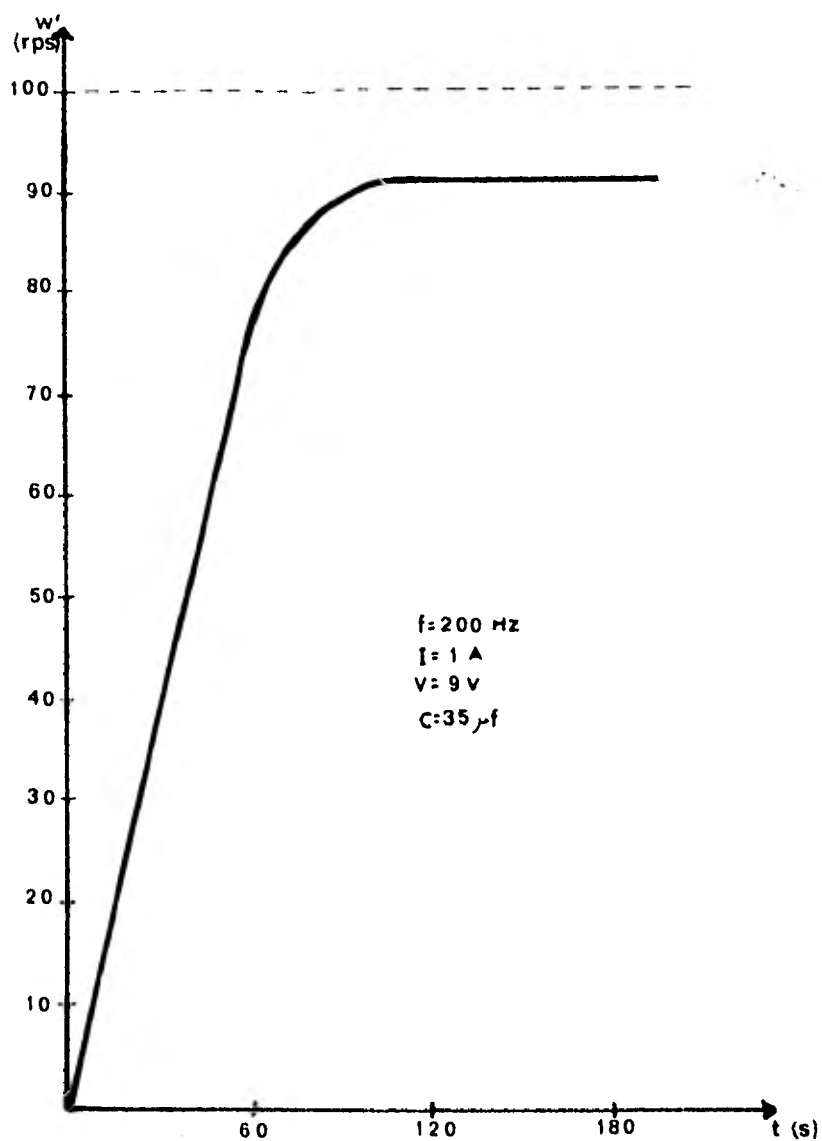


Fig. 4.1.5

Comportamiento del Motor de Inducción con una frecuencia de Alimentación fija.

el voltaje aplicado fué de 9.2 volts y la corriente asociada de 1 Ampere.

Las curvas de velocidad angular muestran tres regiones importantes, la primera de ellas representa, por ser una región lineal, un período de aceleración constante, la segunda, un período no lineal en el cual el aumento de la velocidad es menor y tiende a estabilizarse con un valor máximo en el que se mantiene durante el resto de la operación. esta situación se obtiene en la tercera región. Para este caso la velocidad angular del campo resultó de

$$\omega = 42.5 \text{ r.p.s.}$$

y la velocidad angular máxima del rotor en la región estable de

$$\omega' = 39 \text{ r.p.s.}$$

lo que significa que la velocidad  $\omega'$  es de aproximadamente el 94% de la velocidad sincrónica.

La Fig. 4.1.b muestra otra de las experiencias, en la cual la frecuencia de alimentación fue incrementada a 200 Hertz, por lo que la velocidad sincrónica ( $\omega$ ) resulta de 100 r.p.s.

Al igual que en la primera experiencia, el gráfico presenta tres regiones que corresponden a una aceleración lineal, a una disminución de la aceleración y el resto de la operación a una velocidad constante.

