



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL  
Depto. de Ingeniería Eléctrica  
BIBLIOTECA

Lav. No. FOT-096

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**  
**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA**

**“Construcción de un Modelo Experimental a Escala, de un Vehículo de Transporte Impulsado por un Motor Lineal de Inducción”**

**TESIS DE GRADO**

**Previa a la Obtención del Título de**  
**INGENIERO en ELECTRICIDAD**

**Especialización: P O T E N C I A**

**Presentada por:**

**WELLINGTON BERMUDEZ HIDALGO**

*Guayaquil - Ecuador*

**1986**

## AGRADECIMIENTO

Al Ing. Gustavo Bermúdez  
Director de Tesis, por su  
valiosa colaboración para  
la realización de este  
trabajo.

DEDICATORIA

A MI MADRE

A MI ESPOSA

A MI HIJO



Ing. Cristóbal Mera  
Decano de la Facultad  
de Ing. Eléctrica



Ing. Gustavo Bermúdez  
Director de Tesis



Ing. Carlos Becerra E.  
Miembro del Tribunal



Ing. Jorge Flores M.  
Miembro del Tribunal

## DECLARACION EXPRESA

" La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente, y , el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL ".

( Reglamento de Exámenes y títulos profesionales de la ESPDL )



Wellington Ottón Bernádez Hidalgo

## RESUMEN

Este trabajo comprende la construcción de un modelo a escala de vehículo de transporte impulsado por un motor lineal de inducción, como parte de un proyecto general originado en la Facultad de Ingeniería Eléctrica cuyo objetivo final es la construcción de un vehículo de transporte el cual podría usarse para transportar al personal que labore en el futuro Campus Politécnico.

Las pruebas realizadas sobre el modelo construido, permiten determinar sus características de funcionamiento a frecuencia de 60 Hertz, sin embargo para predecir el comportamiento de la máquina de dimensiones reales será necesaria la construcción de un convertidor de frecuencia que permita probar el modelo a la frecuencia de diseño, esto es 3600 Hz. Las características nominales de dicho convertidor se proponen en esta tesis.

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	VI
INDICE GENERAL.....	VII
INDICE DE FIGURAS.....	XII
INDICE DE TABLAS.....	XIX
INDICE DE PLANOS.....	XXII
SIMBOLOGIA.....	XXIV
INTRODUCCION.....	28

### CAPITULO I

PRINCIPIOS TEORICOS DEL MOTOR LINEAL.....	31
1.1. Semejanzas y diferencias entre los motores de inducción lineal y las máquinas de inducción rotativas.....	33
1.2. Clasificación de los motores lineales.....	37
1.3. Aplicaciones de los motores lineales.....	44
1.4. Fenómenos especiales que se presentan en las máquinas de inducción lineal.....	48
1.4.1. Efectos longitudinales de borde....	48
1.4.2. Efectos transversales de borde.....	52

1.4.3.	Efecto de piel.....	54
1.4.4.	Flujos de dispersión en el entre- hierro.....	55

## CAPITULO II

	CRITERIOS DE DISEÑO DE LA MAQUINA.....	58
2.1.	Ecuaciones básicas de diseño y curvas experimentales a usarse.....	59
2.1.1.	Consideraciones básicas.....	59
2.1.2.	Parámetros del circuito equiva- lente.....	64
2.1.3.	Ecuaciones para calcular la efi- ciencia.....	69
2.2.	Procedimiento para diseñar los parámetros del núcleo primario y la riel secundaria..	71
2.2.1.	Consideraciones para el diseño...	71
2.2.2.	Pasos recomendados a seguir en el diseño.....	76
2.3.	Criterios para seleccionar factores a es- cala.....	80
2.3.1.	Objetivos del modelo a escala....	80



2.3.2. Factores de escala.....	81
2.4. Parámetros de diseño de la máquina real , factores de escala, y parámetros de construcción del modelo. Resultados esperados.....	83
CAPITULO III	
CONSTRUCCION DEL MODELO A ESCALA.....	104
3.1. Materiales a usarse en la construcción.	104
3.2. Construcción del núcleo magnético primario.....	110
3.3. Construcción del devanado primario....	120
3.4. Construcción de la riel de reacción secundaria.....	125
3.5. Construcción del sistema de toma de energía .....	128
3.6. Sistema de control simple.....	133
3.6.1. Control para arranque / parada e inversión de marcha.....	133
3.6.2. Cambio de velocidad.....	135
3.7. Descripción del sistema mecánico.....	137

## CAPITULO IV

PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	142
4.1. Pruebas en vacío y vehículo bloqueado..	142
4.2. Medida de la densidad de flujo en el entrehierro.....	145
4.3. Pruebas de comportamiento al arranque y en estado estable.....	147
4.4. Pruebas de eficiencia.....	150

## CAPITULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	152
5.1. Determinación del circuito equivalente eléctrico.....	152
5.2. Cálculo de la eficiencia del modelo.....	156
5.3. Cálculo de la eficiencia de la máquina real.....	158
5.4. Cuadro comparativo entre resultados teóricos y experimentales.....	159
5.5. Justificación técnica de la máquina real.....	160
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	162

## APENDICES

A. Planos descriptivos del Troquel.....	167
B. Planos descriptivos de partes mecánicas y eléctricas del modelo .....	176
BIBLIOGRAFIA.....	187

## INTRODUCCION

A comienzos del año 1950 se ha planteado el uso de motores lineales para impulsar vehiculos de transporte de personas a baja, mediana y gran capacidad , como solución a los problemas de contaminación , consumo de energía, ruido y riesgos característicos de los medios normales de transporte por tierra usados en la actualidad.

Como consecuencia del continuo incremento de la población y por lo tanto aumento en los problemas inherentes al transporte, será casi ineludible el uso de este tipo de transporte en el proximo siglo.

Construir un Motor de Inducción Lineal ( MIL ) de gran capacidad , para usarlo en el transporte urbano, interprovincial o entre países, requiere gran cantidad de estudios y pruebas previo, los cuales comprenden los diseños teóricos, construcción de modelos de laboratorio, construcción de modelos de mediana capacidad y construcción de vehiculos reales con pequeños tramos de recorrido.

Actualmente países desarrollados como Japón, Alemania, Inglaterra, Estados Unidos, Canadá, Rumanía, poseen vehículos reales de prueba con tramos de recorrido de hasta 30 Kilómetros y velocidades entre 80 y 500 Km/Hr.

El objetivo fundamental de esta tesis es construir un modelo a escala de un MIL de dimensiones reales que impulsará un vehículo de transporte, en base a un diseño previamente establecido. Esta tesis consta de 5 capítulos :

En el capítulo I se revisarán conceptos teóricos sobre el motor lineal de inducción, principalmente las características que lo diferencian de las máquinas de inducción giratorias.

En el capítulo II se hace una revisión al diseño realizado en una tesis anterior, usando el método del circuito equivalente eléctrico para establecer los parámetros de construcción del modelo.

En el capítulo III se explican los procedimientos y materiales que se usaron para construir el modelo a escala.

En el capítulo IV se explican las pruebas experimentales que se realizan sobre el modelo, para determinar sus

características de funcionamiento.

En el capítulo V se analizan los resultados de las pruebas experimentales cuyo objetivo es el tratar de predecir el comportamiento de la máquina de dimensiones reales.

Finalmente se plantean los pasos a seguir para llevar adelante el proyecto cuyo objetivo final es construir un vehículo de transporte de personas.

## CAPITULO I

### PRINCIPIOS TEORICOS DEL MOTOR LINEAL DE INDUCCION

La idea del Motor Lineal de Inducción es, quizás, contemporánea a la creación de la máquina de campo rotativa. A partir de 1885 , ya se tienen pruebas de su aparición, al encontrarse varias patentes presentadas por ingenieros europeos, en las cuales se le dan aplicaciones en el transporte , en bombas , y en osciladores.

El uso de una máquina de inducción para producir un movimiento lineal sin usar ningún convertidor mecánico, es consecuencia de cambiar las dimensiones y formas de los circuitos magnéticos y eléctricos de una máquina de inducción rotativa.

En este capítulo se analizarán aspectos teóricos sobre el principio de funcionamiento de estas máquinas, se presentará un breve resumen sobre los diferentes tipos de máquinas lineales de inducción, y finalmente se hablará sobre sus mas importantes aplicaciones prácticas.

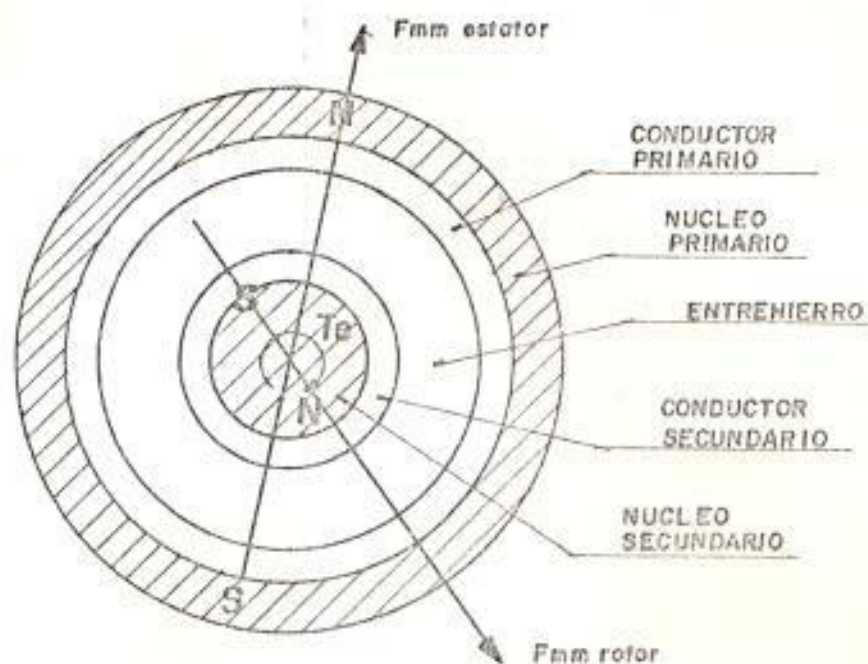


Fig. 1.1. Interacción de campos magnéticos en una máquina de inducción giratoria

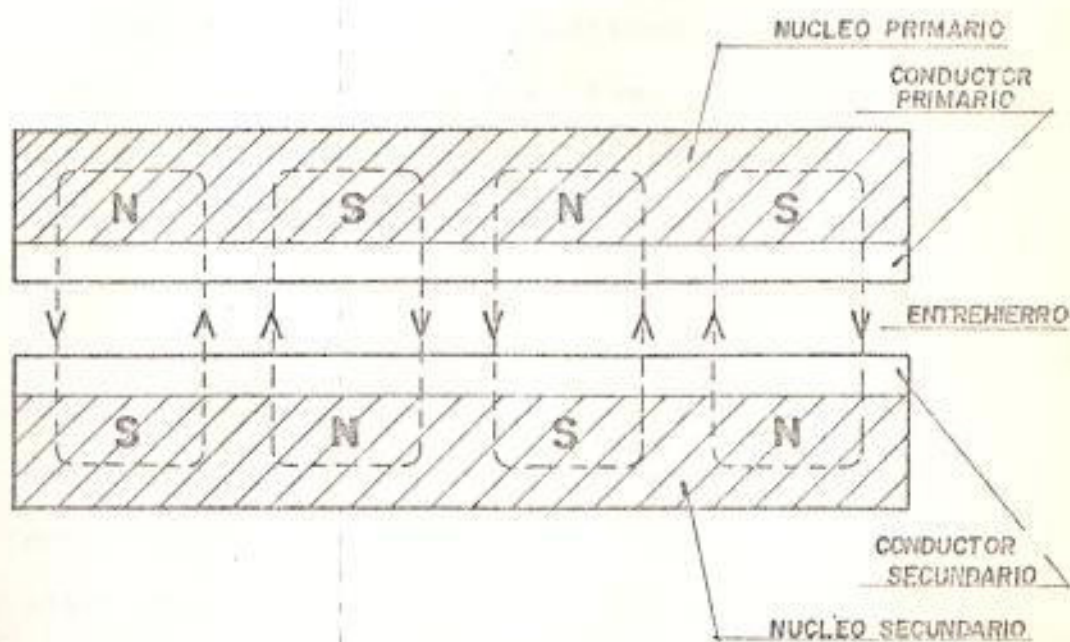


Fig. 1.2.- Campo longitudinal en un mil



### 1.1 SEMEJANZAS Y DIFERENCIAS ENTRE LOS MOTORES DE INDUCCION LINEAL Y LAS MAQUINAS DE INDUCCION ROTATIVAS.

El principio de funcionamiento y los elementos constitutivos sin considerar formas, constituyen las semejanzas entre las máquinas de inducción lineal y las rotativas.

Del estudio de la teoría de máquinas de inducción, se sabe, que el movimiento del rotor en una máquina convencional, se debe a la interacción de 2 campos magnéticos giratorios. El campo primario creado por las corrientes del devanado primario, gira a la velocidad de sincronismo induciendo FEM'S en los conductores del devanado secundario, estas FEM'S originan corrientes secundarias que crean un flujo de reacción secundaria, el cual gira también a la velocidad de sincronismo. La interacción de estos dos campos magnéticos da origen al torque electromagnético, el cual produce el giro del motor, ver fig 1.1 .

En los motores de inducción lineal se tiene una situación similar, pero con las siguientes modificaciones:

- a) Los campos magnéticos, tanto primario como Secundario, a diferencia de las máquinas rotativas, son traslatorios o de movimiento longitudinal. ver fig 1.2.
- b) La interacción de los campos magnéticos primario y secundario, origina dos tipos de fuerzas:
  - 1. Fuerza de empuje o movimiento longitudinal
  - 2. Fuerza normal al movimiento relativo entre el primario y el secundario Fig 1.3.

Los elementos constitutivos, tanto de las máquinas rotativas como de las lineales, tienen, salvo algunas excepciones, materiales de construcción semejantes. La fig 1.4 nos muestra el proceso mediante el cual se obtiene una máquina lineal a partir de una máquina rotativa.

Con la finalidad de que las condiciones

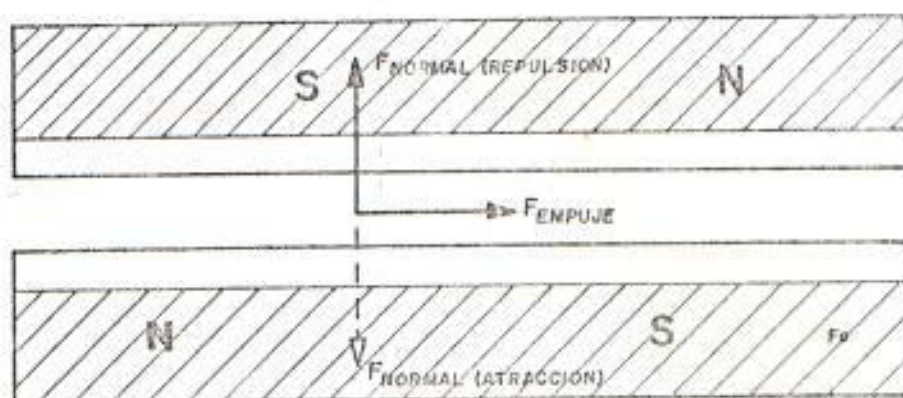


Fig. 1.3. - Fuerza de empuje normal y longitudinal en un mil

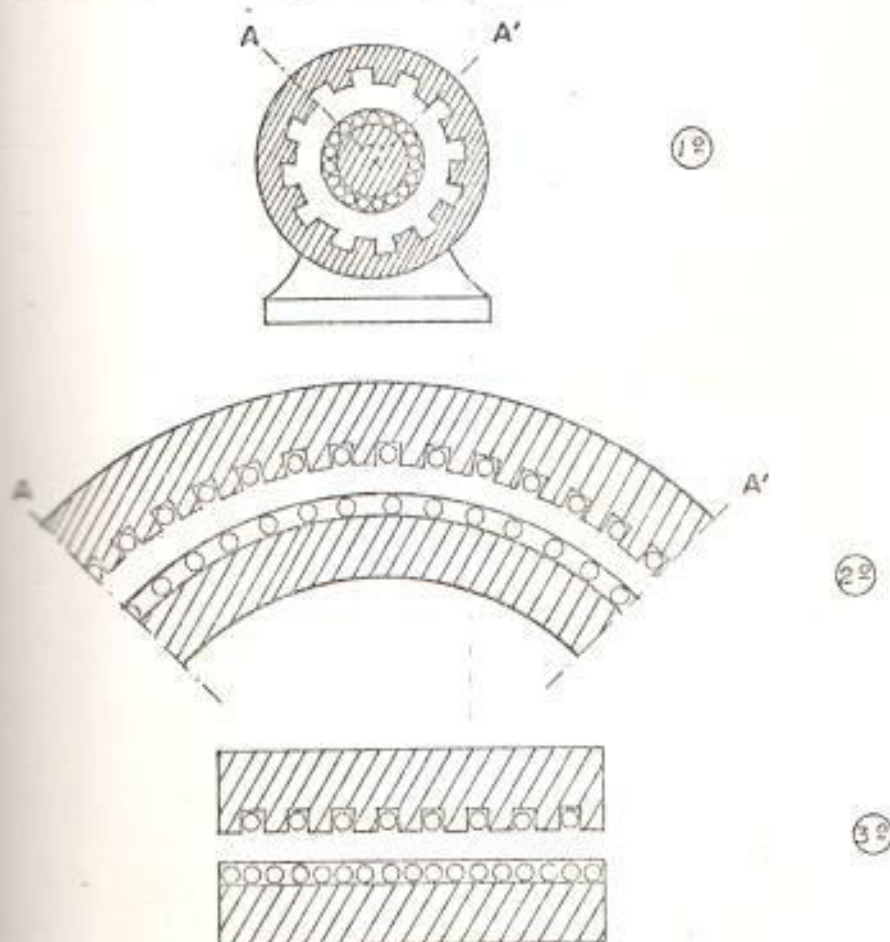


Fig. 1.4. - Desarrollo lineal de una mequina de Inducción giratoria

necesarias para el movimiento de las máquinas lineales se mantenga, uno de sus miembros ( primario o secundario ) debe extenderse en una longitud igual o superior al desplazamiento máximo del miembro móvil (primario o secundario).

Estas diferencias fundamentales de formas y dimensiones son la causa de que en las máquinas lineales se presenten los llamados " Efectos Especiales de Borde ", los cuales reducen su rendimiento, debiendo tomárselos en cuenta en su diseño. Además por razones mecánicas es necesario que muchos motores se construyan con un entrehierro de mayor tamaño comparado con el de una máquina rotativa convencional, esto lógicamente disminuye el factor de potencia de las máquinas lineales.

## 1.2 CLASIFICACION DE LOS MOTORES LINEALES DE INDUCCION.-

La figura 1.5 muestra el motor de inducción lineal ( MIL ), que resulta de desarrollar linealmente una máquina de inducción rotativa.

Para que se sigan cumpliendo las condiciones de funcionamiento, una vez que la parte móvil se ha desplazado, es necesario extender uno de los dos miembros en una longitud igual o mayor a la cantidad de movimiento requerida, por tanto se tiene , MIL de primario corto y MIL de primario largo, ver Fig 1.6 a,b .

A diferencia de las máquinas de inducción rotativas, en el MIL, el primario o secundario pueden ser las partes móviles, tenemos así MIL de primario móvil y MIL de secundario móvil.

En los MIL no siempre es necesario que el devanado secundario tenga un núcleo magnético, además el conductor secundario es una lámina o capa compacta de Cu o Al, por lo tanto se tienen MIL tipo secundario compuesto Fig 1.7a, y MIL tipo secundario de capa conductora Fig 1.7b .

El MIL de la Fig 1.8 es del tipo Plano, o sea que

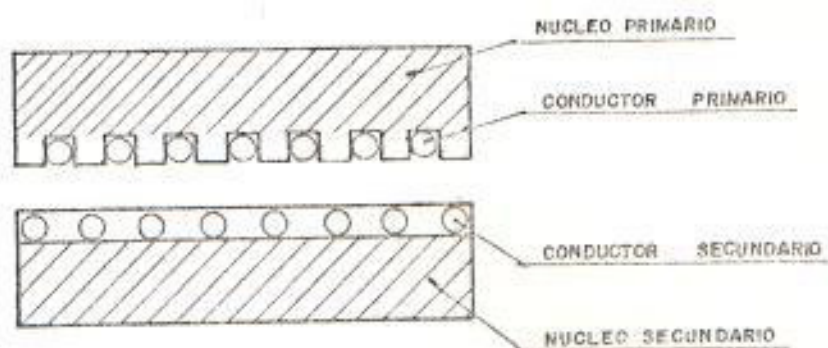


Fig. 1.5. - Configuración resultante de desarrollar linealmente una máquina de inducción giratoria

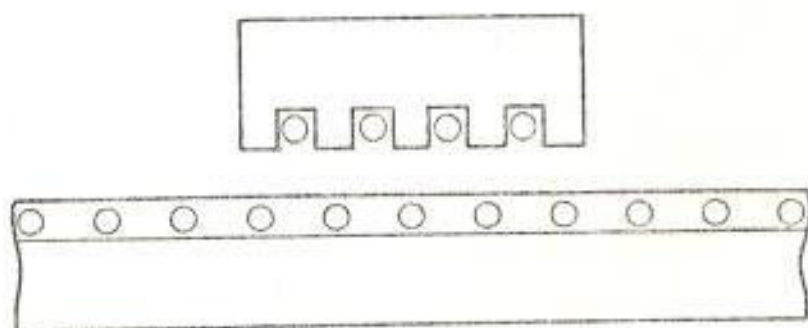


Fig. 1.6a. - MII tipo primario corto

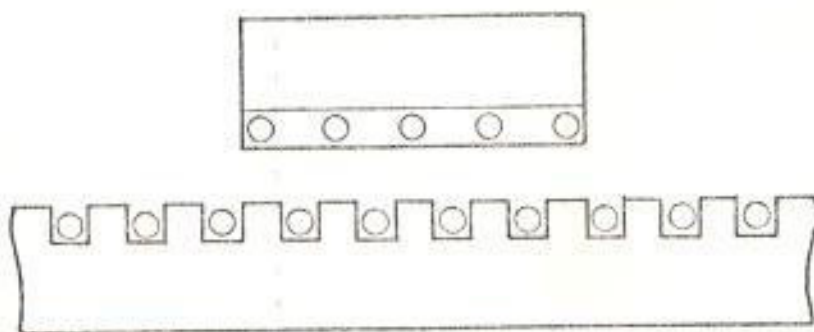


Fig. 1.6b. - MII tipo primario largo

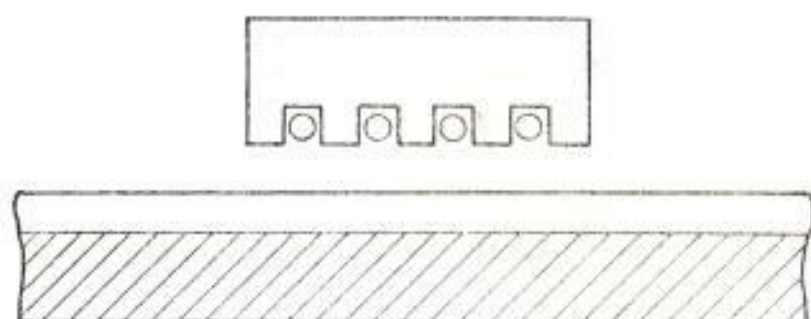


Fig. 1.7.a. - MII tipo Secundario compuesto

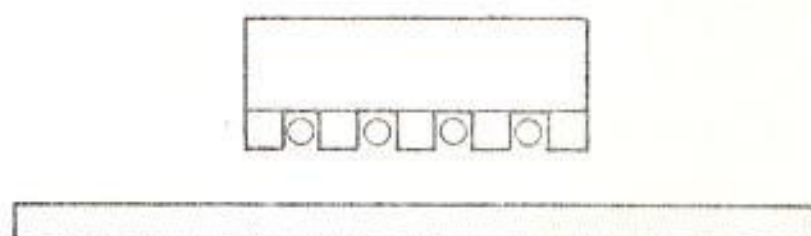


Fig. 1.7.b. - MII tipo secundario de capa conductora

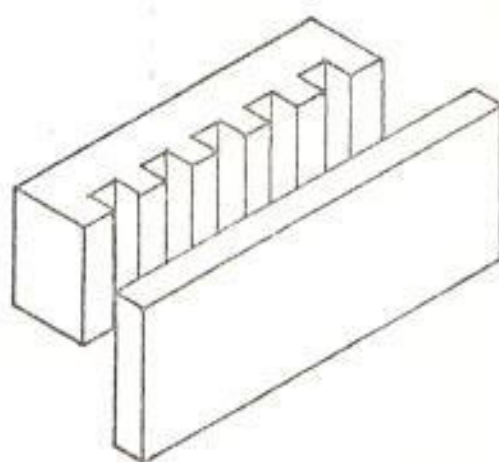


Fig. 1.8. - MII tipo plano

tanto las superficies del primario como del secundario tienen esa forma. Si imaginariamente enrolamos dicho motor, tendremos un MIL Tubular Fig 1.9 .

El flujo magnético en los MIL, puede desplazarse en el espacio en la dirección del movimiento, estos son motores de flujo longitudinal Fig 1.10 a, o puede el flujo magnético estar en un plano perpendicular a la dirección de movimiento, llamándose entonces motores de Flujo Transversal, Fig 1.10 b.

Adicionalmente los MIL se clasifican de acuerdo al tipo de devanado que tengan en el primario: tipo superficial Fig 1.11 a, y tipo anillo de Gramme, Fig 1.11 b.

Por último es posible ubicar simétricamente con respecto al secundario dos núcleos magnéticos, se tiene entonces el MIL de doble lado magnético ( bilateral ), el cual puede devanarse en un solo lado o ambos, Fig 1.12 a, y 1.12 b.



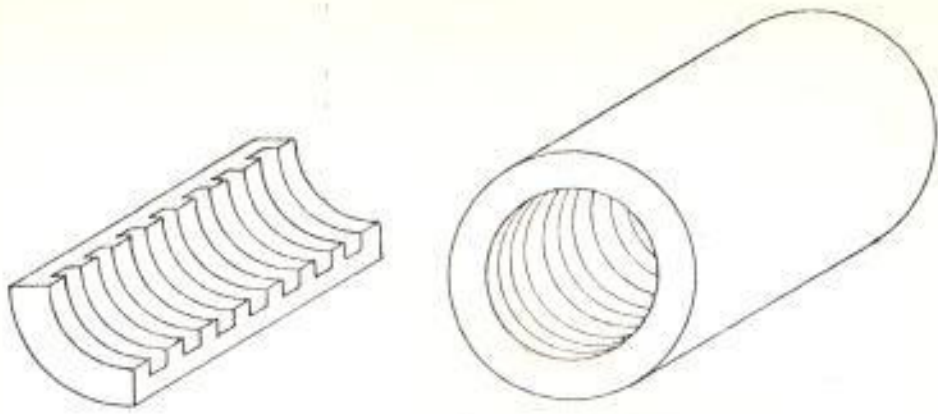


Fig. 1.9. - Mil tubular

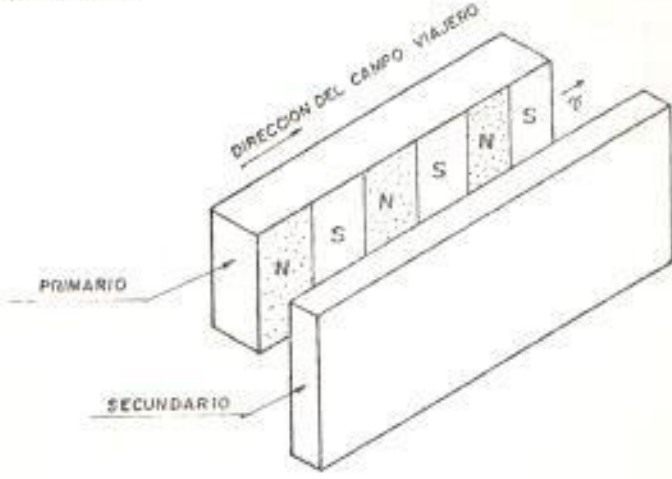


Fig. 1.10a. - Mil de flujo longitudinal

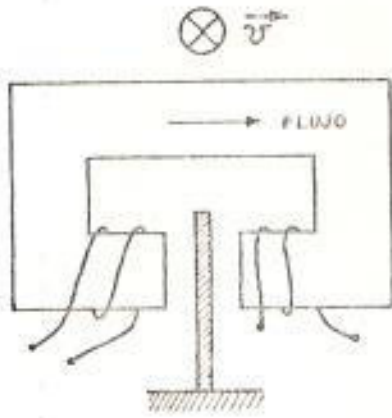


Fig. 1.10b. - Mil de flujo transversal

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS  
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN FÍSICA  
CARACAS, VENEZUELA

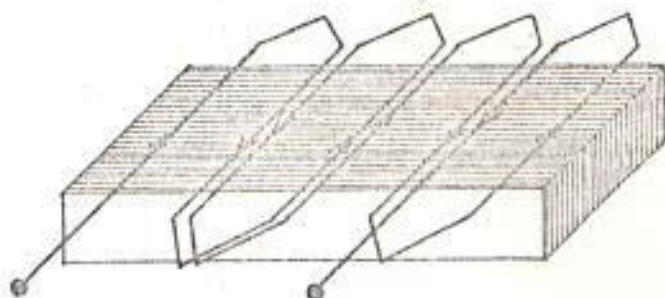


Fig. 1.11a.- MII tipo devanado superficial

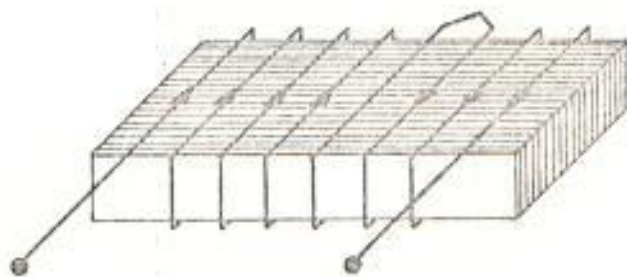


Fig. 1.11b.- MII tipo devanado anillo de GRAMME

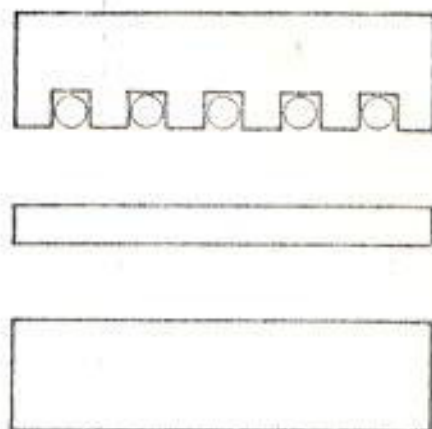


Fig. 1.12c.- Mil de doble lado magnético y simple eléctrico

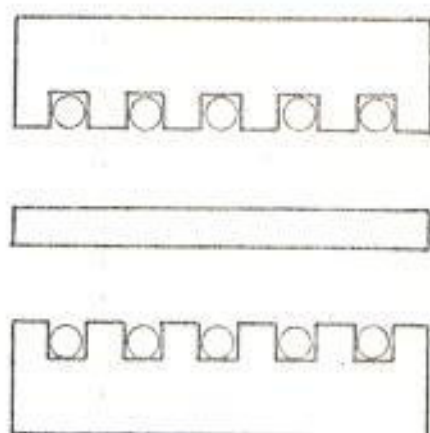


Fig. 1.12b.- Mil de doble lado electromagnético

### 1.3 APLICACIONES DE LOS MOTORES LINEALES.-

Los motores lineales son aplicables en situaciones donde se utilizan motores giratorios gracias a las siguientes ventajas :

- a.- No existen convertidores mecánicos de movimiento giratorio-lineal.
- b.- Fácil mantenimiento, reparación, y cambio de repuestos.
- c.- Habilidad para ejercer empuje sobre el secundario sin contacto mecánico.
- d.- Conveniente control de su característica velocidad vs. empuje.
- e.- Fácil construcción.
- f.- Económicos.
- g.- Como no existe acoplamiento mecánico del motor, la carga puede moverse mediante esfuerzo manual en el eventual caso de una falla de potencia.
- h.- Existe una fuerza normal, la cual presenta grandes ventajas en las máquinas de levitación.

- i.- En aplicaciones de transporte, se permiten altas aceleraciones y desaceleraciones, con el menor uso de las ruedas en el lugar donde se efectúan dichas aceleraciones y desaceleraciones.
- j.- Habilidad para soportar condiciones ambientales adversas (esta ventaja es aprovechada en aplicaciones al transporte ).
- k.- En situaciones donde no está permitido pérdidas de tiempo, un segundo motor puede ser incorporado como equipo emergente.

Desde el punto de vista de sus aplicaciones, es conveniente clasificar a los motores lineales en las siguientes categorías : a) Máquinas de Fuerza, b) Máquinas de Potencia, c) Máquinas de Energía.

Desde el punto de vista Analítico las máquinas de inducción lineal se clasifican en : a) Máquinas de alta velocidad, b) Máquinas de velocidad media c) Máquinas de velocidad baja y estacionarias.

A continuación se presentará un cuadro comparativo entre las máquinas de Fuerza, Energía y Potencia, con relación a diversas características importantes.

Tabla I Cuadro comparativo entre tipos de máquinas de inducción lineal.