En este caso  $f = 200$  Hertz por tanto  $\omega = 100$  r.p.s.; en el gráfico aparece la velocidad máxima del rotor

$$\omega' = 94 \text{ r.p.s}$$

lo que significa un 6% abajo de la velocidad sincrónica.

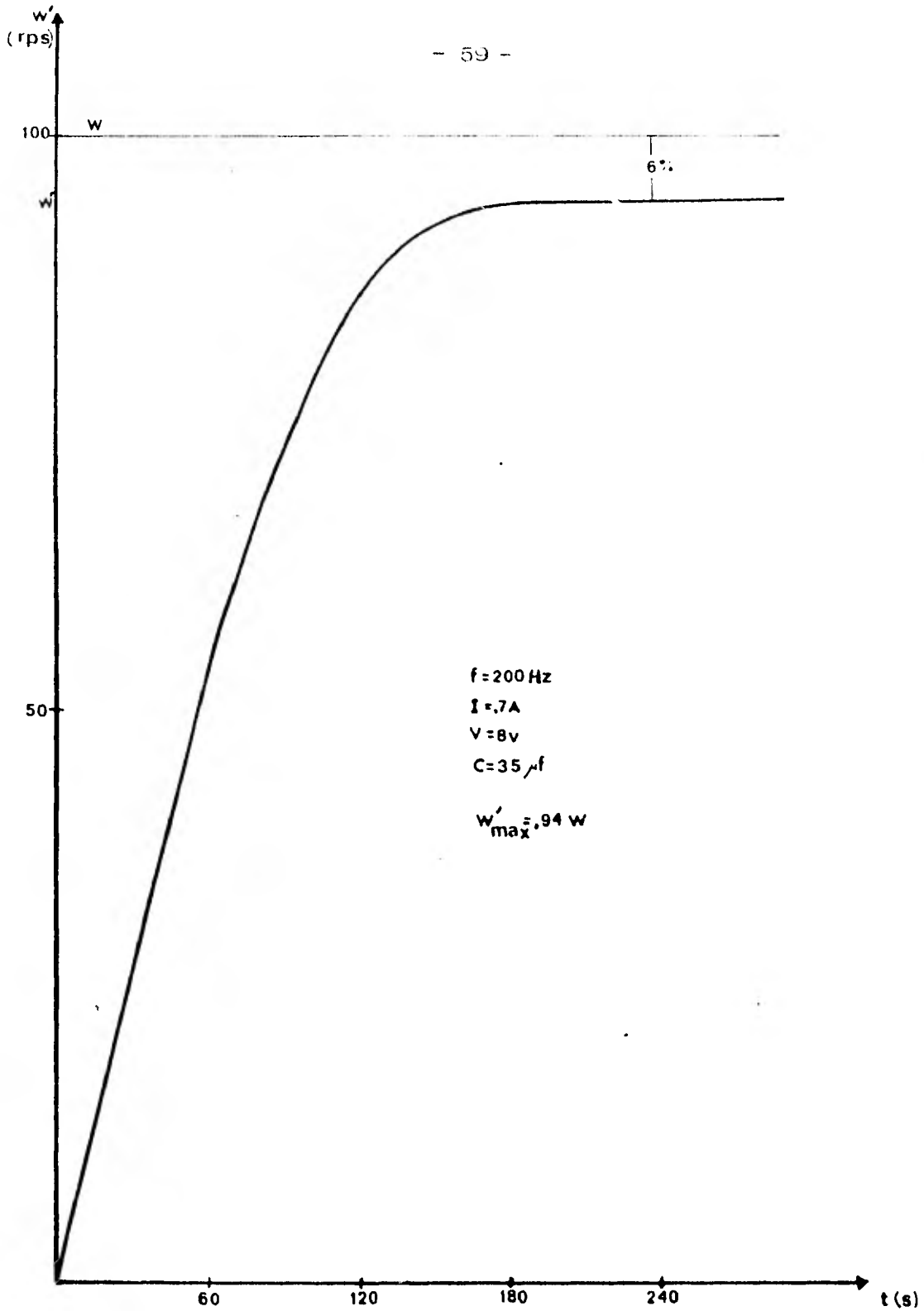


Fig. 4.2

Tendencia asintótica de la Velocidad Angular de un Motor de Inducción.