Caract.	FUERZA	ENERGIA	POTENCIA
Velocidad	baja estacionaria	alta	media alta
Tamaño	pequeno	variable	medio/grande
Eficiencia	no es importante	no es importante	muy importante
Periodo de Servicio	corto	corto	continuo
Otros Parametros importantes	Fuerza/Pot. ent. Fuerza/Peso Fuerza/Costo	Eficiencia de Energía Energía/peso Energía/costo	-----
Equipo Adicional Requerido	Generalmente no es complejo	Generalmente no es complejo	Sistema de Frecuencia variable
Tipo de Máquina Aplicable	Secundario Movil Tubulares Primario corto to movil	Secundario Largo Primario Corto Movil	Primario corto Secundario movil Primario corto movil

Las aplicaciones que se encuentran para cada tipo de máquina son:

- a) Máquinas de Fuerza.- Se encuentran aplicaciones en Transductores , rele y Solenoides, actuadores o motores de fuerza, gruas , actuadores para puertas y cortinas deslizantes.
- b) Máquinas de Energía.- Se encuentran aplicaciones en aceleradores para pruebas de impacto, lanzamiento de cuerpos a gran velocidad .
- c) Máquinas de Potencia .- Se encuentran aplicaciones en bandas transportadoras, puentes grúa, transporte de personas por tierra a altas y medias velocidades, bombas de metal líquido, convertidores hidromagnéticos, generadores magnetohidrodinámicos.

#### 1.4 FENOMENOS ESPECIALES QUE SE PRESENTAN EN LAS MAQUINAS DE INDUCCION LINEAL.-

La mayor diferencia en el análisis de las máquinas de inducción lineal con respecto a las rotativas, la constituyen los llamados "Efectos especiales de Borde". los cuales son consecuencia de las diferencias en dimensiones y forma de los circuitos eléctricos y magnéticos.

Los fenómenos especiales en las máquinas de inducción lineal son :

- a) Efectos Longitudinales de Borde
- b) Efectos Transversales de Borde
- c) Efecto de Piel
- d) Flujos de dispersión en el entrehierro.

En este capítulo se tratará analíticamente cada uno de ellos.

##### 1.4.1 Efectos longitudinales de borde.-

Los efectos longitudinales de borde, tienen su origen en el hecho de que el primario es de longitud finita y el secundario con respecto al



primario puede considerarse como de longitud infinita ( motor tipo primario corto ). ver fig 1.13

Se presentan dos tipos de efectos longitudinales de borde :

- a) Estáticos
- b) Dinámicos.

Los efectos longitudinales de borde estáticos, son producidos por las reactancias de dispersión del primario, las cuales son inevitablemente desbalanceadas. Esto se debe, a que las trayectorias del flujo de dispersión de las bobinas que se encuentran a los extremos de los núcleos, son muy diferentes a las trayectorias recorridas por el flujo de dispersión de las bobinas que se encuentran hacia el centro de los núcleos. En consecuencia, cuando se alimenta el devanado primario desde una fuente de voltaje trifásico balanceado, las corrientes circulantes por cada fase, no son las mismas.

Este desbalance, causa que la fuerza de empuje se reduzca y además que se originen pérdidas de potencia adicionales.

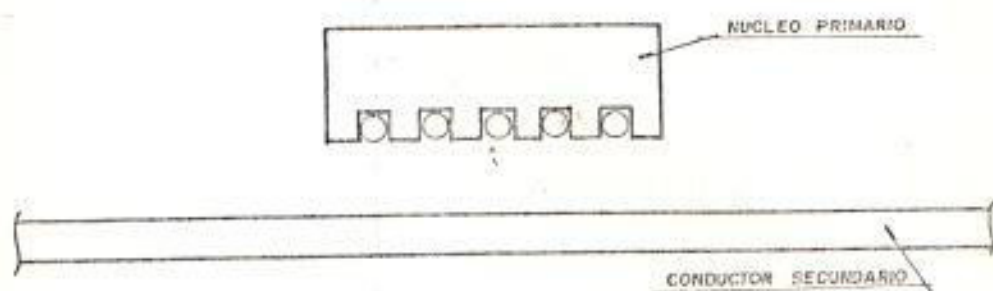
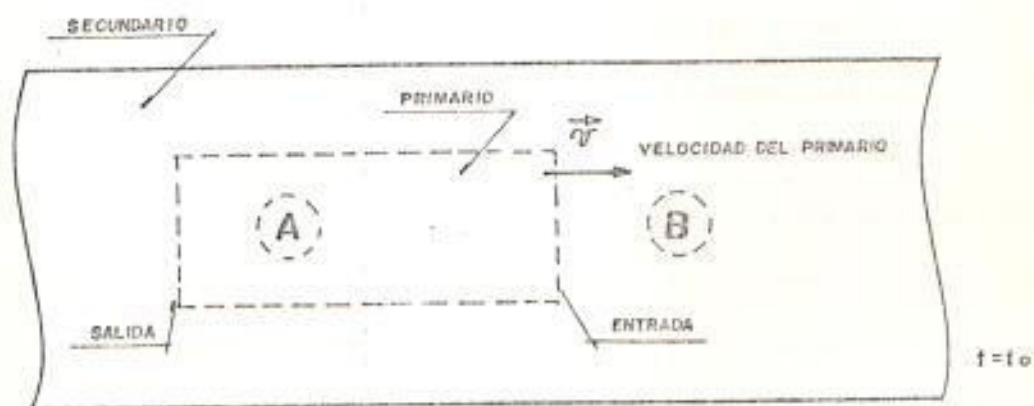
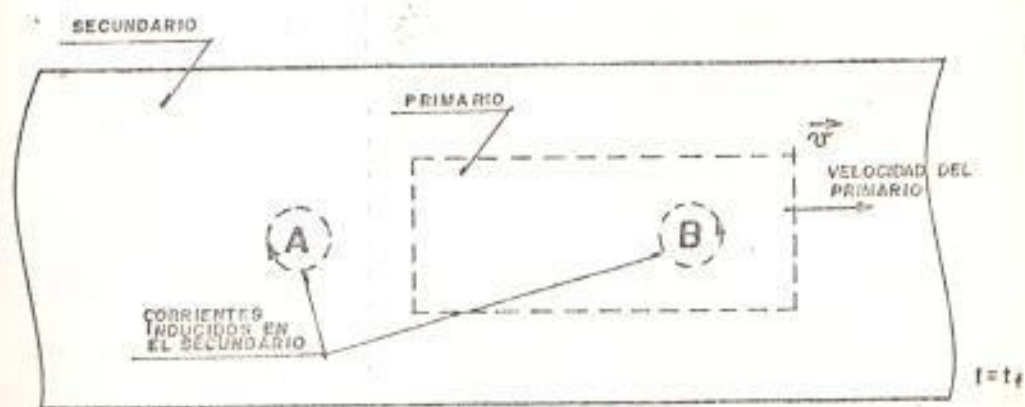


Fig. 1.13.- Mil tipo primario corto

Fig. 1.14a.- Efecto de borde dinámico a  $t_0$ Fig. 1.14b.- Efecto de borde dinámico a  $t_1$

Los efectos longitudinales de borde dinámicos, se deben al movimiento relativo entre un primario de longitud finita y un secundario de longitud infinita, en comparación con la dimensión del primario.

En consecuencia, el flujo magnético creado en el primario en un instante de tiempo cualquiera, solamente atraviesa una parte del secundario (Zona activa). La fig 1.14 a, nos muestra esta situación para un instante  $t_0$ . Debido al movimiento relativo entre primario y secundario, las zonas a y b del secundario, sufrirán una brusca variación de flujo en un tiempo  $t$  posterior, ver fig 1.14 b. Para compensar estas bruscas variaciones de flujo, se originan corrientes secundarias, que tienden a mantener el flujo inicial enlazado por las zonas a y b.

Estas corrientes inducidas se llaman " Corrientes de efectos de borde de entrada y salida ", y ocasionan serias consecuencias en el funcionamiento de la máquina. Los problemas principales que causan son :

- a) Pérdidas adicionales de potencia en el secundario
- b) Fuerzas de frenado que se incrementan con la velocidad.
- c) Disminución del factor de potencia
- d) Distorsión de la onda de densidad de flujo en el entrehierro , lo cual aumenta el desbalance en los enlaces de flujo del primario y por consiguiente un incremento de los efectos especiales de borde estáticos.

#### 1.4.2 Efectos transversales de borde.-

En la Figura 1.8 , se puede observar la disposición relativa entre el primario y secundario que origina este tipo de fenómeno. La densidad de corriente inducida en el secundario tiene dos componentes : La componente longitudinal  $J_x$  , y la componente transversal  $J_z$  , ver fig. 1.15 .

La componente longitudinal  $J_x$  , es la causante principal de estos efectos, cuya mayor consecuencia es incrementar la resistividad

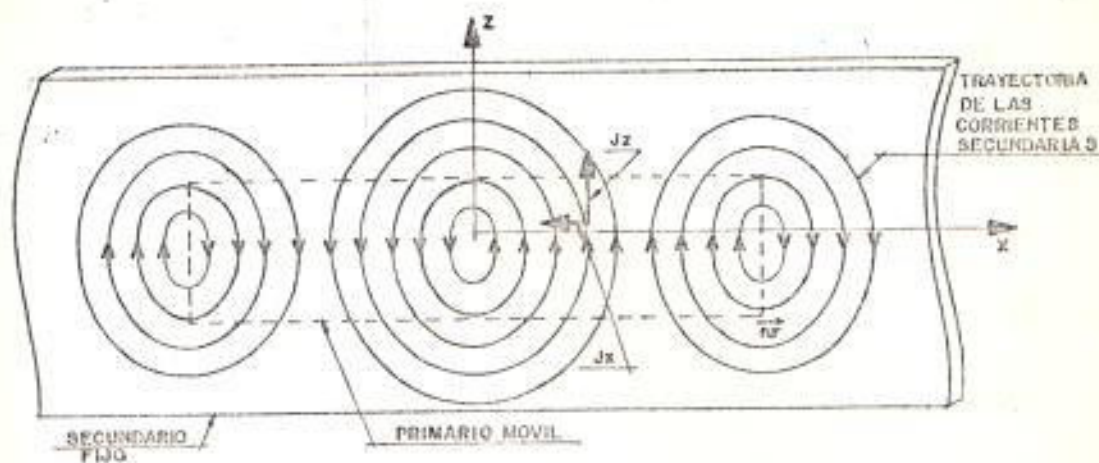


Fig. 115.-Componente de la densidad de corriente inducida en el secundario

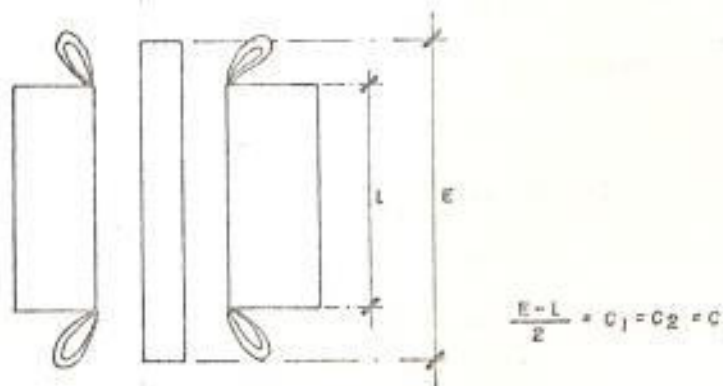


Fig. 116.-Visto lateral de un mill con efectos de borde transversal disminuidos.

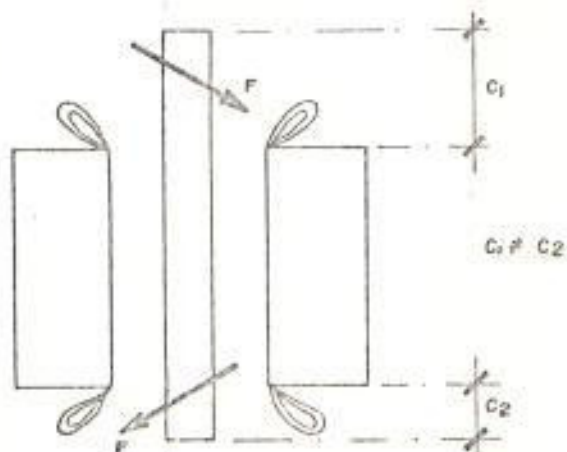


Fig. 117.-Fuerzas de desestabilización sobre el secundario

secundaria equivalente.

Una manera de reducir los efectos transversales de borde es incrementando el ancho del secundario, ver fig. 1.16.

Por razones de construcción, generalmente el primario y el secundario no se encuentran ubicados simétricamente. Esto origina fuerzas de inestabilidad lateral sobre el secundario, ver fig 1.17. Por otra parte, la componente longitudinal de la densidad de flujo inducida en el secundario, se convierte en una fuente de reacción de armadura, distorsionando el campo magnético en el entrehierro.

Los factores mencionados, reducen el rendimiento de la máquina.

#### 1.4.3 Efecto de Piel.-

Generalmente, en las máquinas giratorias convencionales este efecto no es tomado en consideración, a causa del bajo valor de la frecuencia normal de trabajo. Pero, en las máquinas lineales, la frecuencia nominal de

entrada al primario puede ser mayor a 100 Hz , y si el deslizamiento es menor al 20% , entonces el efecto de piel no es despreciable.

La consecuencia principal de este efecto, es disminuir la conductividad secundaria , introduciendo pérdidas de potencia adicionales por parte del secundario.

#### 1.4.4 Flujos de Dispersión en el entrehierro.-

Por razones estrictamente mecánicas, se requiere en una gran variedad de motores lineales, que la separación entre el primario y el secundario sea mayor en comparación con una máquina giratoria convencional.

Si el entrehierro de los motores lineales fuera muy pequeño, entonces debido a la fuerza Normal de atracción existente, podría darse el caso de que el primario y el secundario se acerquen demasiado, lo cual es muy peligroso. En algunas máquinas se suele tener una relación  $g/d$  entre 3 y 6 y el espesor del secundario entre 8 y 10 mm. fig. 1.18. Al ser muy grande el entrehierro, el flujo magnético producido en el primario no llega en su





totalidad al secundario, aumentando de esta forma el flujo de dispersión. En consecuencia se tienen altas corrientes de magnetización y por lo tanto bajo factor de potencia.

## CAPITULO II

### CRITERIOS DE DISEÑO DE LA MAQUINA

En el año de 1983, la ESPOL, inició a través de la Facultad de Ingeniería Eléctrica un proyecto de investigación, cuyo objetivo es construir un vehículo de transporte impulsado por un Motor Lineal de Inducción.

Como primer paso, se desarrolló una tesis de grado, en la cual se establecieron las condiciones que dicho motor debía cumplir, se diseñó la máquina real que cumpla con esas condiciones, y finalmente se escogieron factores de escala, que permitieron calcular los parámetros de construcción de un modelo de la máquina.

El paso siguiente es la construcción del modelo a escala, siendo muy importante revisar el diseño anterior, a fin de ajustar los parámetros de diseño a las posibilidades reales de construcción con que actualmente cuenta la ESPOL.

Para hacer tales modificaciones, es conveniente, hacer un diseño paralelo al anterior. El procedimiento se

concreta en los siguientes pasos:

- a) Establecer el método de diseño a seguir.
- b) Diseñar la máquina de dimensiones reales.
- c) Escoger los factores de escala adecuados, que permitan obtener un modelo factible de construir.

En este capítulo, se seguirán los pasos mencionados con el objeto de obtener los parámetros de construcción del modelo.

## 2.1 ECUACIONES BASICAS DE DISEÑO Y CURVAS EXPERIMENTALES A USARSE.

A continuación se tratará, sobre los criterios a usarse para diseñar la máquina real.

Por experiencia obtenida a través de varios autores, el tipo de motor lineal a diseñarse, es uno de los más convenientes en la aplicación al transporte.

### 2.1.1 Consideraciones Básicas.

Es muy importante, antes de empezar con la tarea

de diseño, hacer las siguientes consideraciones:

- a) La máquina real, tendrá una velocidad entre 40 y 60 Km/Hr. Lo cual, la clasifica como una máquina de media velocidad con tendencia a baja velocidad.

A esta velocidad, los efectos de borde longitudinal, no son despreciables, pero tampoco muy significativos.

- b) En el diseño se utilizará la teoría del circuito equivalente eléctrico, con ciertas modificaciones a sus parámetros, con el objeto de tomar en cuenta los efectos especiales de borde.

- c) Las características básicas del MIL a diseñarse son:

Primario Corto

Primario Móvil

Secundario Simple de Capa Conductora

Flujo Longitudinal

Plano

Doble lado Electro-Magnético.

- d) El Devanado Primario, es de Doble Capa, con excepción de los Extremos ( fig. 2.1) En los cuales se produce solamente la mitad del flujo por polo. De esta manera, se atenúan los efectos longitudinales de borde.
- e) Los dientes de entrada y salida del núcleo primario, son de diferente forma que los restantes, (ver fig. 2.2 ), de esta manera se atenúan los efectos longitudinales de borde.
- f) La altura de la capa conductora secundaria, es mayor a la altura del núcleo con el propósito de disminuir la componente longitudinal de la densidad de corriente secundaria (fig 2.3), esta componente es la mayor fuente de los efectos de borde transversal.
- g) La fig. 2.4, muestra el factor de multiplicación, que afecta a la resistividad secundaria, en función del número de polos de la máquina. Este factor toma en cuenta los efectos longitudinales de borde, cuyas consecuencias se reflejan en un aumento de la resistividad del secundario. En este diseño se tomará un número de polos mayor a cuatro, para



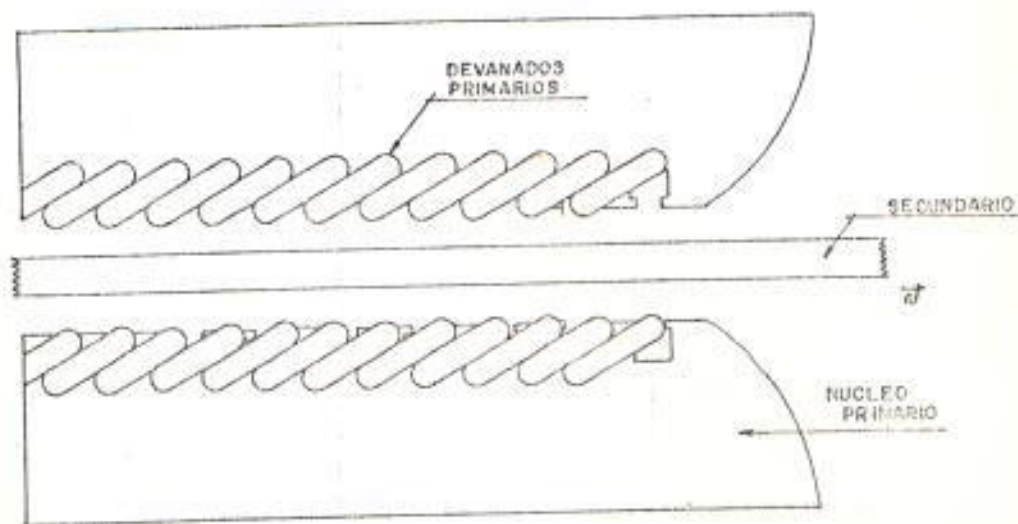


Fig- 2.2.- Extremos del nucleo primario

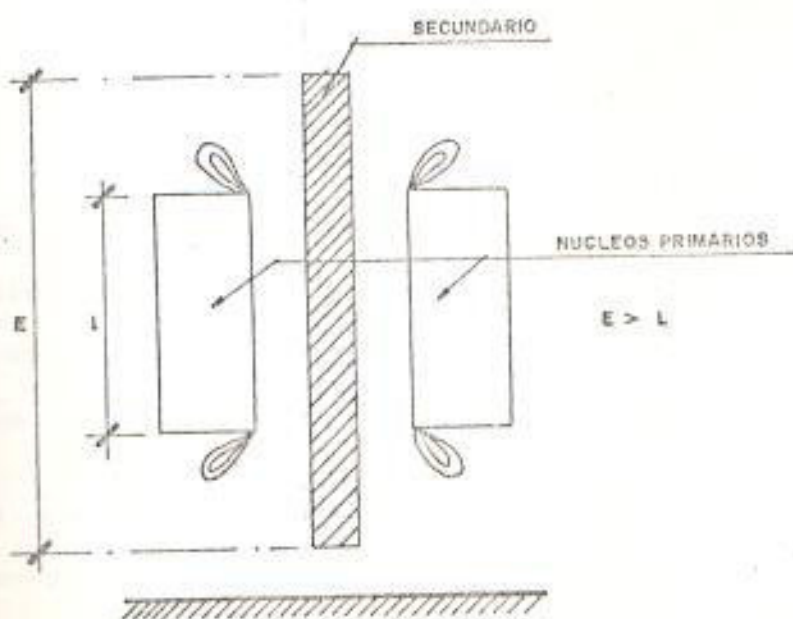


Fig 2.3.- Comparación entre alturas del nucleo y capo secundario

el cual el factor es aproximadamente uno. El aumento del número de polos, disminuye los efectos longitudinales de borde.

- h) Con el propósito, de tomar en cuenta el efecto de borde transversal, se introducirá en los cálculos el Factor de RUSSEL-NORWORTHY, el cual aumenta la resistividad del secundario. Constructivamente esto se traduce en un secundario de mayor espesor.

#### 2.1.2 Parámetros del Circuito Equivalente.

El circuito de la fig. 2.5 es el circuito equivalente eléctrico por fase y por bloque del MIL a diseñarse.

A diferencia del circuito eléctrico equivalente, correspondiente a un motor de inducción giratorio, este circuito no incluye la reactancia de dispersión secundaria, ni tampoco la resistencia que representa las pérdidas en el núcleo.

La reactancia de dispersión secundaria, resulta ser de valor despreciable, al considerar la forma del conductor secundario. En esta configuración,



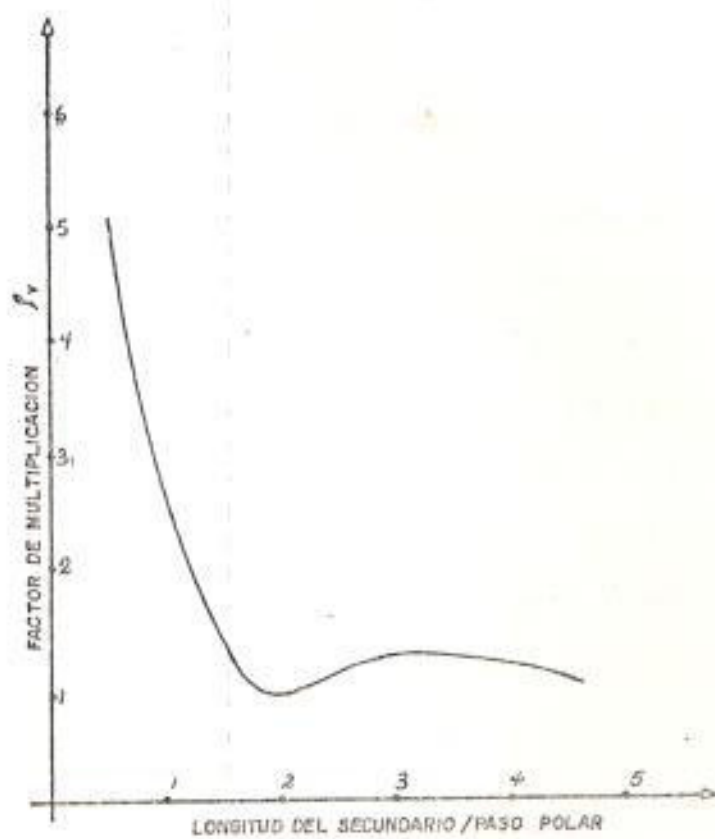


Fig. 2.4.- Factor que afecta a resistividad secundaria en función del número de polos

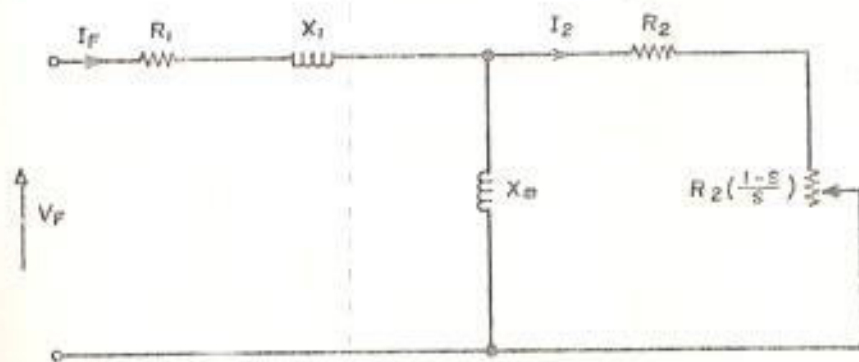


Fig. 2.5.- Circuito eléctrico equivalente por bloque/fase de MIL a diseñarse

los flujos de dispersión en los bordes son mínimos comparados con los flujos de dispersión en los terminales del devanado primario.

Por otra parte, el motor a diseñarse es del tipo primario móvil, corto, lo cual significa que la velocidad relativa entre el flujo traslatorio y el núcleo primario, es muy baja. De esta manera, las corrientes inducidas tendrán una frecuencia relativamente baja, ( cerca de 10 Hz ), Por consiguiente las pérdidas tanto por histéresis, como por corrientes de foucalt, pueden considerarse despreciables.

Adicionalmente, el núcleo sera construido con chapas de acero laminadas, lo cual disminuye mucho más dichas pérdidas.

En la tabla II, se presentan las formulas empleadas para calcular los parámetros del circuito eléctrico equivalente del motor lineal de inducción.

*En la tabla III se presentan valores, y rangos de variación de algunos factores que intervienen en estas formulas.*

Tabla II.- Formulas utilizadas para calcular los parametros del circuito equivalente electrico por bloque/fase del MIL de dimensiones reales.

PARAMETRO	FORMULA UTILIZADA
RESISTENCIA PRIMARIA	$r1 = \frac{\rho_p K \beta^2 q a^2 \left( H^2 (1 + K) J_p^2 / 3 \right)}{K f K d P J_p^2}$
RESISTENCIA SECUNDARIA	$r2 = \frac{61 \rho_r (K_H H)^2}{J_p P} \quad \rho_r = \frac{\rho_r}{1 - K} \quad \rho_r = \frac{\rho_s}{d}$
RESISTENCIA DE IMPEDION PRIMARIA	$x1 = \frac{4 \pi \mu_0 H^2}{P} \left[ \frac{(L_c + L_d)}{q} + \frac{L_e J_p K^2 a}{\pi} \right]$ $K = \frac{\operatorname{tgh} \frac{\pi l}{2 J_p}}{\frac{\pi l}{2 J_p} \left( 1 + \operatorname{tgh} \left( \frac{1}{2 J_p} \right) \right) \operatorname{tgh} \left( \frac{\pi c 2}{2 J_p} \right)}$ $L_c = 1/12 K d (1 + 3\beta)$ $L_e = 0.3(3\beta - 1)$ $L_d = \frac{5q}{5w + 4g}$
RESISTENCIA DE INERTIACION	$x2 = \frac{12 \mu_0 f J_p l (K_H H)}{\pi P q}$

Tabla III Valores aproximados de cantidades que intervienen en el diseño del MIL de dimensiones reales.

SÍMBOLO	EQUIVALENCIA	DEFINICIÓN	VALOR APROXIMADO
	$l/p$	Relación entre la longitud media de las conexiones terminales del devanado primario, al paso polar,	1.2 - 1.8
		Factor de anchura del devanado primario	0.95
	$\frac{l + w}{w}$	Relación paso de ranura, ancho de ranura	2 - 3
		Factor de distribución del devanado primario	0.9 - 0.97
	$t/w$	Relación entre profundidad de ranura y ancho de ranura.	3 - 5
	$A/A_r$	Factor de llenado de ranura	0.5 - 0.7
		Factor de acorte del devanado primario	0.833

### 2.1.3 Ecuaciones para calcular la Eficiencia.

En las máquinas lineales , clasificadas como máquinas de potencia, es muy importante considerar el valor de la eficiencia definida como:

$$= \frac{\text{Potencia Mecánica de Salida}}{\text{Potencia Eléctrica de Entrada}} \quad ( 2.1 )$$

La tabla IV , nos muestra las formulas que se usarán, para calcular las eficiencia del MIL, usando el circuito eléctrico por bloque y por fase de la fig 2.5.

Tabla IV Formulas empleadas para calcular los parametros de operacion del MIL en funcion de los parametros del circuito equivalente electrico

ORDEN	DEFINICION	FORMULA EMPLEADA
10	Factor de Potencia	$\cos(\arctan X_{eq}/R_{eq})$
20	Impedancia equivalente por fase	$\sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2}$
30	Potencia Mecanica total de salida	$\frac{V R_2 (1 - s)}{(R_1 + R_2/s) + j(X_1 + X_2)}$
40	Potencia electrica total de entrada	$\sqrt{3} V I_{fp}$
50	Corriente de linea	$\frac{V}{\sqrt{3} Z_{eq}}$
60	Rendimiento	$P_o/P_e$
70	Reactancia equivalente por fase ( vista desde el primario)	$\frac{(R_1 + R_2/s) X_m^2 + (X_1 + X_2) j I_1 X_m}{(R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2}$
80	Resistencia equivalente por fase ( vista desde el primario)	$\frac{(R_1 + R_2/s) X_m^2}{(R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2}$

## 2.2 PROCEDIMIENTOS PARA DISEÑAR LOS PARAMETROS DEL NUCLEO PRIMARIO Y LA RIEL DE REACCION SECUNDARIA.

El procedimiento de diseño a seguir, requiere que el diseñador posea habilidad para decidir, cuales son los parámetros que pueden variarse, durante el diseño, para mejorar unas condiciones, sin afectar considerablemente a otras.

### 2.2.1 Consideraciones para el Diseño.

Se presentará a continuación, un breve análisis, de las principales consecuencias, que se tienen sobre el funcionamiento del MIL, cuando se varía parámetros muy importantes tales como el paso polar, número de polos, resistividad superficial secundaria, dimensiones del núcleo primario, entrehierro.

#### a) Entrehierro:

Un circuito magnético con un entrehierro de gran magnitud, demandará de la línea una elevada corriente de magnetización, con lo cual el factor de potencia se reduce.

Las pérdidas de potencia debido a los efectos longitudinales de borde, se incrementan con el

incremento del entrehierro.

La fuerza de empuje de salida y la eficiencia de la máquina, disminuyen con el aumento del entrehierro.

Usando el concepto del factor de bondad [7], para evaluar el buen diseño de una máquina, se observa que el entrehierro debe ser pequeño, para que  $G$  se incremente. El factor de bondad  $G$ , puede escribirse como:

$$G = \frac{2 \mu_0 + I_p^2}{f_r \pi g} \quad (2.2)$$

Existe una limitación para el entrehierro: no puede ser muy pequeño, al extremo que produzca una acción incontrolada de la fuerza normal de atracción entre el núcleo primario y la riel secundaria. De ser así, se produciría un rozamiento mecánico muy peligroso entre estas partes.

b) Paso Polar.-

Para mejorar el factor de bondad, el paso polar



debe ser lo más grande posible.

Incrementando el paso polar, la relación longitud activa del conductor, a longitud total, es menor. Por consiguiente, la eficiencia es disminuida, puesto que en las conexiones terminales (partes no activas del conductor) se producen altas reactivancias de dispersión y pérdidas de potencias.

El incremento del paso polar, exige un incremento en las dimensiones del núcleo magnético, con lo cual se incrementa el peso del núcleo.

La velocidad sincrónica del campo magnético, generalmente es determinada por el paso polar, puesto que la frecuencia permanece constante.

Si se dispone de una longitud mínima para el núcleo, al incrementar el paso polar, se debe disminuir el número de polos, lo cual generalmente no se desea.

#### c) Número de Polos.-

Las Pérdidas de potencia debido a los efectos de borde, se reparten por igual entre el número

de polos de la máquina. Por lo tanto, es ventajoso aumentar el número de polos para disminuir dichas pérdidas y mejorar la eficiencia de la máquina.

Por lo tanto se observa, que existe un compromiso entre el paso polar y el número de polos, de tal manera, que la distancia longitudinal del núcleo magnético no rebase el límite fijado.

d) Resistividad Superficial del Secundario.-

El factor de bondad puede escribirse como:

$$S = \frac{2 f \tau^2 (1 - K) (\text{espesor del secundario})}{\tau_g (\text{resistencia volumétrica del sec.})} \quad (2.3)$$

Por lo tanto, a mayor espesor del secundario, se tiene un mejor factor de bondad.

Cuando el secundario es simple ( no posee núcleo magnético secundario ), Al aumentar el espesor del secundario, se aumenta el entrehierro, lo cual no se desea.

El espesor del secundario debe ser lo mas pequeño posible, sin que se pierda la consistencia necesaria del material, con el objeto de evitar se deforme frente a las fuerzas de atracción o repulsión presentes.

Cuando la resistividad del secundario es baja, el factor de bondad aumenta, las pérdidas de potencia por efecto Joule disminuyen, y la eficiencia de la máquina aumenta.

Si el material tiene una baja resistividad secundaria, los efectos longitudinales de borde tardan en disiparse.

Al escoger el tipo de secundario debe considerarse que cuando se tiene núcleo secundario de material ferromagnético, se tiene alta permeabilidad magnética y baja corriente de magnetización, lo cual representa ventajas sobre un secundario de capa simple. Sin embargo se tiene la desventaja de poseer una fuerte atracción entre el primario y el secundario.

Considerando el aspecto económico, en este diseño se utiliza un Secundario de capa simple.

e) Núcleo Primario.-

Es conveniente que la forma de los dientes del núcleo primario, sea similar a la mostrada en la fig 2.6 De esta manera, las reactivancias de dispersión en el primario disminuyen y se consigue tener mayor fuerza de empuje de salida, mejor factor de potencia y mayor eficiencia.

En el diseño del tamaño del diente, debe considerarse la densidad de campo máxima que soporta el material, a fin de no saturar dicha zona.