En las dos situaciones presentadas, así como en el resto de las experiencias (Pruebas con diferentes frecuencias) se encontró que la velocidad angular máxima  $\omega'$  tiene como límite un promedio del 6% por abajo de la velocidad del campo. (Fig. 4.2).

De las diversas experiencias, se encontró, como la muestran las gráficas anteriores, que la aceleración angular disminuye a medida que la frecuencia de alimentación aumenta.

Este hecho se presenta claramente en la Fig. 4.3

Este hecho resulta importante, ya que la torca del sistema es proporcional a la aceleración angular.

El siguiente cuadro (Tabla No. 2) presenta para cada frecuencia, el valor correspondiente obtenido de la aceleración angular ( $\alpha$ ) en  $\frac{\text{rad}}{\text{seg}^2}$  y la torca equivalente a cada una de ellas.

$f$ (Hz)	$\alpha$ ( $\text{seg}^{-2}$ )	$\tau$ ( $\text{kg m}^2 \text{seg}^{-2}$ )
85	14.61	$7.98 \times 10^{-3}$
200	8.37	$4.57 \times 10^{-3}$
260	5.87	$3.20 \times 10^{-3}$
340	4.27	$2.33 \times 10^{-3}$
560	2.08	$1.13 \times 10^{-3}$
970	1.20	$0.65 \times 10^{-3}$
1500	0.87	$0.47 \times 10^{-3}$
2000	0.65	$0.35 \times 10^{-3}$

Tabla No. 2

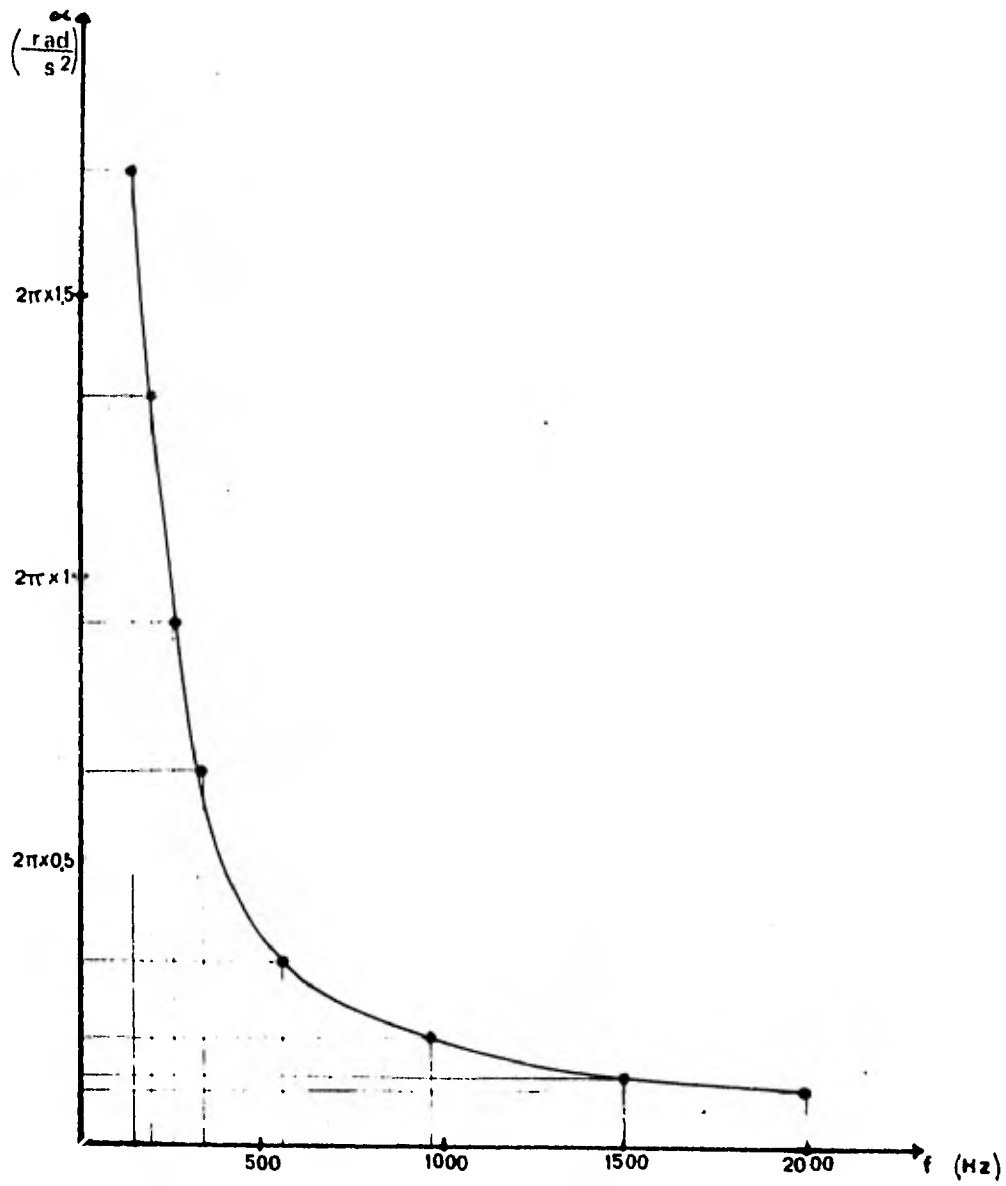


Fig. 4.3

Influencia de la Frecuencia de Alimentación en la Aceleración.



La constante de proporcionalidad para valuar la torca es el momento de inercia  $I_{zz}$ . Puesto que se trata de un cilindro que gira sobre su eje, se calculó directamente, encontrándose el siguiente valor

$$I_{zz} = 5.4653 \times 10^{-4} \text{ Kg m}^2$$

de tal forma

$$\tau = 5.4653 \times 10^{-4} \alpha$$

En la región lineal de aceleración, la torca disminuye cuando se aplica a los devanados altas frecuencias, lo que implica una reducción en el par motor; esta situación se ilustra claramente en la Fig. 4.4.

Uno de los puntos importantes del presente trabajo fué obtener la eficiencia del motor de inducción operado como impulsor de alta velocidad; esto implicó calcular la energía suministrada en las diferentes experiencias y compararla con la energía entregada por el rotor cuando ha llegado a una velocidad determinada.

La potencia entregada por la fuente de corriente y voltaje alternos se determina por la relación

$$P = IV \cos \theta$$

en donde  $\theta$  es el ángulo de desfase entre el voltaje alterno y la corriente asociada. Es posible que la relación anterior se transforme simplemente en  $P = IV$  si el ángulo de desfase es nulo; así  $\cos 0 = 1$ , lo que implica que la corriente y el voltaje tienen la misma fase. Este efecto se consiguió usando un capacitor adecuado para que se anule la diferencia de fase debida a la inductancia de los devanados. El condensador resultó del mismo valor que el requerido para producir el desfase de  $90^\circ$  en los volta-