### 2.2.2 Pasos Recomendados a seguir en el diseño.

Los pasos que se utilizarán, simplifican la tarea de diseño, permitiendo realizar variaciones en los parámetros a fin de encontrar el diseño que cumpla con los requerimientos impuestos. Los pasos recomendados son:

- a) Establecer condiciones que la máquina a diseñarse deba satisfacer. Dentro de estas condiciones se encuentra la fuerza de empuje de salida, velocidad del vehículo y rendimiento

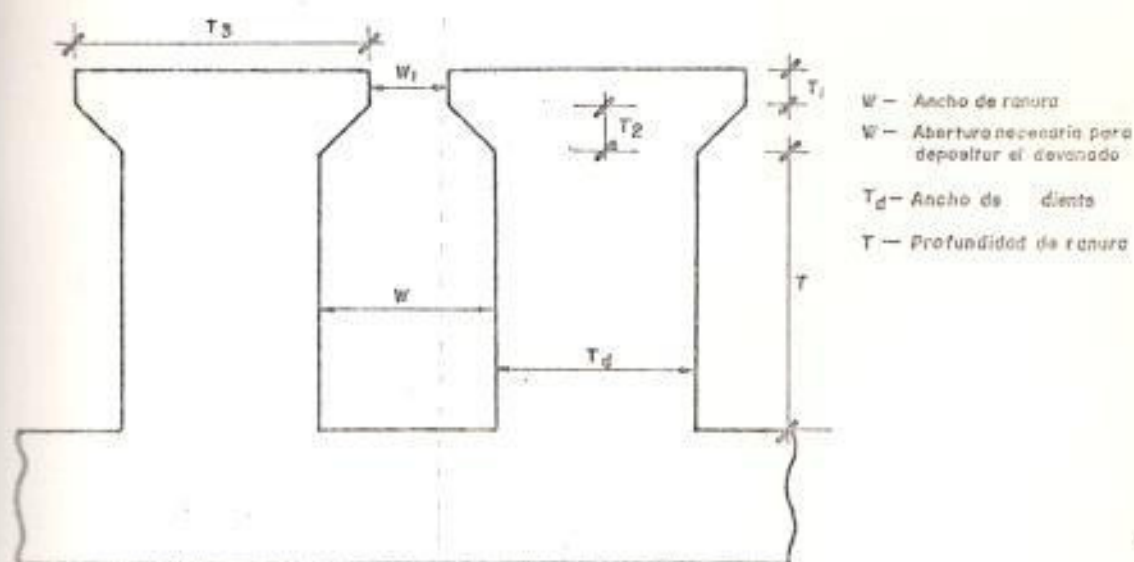


Fig. 2.6.- Forma de dientes del núcleo primario del MIL a diseñarse

deseado.

Se deben establecer las condiciones para seleccionar una máquina, en el caso de que varias máquinas satisfagan las condiciones impuestas en el párrafo anterior.

- b) Se deben establecer, los factores que puedan variar así como también sus límites permitidos de variación.
- c) Se asume un diseño inicial a partir de las variables disponibles para el primario y el secundario.
- d) Se hace un análisis del diseño conteniendo los cálculos de parámetros y corrientes en el circuito equivalente, y los cálculos correspondientes al rendimiento de la máquina.
- e) Se compara el rendimiento deseado con el rendimiento calculado.
- f) Si un diseño no cumple con el rendimiento deseado, se cambia algún factor dentro de los límites específicos y se continúa la iteración hasta que se cumpla el rendimiento deseado, o

hasta concluir que no puede cumplirse con este rendimiento dentro de los límites especificados.

g) Si un diseño cumple con el rendimiento deseado, se continúa el proceso interactivo, para poder determinar si cualquier otro diseño cumple también con el rendimiento deseado. Si es así, se elige la mejor máquina.

h) Si las condiciones deseadas no pueden cumplirse, entonces se concluye que los requerimientos impuestos no permiten obtener el diseño de una máquina que los cumpla.

## 2.3 CRITERIOS PARA SELECCIONAR FACTORES DE ESCALA.

Una vez que se tienen los parámetros de construcción de la máquina que cumplirá las condiciones impuestas por el diseñador, es necesario encontrar una manera económica de probar técnicamente tal afirmación. Una manera de hacerlo es construir modelos a escala de la máquina real.

### 2.3.1 Objetivo del Modelo a Escala.

En muchos campos de la Ingeniería, previo a la construcción de una obra de gran envergadura, resulta muy beneficioso para el diseño teórico, construir un modelo a escala de la obra real. De esta manera, se puede pronosticar con aproximación el comportamiento de la máquina real, permitiéndose realizar cualquier variación con el objeto de mejorar el diseño inicial.

En los últimos años el campo de aplicación de los motores lineales se ha incrementado, siendo necesario diseñar estas máquinas con la mayor aproximación posible. Por esta razón es muy importante la construcción de modelos a escala de máquinas de magnitudes reales.



### 2.3.2 Factores de Escala.

Existen dos criterios básicos en los cuales se fundamenta el uso de factores electromagnéticos de escala:

- a) La relación de cualquier componente de campo en dos puntos de la máquina real, debe ser la misma que la relación de la componente equivalente en los puntos equivalentes del modelo.
- b) El factor de bondad de la máquina real, debe ser igual al factor de bondad del modelo.

El modelo una vez construido puede considerarse como una forma de computadora análoga, la cual puede fácilmente ser instrumentada y probada. Además cualquier modificación en el diseño puede ser implementada de manera fácil y económica.

Los factores de escala definidos son tres :

$$\text{Factor de Escala de Longitud} = \frac{\text{Long. del Modelo}}{\text{Long. Maq. Real}} \quad (2.4)$$

$$\text{Factor de Escala de Vueltas} = \frac{\text{vueltas bobinas Mod.}}{\text{vuelt.bob. Maq. Real}} \quad (2.5)$$

$$\text{Factor de Escala de Corrientes} = \frac{\text{Corriente en el Mod.}}{\text{Corriente en M. Real}} \quad (2.6)$$

Se calculará a continuación la relación que existe entre la frecuencia de operación de la máquina real y del modelo.

La profundidad de penetración de una onda es definida como:

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\omega \mu}} \quad (2.7)$$

Donde:

$\rho$  Resistividad del material

$\omega$  Frecuencia Angular

$\mu$  Permeabilidad magnética del material.

Usando el primer criterio:

$$\frac{\lambda_m}{d_m} = \frac{\lambda_e}{d_e} \quad (2.8)$$

Donde:

$\lambda_m$  Longitud de Onda en el Modelo

$\lambda_e$  Longitud de Onda en la Máquina Real.

Por definición debe cumplirse que:

$$\eta_L = \frac{d_m}{d_R} \quad \text{y} \quad \frac{\lambda_m}{\lambda_R}$$

Reemplazando (2.7) en (2.8) se tiene:

$$\frac{P_m}{f_m} = \eta_L^2 \frac{P_R}{f_R}$$

En General:

$$P_m = P_R$$

Por lo tanto:

$$\frac{f_m}{f_R} = \left( \frac{1}{\eta_L} \right)^2$$

Igual resultado se obtendría si usamos el criterio del factor de bondad, igualando el de la máquina real y del modelo.

La tabla V nos muestra varias de las expresiones que se usarán para calcular los parámetros del modelo a partir de los valores calculados para la máquina real y los factores de escala escogidos.

#### 2.4 PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE LA MÁQUINA REAL, FACTORES DE ESCALA, PARÁMETROS DE CONSTRUCCIÓN DEL MODELO. RESULTADOS ESPERADOS.

En este apartado se detallará, el procedimiento para diseñar los parámetros de construcción de un

TABLA V Fórmulas empleadas para calcular los parámetros del modelo a escala en función de los factores de escala

PARAMETRO	FACTOR DE CONVERSION ESCALA/ REAL
Longitud de onda	$n_L$
Frecuencia	$1/n_L^2$
Voltaje	$n_V^2 n_C / n_L$
Impedancia terminal	$n_V^2 / n_L$
Resistencia	$n_V / n_L$
Potencia de entrada	$n_V^2 n_C^2 / n_L$
Fuerza de empuje	$n_V^2 n_C^2$
Velocidad	$1/n_L$

MIL de dimensiones reales y su respectivo modelo a escala.

Las condiciones y características técnicas que el MIL a diseñarse de satisfacer son similares a las del anterior diseño. ( ver Ref. 3 ). Esto es:

El MIL proporcionará potencia mecánica suficiente para mover un vehículo de transporte cuyo peso total aproximado es de 3300 Kg, y se desplazará a una velocidad de 60 Km/hr .

El detalle de los pasos que se siguen en el diseño es el siguiente:

- a) Se establecen las características y condiciones iniciales. Ver Tabla VI
- b) En las figuras 2.7, 2.8, 2.9, se muestran curvas de variación características de parámetros de funcionamiento de MIL'S similares al que se construirá. Considerando estas curvas se tienen criterios que permiten asumir con aproximación rangos de variación para los siguientes parámetros:

Deslizamiento	0.25 - 0.35
---------------	-------------

Tabla VI.- Características iniciales del MTL a diseñarse

VELOCIDAD DEL VEHICULO	16,6 m/s
POTENCIA DE SALIDA	180 Kw
VOLTAJE DE LINEA	440 V
FRECUENCIA	60 Hz
RESISTIVIDAD DEL CONDUCTOR PRIMARIO	$1.72 \times 10^{-8}$ ohm/m
RESISTIVIDAD DEL CONDUCTOR SECUNDARIO	$2.63 \times 10^{-8}$ ohm/m
FASES	3

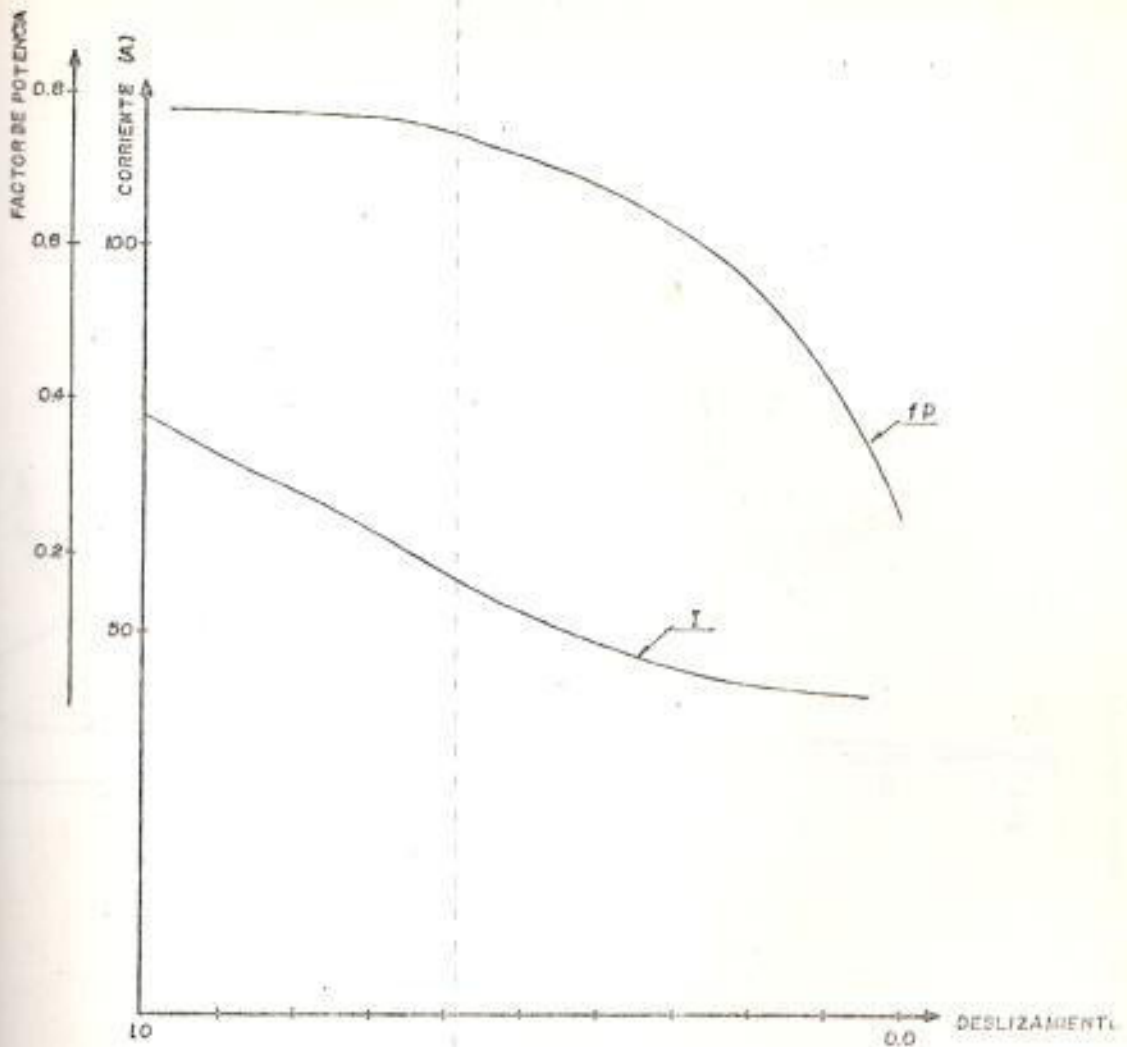


Fig. 27a.- ( $f_p$  A  $I_p$ ) vs  $S$  para MIL de velocidad media y alta resistividad secundaria, 6 Polos

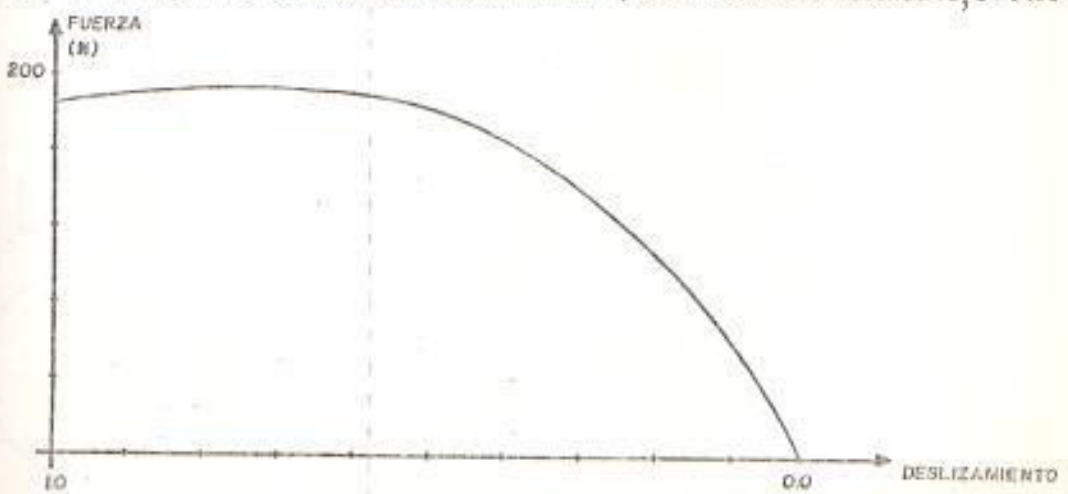


Fig. 27b.-  $F$  vs  $S$  para MIL de velocidad media y alta resistividad secundaria, 6 Polos

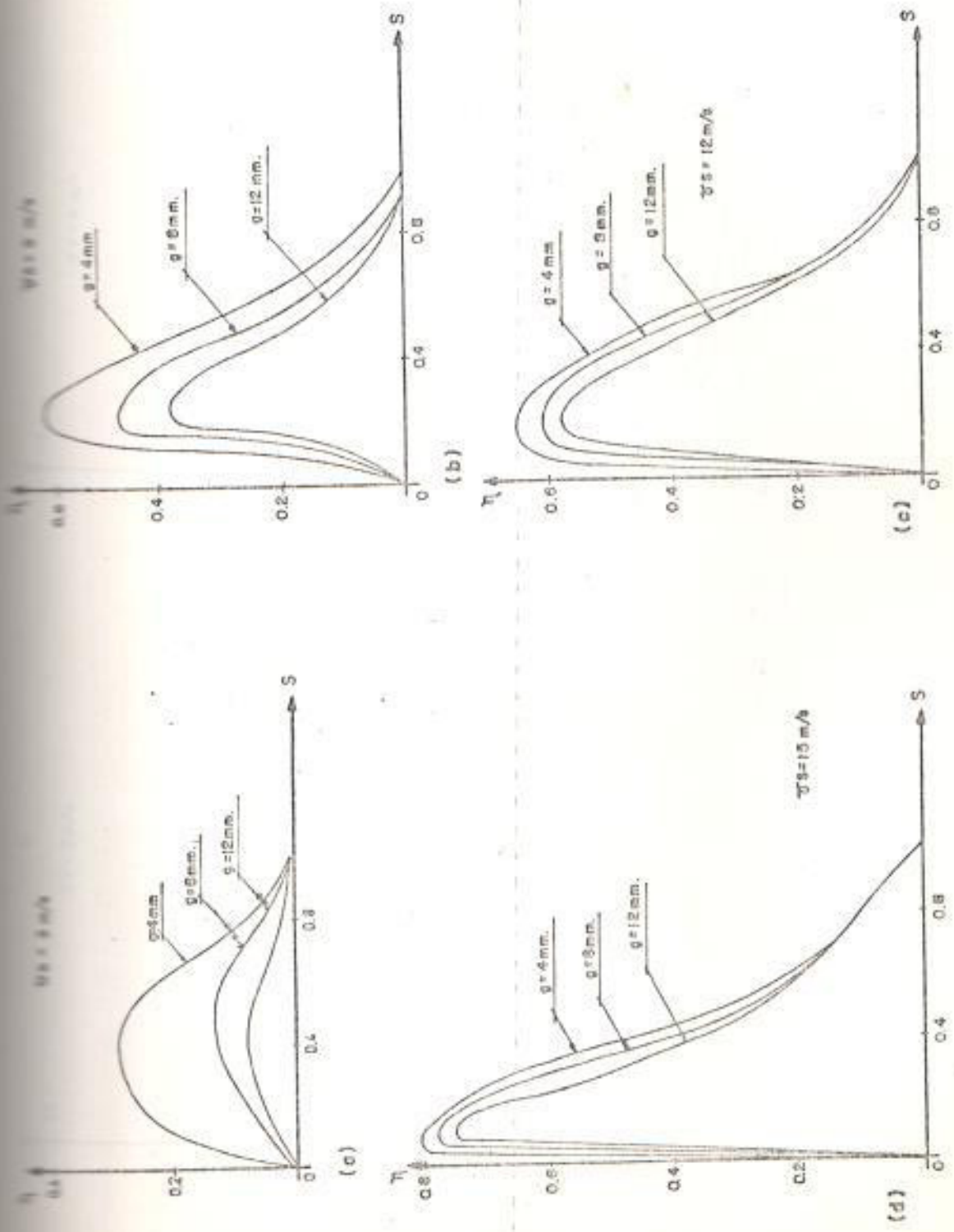


Fig. 2.B.- $\eta$  v.  $S$  Para diferentes valores de entrehierro y velocidad sincrónica



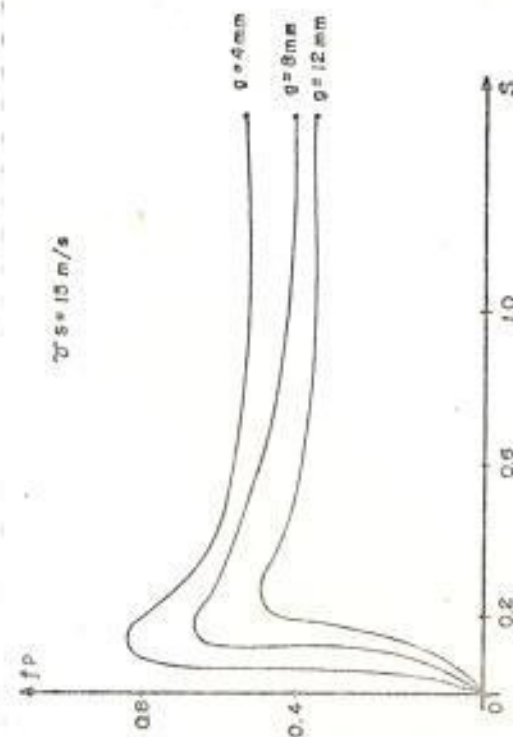
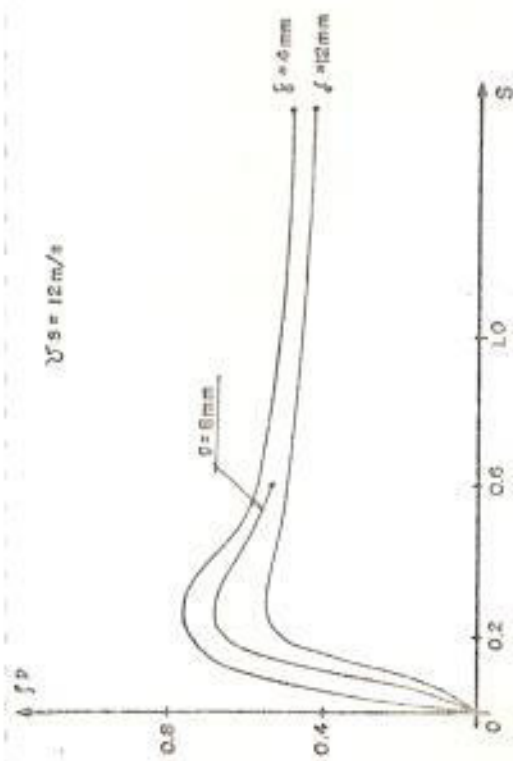
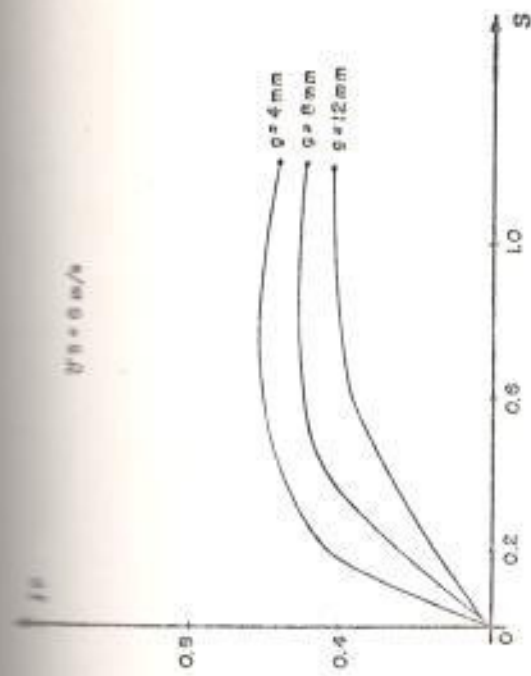
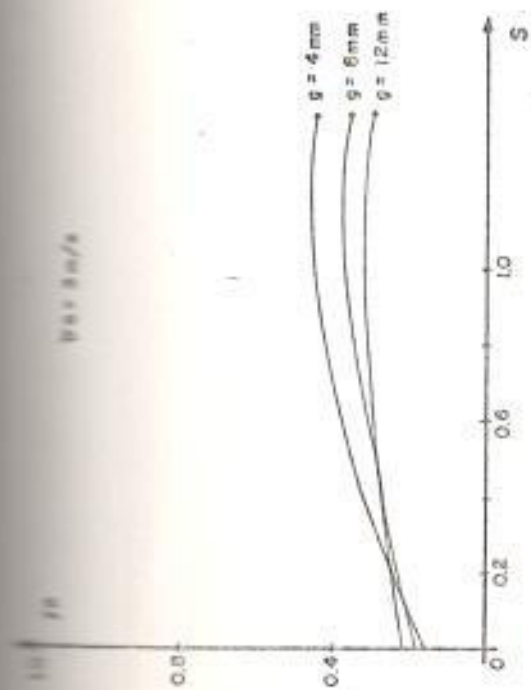


Fig. 2.9.-  $fP$  vs  $S$  para diferentes valores de entresierro y velocidad sincronica

Factor de Potencia	0.45 - 0.60
Rendimiento	0.50 - 0.70

El Devanado Primario del  $Mil$  a diseñarse (fig. 2.1 ) es de doble capa y tiene factor de acorte igual a  $5/6$ , lo que permite tener una adecuada distribución de la fuerza magnetomotiva en el entrehierro.

El número de pares de polos y el correspondiente número de ranuras del devanado primario son variables en el diseño. Se corresponden de la siguiente manera:

PARES DE POLOS	RANURAS
2	29
3	41
4	53
5	65
6	77

- c) La figura 2.10, nos muestra el flujo de cálculos que se realizan hasta obtener los parámetros de construcción de la máquina de dimensiones reales.

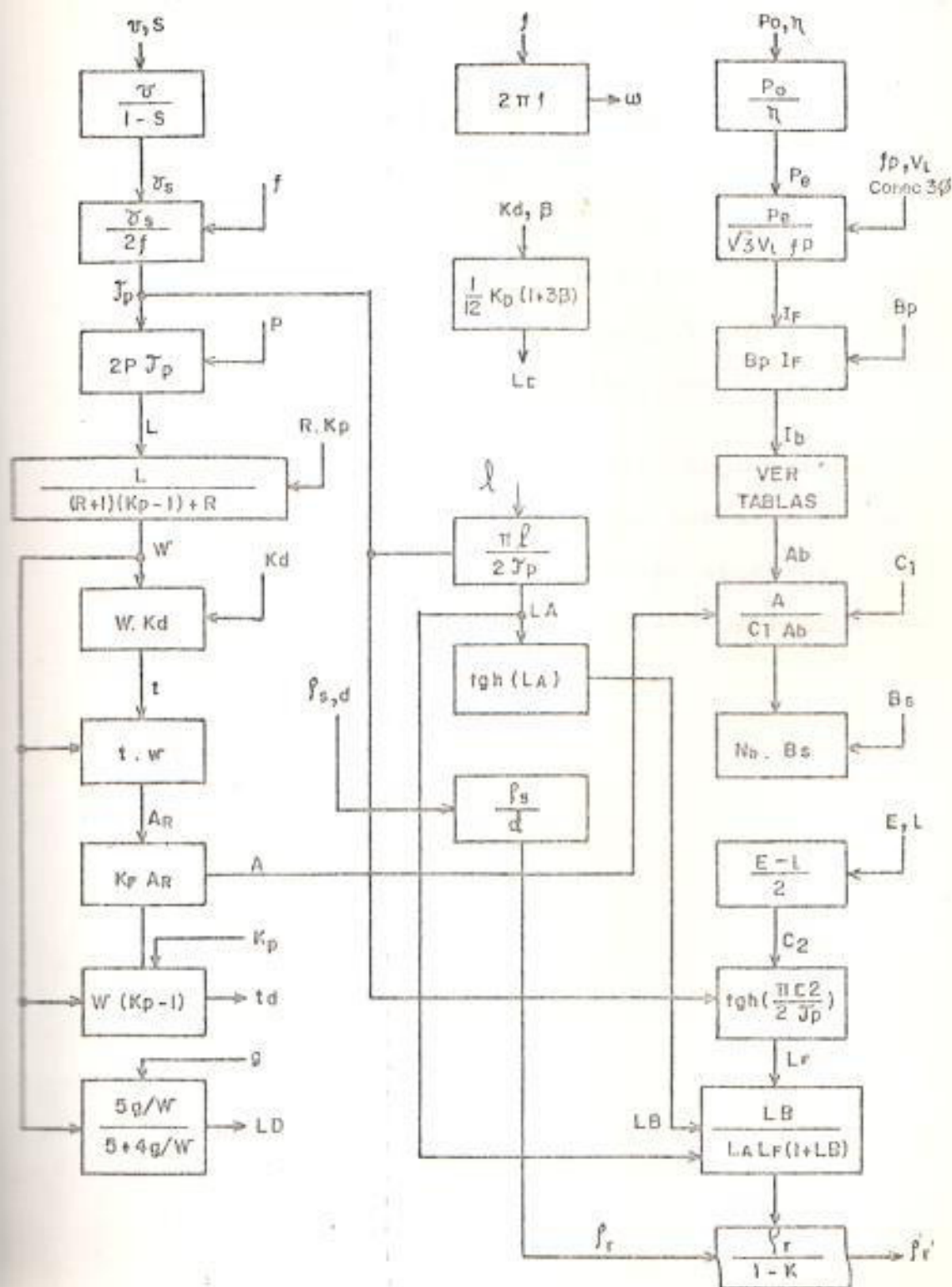


Fig. 2.10.- Flujo de cálculos para obtener parámetros de construcción del MIL, de dimensiones reales

- d) Luego de obtener los parámetros de construcción de la máquina de dimensiones reales, se calculan los parámetros del circuito equivalente eléctrico por bloque/fase. Luego, dependiendo de la conexión entre los devanados de ambos núcleos, se calcula el circuito equivalente eléctrico por fase del MLL.

Con los parámetros del circuito equivalente, se calculan los parámetros de operación, para compararlos con los inicialmente asumidos, así como con las condiciones inicialmente impuestas.

Estos valores son :

Potencia mecánica de Salida

Rendimiento

Factor de Potencia

Impedancia equivalente

Si la diferencia encontrada al compararlos con los valores iniciales es menor al 15%, se prepara la hoja de diseño, caso contrario se reasumen valores y se efectúan nuevamente los cálculos.

La figura 2.11 nos muestra el flujo de cálculos que se siguen hasta obtener los parámetros de operación de la máquina real.

En las tablas VII, VIII, IX, Se muestran los resultados del proceso explicado hasta obtener los parámetros de construcción de la máquina real.

En la tabla X se calcula el error entre los valores iniciales asumidos y calculados.

- e) El paso siguiente es el diseño del modelo a escala.