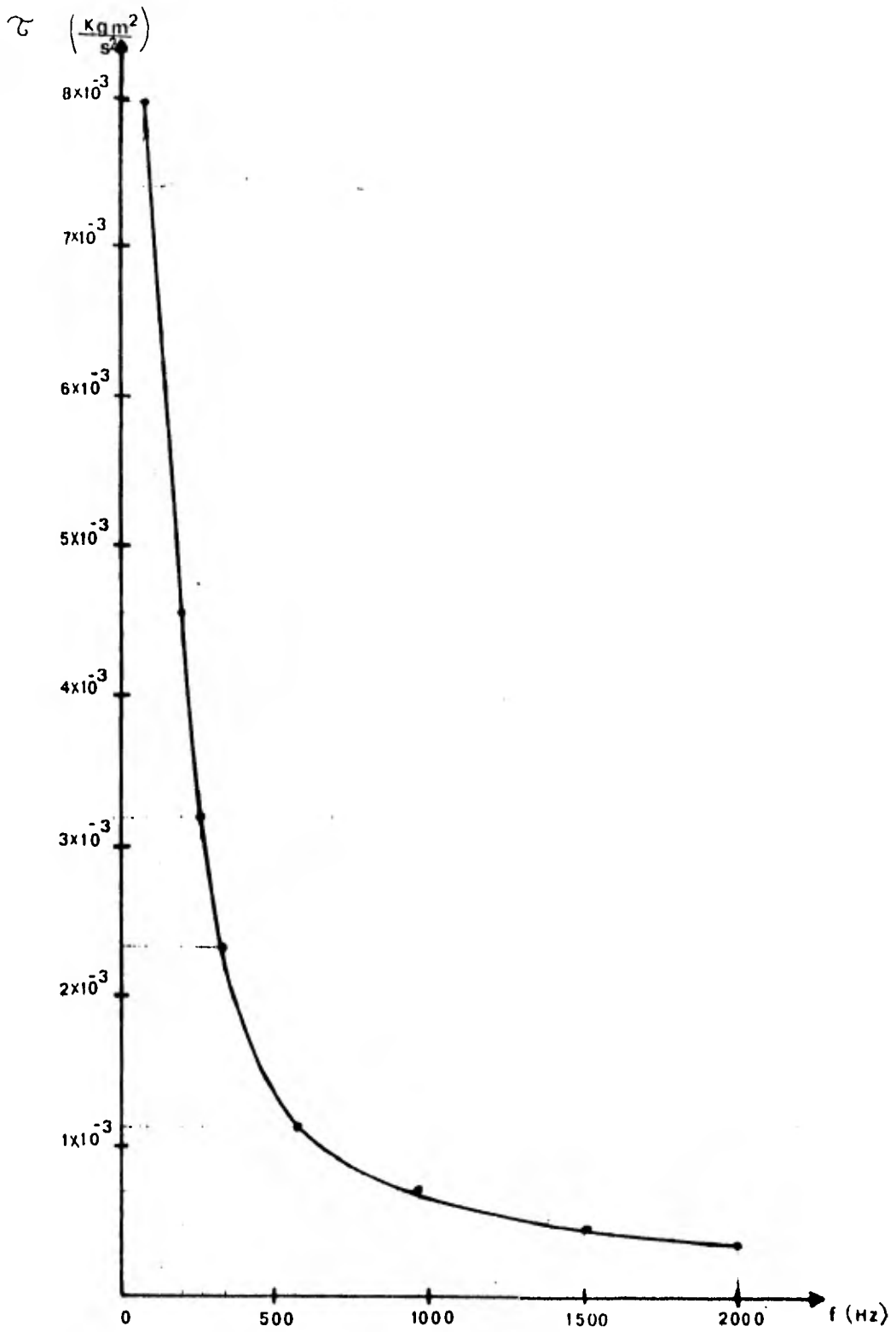


Fig. 4.4

Influencia de la Frecuencia de Alimentación en la Torca del Sistema.

jes alternos aplicados a los devanados con una frecuencia específica.

La siguiente tabla muestra la eficiencia del impulsor a diferentes frecuencias de alimentación.

$f$	$\epsilon$
85	12 %
200	8 %
570	3 %

Tabla No. 3

#### IV.2.- Sugerencias.

Los resultados experimentales obtenidos y que se han presentado antes , llevan a concluir que el empleo de motores de inducción como impulsores de alta velocidad es factible, así mismo se sugiere que: para el mejor aprovechamiento de la energía con que se alimenta al impulsor, el período de aceleración se lleve a cabo paulatinamente, es decir, se aproveche que la torca del sistema es grande cuando las frecuencias de alimentación son relativamente bajas. Se sugiere también que la frecuencia de alimentación sea relativamente cercana y por encima de la velocidad angular deseada.

## BIBLIOGRAFIA

1. - Brophy, J., Basic electronics for scientists, Mc.Graw Hill, 3a. Edición, 1977.
- 2.- Corrales Martin, J., La máquina eléctrica, Ed. Labor, 1a. Edición, 1969.
- 3.- Crosno, D., Fundamentals of electromechanical conversion, Harcourt, Brace & World Inc., 1a. Edición, 1968.
- 4.- Kuhlman, J., Diseño de aparatos eléctricos, C.E.C.S.A., 1a. Edición, 1959.
- 5.- Langsdorf, A., Teoría de las máquinas de corriente alterna, Mc.Graw Hill, 2a. Edición, 1955.
- 6.- Matsch, L., Máquinas electromagnéticas y electromecánicas, Representaciones y servicios de Ingeniería, 1a. Edición 1974.
- 7.- Reitz, L., Foundations of electromagnetic theory, Addison Wesley Publ. Comp., 2a. Edición, 1975.
- 8.- Sears, F., Electricidad y magnetismo, Aguilar, 6a. Edición, 1972.
- 9.- Slater, J., Electromagnetism, Dover Publ., 1a. Edición, 1974.