Antes de seleccionar los factores de escala, se fijan límites de construcción y operación del modelo, de acuerdo a la experiencia obtenida sobre factibilidad de construcción. Los límites son:

Longitud del núcleo	menor a 30 cms.
Ancho de Ranura	mayor a 3 mm
Ancho de diente	mayor a 3 mm
Potencia eléctrica de entrada	menor a 1 Kw

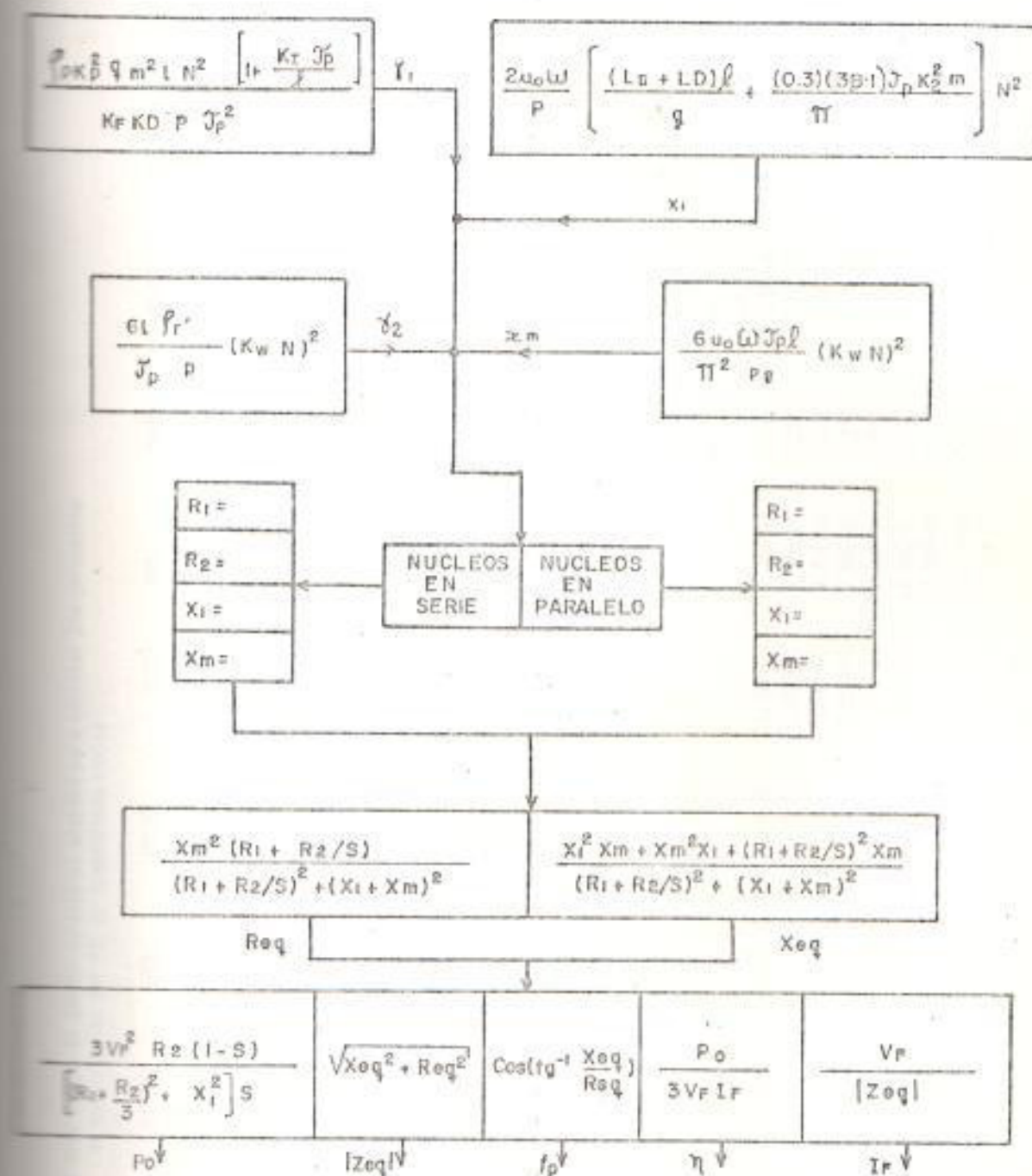


Fig. 22.- Flujo de cálculo para obtener parámetros del circuito equivalente y parámetros de operación del motor

TABLA VII Valores que se asumen durante el proceso para calcular los parámetros de construcción del MIL de dimensiones reales

DESPLZ.	FACTOR POT.	REND.	VELOC. SINC. m/s	F. ELECT ENTRADA M	AMP. FASE A	PASES POLUS	RAMUR. TOTAL.	BOB. SERIE	TRAYECT. PARALELO	RAMURA POL/FAS.
1	2.50E-01	6.00E-01	2.21E+01	3.00E+05	6.57E+02	4.00E+00	5.50E+01	8.00E+00	2.00E+00	2.00E+00
2	2.50E-01	6.00E-01	2.21E+01	3.00E+05	6.57E+02	4.00E+00	5.50E+01	8.00E+00	2.00E+00	2.00E+00
3	2.80E-01	6.00E-01	2.51E+01	3.00E+05	6.57E+02	4.00E+00	5.50E+01	8.00E+00	2.00E+00	2.00E+00
4	3.00E-01	6.00E-01	2.57E+01	3.00E+05	6.57E+02	4.00E+00	5.50E+01	8.00E+00	2.00E+00	2.00E+00
5	3.00E-01	6.50E-01	2.37E+01	3.00E+05	6.06E+02	4.00E+00	5.50E+01	8.00E+00	2.00E+00	2.00E+00
6	3.00E-01	6.50E-01	2.37E+01	2.77E+05	5.60E+02	4.00E+00	5.50E+01	8.00E+00	2.00E+00	2.00E+00
7	3.00E-01	6.50E-01	2.37E+01	2.77E+05	5.60E+02	4.00E+00	5.50E+01	4.00E+00	4.00E+00	2.00E+00
8	2.50E-01	6.50E-01	2.21E+01	2.65E+05	5.35E+02	4.00E+00	5.50E+01	4.00E+00	4.00E+00	2.00E+00
9	2.50E-01	6.50E-01	2.21E+01	2.65E+05	5.35E+02	4.00E+00	5.50E+01	4.00E+00	4.00E+00	2.00E+00
10	2.50E-01	6.50E-01	2.21E+01	2.65E+05	5.35E+02	4.00E+00	5.50E+01	4.00E+00	4.00E+00	2.00E+00

K1	K2	Kp	Ks	Kd	Kf	ANCHO SECCION. m	ANCHO MUELLO m	ALTUR. SECCION. m	ALTURA MUELLO m	ENTREN. m
1	1.50E+00	2.00E+00	9.90E-01	5.00E+00	7.00E-01	2.00E-02	4.00E-01	8.00E-01	4.00E-01	3.50E-02
2	1.50E+00	2.00E+00	9.90E-01	5.00E+00	7.00E-01	1.50E-02	3.50E-01	8.00E-01	4.00E-01	3.00E-02
3	1.50E+00	2.00E+00	9.90E-01	5.00E+00	7.00E-01	1.50E-02	3.00E-01	8.00E-01	4.00E-01	3.00E-02
4	1.50E+00	2.00E+00	9.90E-01	5.00E+00	7.00E-01	1.50E-02	3.00E-01	8.00E-01	4.00E-01	3.00E-02
5	1.50E+00	2.00E+00	9.90E-01	5.00E+00	7.00E-01	1.50E-02	3.00E-01	8.00E-01	4.00E-01	3.00E-02
6	1.50E+00	2.00E+00	9.90E-01	5.00E+00	7.00E-01	1.50E-02	3.00E-01	7.50E-01	4.00E-01	3.00E-02
7	1.50E+00	2.00E+00	9.90E-01	5.00E+00	7.00E-01	1.00E-02	2.50E-01	7.00E-01	3.50E-01	3.00E-02
8	1.50E+00	2.00E+00	9.90E-01	5.00E+00	7.00E-01	8.00E-03	2.00E-01	4.50E-01	3.00E-01	2.50E-02
9	1.50E+00	2.00E+00	9.90E-01	5.00E+00	7.00E-01	8.00E-03	2.00E-01	4.30E-01	2.80E-01	2.50E-02
10	1.50E+00	2.00E+00	9.90E-01	5.00E+00	7.00E-01	8.00E-03	2.00E-01	4.00E-01	2.80E-01	2.50E-02

TABLA VIII Parámetros de construcción que se calculan a partir de los valores asumidos en el diseño del MIL de dimensiones reales

La	Lc	Ld	Lb	C2	Lf	PASO POLAR at	LONG. NUCLEO at	ANCHO RAMPA at	ANCHO DIENTE at	AMP. BUBINA A
1	3.40E+00	1.46E+00	8.38E-01	0.997796	2.00E-01	1.84E-01	1.48E+00	1.38E-02	1.38E-02	1.64E+02
2	3.40E+00	1.46E+00	7.94E-01	0.997796	2.00E-01	1.84E-01	1.48E+00	1.38E-02	1.38E-02	1.64E+02
3	3.27E+00	1.46E+00	7.82E-01	0.997107	2.00E-01	1.82E-01	1.54E+00	1.44E-02	1.44E-02	1.64E+02
4	3.18E+00	1.46E+00	7.74E-01	0.997532	2.00E-01	1.98E-01	1.58E+00	1.48E-02	1.48E-02	1.64E+02
5	3.18E+00	1.46E+00	7.74E-01	0.997532	2.00E-01	1.98E-01	1.58E+00	1.48E-02	1.48E-02	1.64E+02
6	3.18E+00	1.46E+00	7.74E-01	0.997532	1.75E-01	1.98E-01	1.58E+00	1.48E-02	1.48E-02	1.40E+02
7	2.78E+00	1.46E+00	7.74E-01	0.997341	1.75E-01	1.98E-01	1.58E+00	1.48E-02	1.48E-02	7.40E+01
8	2.55E+00	1.46E+00	7.40E-01	0.987767	7.50E-02	1.84E-01	1.48E+00	1.38E-02	1.38E-02	6.69E+01
9	2.38E+00	1.46E+00	7.40E-01	0.985128	7.50E-02	1.84E-01	1.48E+00	1.38E-02	1.38E-02	6.69E+01
10	2.38E+00	1.46E+00	7.40E-01	0.985128	6.80E-02	1.84E-01	1.48E+00	1.38E-02	1.38E-02	6.69E+01

AREA BUBINA	PROF. RAMPA	AREA RAMPA	AREA BUBINA	VUELTAS BUBINA	VUELTAS FASE	REST. SUP. SEC	FACTOR RUSSEL	REST. REL. SEC	ohm/atxat
mixat	at	atxat	atxat			ohm/atxat			
1	8.50E-05	6.90E-02	9.51E-04	3.97E+00	3.13E+01	1.32E-06	1.57E-01	1.56E-06	
2	8.50E-05	6.90E-02	9.51E-04	3.97E+00	3.13E+01	1.75E-06	1.57E-01	2.09E-06	
3	8.50E-05	7.18E-02	1.03E-03	4.23E+00	3.40E+01	1.75E-06	1.65E-01	2.10E-06	
4	8.50E-05	7.39E-02	1.09E-03	4.49E+00	3.60E+01	1.75E-06	1.71E-01	2.11E-06	
5	8.00E-05	7.39E-02	1.09E-03	4.78E+00	3.82E+01	1.75E-06	1.71E-01	2.11E-06	
6	6.08E-05	7.39E-02	1.09E-03	6.37E+00	5.09E+01	1.75E-06	1.78E-01	2.13E-06	
7	2.10E-05	7.39E-02	1.09E-03	1.82E+01	7.28E+01	2.63E-06	2.03E-01	3.30E-06	
8	1.40E-05	6.90E-02	9.51E-04	2.38E+01	9.51E+01	3.29E-06	3.45E-01	5.02E-06	
9	1.40E-05	6.90E-02	9.51E-04	2.38E+01	9.51E+01	3.29E-06	3.69E-01	5.21E-06	
10	1.40E-05	6.90E-02	9.51E-04	2.38E+01	9.51E+01	3.29E-06	4.42E-01	5.89E-06	



TABLE IX Parametros del circuito equivalente electrico del Mil de dimensiones reales

	RES. PRIM BLOG/FASE	RES. SEC. BLOG/FASE	REACT. MASH. BLOG/FASE	REACT. DISP. PRIM BLOG/FASE	RES. PRIM TOTAL/FASE	RES. SEC. TOTAL/FASE	REACT. MASH. TOTAL/FASE	REACT. DISP. PRIM TOTAL/FASE	z
1	1.73E-03	4.88E-03	1.46E-01	1.23E-01	8.63E-04	4.88E-03	1.46E-01	6.16E-02	cha
2	1.73E-03	6.50E-03	1.70E-01	1.21E-01	8.63E-04	6.50E-03	1.70E-01	6.06E-02	cha
3	1.90E-03	7.42E-03	2.07E-01	1.43E-01	9.52E-04	7.42E-03	2.07E-01	7.93E-02	cha
4	2.04E-03	8.13E-03	2.40E-01	1.60E-01	1.02E-03	8.13E-03	2.40E-01	8.01E-02	cha
5	2.30E-03	9.18E-03	2.71E-01	1.81E-01	1.15E-03	9.18E-03	2.71E-01	1.32E-01	cha
6	4.09E-03	1.65E-02	4.82E-01	3.21E-01	2.05E-03	1.65E-02	4.82E-01	1.61E-01	cha
7	7.75E-03	4.55E-02	8.67E-01	5.86E-01	3.88E-03	4.55E-02	8.67E-01	2.73E-01	cha
8	1.36E-02	1.09E-01	1.41E+00	8.59E-01	6.78E-03	1.09E-01	1.41E+00	4.20E-01	cha
9	1.31E-02	1.05E-01	1.37E+00	8.12E-01	6.54E-03	1.05E-01	1.32E+00	4.66E-01	cha
10	1.31E-02	1.19E-01	1.32E+00	8.12E-01	6.54E-03	1.19E-01	1.32E+00	4.66E-01	cha
	Req	Req	Zeq	FACTOR POTENCIA	AMP FASE	POT SALIDA	POT. ELEC ENTRADA	RENDIM.	
1	4.43E-02	9.97E-03	4.54E-02	2.20E-01	5.60E+03	6.72E+05	9.36E+05	7.18E-01	M
2	4.64E-02	1.44E-02	4.84E-02	2.97E-01	5.74E+03	8.59E+05	1.18E+06	7.26E-01	M
3	5.47E-02	1.51E-02	5.63E-02	2.66E-01	4.48E+03	6.39E+05	9.07E+05	6.95E-01	M
4	6.14E-02	1.57E-02	6.34E-02	2.49E-01	4.91E+03	5.10E+05	7.56E+05	6.75E-01	M
5	6.94E-02	1.77E-02	7.16E-02	2.49E-01	3.55E+03	4.52E+05	6.70E+05	6.75E-01	M
6	1.23E-01	3.18E-02	1.27E-01	2.50E-01	2.00E+03	2.56E+05	3.79E+05	6.75E-01	M
7	2.30E-01	6.50E-02	2.45E-01	3.67E-01	1.04E+03	1.87E+05	2.74E+05	6.03E-01	M
8	3.88E-01	2.45E-01	9.59E-01	5.74E-01	5.54E+02	1.66E+05	2.25E+05	7.38E-01	M
9	3.69E-01	2.35E-01	4.37E-01	5.38E-01	5.82E+02	1.74E+05	2.38E+05	7.39E-01	M
10	3.83E-01	2.61E-01	4.64E-01	5.63E-01	5.46E+02	1.74E+05	2.35E+05	7.40E-01	M

TABLA 1 Cálculo del error entre valores iniciales y finales para cada paso del proceso para diseñar el MIL de dimensiones reales

	POT		FACTOR		RENDIM.		ANP		Ieq	
	SALIDA	% error	POT.	% error	Rendim.	% error	FASE	% error	Ieq	% error
1	2.73E+02		6.34E+01		1.97E+01		7.52E+02		8.83E+01	
2	3.77E+02		5.03E+01		2.10E+01		6.97E+02		8.75E+01	
3	2.50E+02		5.37E+01		1.50E+01		5.02E+02		8.53E+01	
4	1.83E+02		5.87E+01		1.24E+01		5.11E+02		8.36E+01	
5	4.51E+02		6.19E+01		1.24E+01		4.86E+02		8.29E+01	
6	4.22E+01		6.15E+01		3.82E+00		2.57E+02		7.20E+01	
7	3.77E+00		4.67E+01		5.01E+00		8.53E+01		4.60E+01	
8	7.58E+00		1.78E+01		8.40E+00		3.57E+00		3.45E+00	
9	2.31E+00		1.73E+01		8.50E+00		8.74E+00		8.04E+00	
10	3.43E+00		1.34E+01		8.80E+00		2.46E+00		2.40E+00	

Voltaje de línea                    menor a 50 V

Establecidos estos límites, se seleccionan factores de escala y se calculan los parámetros del modelo afectados por los límites. (tabla XI)

En el caso de que los parámetros calculados estén fuera de los límites, se seleccionan nuevos factores de escala y se vuelven a calcular los parámetros hasta que estén dentro de los límites establecidos.

Luego, se calculan los parámetros restantes de acuerdo a los factores de escala seleccionados.

La Tabla XII nos muestra los resultados del proceso hasta determinar los parámetros de construcción del modelo.

La figura 2.12 , presenta un resumen del procedimiento de diseño que se sigue hasta obtener los parámetros de construcción de la máquina real y su modelo a escala.

La figura 2.13 nos muestra la simbología usada para representar las dimensiones del núcleo primario y la riel de reacción secundaria.

TABLA II Factores de escala y parámetros principales del modelo a escala

FACTOR ESCALA LONGITUD	FACTOR ESCALA VUELTAS	FACTOR ESCALA CORRIENTE	ANCHO DE BARRA m	ANCHO DE DIENTE m	VOLTAJE DE FASE V	FRECUENCIA Hz	VELOCIDAD m/s	POTENCIA ELECT. DE ENTRADA W
1	1.25E-01	8.00E-01	3.45E-03	1.72E-03	1.04E+01	3.84E+03	1.33E+02	8.67E+01
2	1.28E-01	9.00E-01	3.53E-03	1.77E-03	1.45E+01	3.66E+03	1.30E+02	1.36E+02
3	1.28E-01	1.00E+00	3.53E-03	1.77E-03	1.79E+01	3.66E+03	1.30E+02	1.68E+02
4	1.28E-01	1.00E+00	3.53E-03	1.77E-03	1.89E+01	3.66E+03	1.30E+02	1.87E+02
5	1.28E-01	1.15E+00	3.53E-03	1.77E-03	2.37E+01	3.66E+03	1.30E+02	2.22E+02
6	1.28E-01	1.00E+00	3.53E-03	1.77E-03	1.69E+01	3.66E+03	1.30E+02	1.49E+02
7	1.28E-01	9.00E-01	3.53E-03	1.77E-03	1.34E+01	3.66E+03	1.30E+02	1.15E+02
8	1.28E-01	8.80E-01	3.53E-03	1.77E-03	1.31E+01	3.66E+03	1.30E+02	1.16E+02
9	1.28E-01	8.80E-01	3.53E-03	1.77E-03	1.32E+01	3.66E+03	1.30E+02	1.18E+02
10	1.28E-01	8.80E-01	3.53E-03	1.77E-03	1.34E+01	3.66E+03	1.30E+02	1.21E+02

TABLA XII Parámetros de construcción y operación del Modelo a escala

PROFUND. DE RAJADA at	ALTURA DEL SEGUND. at	ANCHO DEL NUCLEO at	ALTURA DEL NUCLEO at	NUMERO DE RAJURAS	PAIRES DE POLOS	C2 at	VUELTAS POR FASE
1	8.62E-03	5.02E-02	2.50E-02	3.50E-02	2.90E+01	2.00E+00	7.50E-03
2	8.83E-03	5.12E-02	2.50E-02	3.50E-02	2.90E+01	2.00E+00	7.68E-03
3	8.83E-03	5.12E-02	2.50E-02	3.50E-02	2.90E+01	2.00E+00	7.68E-03
4	8.83E-03	5.12E-02	2.50E-02	3.50E-02	2.90E+01	2.00E+00	7.68E-03
5	8.83E-03	5.12E-02	2.50E-02	3.50E-02	2.90E+01	2.00E+00	7.68E-03
6	8.83E-03	5.12E-02	2.50E-02	3.50E-02	2.90E+01	2.00E+00	7.68E-03
7	8.83E-03	5.12E-02	2.50E-02	3.50E-02	2.90E+01	2.00E+00	7.68E-03
8	8.83E-03	5.12E-02	2.50E-02	3.50E-02	2.90E+01	2.00E+00	7.68E-03
9	8.83E-03	5.12E-02	2.50E-02	3.50E-02	2.90E+01	2.00E+00	7.68E-03
10	8.83E-03	5.12E-02	2.50E-02	3.50E-02	2.90E+01	2.00E+00	7.68E-03

ENTREN. at	ANCHO DEL SEGUND. at	VELOCID SINC. m/s	AMPER. FASE A	freq cha	RESISTEN. PRIMARIO cha	GRUPO POL/FASE	POTENCIA DE SALIDA W
1	3.13E-03	1.00E-03	1.77E+02	4.20E+00	4.19E-02	2.00E+00	3.70E+01
2	3.20E-03	1.02E-03	1.73E+02	4.81E+00	4.60E-02	2.00E+00	8.91E+01
3	3.20E-03	1.02E-03	1.73E+02	4.81E+00	5.11E-02	2.00E+00	1.10E+02
4	3.20E-03	1.02E-03	1.73E+02	5.02E+00	5.11E-02	2.00E+00	1.23E+02
5	3.20E-03	1.02E-03	1.73E+02	4.81E+00	5.00E-02	2.00E+00	1.43E+02
6	3.20E-03	1.02E-03	1.73E+02	4.55E+00	5.11E-02	2.00E+00	9.91E+01
7	3.20E-03	1.02E-03	1.73E+02	4.64E+00	4.60E-02	2.00E+00	7.58E+01
8	3.20E-03	1.02E-03	1.73E+02	4.55E+00	4.50E-02	2.00E+00	7.80E+01
9	3.20E-03	1.02E-03	1.73E+02	4.60E+00	4.50E-02	2.00E+00	7.78E+01
10	3.20E-03	1.02E-03	1.73E+02	4.65E+00	4.50E-02	2.00E+00	7.96E+01

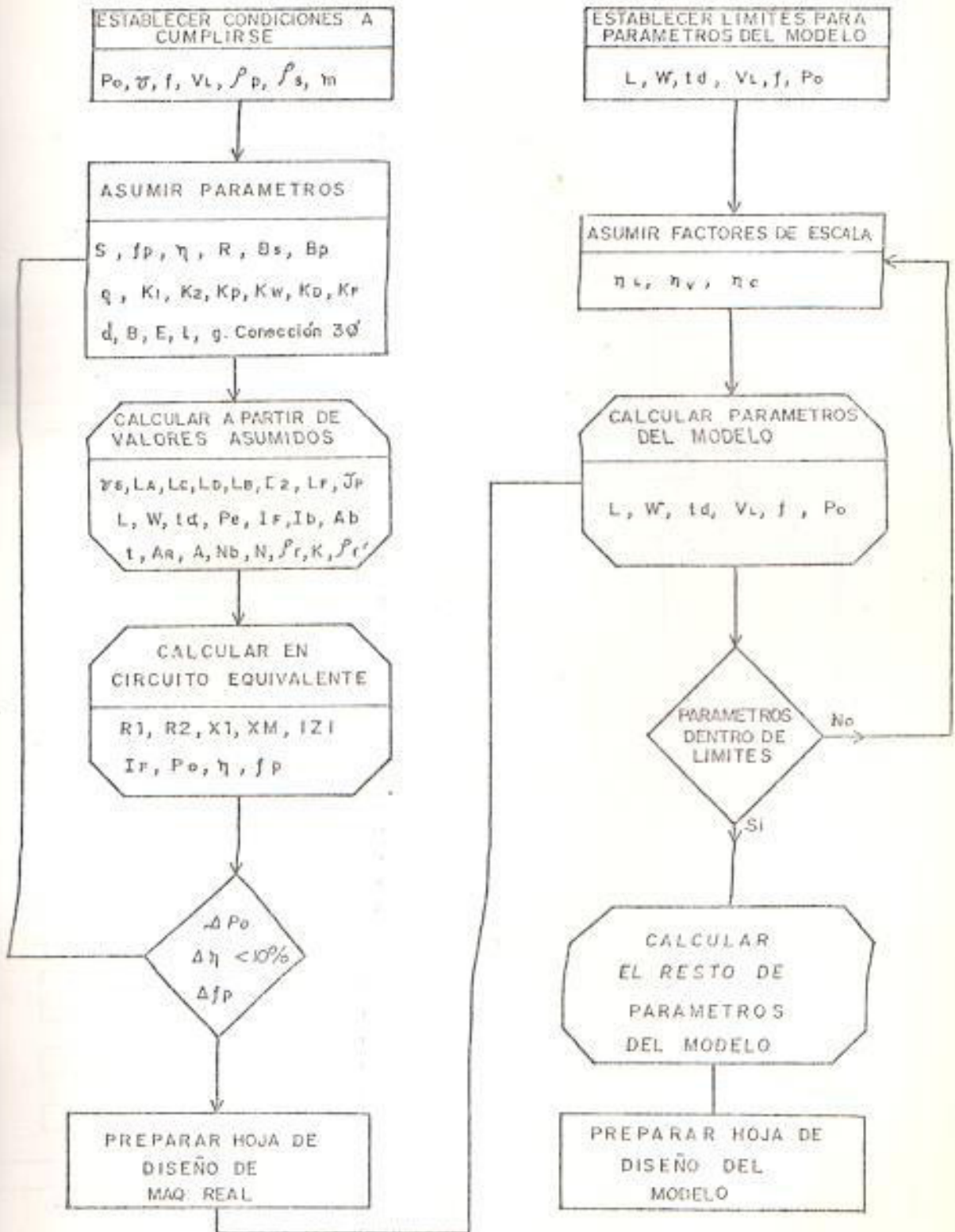


Fig. 2.12.- Procedimiento para obtener parámetros de máquina real y modelo

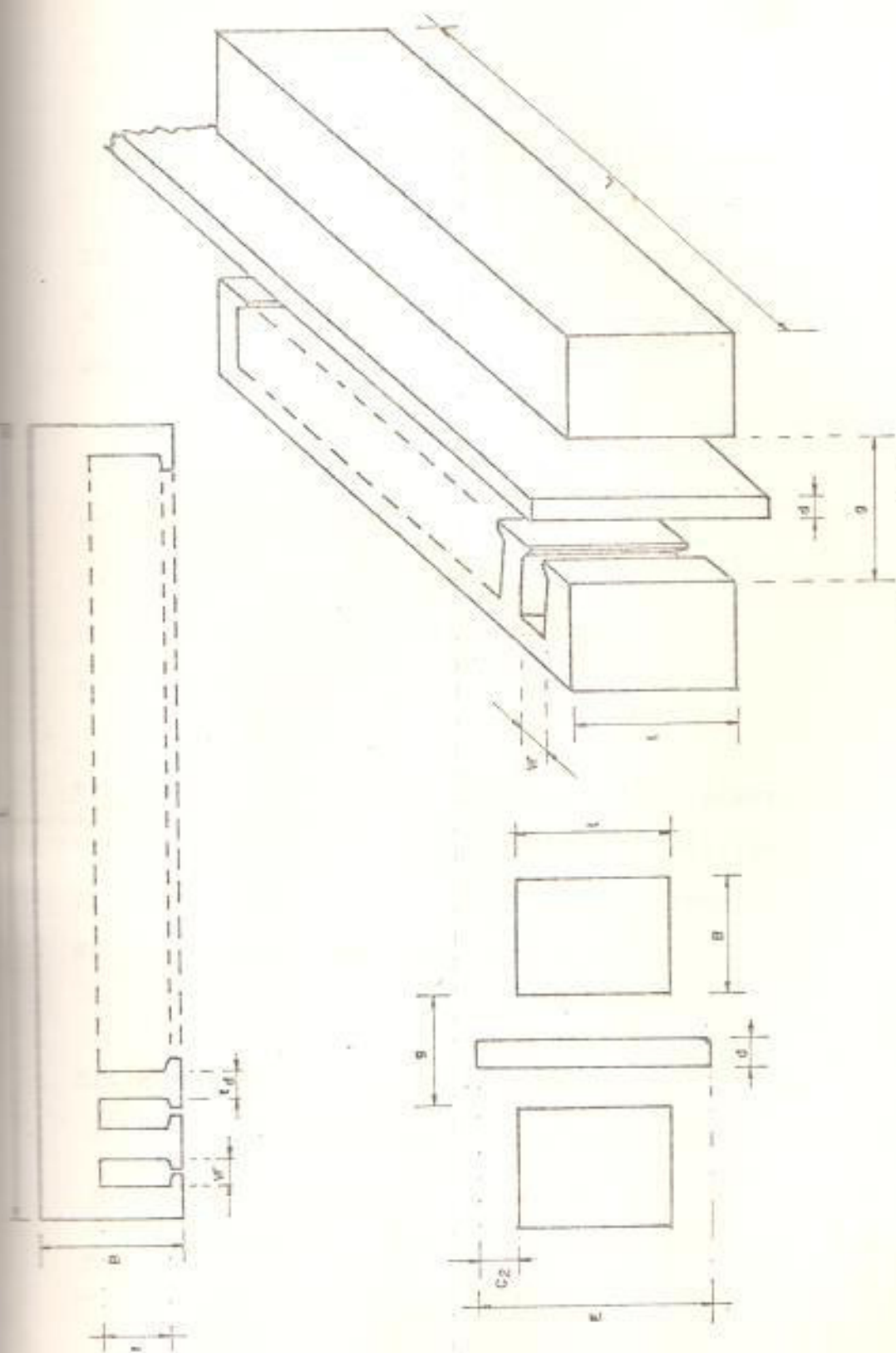


Fig. 2.13.- Símbolos usados en el núcleo primario y riel de reacción secundaria

## CAPITULO III

### CONSTRUCCION DEL MODELO A ESCALA

El conjunto necesario para el funcionamiento adecuado del modelo requiere la construcción de las siguientes partes :

- a) Núcleos magnéticos
- b) Devanado Primario
- c) Riel de Reacción Secundaria
- d) Sistema Mecánico de Tracción
- e) Toma de Energía

En este capítulo, se hablará, acerca de las características de los materiales utilizados, y los procedimientos que se siguieron para construir cada una de las partes antes mencionadas.

#### 3.1 MATERIALES A UTILIZARSE EN LA CONSTRUCCION

Las características de los materiales seleccionados, para construir cada una de las partes que constituyen el modelo, son las siguientes:

- a) Núcleos Magnéticos.- El núcleo magnético



primario del motor, será construido, utilizando un material ferromagnético cuya densidad de campo máxima es aproximadamente  $1.6 \text{ WB/m}^2$  (la característica de magnetización aproximada de este material se muestra en la fig. 3.1). El material es acero al silicio para transformadores.

Con el objeto de evitar pérdidas de potencia por corrientes de Foucault, el núcleo magnético será construido usando chapas de 0.5 mm de espesor.

- b) Devanado Primario.- La capacidad de conducción de corriente del conductor que constituye este devanado, debe ser suficiente para transportar la corriente que demanda el motor en sus diferentes regímenes de trabajo sin provocar un aumento exagerado de temperatura.

El material seleccionado es: Alambre de cobre comercial # 23 AWG cubierto con barniz clase F, cuyo incremento permitido de temperatura es de 120 grados centígrados. La resistividad de este material es  $1.72 \times 10^{-8} \text{ ohm-mt.}$

- c) Riel de Reacción Secundaria.- El material

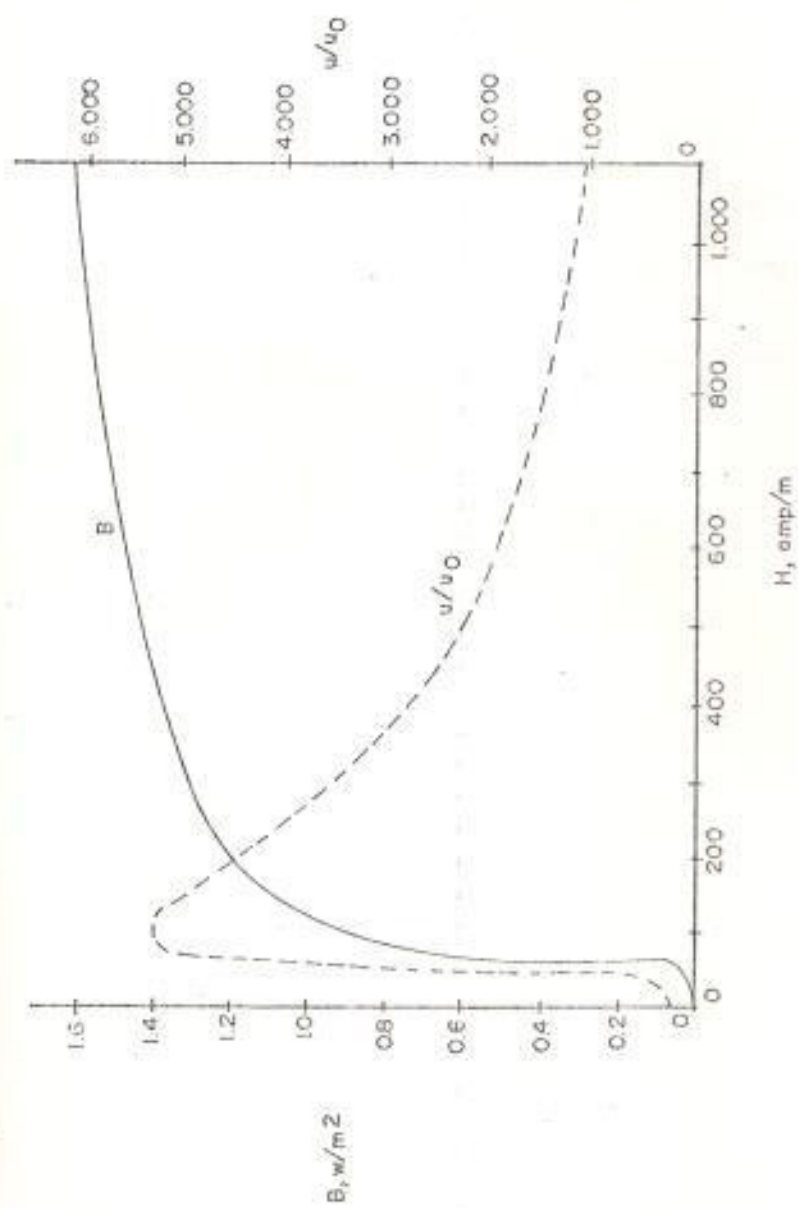


Fig. 3.1. Curvo de magnetización y permeabilidad relativa de hierro comercial (recocido)

necesario para construir la riel de reacción secundaria, debe ser un material con suficiente rigidez, buena conducción de corriente y bajo costo.

El material seleccionado es : Aluminio comercial de resistividad aproximada  $2.63 \times 10^{-8}$  ohm-mt, construido en plancha de 1.5 mm de espesor.

d) Sistema Mecánico de Tracción.- Forman este sistema :

EL Soporte del Núcleo Magnético

Las Ruedas Guía

La Riel Guía.

El soporte del núcleo magnético debe ser un material de bajo peso y de gran rigidez. El material escogido lo constituye un perfil de aluminio comercial cuya forma y dimensión, es adecuada para contener los núcleos (ver fig 3.2)

Las ruedas guía, en este caso, deben ser de bajo peso y no desgastarse fácilmente. El material escogido es Bronce Fosfórico.

La Riel Guía debe ser un material de gran rigidez ,y que permita su alineación. El material seleccionado lo constituyen varillas de Hierro comercial en perfil tipo T, con una sección transversal de 1" x 1/8".

- e) Toma de Energía.- Este sistema esta constituido por el material conductor que transporta la energía a lo largo de toda la pista, y el sistema de escobillas, el cual alimenta al motor. El conductor de transporte debe ser de baja resistividad y de gran rigidez . El material seleccionado lo constituye una barra de cobre por fase con una sección transversal de 1/2" x 1/8". ver fig. 3.3.

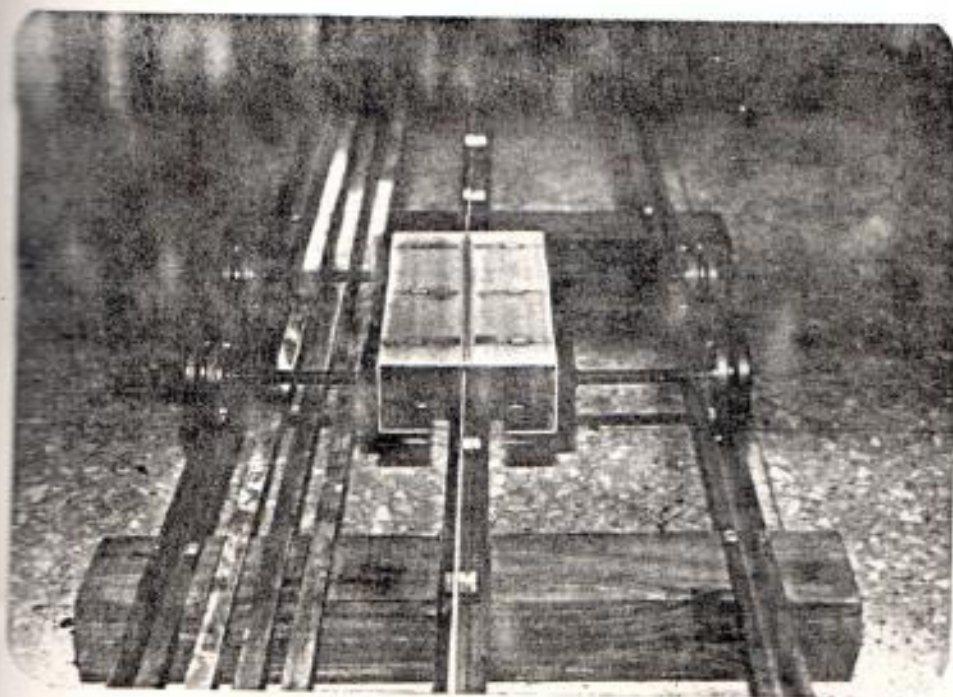


Fig 3.2 Perfil de aluminio para contener núcleos primarios

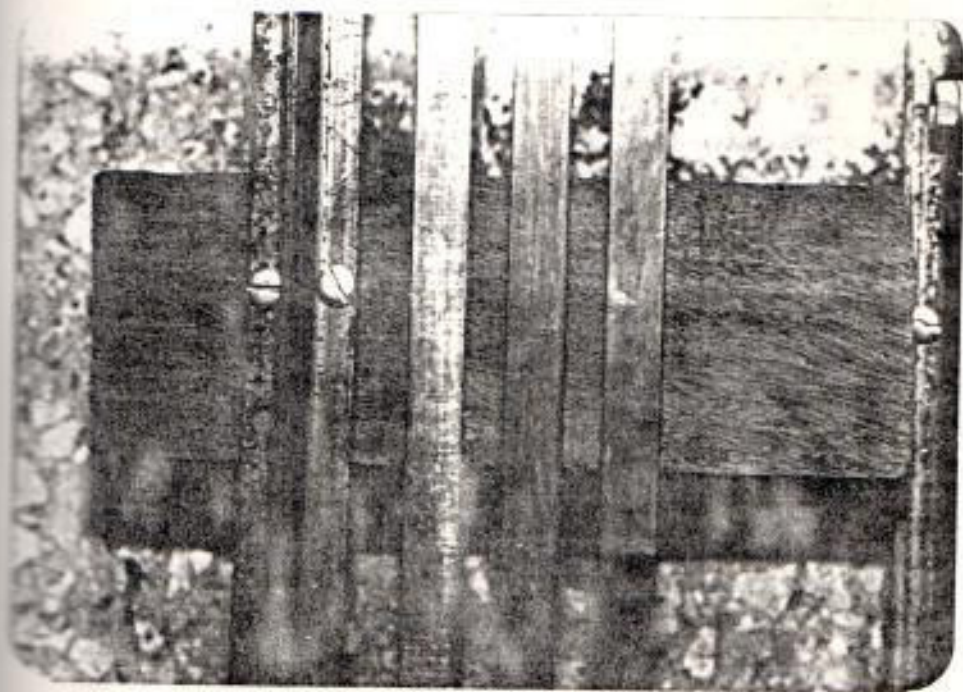


Fig 3.3 Barras de cobre para toma de energía

### 3.2 CONSTRUCCION DEL NUCLEO MAGNETICO PRIMARIO.-

El núcleo magnético primario es fabricado con chapas de acero al silicio de 0.5 mm de espesor, las cuales son tratadas en diferentes procesos, hasta darle al núcleo la forma requerida por el diseño. Estos Procesos son:

- a) Troquelado
- b) Limado
- c) Baño de Barniz
- d) Prensa
- e) Secado al Horno

Los Planos P 1/1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, (ver apéndice A), describen el troquel construido para la perforación de las chapas de acero, a fin de obtener las ranuras según el diseño. El troquel consta de las siguientes partes:

- a) Cuerpo y Guía
- b) Punzón
- c) Matriz

El punzón y la matriz dan la forma a la ranura,

mientras que el cuerpo y la guía contienen al punzón y la matriz y permiten el deslizamiento de estos para producir el corte , ver figuras 3.4 y 3.5 .

El troquel es instalado en una troqueladora cuya capacidad debe estar de acuerdo con el tipo de material y corte que se va a efectuar. En nuestro caso para fabricar una chapa de acero al silicio a razón de un corte de ranura por golpe, fue suficiente con emplear una troqueladora de 8 toneladas.

Una vez que se obtienen las chapas ranuradas, estas deben ser preparadas para su apilamiento. Dicha preparación consiste en eliminar cualquier " Rebaba " , llamandose así, a ciertas deformaciones en el material producidas por cortes mal efectuados, ya sea por el desgaste del punzón y matriz o por el desalineamiento de los pilares guías del troquel, ver figura 3.6 .

Es indispensable lo cual se puede concluir por experiencia, que el troquel sea construido con el mayor cuidado posible, a fin de evitar zonas desacopladas o desalineadas.

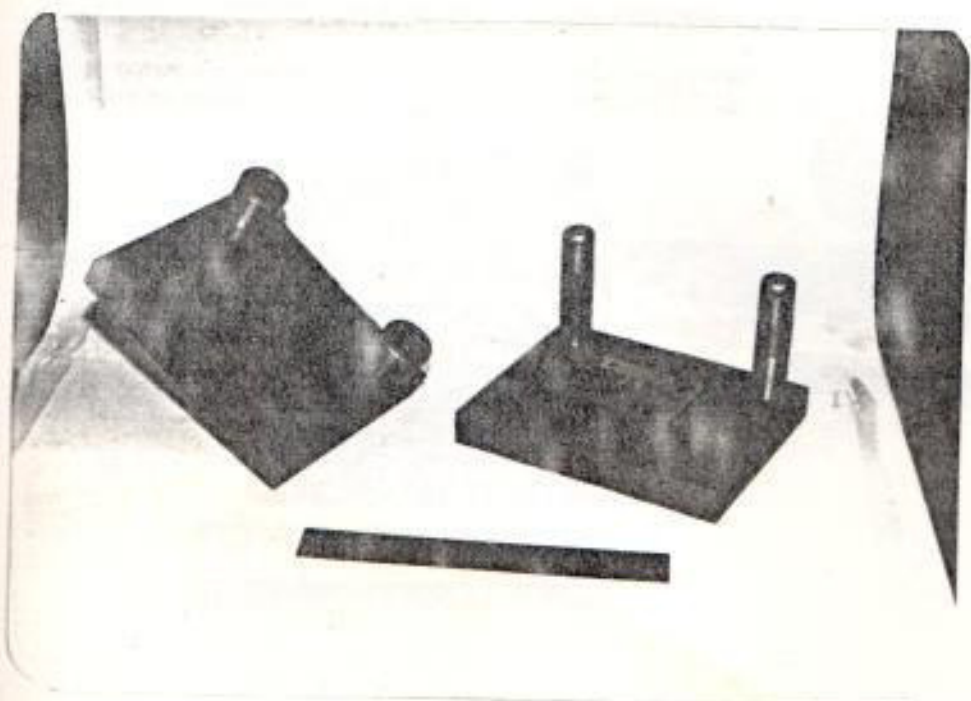


Fig 3.4.a Placas de cuerpo y guía del troquel separadas

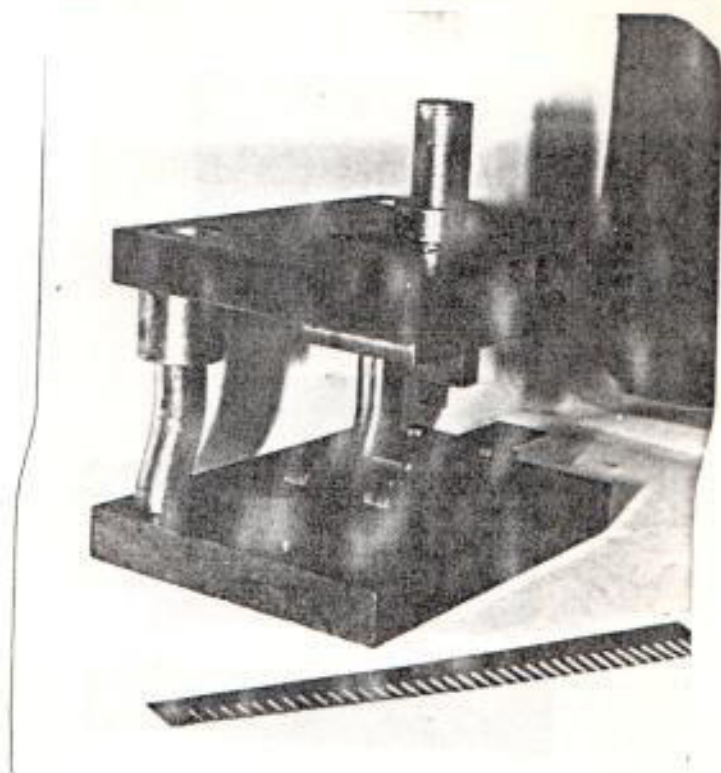


Fig 3.4.b Placas de cuerpo y guía del troquel acopladas



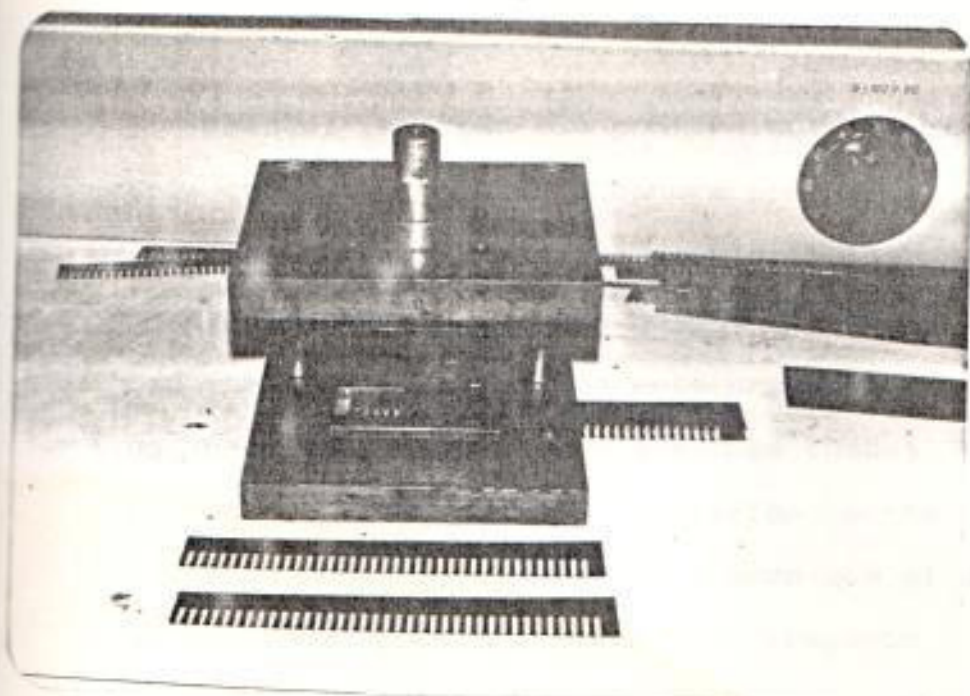


Fig. 3.5.a Vista frontal del troquel.



Fig. 3.5.b Troquel mostrando Punzón y Matriz.

El troquel tal como fué construido, efectúa en una sola chapa, un corte de ranura por golpe. Es decir que para obtener una chapa completamente ranurada es necesario efectuar tantos golpes como ranuras tiene cada chapa. De acuerdo a este procedimiento, surge un problema implícito a él: Las chapas ranuradas encuentran una ligera desviación entre sí, al apilarse unas a otras, provocando que el ancho de ranura del bloque o núcleo compacto se vea seriamente disminuido. Fig 3.7.

Este problema puede ser eliminado, construyendo un troquel que efectúe de un solo golpe todas las ranuras, de esta manera sería suficiente dar tantos golpes como número de chapas forman al núcleo. Así se ahorra gran cantidad de tiempo en la fabricación y se obtienen mejores resultados.

La contraparte de este procedimiento, es el aspecto económico, puesto que un troquel de estas características es muy costoso y además la troqueladora a usarse debe ser de mayor tonelaje.

Considerando que este proyecto comprendía la fabricación de un solo motor, no se justifica una

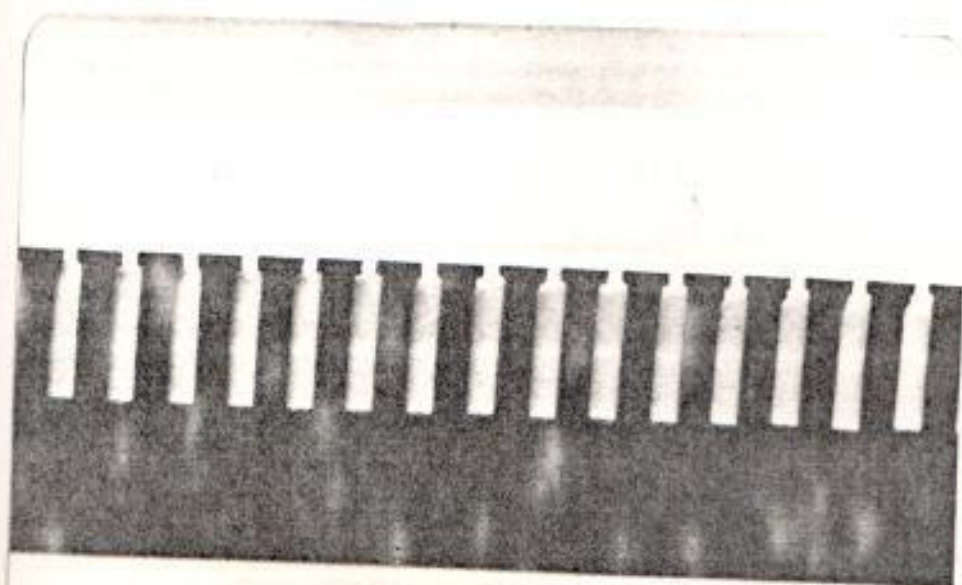


Fig. 3.6 Corte de ranuras en chapa de acero.



Fig. 3.7 Apilamiento de chapas ranuradas.

inversión de tal naturaleza. Sin embargo el troquel construido arroja un porcentaje de chapas coincidentes de aproximadamente 30% con una desviación de .5mm y un porcentaje de 60% con una desviación de 1 mm. En consecuencia si se acepta una desviación de 0.6 mm, la cual se puede corregir mediante un proceso de limado, será necesario procesar cerca de 200 chapas para obtener 2 núcleos de 20 mm de espesor conteniendo cada uno cerca de 40 chapas.

Una vez que se seleccionan las chapas con mayor coincidencia, estas se apilan unas a otras en la cantidad necesaria para formar cada núcleo, luego se las somete al proceso de limado hasta que el ancho de ranura sea próximo al del diseño. A estas alturas es conveniente prensar los núcleos con el objeto de compactarlos. Esto se consigue utilizando una prensa de capacidad suficiente, en nuestro caso, 20 toneladas aplicadas en forma simétrica, para evitar zonas desacopladas.

La etapa final comprende un limado adicional y luego un baño de barniz, este baño cumple dos objetivos:

- a) Aislar eléctricamente las chapas a fin de evitar las pérdidas por corrientes de Foucault.
- b) Ayudar a mantener pegadas las chapas.

El barniz usado es del tipo comercial líquido, clase F con capacidad de aislamiento de 600 V.

Una vez que las chapas han sido barnizadas son llevadas a la prensa donde permanecen por lo menos 48 horas. Durante este tiempo, los núcleos deben mantenerse unidos por medio de pernos pasantes.

Luego de someterse a la prensa los núcleos barnizados se encuentran un poco más secos. Finalmente, son sometidos a temperaturas entre 100 y 80 grados centígrados para facilitar el secado del barniz. El tiempo de permanencia bajo dicha temperatura, depende del tipo de horno de secado que se utilice. En este caso, los núcleos permanecieron 48 horas aproximadamente.

Es importante, que durante el secado, los núcleos se sometan a una presión suficiente que los ayude a compactarse.

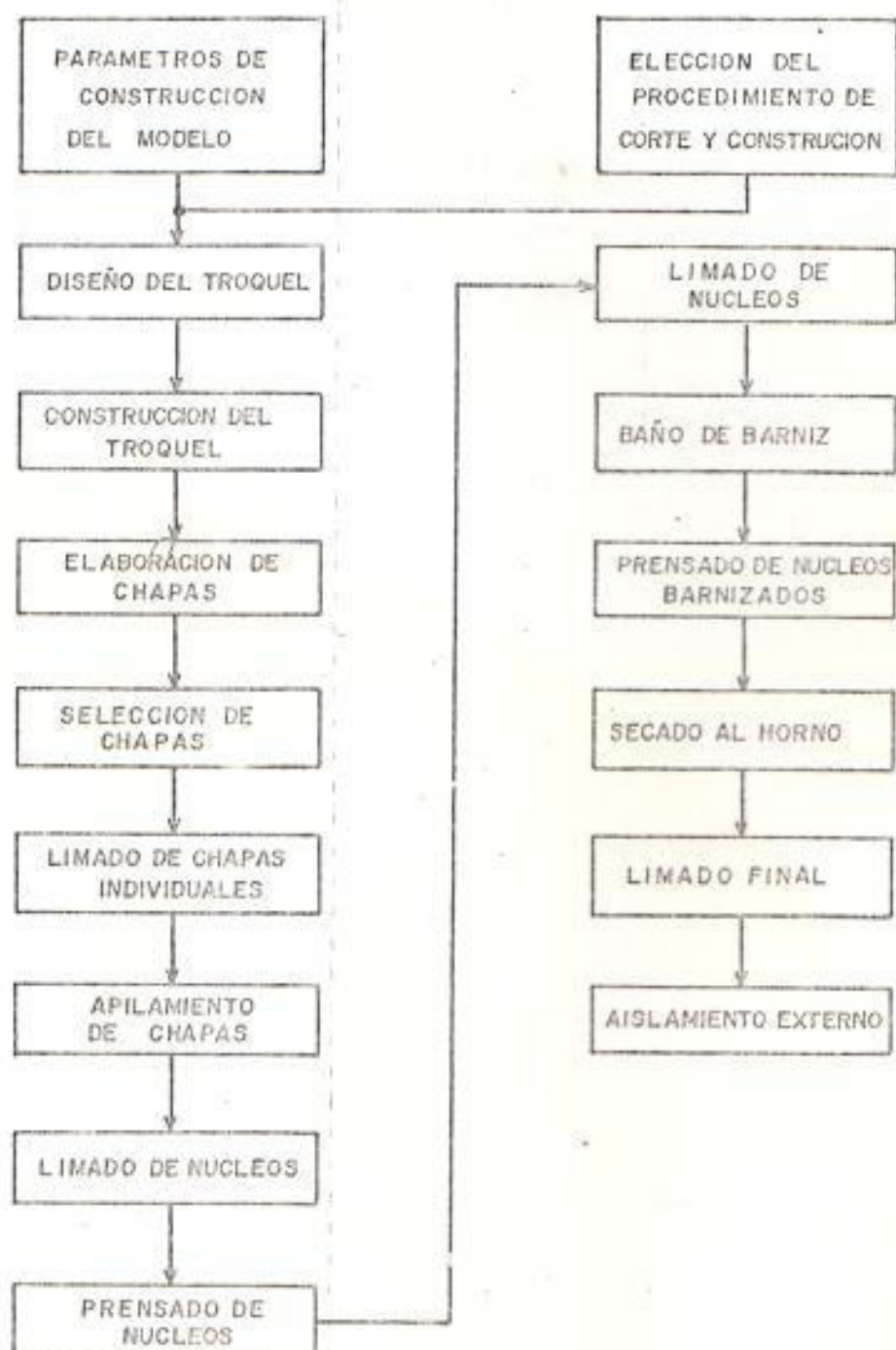


Fig. 3.8.- Pasos para elaborar núcleos magnéticos del mil

Finalmente, Una última limada es necesaria, para dejar a punto las ranuras. El proceso termina al aplicar una capa de aislante clase F tipo aerosol, para aislar exteriormente los núcleos.

La fig 3.8, nos resume los pasos seguidos para la elaboración de los núcleos magnéticos.

### 3.3 CONSTRUCCION DEL DEVANADO PRIMARIO .-

El diseño del modelo a escala nos da el calibre del conductor a usarse, el número de vueltas por bobina y el tipo de devanado a efectuarse. Con estos datos se procede a confeccionar en primer lugar, un molde tipo para todas las bobinas del devanado. En nuestro caso el molde construido en madera permite la realización de dos bobinas conectadas en serie, las cuales forman parte de un grupo Polo-Fase del devanado.

Luego, se usa la máquina bobinadora para construir el total de las bobinas según el diseño. Antes de depositar las bobinas en las ranuras del núcleo, estas deben aislarse con un papel aislante que cumpla con las siguientes características:

- a) No debe ocupar un espacio significativo en la ranura.
- b) Debe permitir un incremento de temperatura de hasta 80 grados centígrados sobre la temperatura ambiente.
- c) Debe ser fácilmente manejable a fin de darle la forma adecuada que lo amolde a la ranura.



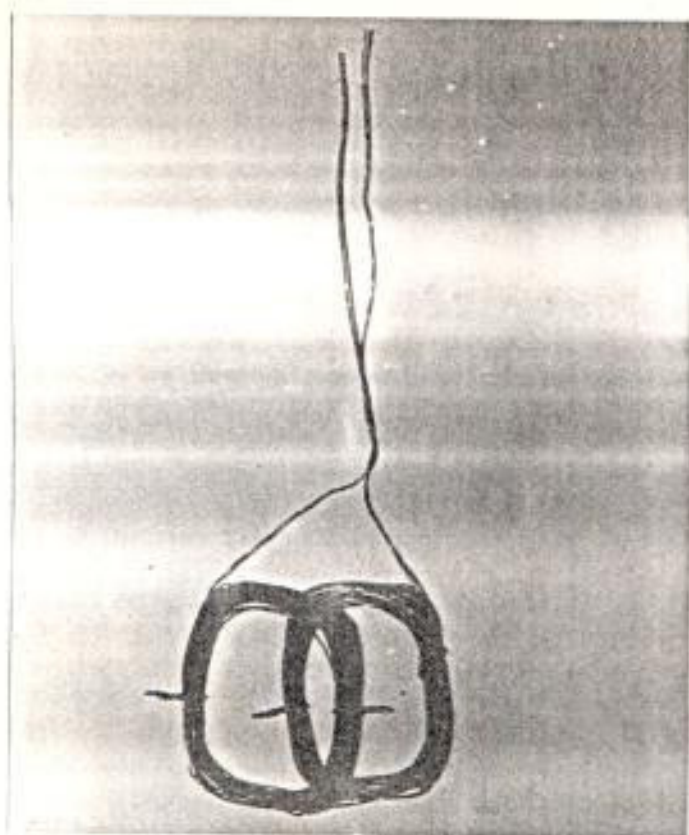


Fig. 3.9. Grupo bobina del devanado antes de ser depositado en las ranuras del núcleo.

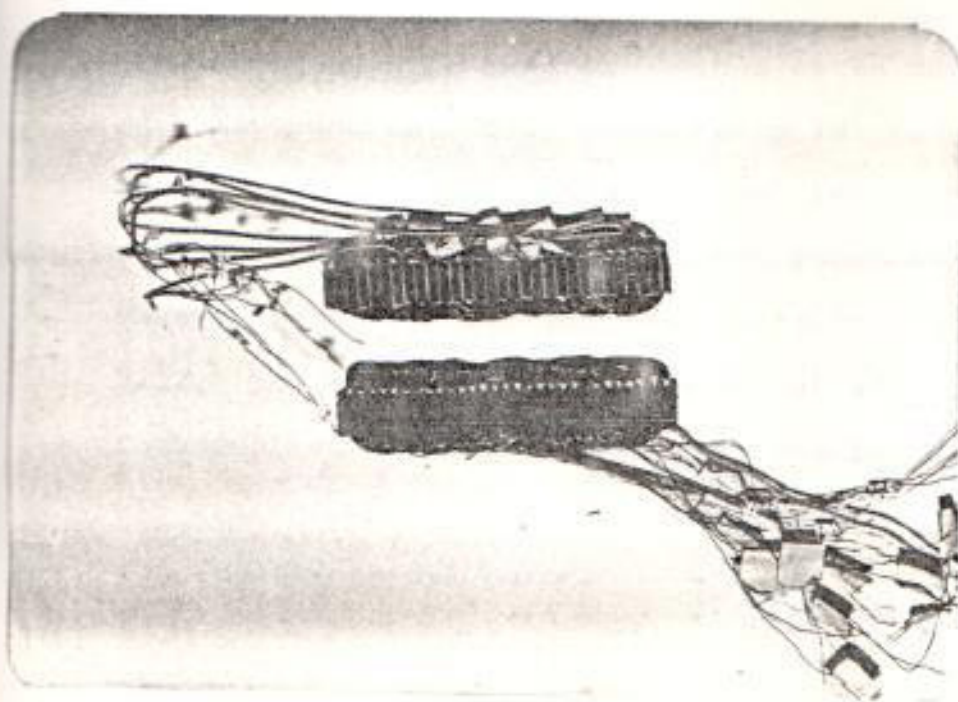


Fig. 3.10. Núcleos bobinados.

d) Debe evitar romperse con facilidad .

El material seleccionado, recibe el nombre comercial de TEFLON y tiene capacidad para aislar hasta 600 V.

La fig 3.9 , muestra un grupo bobina antes de ser depositada en el núcleo, la fig 3.10, muestra los núcleos completamente bobinados.

La colocación de las bobinas en los núcleos debe realizarse con mucho cuidado, si embargo, el papel aislante entre bobina y núcleo disminuye el peligro de tener una conexión directa entre conductor y núcleo, ver figura 3.11 .

Finalmente una vez que las bobinas están depositadas en las ranuras, debe asegurarse la ranura para evitar que uno o varios hilos de las bobinas se salgan, esto se consigue colocando pequeñas cuñas de madera en el extremo superior de la ranura. La fig 3.12, muestra un corte transversal de 2 ranuras consecutivas y los componentes necesarios para tener el aislamiento y seguridad adecuados para el buen funcionamiento del motor.

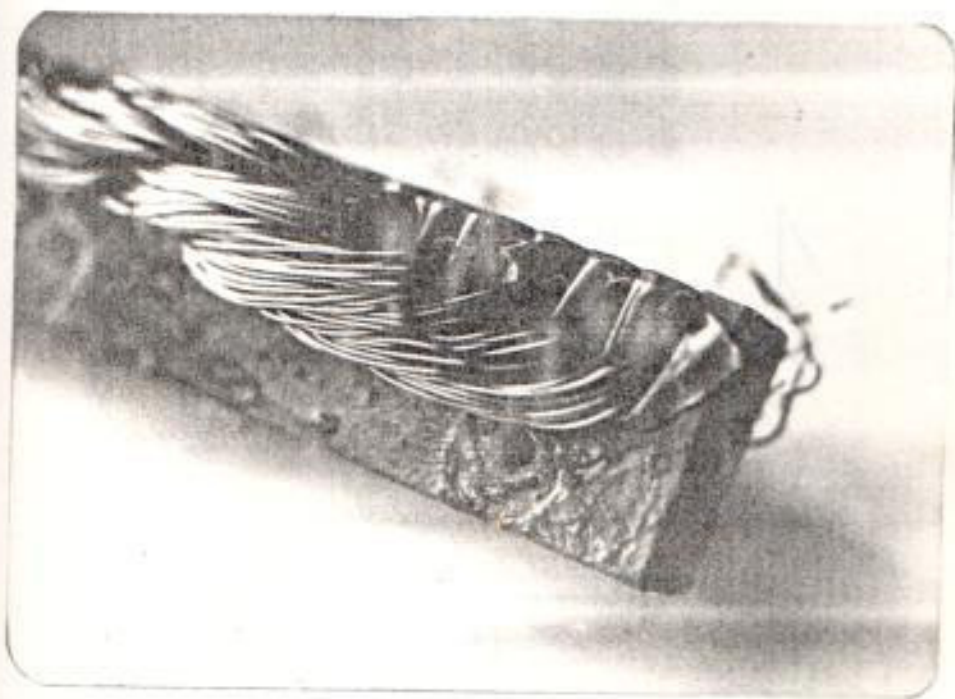


Fig. 3.11. Aislamiento entre bobinas y núcleos.

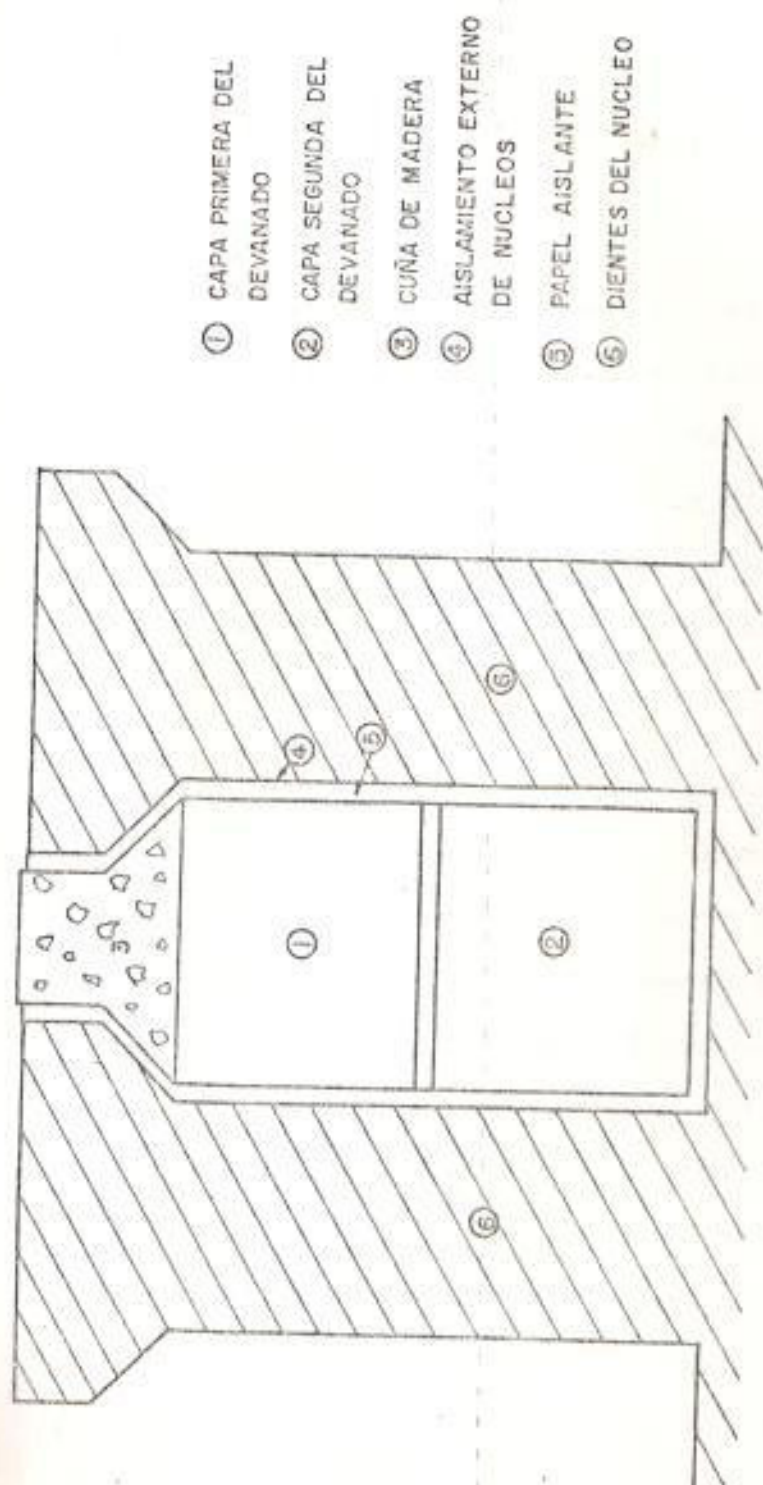


Fig. 3.12.- Corte de una ranura y los elementos del devanado

### 3.4 CONSTRUCCION DE LA RIEL DE REACCION SECUNDARIA.-

En los planos 2/1, 2/2, 2/3 (ver apêndice B) se muestran los elementos que forman la riel de reacci3n secundaria.

La hoja conductora secundaria, es construida en aluminio comercial con una resistividad aproximada de  $2.63 \times 10$  ohm-mt. El espesor de la hoja es de 1.5 mm, lo cual le da la sufuciente rigidez, a fin de evitar que el material se desvie y en un momento dado disminuya peligrosamente su distancia al n3cleo magn3tico primario.

Un detalle importante en la construcci3n, es la manera de sostener la hoja de aluminio. En este caso, la posici3n de la hoja es vertical, y se mantiene por medio de pernos pasantes con tuerca y anillos de contenci3n de 1/2 pulgada de diâmetro. Estos elementos apretan la hoja contra un perfil T de hierro comercial y van colocados en una separaci3n tal que no permita una significativa desviaci3n de la hoja entre ellos. La formacion de un " Seno " tal como lo muestra la fig 3.13, puede producir roces entre la hoja de aluminio y los n3cleos magn3ticos.

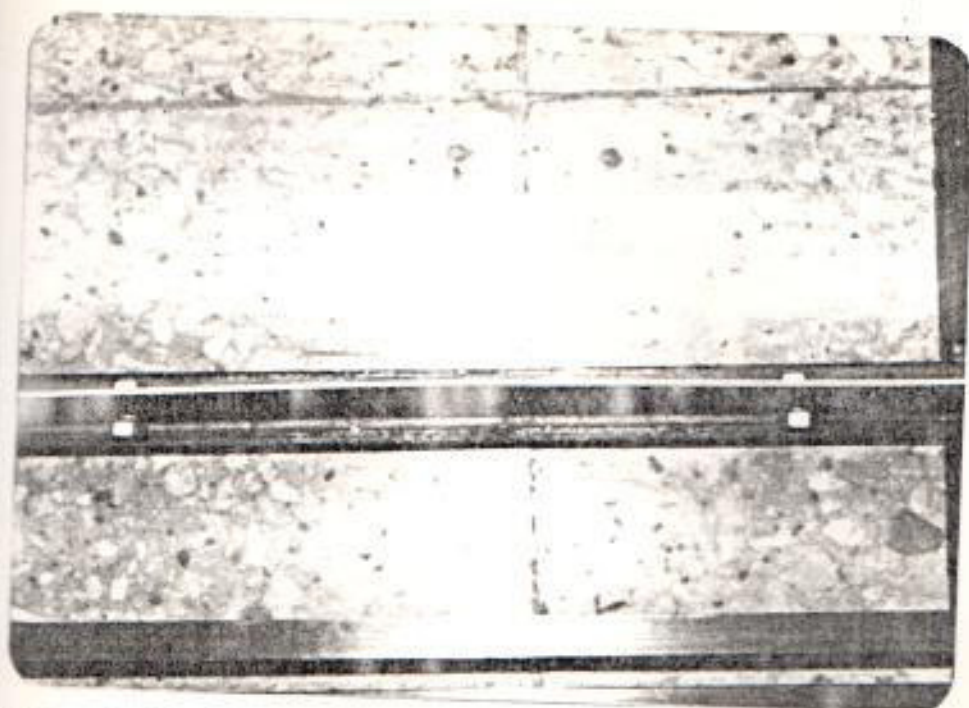


Fig. 3.13. Formación de un seno en la hoja secundaria.

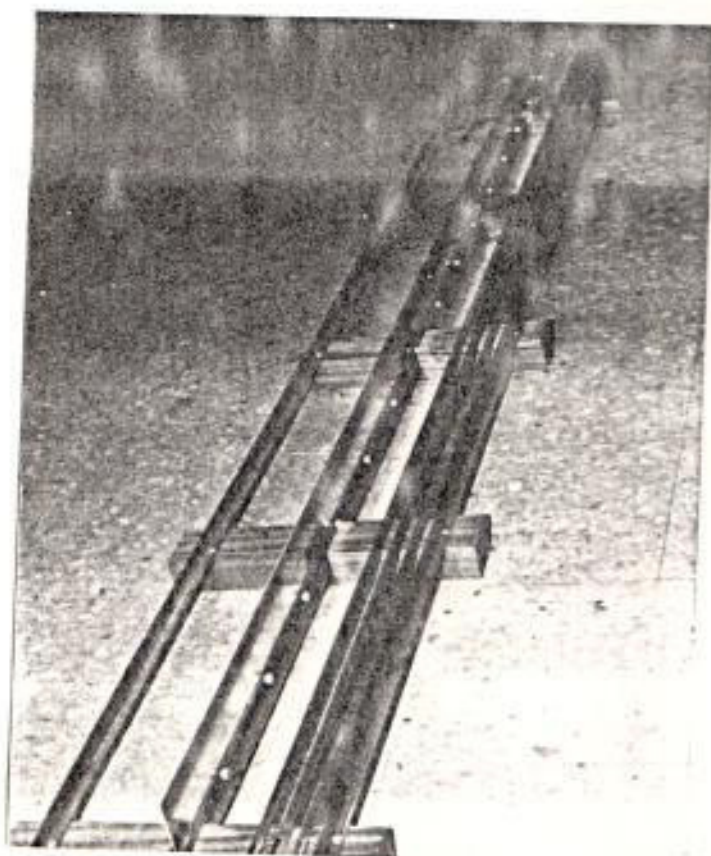


Fig. 3.14. Riel de reacción secundaria tal como es instalada.

El conjunto, hoja de aluminio y perfil T que la sostiene, va montado sobre una base de madera seca, la cual aísla eléctricamente el secundario del resto de partes del vehículo. La fig 3.14, muestra la Riel de Reacción Secundaria tal como es instalada.

### 3.5 CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE TOMA DE ENERGIA .-

El Sistema de toma de energía lo constituyen las barras de cobre para alimentación, el sistema de escobillas, y el arreglo para los conductores terminales del motor.

Las barras de cobre, reciben la energía directamente desde el tablero de control y la llevan a lo largo de la pista, dando servicio trifásico al motor por medio de tres barras de  $1/2$  " x  $1/8$  " de sección transversal con capacidad de conducción de 110 amperios. Esta capacidad de conducción esta sobredimensionada al valor que realmente demandará el motor, pero se lo hace para ganar en rigidez y consistencia y evitar que las barras se deflecten debido a la disposición que llevan en el conjunto.

El plano P 3/1 (ver apéndice B) muestra la disposición de las barras en el conjunto. Se puede notar que van montadas sobre una base de madera, en la cual se han elaborado tres canales para sostenerlas y aislarlas.

El sistema de escobillas comprende tres unidades cada una compuesta por los siguientes elementos:



- a) Porta escobilla
- b) Carbón o Escobilla
- c) Cable flexible de cobre
- d) Resortes
- e) Base para soportar todo el conjunto.

Los planos 4/1, 4/2 (ver apéndice B), muestran las partes que forman el Sistema de Escobillas y la forma como se instalan en el vehículo. En la fig 3.15 podemos observar el conjunto tal como va instalado.

Los Carbones o Escobillas hacen contacto con las barras de cobre durante toda la carrera del vehículo. El cable flexible de cobre, hace contacto con la escobilla y lleva la energía hacia una bornera de terminales, en donde se encuentran dispuestos los terminales del devanado primario del motor. La fig 3.16 , muestra dicha disposición.

Cada porta escobillas contiene internamente un resorte, cuyo objetivo es el de mantener presionado contra la barra de cobre al carbón o escobilla respectiva. De esta manera se asegura el contacto

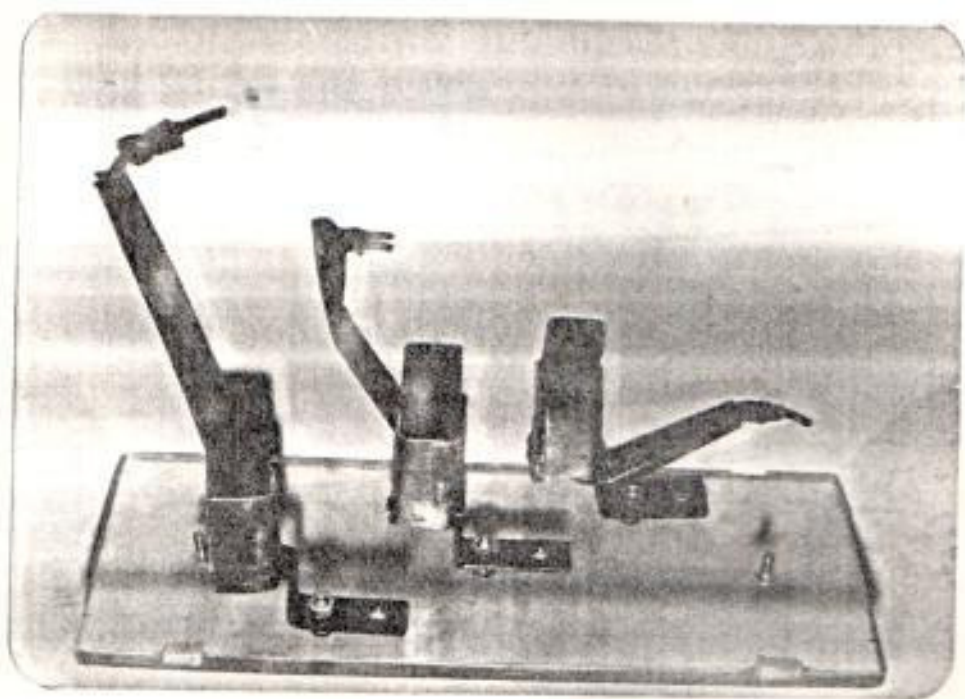


Fig. 3.15.a Elementos del sistema de escobillas.

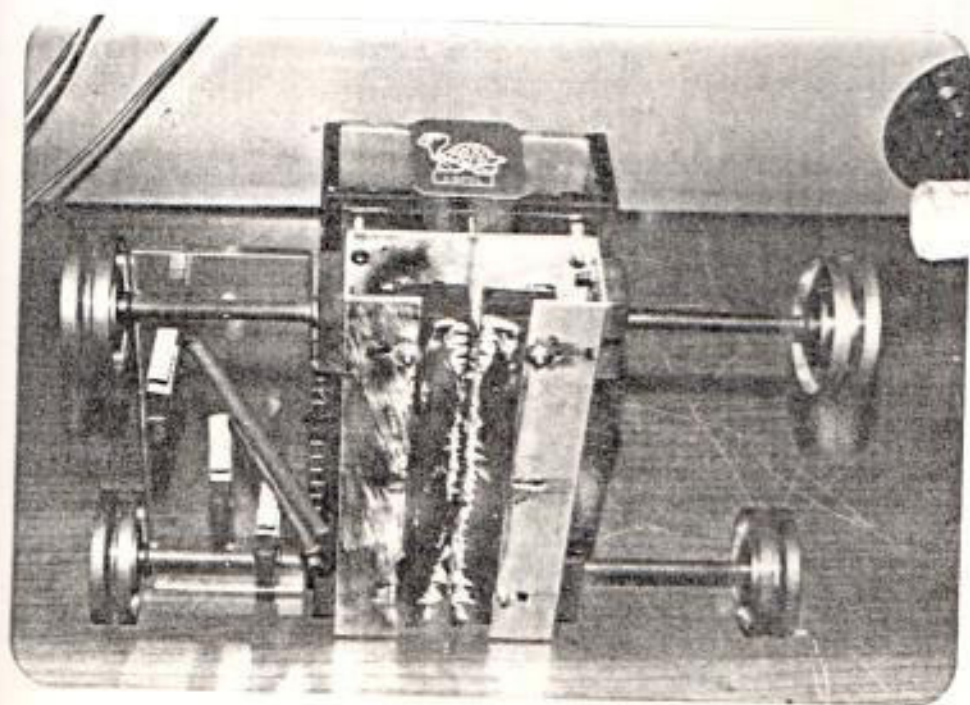


Fig. 3.15.b Conjunto de escobillas tal como es instalado

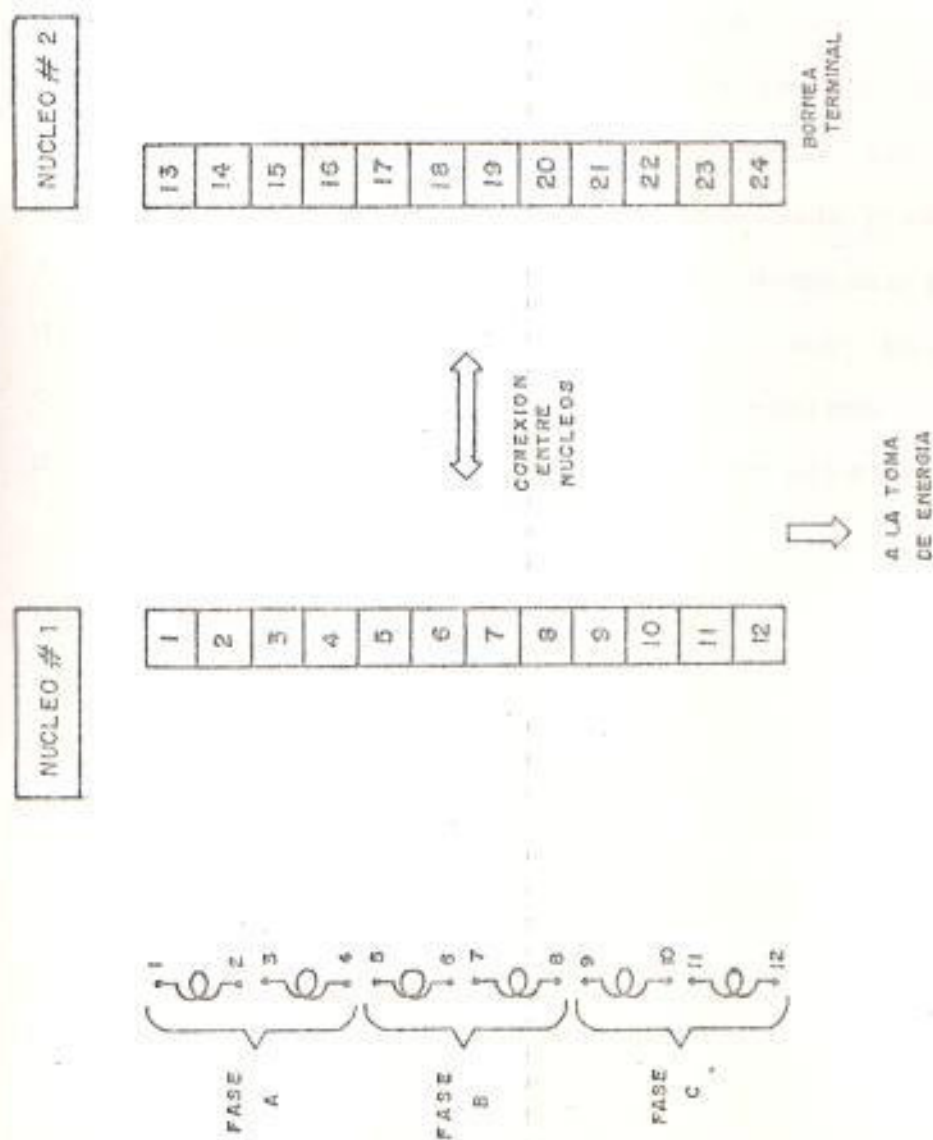


Fig. 3.16.- Disposicion de terminales del devcnado primario

entre la escobilla y la barra, evitando la aparición del chisporroteo, el cual deteriora ambas partes. Además, cualquier imperfección o desnivel en la barra, será absorbido por el resorte manteniendo así un contacto seguro con la barra.

La presión que el resorte ejerce sobre el carbón es un parámetro muy importante, ya que de esto depende parte de la fricción que se ejercerá sobre el vehículo. Así, si la presión es demasiado grande la fricción aumenta y el vehículo se desplazará con dificultad, pero si la presión es muy baja el contacto entre carbón y barra será demasiado débil y por lo tanto puede aparecer un chisporroteo perjudicial.

### 3.6 SISTEMA DE CONTROL SIMPLE.-

Para realizar con el modelo a escala, las pruebas experimentales que permitan predecir el comportamiento de la máquina real, es necesario que se construya un medio sencillo de controlar el arranque, parada y la velocidad de desplazamiento del motor.

Además, la fuente de alimentación deberá ser de voltaje y frecuencia variable, para cumplir con los requisitos impuestos por los factores a escala escogidos.

#### 3.6.1 Control para Arranque / Parada e Inversión de Marcha

De la misma manera que se controla un motor de inducción giratorio, se realizan con el modelo construido los controles para: Arranque Directo, Frenado por Contracorriente, Inversión de Marcha.

El circuito de fuerza y control mostrado en la figura 3.17, permite mantener al modelo en operación continua, mediante el uso de dos interruptores fin de carrera, convenientemente

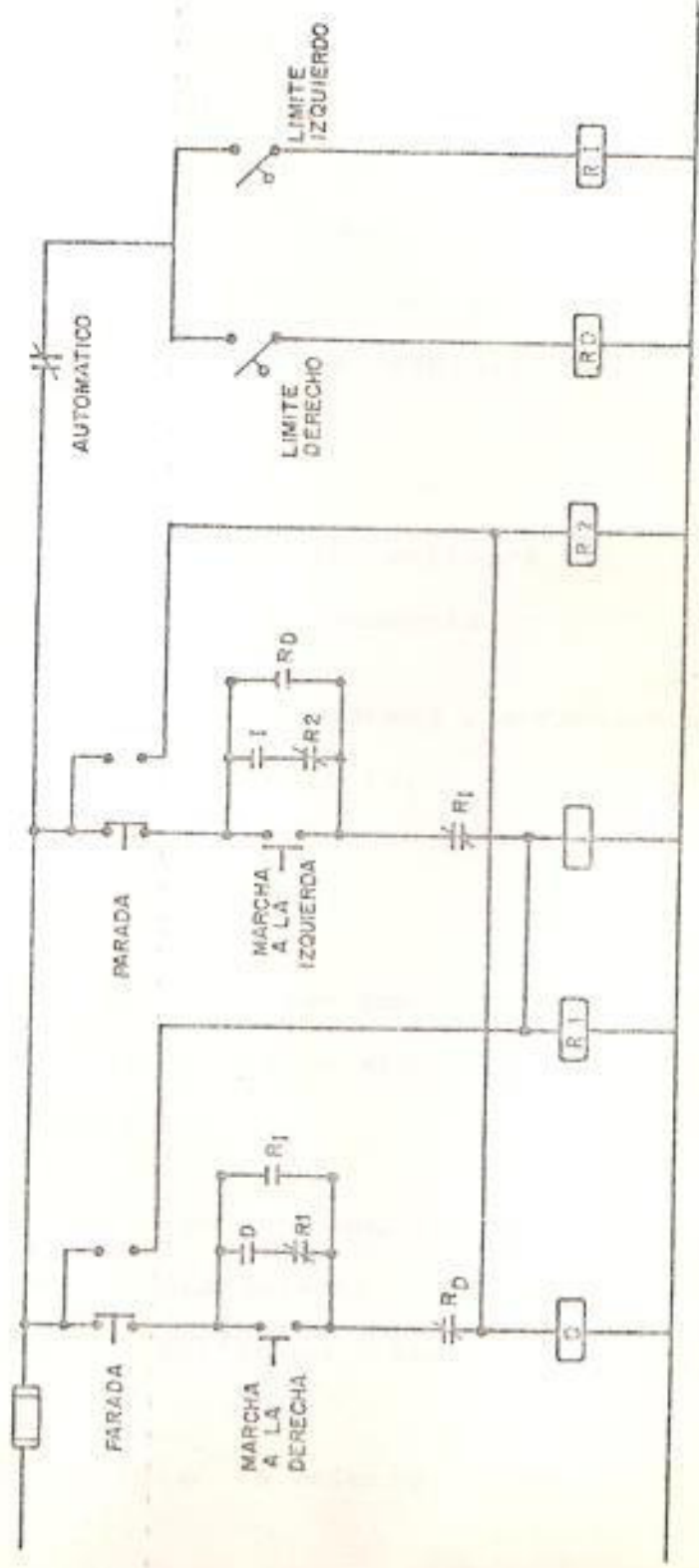
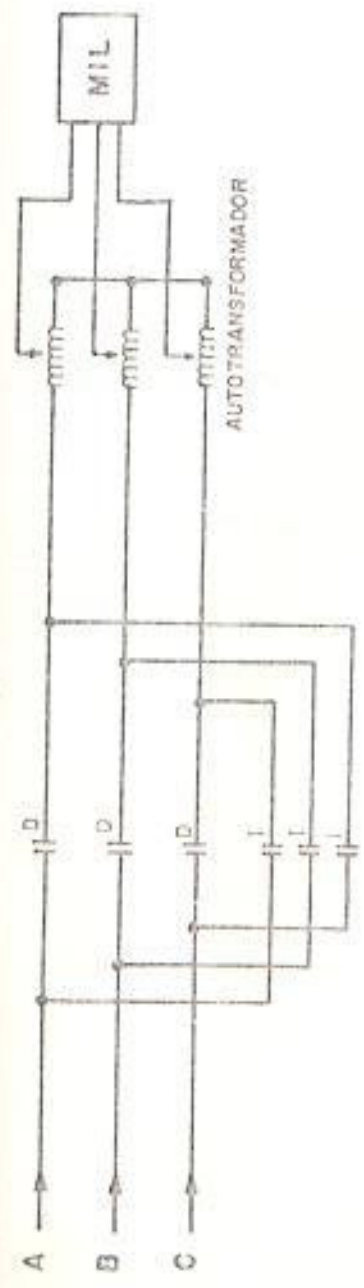


FIG. 3.17 CIRCUITO DE FUERZA Y CONTROL PARA PRUEBAS DEL MODELO . .

ubicados en los extremos de la pista. De esta manera, el motor es arrancado desde un extremo para avanzar hacia el otro, en donde activa un interruptor. Esta señal se aprovecha para intercambiar dos fases de la fuente de alimentación; lo que ocasiona que el motor frene por contracorriente y luego se desplace en sentido contrario al anterior.

Al llegar al otro extremo se activará el otro interruptor repitiéndose la secuencia.

Además, el motor puede ser parado y arrancado en cualquier punto de su trayectoria.

### 3.6.2 Cambio de Velocidad.-

La velocidad del MIL puede ser controlada variando la frecuencia de la fuente de alimentación, el voltaje, o el paso polar.

En el modelo a escala construido, se controla la velocidad de desplazamiento utilizando un Autotransformador trifásico con secundario variable.

Esta manera de controlar la velocidad resulta ser,

para el modelo construido, la más económica. Sin embargo, para máquinas de dimensiones reales es más conveniente el uso de convertidores de frecuencia con lo cual se varía directamente la velocidad sincrónica ( $V_s = 2 \mathcal{I}_{pf}$ ).



### 3.7 DESCRIPCION DEL SISTEMA MECANICO.-

Los Planos 5/1, 5/2, 5/3, 5/4 (ver apéndice B) describen las partes adicionales del motor, las cuales son las siguientes:

- a) Ruedas guía, ejes y placas soporte de ejes.
- b) Soporte de núcleos.
- c) Riel guía.
- d) Maderos para asentamiento del conjunto.

Los núcleos magnéticos, son contenidos por una estructura, la cual no debe ser pesada, pero sin embargo debe ser rígida. Los núcleos se sujetan a esta estructura por medio de pernos pasantes. (ver fig 3.18)

La rigidez del material con que se construya la estructura, le permitirá soportar los esfuerzos que causan las fuerzas de atracción y repulsión entre núcleos, presente en este tipo de motor de inducción.

Con la finalidad de realizar pruebas, la estructura construida dispone de 6 ranuras o canales, las cuales permiten deslizar los pernos pasantes que

sujetan los núcleos contra la estructura. De esta manera, se consigue aumentar o disminuir el entrehierro de la máquina.

En la estructura de soporte de núcleos, se instalan las placas para el soporte de los ejes. Los ejes, contruidos con acero de transmisión, se insertan en su otro extremo con los rodamientos, los cuales permiten el giro de las ruedas guía.

Las Ruedas Guía, fabricadas con un material resistente al desgaste por fricción, deben en lo posible ser de bajo peso.

Puede observarse en los planos descriptivos (5/1 a 5/4) , que las ruedas guías son contruidas con una sección, que permite el acoplamiento con la riel guía, de tal manera, que el contacto entre ellos ocurre aproximadamente en dos puntos. De esta manera se logra disminuir el rozamiento.

Todo el conjunto: Riel de reacción secundaria, Rieles guía, barras de cobre para toma de energía, va instalado sobre bases de madera, las cuales contienen y aíslan eléctricamente todas las partes vivas del conjunto. (ver fig 3.19).

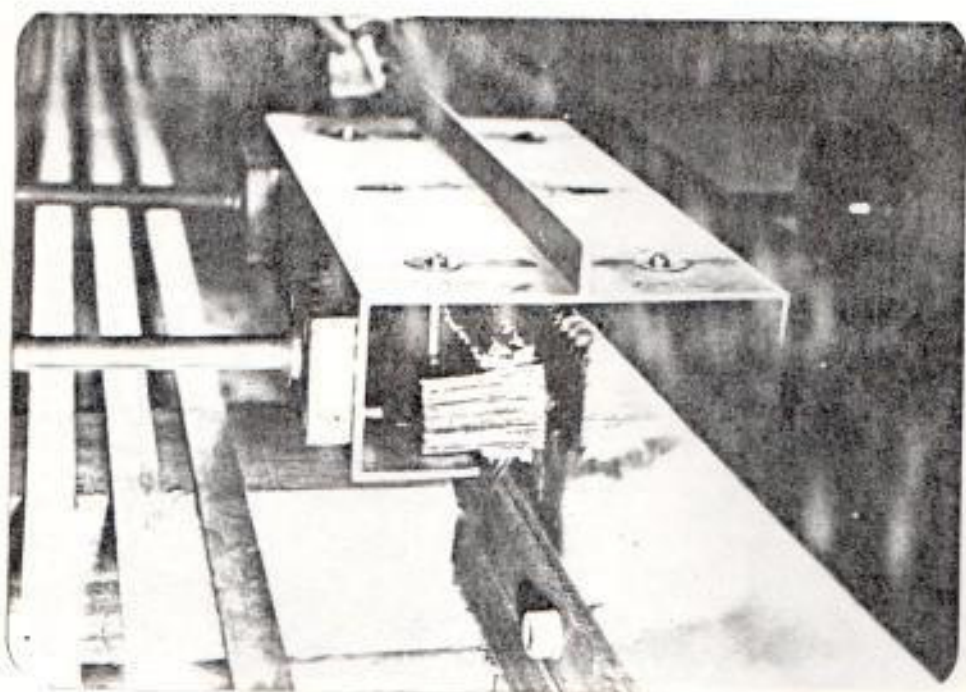


Fig. 3.18. Manera de sujetar núcleos a estructura soporte

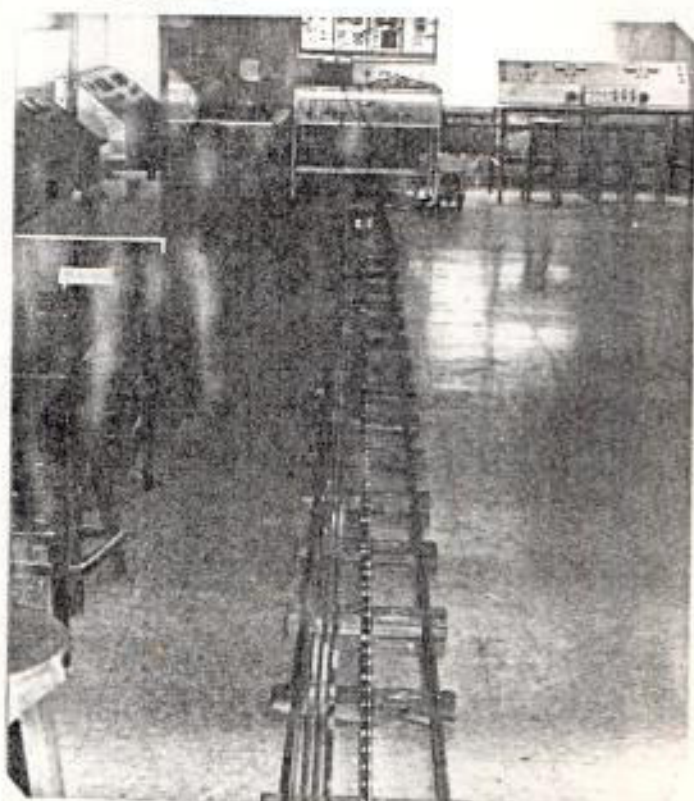


Fig. 3.19 Maderos para asentamiento del conjunto.

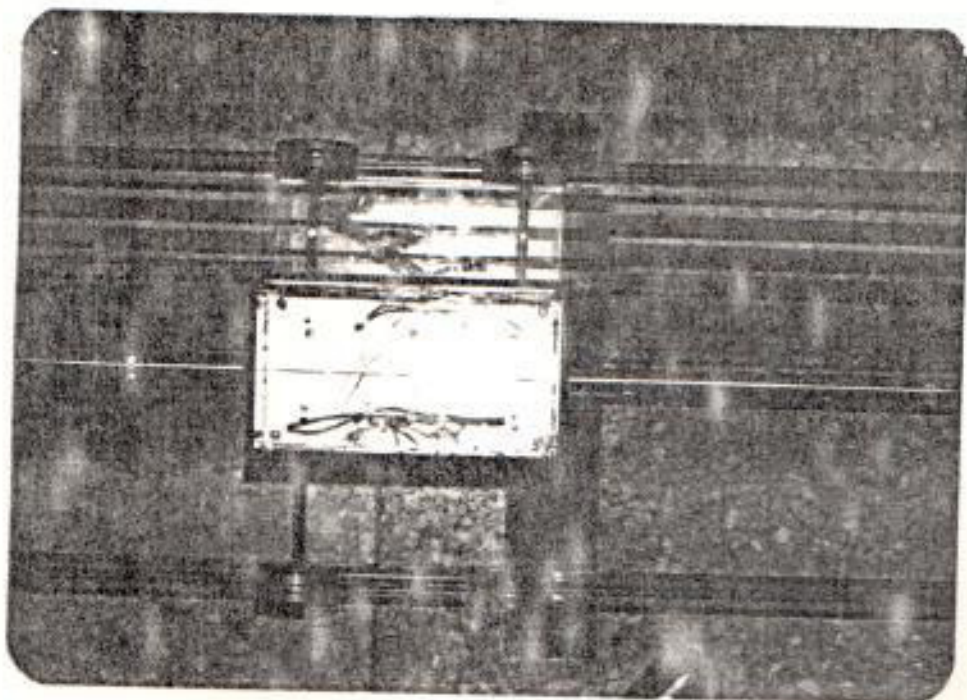


Fig. 3.20. Vista superior del vehículo terminado.



Fig. 3.21 Vehículo terminado.

Las figuras 3.20 y 3.21 nos muestran el motor y sus partes tal como van instalados

## CAPITULO IV

### PRUEBAS EXPERIMENTALES

En este capítulo se explicarán los procedimientos para realizar las pruebas experimentales sobre el modelo a escala construido. Estas pruebas permitirán calcular los parámetros del circuito equivalente eléctrico, parámetros de operación y eficiencia del modelo a escala, para en base a ellos predecir el comportamiento de la máquina de dimensiones reales.

#### 4.1 PRUEBAS EN VACIO I VEHICULO BLOQUEADO .-

Estas pruebas permiten determinar los parámetros del circuito equivalente eléctrico del modelo.

De acuerdo con el diseño teórico, la frecuencia de operación del modelo debe ser aproximada a 3600 Hz.

Por lo tanto se debe disponer de un convertidor de frecuencia que permita probar al modelo con la frecuencia de diseño. Además para facilitar la realización de las pruebas de eficiencia, vehículo bloqueado y prueba de vacío (sin carga), es conveniente que el mencionado convertidor cumpla con las siguientes características de salida.

- a) Voltaje trifásico variable 0 - 50 v.
- b) Frecuencia Variable 0 - 4 KHz
- c) Potencia de Salida 1.5 Kw

Las pruebas que se explican en este capítulo son realizadas a frecuencia igual a 60 Hz, por no disponerse del convertidor de frecuencia cuyas características se mencionan en el párrafo anterior.

La prueba en vacío (sin carga), se realiza aplicando voltaje nominal al devanado primario del motor, el cual debe desplazarse con la menor carga posible hasta alcanzar una velocidad cercana a la velocidad de sincronismo. Con el objeto de disminuir las fuerzas de rozamiento que actúan sobre el motor, se alimenta el devanado primario directamente a través de conductores que se desplazan junto al motor, evitando el uso, para esta prueba, de las escobillas.

Para un valor de frecuencia de 60 Hz, la velocidad sincrónica del modelo es igual a 5.4 m/s.

Bajo las condiciones mencionadas, se toman lecturas de corriente, potencia trifásica y voltaje de línea

aplicado.

La prueba con vehículo bloqueado se realiza haciendo circular corriente nominal por cada fase del devanado primario y evitando el desplazamiento del vehículo. Bajo estas condiciones se toman lecturas de corriente por fase, voltaje de línea y potencia trifásica.

Adicionalmente es necesario medir la resistencia por fase del devanado primario. Para el efecto se aplica voltaje directo a cada fase del devanado primario y se toman medidas de corriente para cada valor del voltaje aplicado. Los resultados de la prueba en vacío (sin carga), vehículo bloqueado y medida de resistencias aparecen en la tabla XIII.

TABLA XIII Resultados de prueba en vacío, vehículo bloqueado y medida de resistencias

PRUEBA EN VACÍO (sin carga)				PRUEBA CON VEHÍCULO BLOQUEADO				MEDIDA DE RESISTENCIAS			
V	I	W1	W2	V	I	W1	W2	V	Ia	Ib	Ic
(V)	(A)	(W)	(W)	(V)	(A)	(W)	(W)	(V)	(A)		
15	6.0	80	10	9.5	1.8	8.0	8.5	1	1	1.1	1
VELOCIDAD = 3 m/s								2	2.1	2	2
								3	3	3.1	3



#### 4.2 MEDIDA DE LA DENSIDAD DE FLUJO EN EL ENTREHIERRO.-

La determinación de la densidad de flujo en el entrehierro, requiere el uso de bobinas exploratorias las cuales se ubican convenientemente en las ranuras del núcleo primario del motor..

El flujo magnético existente en el entrehierro inducirá en las bobinas exploratorias voltajes cuyos valores pueden ser analizados por circuitos integradores, para obtener el valor del flujo magnético y así obtener el valor de la densidad de flujo.

Sin embargo, para los fines de esta tesis es suficiente conocer si el valor de densidad de flujo correspondiente al punto nominal de operación del modelo, se encuentra antes de la zona de saturación del material con que se construye el núcleo primario del motor, es decir de acuerdo a la figura 3.1 una densidad de campo aproximada  $1.4 \text{ Wb/m}^2$ .

Con el objeto de conocer el grado de saturación del núcleo, se realiza una prueba en la cual se aplica

independientemente a cada fase del devanado primario, voltaje variable, tomando para cada fase lecturas de la corriente circulante.

Esta prueba se realiza para diferentes valores de Entrehierro . La tabla XIV nos muestra los resultados de las pruebas realizadas.

TABLA XIV Valores obtenidos en la prueba para determinar grado de Saturación del núcleo.

ENTREHIERRO (mm)	VOLTAJE DE FASE ( volt. )	CORRIENTE DE FASE ( amp )
10	1.7	1.2
	1.8	1.3
	2.6	1.9
	3.3	3.0
	4.1	3.6
	4.8	4.5
	7.3	6.7
	8.6	8.0
	12.0	11.0
	14.0	12.5
	16.0	14.0
5.3	1.0	0.7
	3.0	2.2
	4.0	3.5
	5.0	4.0
	6.0	4.8
	7.0	5.5
	7.5	6.5
	8.5	7.5
	9.8	8.5
	10.5	9.5
	12.4	10.7
	13.2	11.2
	14.1	12.0

	16.6	14.0
4.0	1.3	0.9
	1.5	1.1
	2.2	1.5
	3.1	2.5
	4.3	3.5
	5.1	4.3
	6.5	5.2
	7.1	6.0
	9.4	8.0
	10.4	8.8
	12.4	10.2
	13.3	11.0
	14.8	12.3
	16.7	13.5
3.0	0.8	0.4
	1.4	0.9
	2.3	1.6
	2.7	1.9
	3.2	2.2
	4.1	3.5
	6.0	5.0
	7.3	6.0
	8.4	7.0

---

La figura 4.1 nos muestra la gráfica V vs I usando los valores de la tabla XIV.

#### 4.3 PRUEBAS DE COMPORTAMIENTO AL ARRANQUE I EN ESTADO ESTABLE.-

Estas pruebas permiten observar la habilidad del vehículo para frenar y arrancar repetidamente sin aumentar de manera anormal la temperatura del

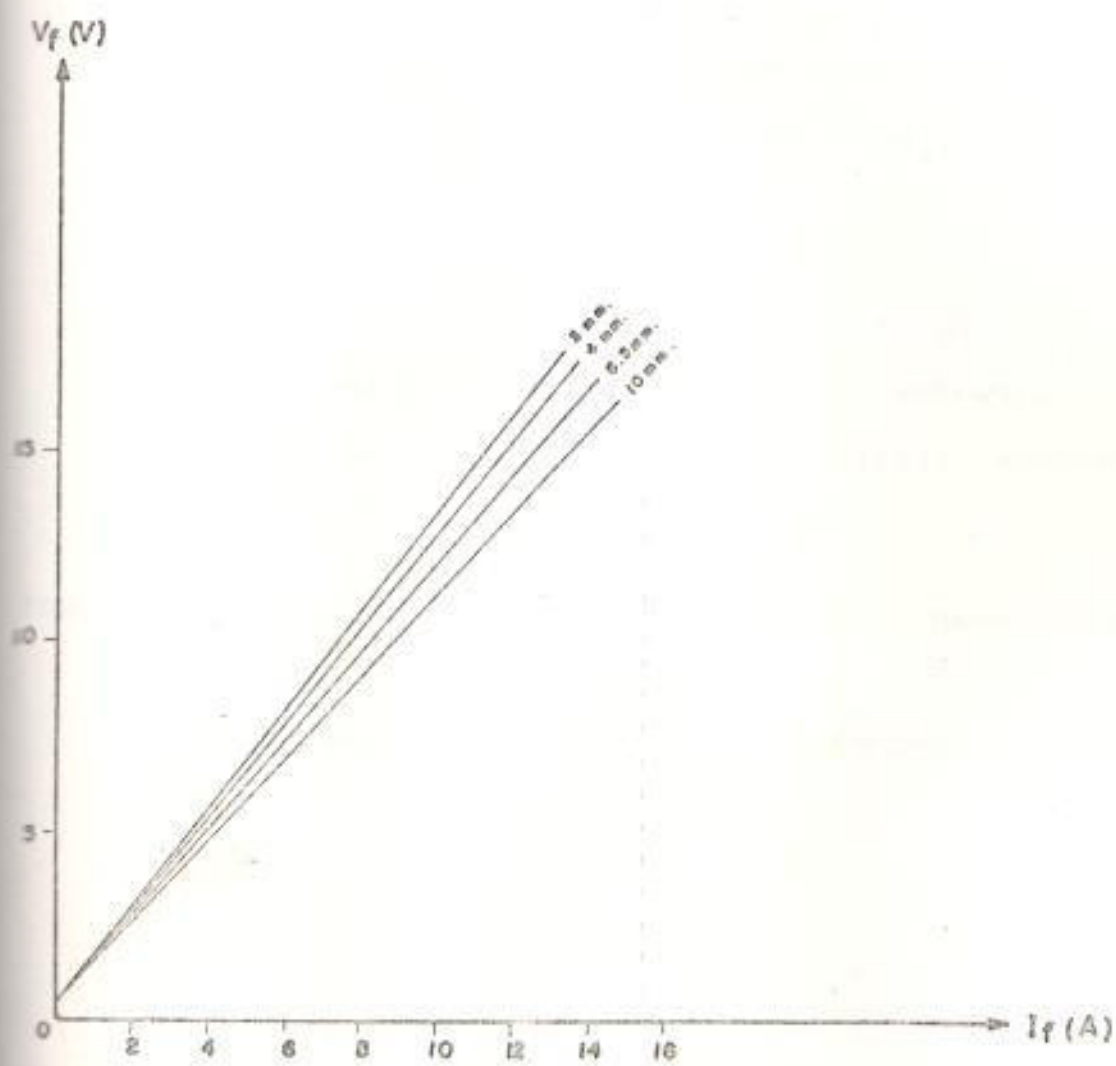


FIG. 4.1 GRAFICA  $V_f$  vs.  $I_f$  CON VALORES SEGUN TABLA XIV

devanado primario.

Una de las ventajas en la construcción del modelo es el disponer de un medio mecánico que permite variar el entrehierro para verificar experimentalmente la influencia que tiene sobre el funcionamiento del MIL.

La tabla XV nos muestra la variación del empuje del motor para diferentes valores de entrehierro, al aplicarse al devanado primario voltaje nominal, y bajo condiciones de carga mínimas.

TABLA XV Variación del Empuje del motor para varios valores de Entrehierro.

ENTREHIERRO	VOLTAJE DE LINEA	EMPUJE	CARGA APLICADA
10 mm	25 V	3 lbf	5lbf
5	"	5	"
4	"	8	"
3	"	15	"

De los resultados obtenidos en la tabla XV, se puede deducir que para un entrehierro de 3 mm se tienen mejores condiciones al arranque, pero debido

a problemas de desalineamiento entre las rieles guía y la riel de reacción secundaria se producen, para este valor de entrehierro, roces entre la hoja secundaria y los núcleos primarios.

Por lo tanto es necesario seleccionar un valor de entrehierro que no provoque roces, y permita el arranque bajo carga normal al motor. Según la tabla XV este valor de entrehierro sería 4.0 mm .

Al usar un entrehierro de 4.0 mm , y aplicar voltaje nominal (25 V) se tienen corrientes de arranque y frenado aproximadas a 8 y 9 amperios respectivamente, lo cual representa mas o menos 6 veces la corriente nominal del motor.

#### 4.4 PRUEBAS DE EFICIENCIA.-

Estas pruebas permiten calcular la eficiencia máxima del motor y la carga máxima que soporta, para ciclos de trabajo largos y cortos en los cuales el motor se somete a frecuentes arranques y paradas.

En la tabla XVI se muestran resultados que se obtienen al hacer funcionar el vehículo a voltaje nominal, entrehierro de 4 mm y varias condiciones de carga.

TABLA XVI Pruebas bajo carga del modelo construido.  
condiciones al arranque.

CARGA APLICADA	VOLTAJE DE LINEA	CORRIENTE DE LINEA	W1	W2	v
(Kgf)	( V )	( A )	( W )	( W )	m/s
0	27	10	80	120	3
8.8	"	"	100	120	1.5
26.4	"	"	100	125	1.0
35.2	"	"	100	130	0.5

Los valores de velocidad que se mencionan en la tabla XVI fueron alcanzados por el vehículo a los 10 mts de recorrido fijados por la pista construida.

## CAPITULO V

### ANALISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se analizarán los resultados de las pruebas efectuadas en el capítulo anterior, las cuales permitirán calcular los parámetros del circuito equivalente y las características de operación del motor a frecuencia de línea de 60 Hz.

#### 5.1 DETERMINACION DEL CIRCUITO EQUIVALENTE ELECTRICO.-

A partir de los datos obtenidos en la prueba para medir resistencia del devanado primario del motor, se concluye que el valor promedio por fase es aproximadamente:

$$R_1 = 1.0 \text{ ohm}$$

Este valor es el correspondiente a conectar en cada núcleo 4 grupos bobina en serie, siendo 0.45 ohm la resistencia de cada grupo polo-fase, y luego conectar en paralelo los devanados equivalentes por núcleo.

A partir de los resultados obtenidos en la prueba de



vehículo bloqueado, se tiene que la potencia consumida total es :

$$P \text{ (trifásica)} = W_1 + W_2 = 3 I(\text{veh bloq}) (R_1 + R_2 + R_c)$$

siendo  $R_c$  la resistencia que presentan las escobillas.

reemplazando los valores de la tabla XIII se tiene :

$$R_c + R_1 + R_2 = \frac{16.5 \text{ w}}{3(1.8)} = 1.7 \text{ ohm}$$

reemplazando  $R_1$ , y  $R_c = 0.2 \text{ ohm}$  (valor medido a  $I = 4 \text{ A}$ )

$$\text{entonces : } R_2 = 1.7 - (0.2 + 1.0)$$

$$R_2 = 0.5 \text{ ohm.}$$

La impedancia equivalente a vehículo bloqueado es:

$$Z \text{ ( v. b ) } = \frac{V_f \text{ ( v.b )}}{I \text{ nom.}}$$

reemplazando los valores de la tabla XIII se tiene :

$$Z = \frac{5.5 \text{ v}}{1.8 \text{ a}} = 3.1 \text{ ohm}$$

el valor de la reactancia de dispersión primaria es :

$$X1 = \sqrt{Z^2 - (R1 + R2 + Rc)^2}$$

reemplazando valores se tiene:

$$X1 = \sqrt{(3.1)^2 - (1.7)^2}$$

$$X1 = 2.60 \text{ ohm.}$$

La prueba en vacío (sin carga) , se realiza parcialmente debido a que en los 10 mts de recorrido de pista, no es posible conseguir una velocidad cercana a la velocidad de sincronismo. Los datos que aparecen en la tabla XIII corresponden a una velocidad de 3 m/s lo que implica un deslizamiento de 44 % .

El circuito equivalente para esta condición de trabajo del motor se muestra de manera aproximada en la figura 5.1

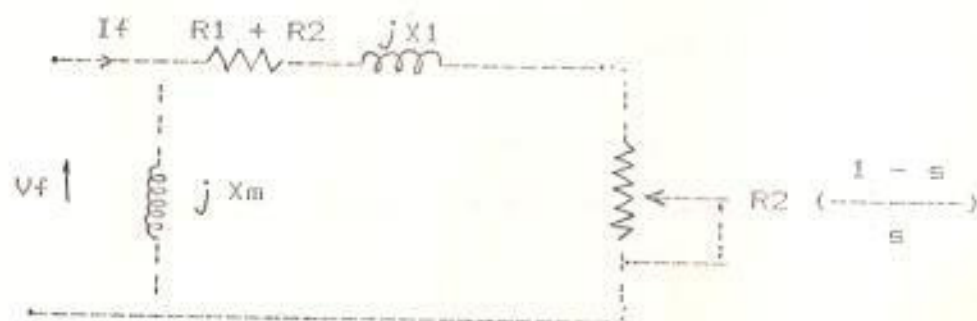


Fig 5.1 Circuito equivalente para la prueba de vacío realizada con el modelo construido.

Usando el método de los 2 vatímetros podemos calcular el ángulo de fase de la corriente de entrada

$$\operatorname{tg} \theta = \sqrt{3} \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2}$$

reemplazando los valores de la tabla XIII se tiene

$$\theta = 53$$

por lo tanto la corriente de fase es :

$$I_f = 6 \angle -53^\circ$$

En el circuito de la figura 5.1 la impedancia del ramal secundario es:

$$Z = R_1 + R_2 + R_2 \left( \frac{1 - s}{s} \right) + j X_1$$

reemplazando los valores dados por la prueba de vehículo bloqueado y considerando el valor de deslizamiento igual a 0.44 se tiene :

$$Z = 2.14 + 2.6 j = 3.37 \angle 51^\circ$$

La corriente circulante por ese ramal es:

$$I_2 = 4.6 \angle -50^\circ$$

Usando el diagrama fasorial de corrientes de la figura 5.2 se puede plantear la siguiente ecuación:

$$V_f / X_m + I_2 \cos ( 90 - \theta_2 ) = I_f \cos ( 90 - \theta_f )$$

reemplazando valores se tiene:

$$X_m = 12.2 \text{ ohm}$$

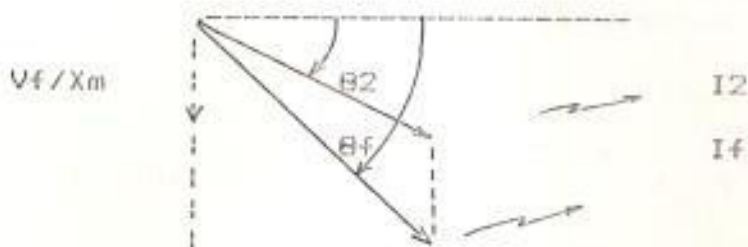


Fig 5.2 Diagrama fasorial de corrientes correspondiente al circuito de la fig 5.1

### 5.2 CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL MODELO.-

El circuito equivalente del modelo a escala para pruebas realizadas a 60 Htz se muestra en la figura 5.3

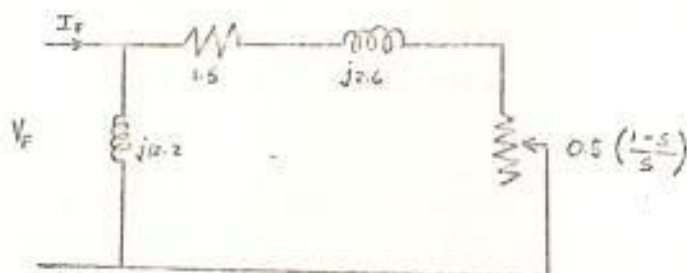


Fig 5.3 Circuito equivalente eléctrico por bloque y fase del modelo a escala construido

Asumiendo que a dicho circuito se le aplica voltaje nominal teórico, o sea :

$$V_f = 15.6 \text{ v/fase}$$

y que el vehículo se desplaza hasta alcanzar su velocidad nominal es decir a un deslizamiento cercano al 20% se tienen las siguientes condiciones:

$$Z_2 = R_1 + R_2 + R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) + j X_1$$

reemplazando valores se tiene:

$$Z_2 = 3.5 + j 2.6 = 4.36 \angle 36.6^\circ$$

por lo tanto :

$$I_2 = V_f / Z_2$$

reemplazando valores se tiene:

$$I_2 = 3.6 \angle -36.6^\circ$$

la potencia de salida por fase será :

$$P_s = (I_2)^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right)$$

reemplazando valores se tiene:

$$P_s = 26 \text{ W}$$

entonces la potencia total de salida del modelo es:

$$P_t = 3 ( 26 ) = 78 \text{ w}$$

Calculando la corriente total que consume el motor por fase se tiene :

$$I_f = 4.47 \angle -49.6^\circ$$

El factor de potencia es :

$$f_p = \text{Cos} ( 49.6^\circ ) = 0.65$$

La potencia eléctrica de entrada total es :

$$P_e = 3 \cdot V_f \cdot I_f \cdot f_p$$

reemplazando valores se tiene :

$$P_e = 136 \text{ w}$$

Por lo tanto la eficiencia del modelo es

$$= \frac{78}{136} \cdot 100 = 57 \%$$

### 5.3 CALCULO DE LA EFICIENCIA DE LA MAQUINA REAL.-

Según el diseño teórico la máquina real debe tener una eficiencia del 68 %.

Las pruebas realizadas a 60 Hz con el modelo a

escala indican una eficiencia aproximada de 57 %, por lo tanto a pesar de que la eficiencia del modelo disminuya cuando sea probado a 3600 Hz , debido a las pérdidas en el núcleo, esta disminución se puede compensar mejorando ciertas partes del modelo las cuales son causa de pérdidas de potencia. Como por ejemplo :

- a) Alineación de rieles guía.
- b) Disminución del peso de ruedas y ejes.
- c) Rozamiento de escobillas para toma de energía.

En conclusión:

Si se corrigen y mejoran constructivamente partes importantes para el funcionamiento del modelo se puede decir que su eficiencia estará cercana a la de diseño, cuando el modelo se pruebe a frecuencia de 3600 Hz.

#### 5.4 CUADRO COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS TEORICOS Y EXPERIMENTALES

A continuación se presenta los valores de operación que se esperan obtener para el modelo , y los que se

obtienen experimentalmente al probar el modelo construido a frecuencia de 60 Hz.

Cuadro comparativo valores teórico - experimentales

PARAMETRO	TEORICO	EXPERIMENTAL
Voltaje de fase	13.4 V	15.6 V
Frecuencia	3600 Hz	60 Hz
Velocidad	130 m/s	4.32 m/s
Pot. Elec. Entrada.	121 W	136 W
Corriente de Fase	4.6 A	4,47 A
Impedancia equivalente	2.81 ohm	3.5 ohm
Resistencia del primario	0.45 ohm	1.0 ohm
Potencia de salida	79.6 W	78 W

### 5.5 JUSTIFICACION TECNICA DE LA MAQUINA REAL.-

Para construir una máquina de dimensiones reales como la proyectada en esta tesis, se neseitará dos etapas adicionales para justificar dicha construcción :

- Probar el modelo construido a la frecuencia de diseño
- Probar el método de diseño de la máquina real,



diseñando y construyendo una máquina real de pequeña potencia de salida por ejemplo 2 Kw.

Por otra parte, las ventajas del MIL como son :

- a) fácil construcción
- b) mantenimiento mínimo
- c) ahorro de energía
- d) Económico, salvo la construcción de la riel.

Permiten, justificar parcialmente la construcción de una máquina de dimensiones reales.

## CONCLUSIONES

- 1.- Varias de las propiedades de los MIL'S que se afirman teóricamente, se han probado experimentalmente como por ejemplo:
  - a.- La habilidad que poseen los motores lineales para ejercer empuje sobre el secundario mecánicamente independiente.
  - b.- Además de la fuerza de empuje longitudinal, se observa la presencia de una fuerza normal de atracción entre los núcleos primarios y la riel de reacción secundaria. En algunos casos, esta fuerza provocó el contacto entre un núcleo primario y la riel secundaria. Por lo tanto el sistema mecánico que se utilice para sujetar los núcleos en la máquina real, debe considerar seriamente este fenómeno.
- 4.- El procedimiento de diseño usando el circuito equivalente eléctrico, es aceptable para vehículos

con bajas velocidades , sin embargo deben considerarse detalles de construcción para disminuir los efectos de borde.

- 5.- Los modelos a escala poseen en general velocidades de prueba demasiado elevadas, lo cual implica la construcción de pistas de prueba de gran longitud que permitan al modelo alcanzar su velocidad nominal.
- 6.- Es conveniente se diseñe y construya motores a escala real pero de potencia de salida pequeña, entre 1 o 2 Kw. La frecuencia de operación normal del motor sería 60 Hz y si las pruebas se realizan a baja frecuencia (20 o 40 Hz) no será necesaria la construcción de una pista muy larga para obtener el régimen de trabajo normal del motor.
- 7.- La variación del voltaje de alimentación en un motor de inducción lineal, produce una variación de velocidad mucho mayor que la producida en un motor de inducción giratorio. Esto se debe a que el MIL opera en una región de alto deslizamiento. Esta situación puede aprovecharse para controlar la velocidad del MIL mediante variación de voltaje.

## RECOMENDACIONES

- 1.- Que se construya un convertidor de frecuencia cuyas características se mencionan en esta tesis, a fin de probar el modelo construido a la frecuencia de diseño.
- 2.- Que se desarrollen tesis de grado cuyos objetivos sean:
  - a) Mejorar el sistema mecánico del vehículo.
  - b) Desarrollo de un control de velocidad, arranque y frenado del MIL .
  - c) Investigar sobre la levitación magnética del vehículo como medio de eliminar el rozamiento entre las ruedas y la riel guía.
- 3.- Que se diseñe y construya un vehículo impulsado por un MIL de baja potencia de salida, aproximadamente 2 Kw que opere a frecuencia normal de 60 Hz.
- 4.- Que se investigue sobre motores síncronos lineales (MSL), a fin de establecer ventajas y desventajas sobre los MIL en la aplicación al transporte.

5.- Que se realice un estudio Económico, para conocer aproximadamente el costo del MIL de dimensiones reales diseñado en esta tesis, así como también el costo por metro de la pista.

- 7 LAITHWAITE, E.R. Induction Machines for Special Purposes, Newnsws International, Inglaterra, 1966.
- 8 LAITHWAITE, E.R. Linear Electric Motors, Mills Boon Limited, Inglaterra 1971, p. 70.
- 9 LOWTHER, D.A. FREEMAN, E.M. Electromagnetic Scale Models of Linear Induction Motors, Linear Electric Machines Conference Publication Number 120, Whitefriars Press Ltd, London and Tonbrige, 1974.
- 10 MARKEY, P. Linear Induction Motors, English electric-AEI Machines Ltd.
- 11 NASAR, S.A. Linear Motion Electrical Machines, John Wiley & Sons, USA, 1976.
- 12 OBERRETEL, K. Linears Motors with Special Double Layers Windings, Electrical Machines Conference Publication Number 120
- 13 POLOUJADOFF, M. Linear Induction Machines Part I, IEEE Spectrum vol.8, Feb. 1971, p. 72-80.

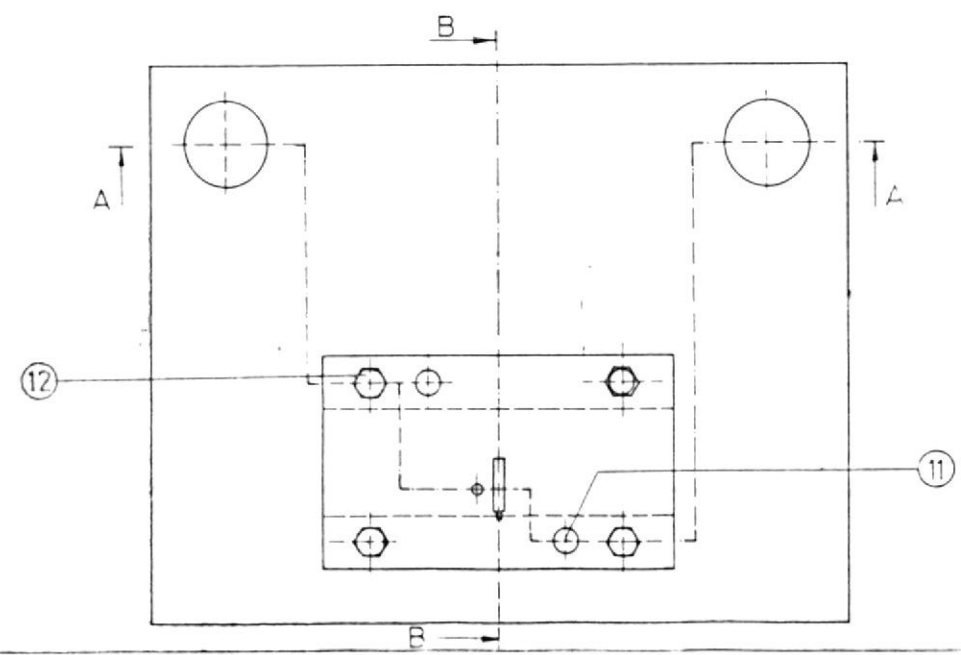
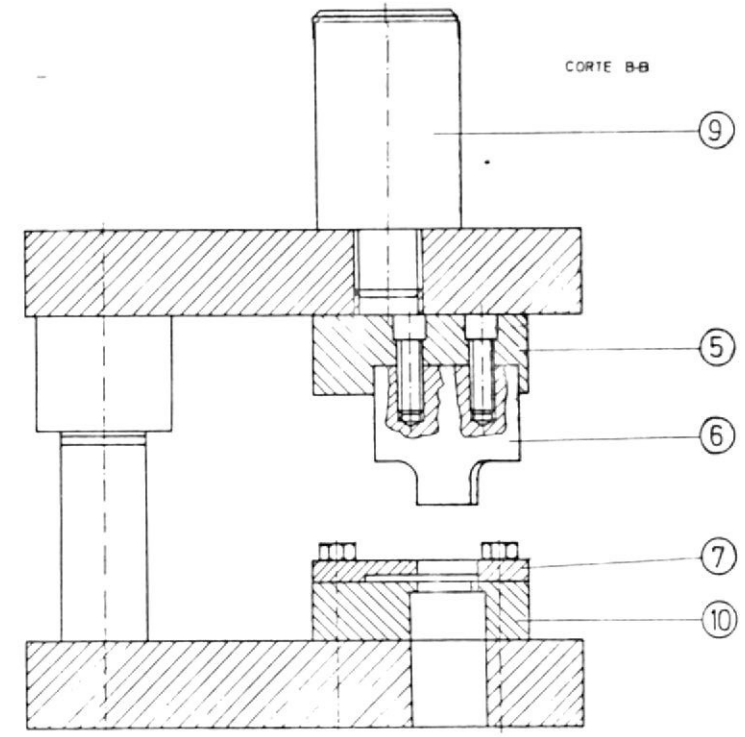
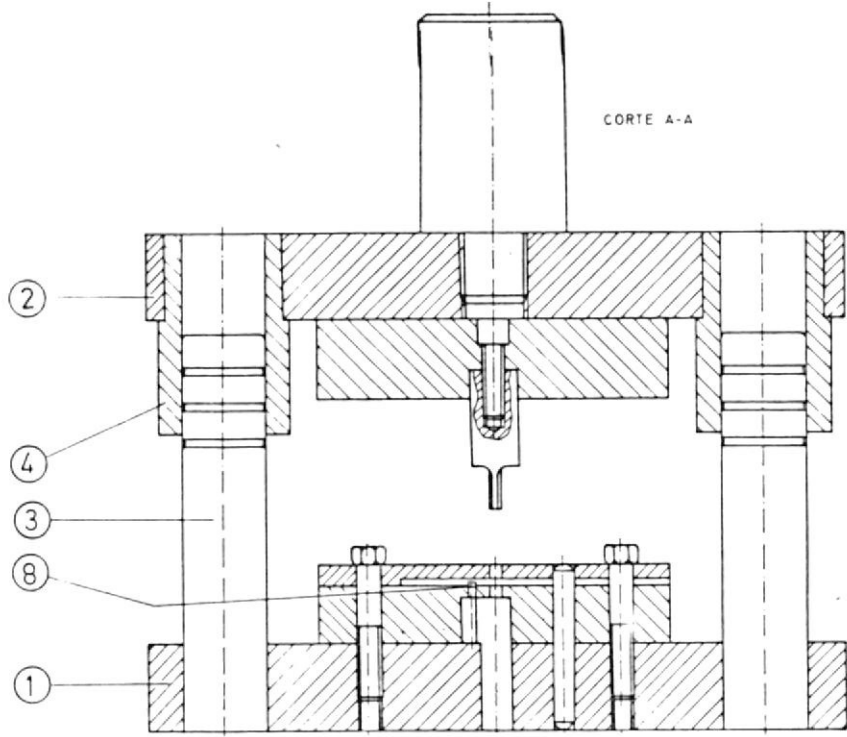
- 14 POLOUJADOFF, M. Linear Induction Machines part II, IEEE Spectrum, March. 1971, p.79-86.
- 15 SCHIEBER, D. Principles of Operation of Linear Induction Devices, Proc IEEE vol. 61 # 5, Mayo 1973, p. 647-656.
- 16 STANLEY, A. Motores Electricos Lineales de Induccion, Megavattios, Buenos Aires 1985, p.40-43.
- 17 ZIEHLMAN, W. OJEDA, O. ZOLEZZI, J. Prototipo de Sistema de Traccion impulsado con Motor de Induccion Lineal, JIEE vol.5, Quito 1984, p.95-98.

A P E N D I C E S



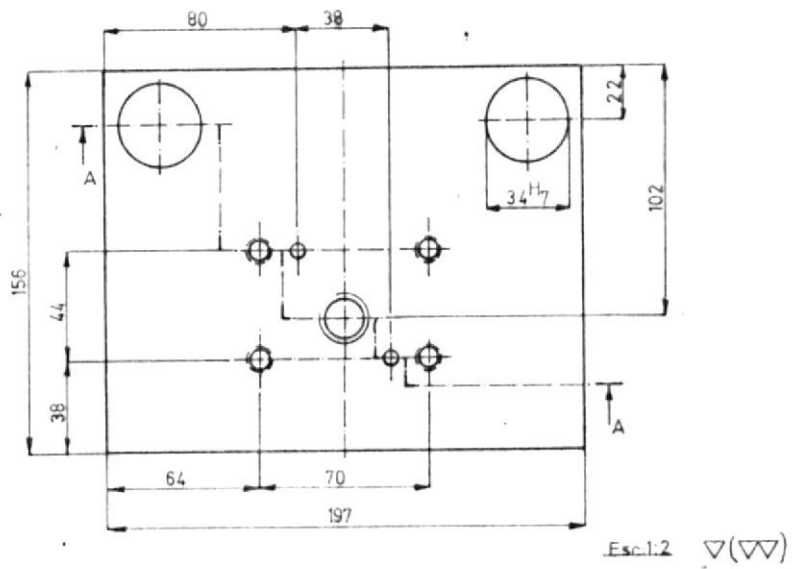
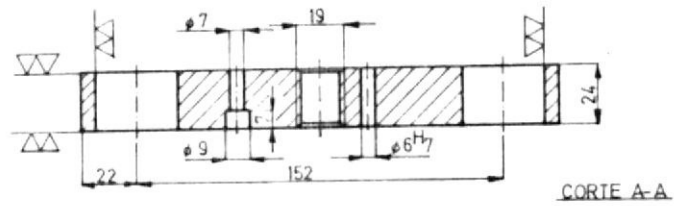
APENDICE A

PLANOS DESCRIPTIVOS DEL TROQUEL

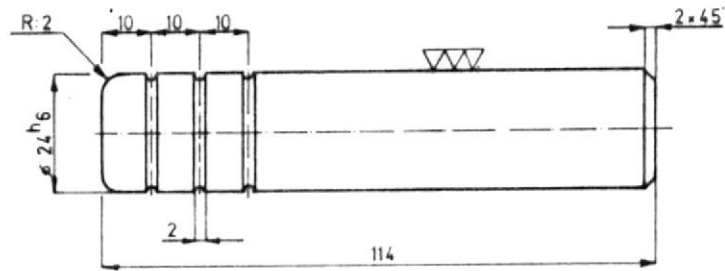


8	Perno de sujecion	Ac St 50	12	M6x35
4	Pasador	Al. Plata	11	#6x40
1	Placa Matriz	Assab DF-2	10	98,60x16
1	Espeja de sujecion	Assab 750	9	#40x80
1	Tapete	Ac St 50	8	#2x16
1	Extractor	Assab 705	7	98,60x6
1	Punzon	Assab DF-2	6	35,40x13
1	Placa Portapunzon	Assab 705	5	98,50x22
2	Bloque	Assab DF-2	4	#38x56
2	Columna	Assab DF-2	3	#38x110
1	Placa Base Superior	Assab 750	2	107,55x21
1	Placa Base Inferior	Assab 750	1	107,55x21
CANT	DENOMINACION	MATERIAL	POS	MED DAS

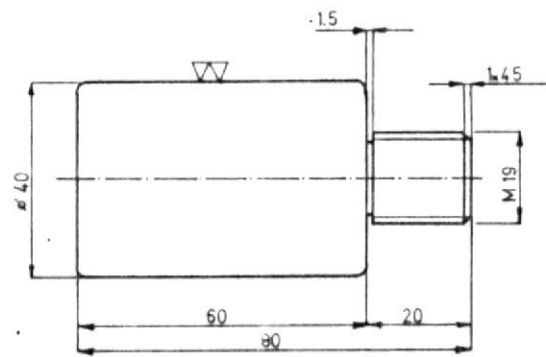
Fecha	Nombre	FACULTAD	
Dibujado	por	INGENIERIA ELECTRICA	ESPOL
Dibujado	por	INGENIERIA ELECTRICA	ESPOL
Esc	1:1	TESS DE GRADUACION EN ELECTRICIDAD	PROYECTO
Esc	1:1	PL. PROYECTO DE MONTAJE	MOTOR LINEAL



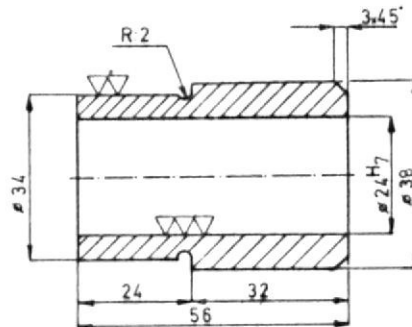
P1/2 Placa base superior.



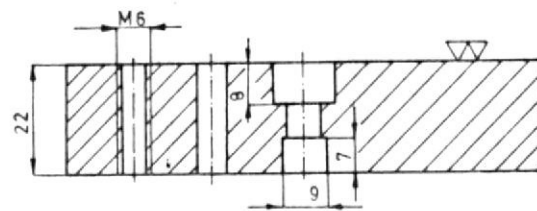
P1/3a. Columna.



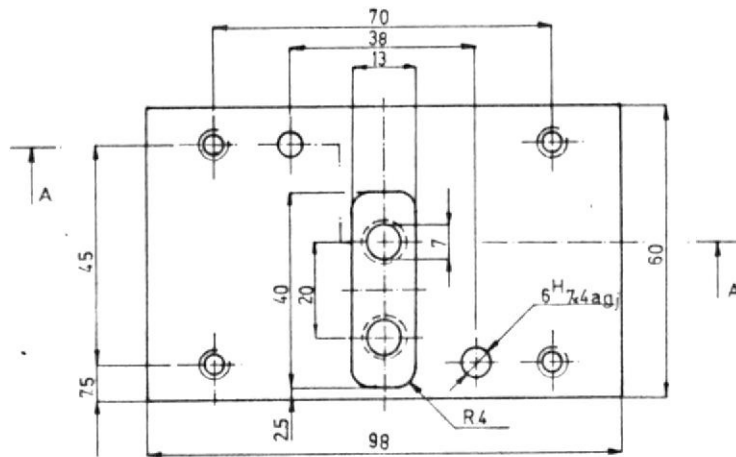
P1/3b. Espiga de sujecion.



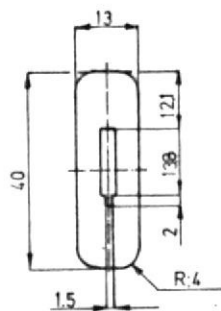
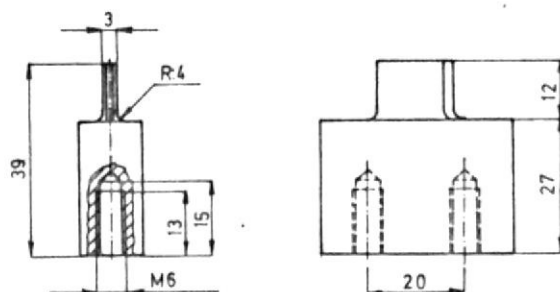
P1/3c. Buje.



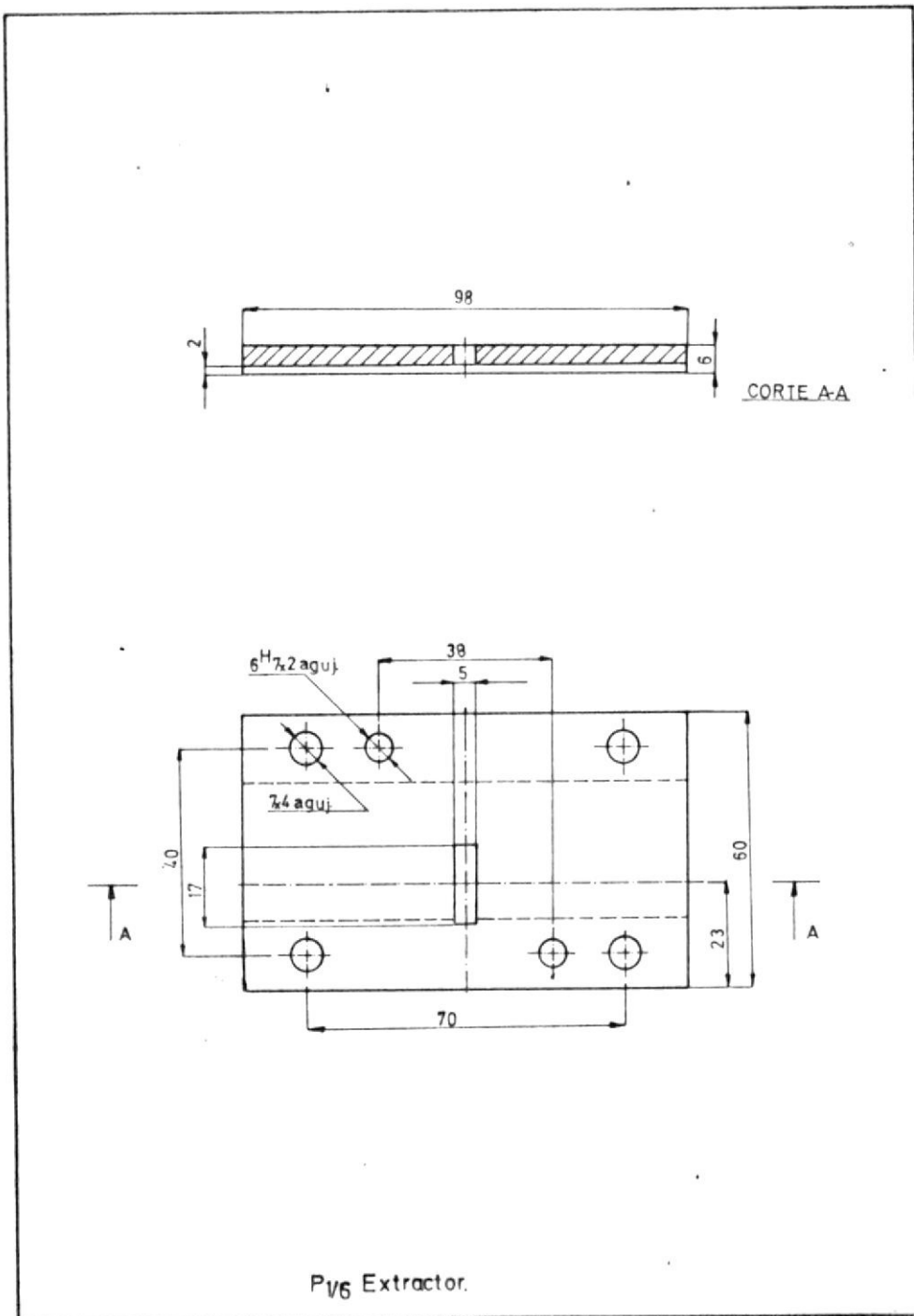
CORTE A-A



P1/4 Placa portapunzon.

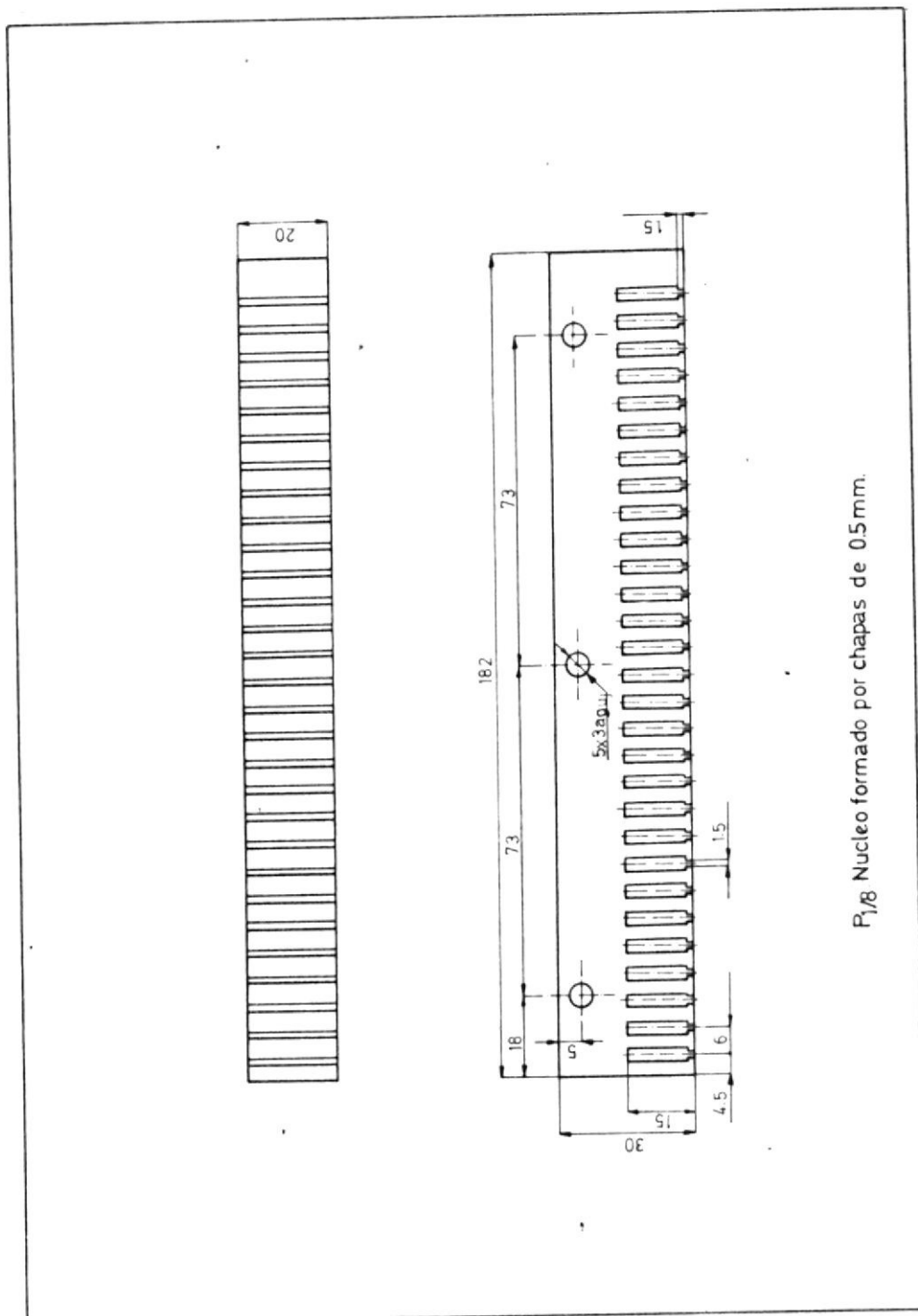


P1/5 Punzon.



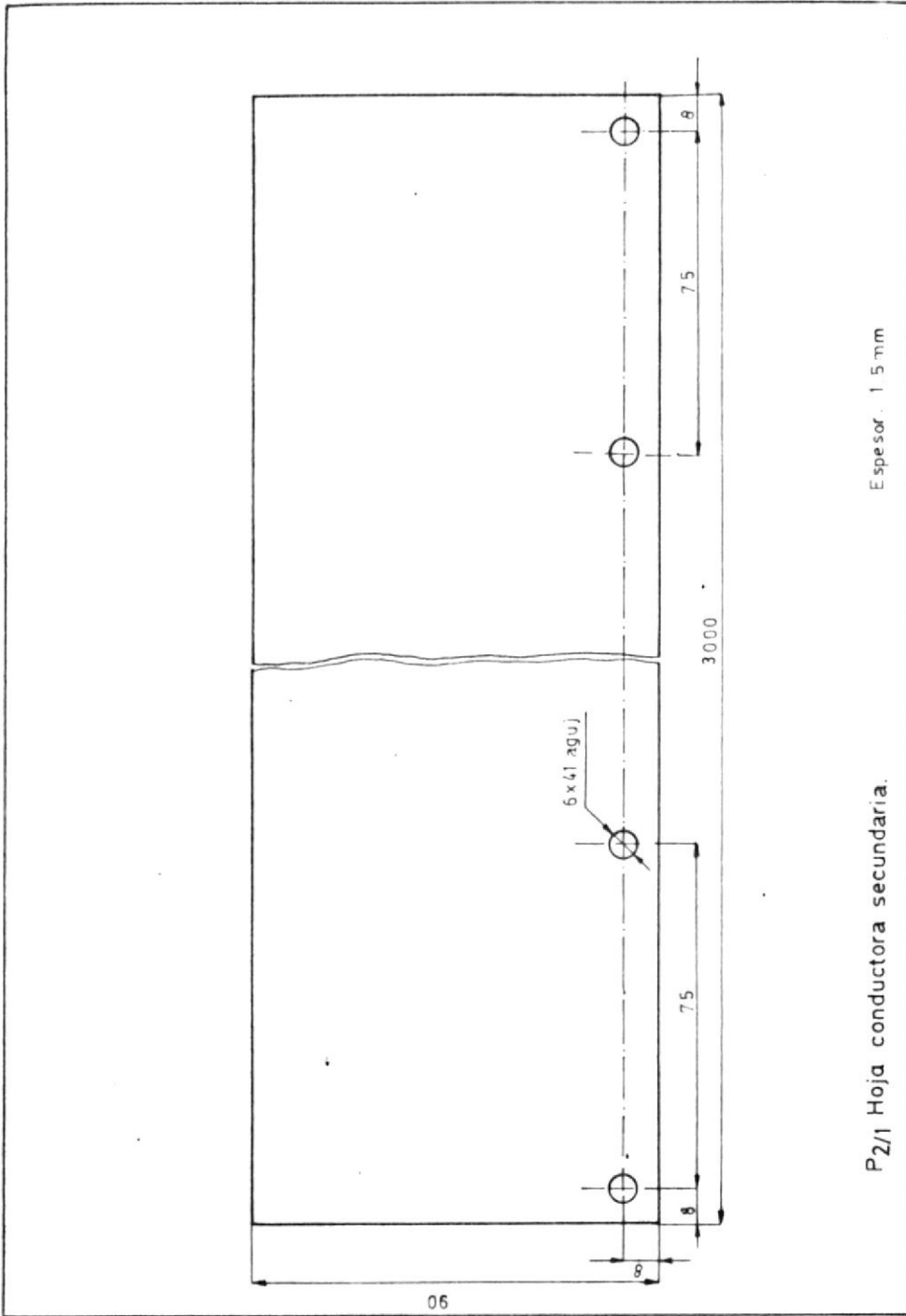




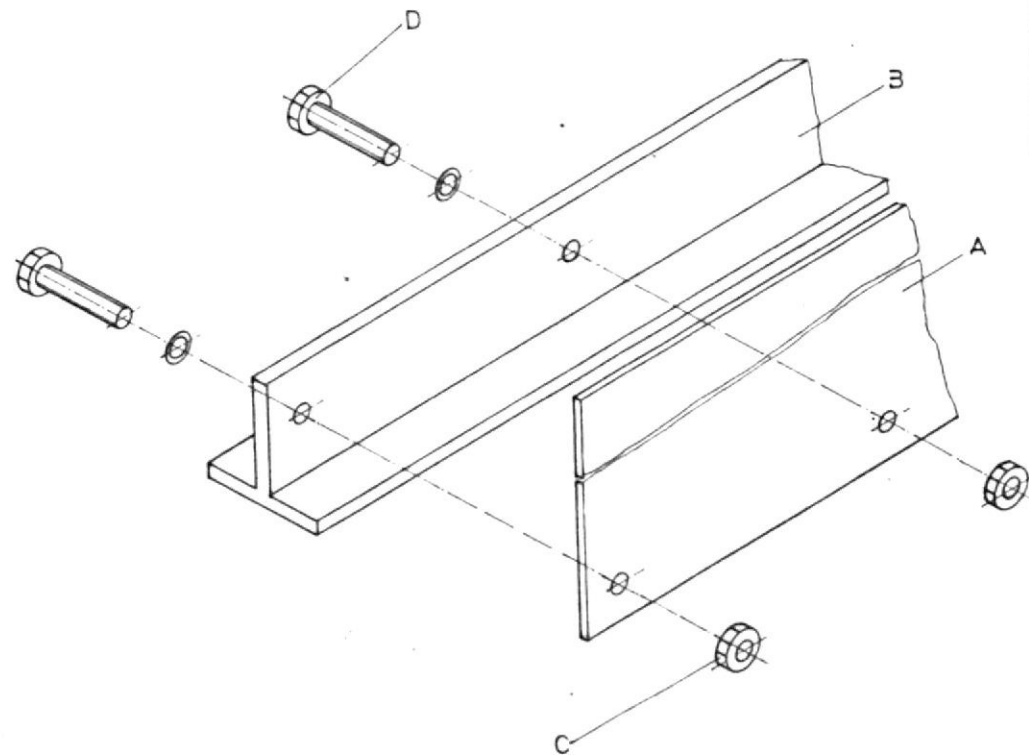


APENDICE B

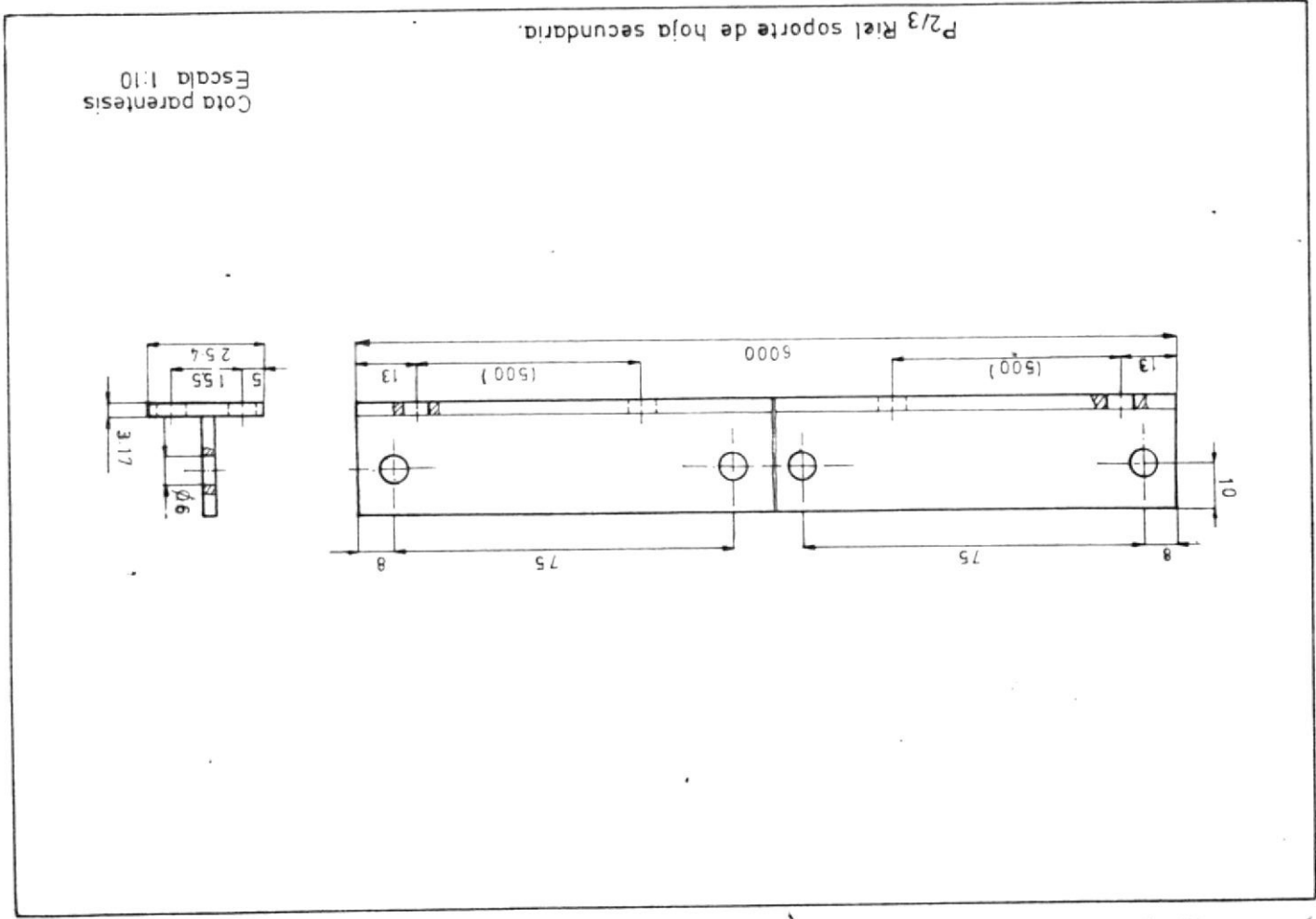
PLANOS DESCRIPTIVOS DEL SISTEMA MECANICO DEL VEHICULO

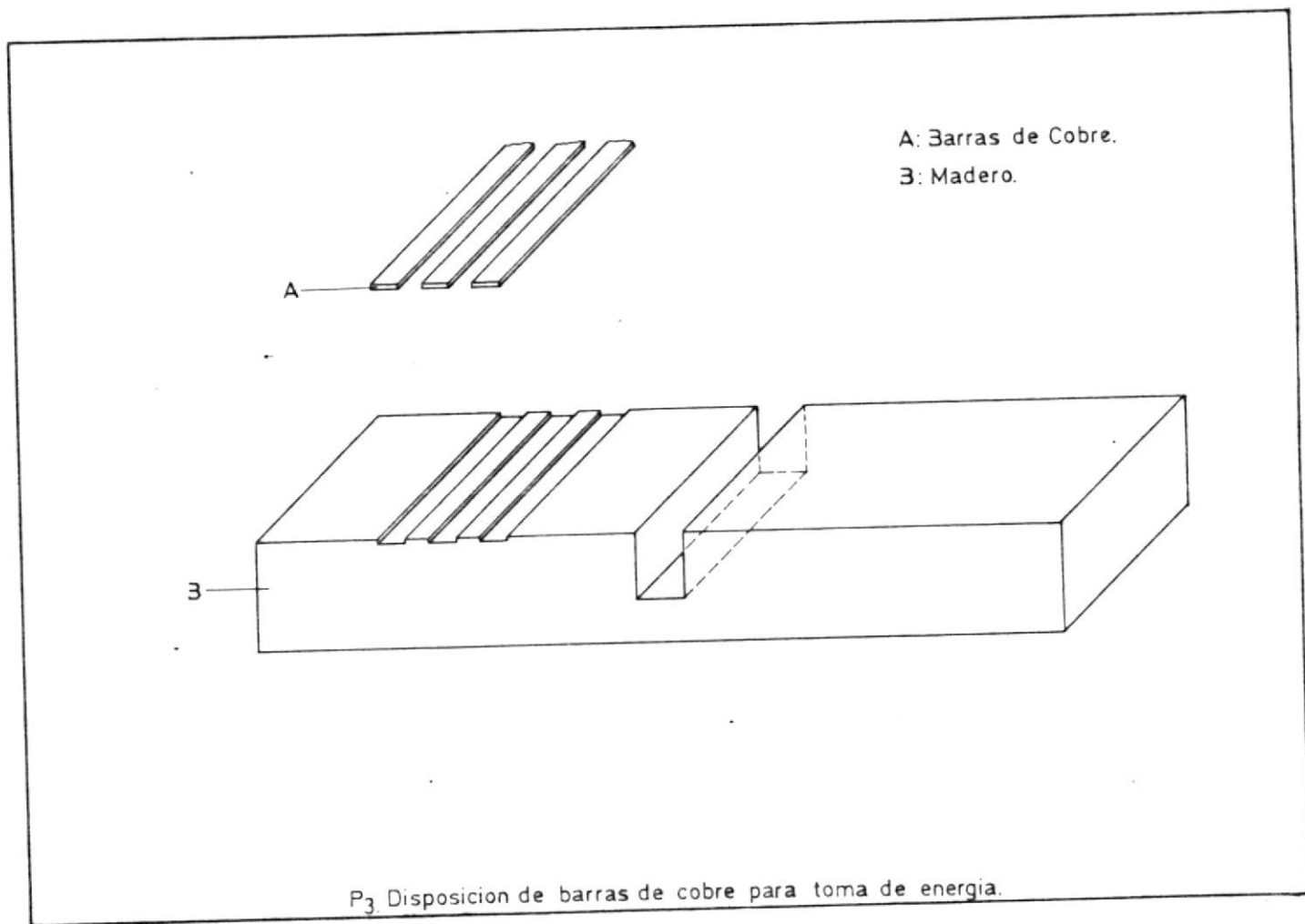


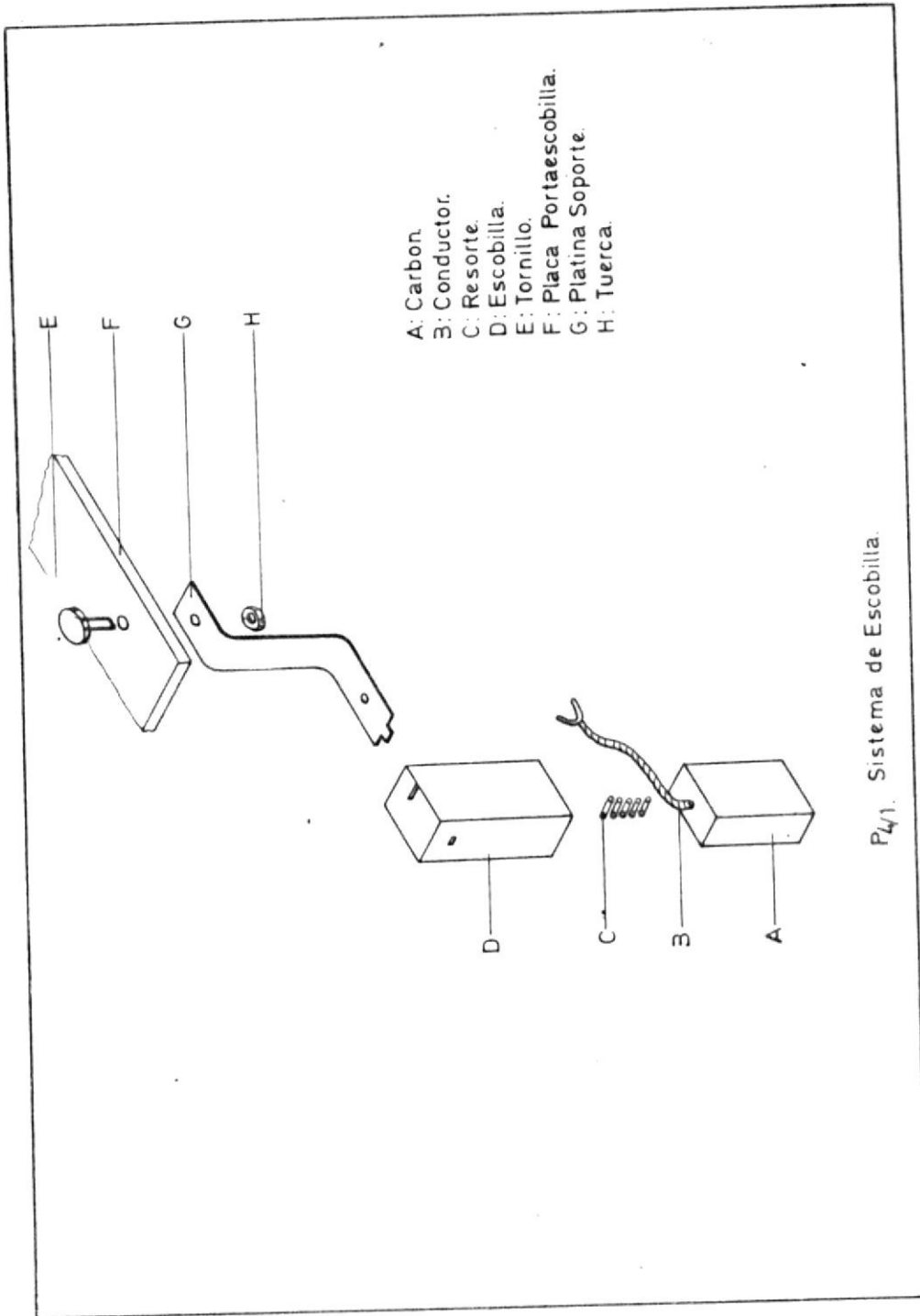
- A: Hoja de Aluminio
- B: Riel soporte de hoja.
- C: Tuerca
- D: Perno
- E: Arandela

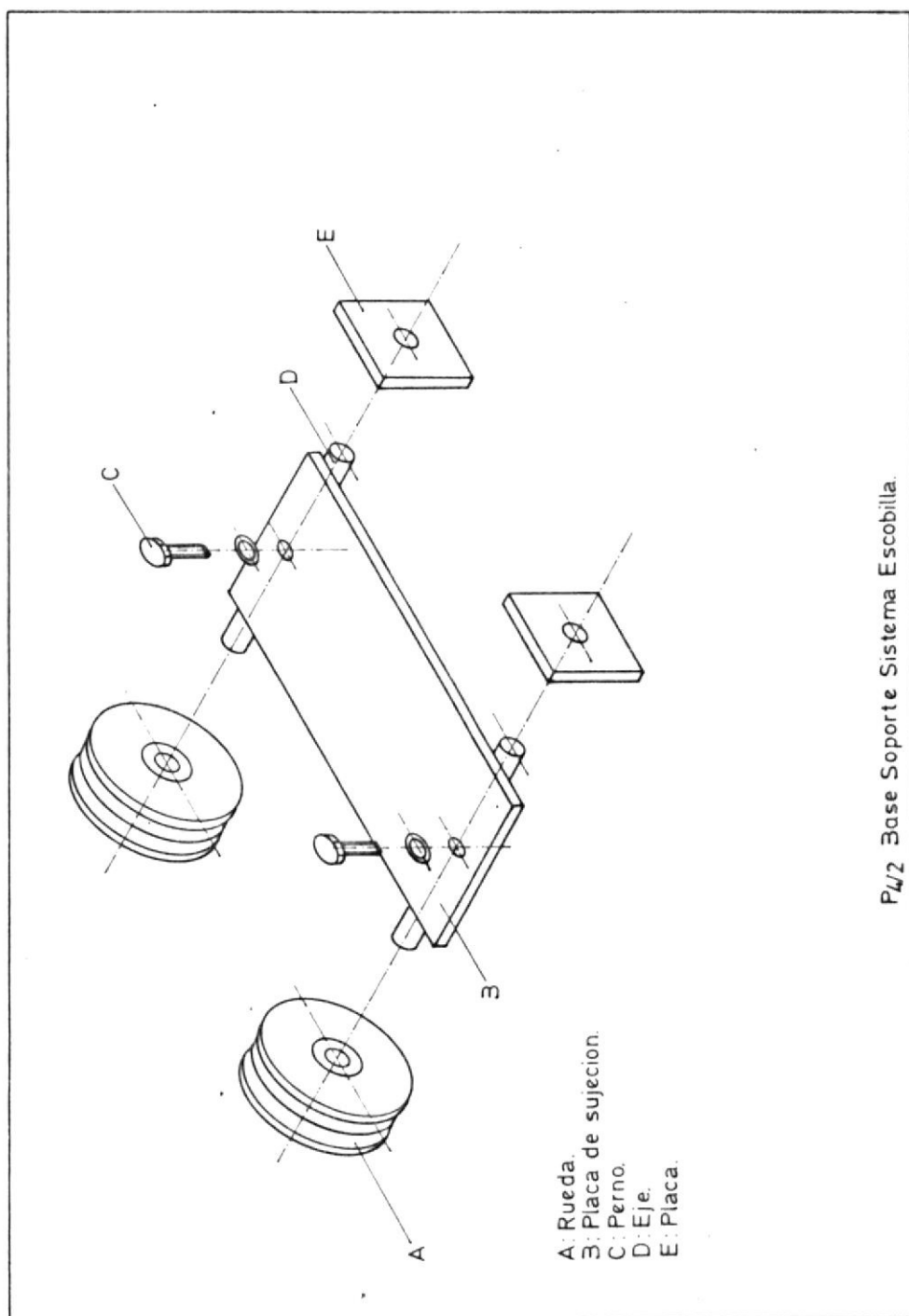


P<sub>2/2</sub> Riel de reaccion secundaria.



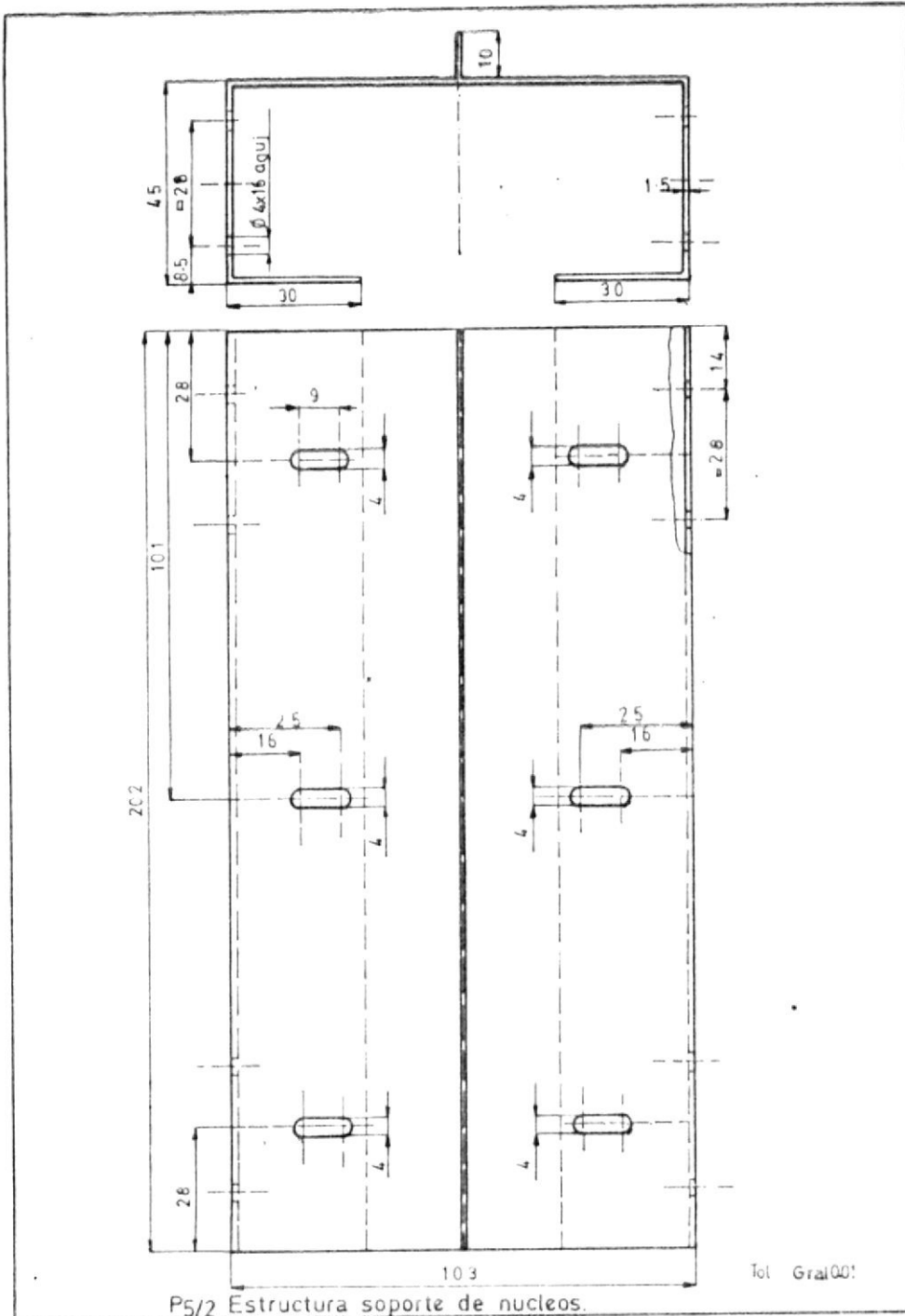


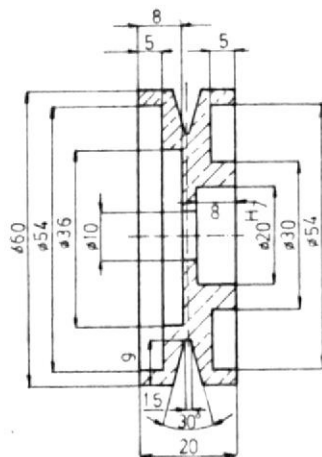






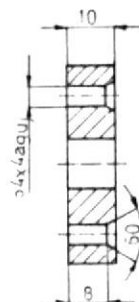
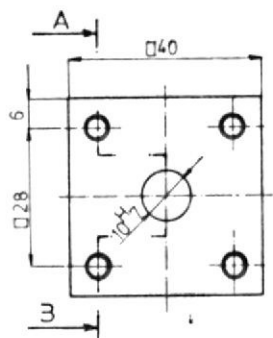






P5/3a. Rueda guia.

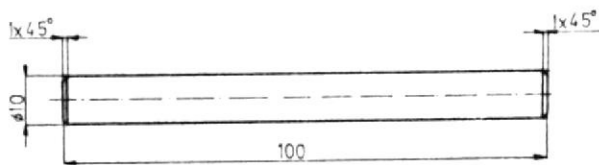
Tol Gral: ±0.01



CORTE A-B

P5/3b. Placa soporte

Tol Gral: ±0.01



P5/3c. Eje de rueda guia.

Tol Gral: ±0.01

