

# Universidad Nacional de Ingenieria

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



## Banco de Pruebas para Motores de Imán Permanente de Corriente Continua con Rotor Inducido Impreso ”

**T E S I S**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**RAUL E. PALACIOS BOCANEGRA**

PROMOCION: 1982 - 2

**LIMA . PERU . 1991**



2.2.3.2. Cojinetes de guiado.	21
2.2.3.3. Ventilador.	22
2.2.3.4. Inducido.	22
2.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.	24
2.3.1. Aplicación en un Sistema de Armas.	24
2.3.2. Principio de funcionamiento.	24
2.3.3. Consideraciones previas al desarrollo del modelo matemático.	27
2.4. MODELO MATEMATICO.	32
2.4.1. Premisas.	32
2.4.2. Definición de ecuaciones.	33
2.4.3. Desarrollo del circuito mecánico equivalente.	36
2.4.3.1. En condiciones estables.	36
2.4.3.2. En condiciones transitorias.	41
2.5. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO EN VACIO.	42
2.5.1. Corriente de arranque.	42
2.5.2. Torque de fricción.	42
2.5.3. Relación Torque resistente versus velocidad angular.	43
2.5.4. Relación corriente versus velocidad angular.	43
2.5.5. Relación corriente versus torque resistente.	44
2.5.6. Relación tensión versus velocidad angular.	44

2.6. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO EN REGIMEN ESTACIONARIO.	46
2.6.1. Curva límite del motor.	46
2.6.2. Relación corriente versus torque en el eje, a RPM nominal.	47
2.6.3. Relación de velocidad angular versus torque a tensiones constantes.	48
2.6.4. Diagrama característico del motor.	51
2.6.5. Diagrama característico del límite de trabajo del motor.	51
2.6.6. Curva de la eficiencia versus la velocidad angular.	53
2.7. FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCIDO IMPRESO COMO UN GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA.	54
2.7.1. Premisa.	54
2.7.2. Diagrama f.e.m. versus velocidad angular.	55
2.8. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO.	56
2.8.1. En el arranque.	56
2.8.2. En la parada.	62
2.9. ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL MOTOR DURANTE VARIACIONES DE CARGA Y TENSION.	64
2.9.1. Para $\delta T_L = 0$ , y $\delta E$ diferente de cero.	68
2.9.2. Para $\delta E = 0$ , y $\delta T_L$ diferente de cero.	70

2.10. ANALISIS COMPARATIVO DE ESTABILIDAD CON LOS MOTORES ELECTRICOS CONVENCIONALES DE CORRIENTE CONTINUA.	72
2.10.1. Para $\delta T_L=0$ , y $\delta E$ diferente de cero	73
2.10.2. Para $\delta E=0$ , y $\delta T_L$ diferente de cero	74
3. DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE IMANES PERMANENTES D.C. CON ROTOR DE INDUCIDO IMPRESO	77
3.1. PREMISA.	77
3.2. JUSTIFICACION.	78
3.3. REQUERIMIENTOS TECNICOS DE CONTROL Y MANTENIMIENTO QUE DEBE CUMPLIR EL BANCO DE PRUEBAS.	79
3.3.1. Control de la f.e.m.	79
3.3.2. Control de la dirección de rotación.	80
3.3.3. Control de la corriente en vacío.	80
3.3.4. Control de la corriente para un torque promedio a la velocidad angular nominal.	80
3.3.5. Desmagnetización y magnetización.	81
3.4. UNIDADES QUE CONFORMAN EL BANCO DE PRUEBAS.	81
3.4.1. Unidad de Control y Magnetización.	81
3.4.1.1. Sub-unidad de Magnetización y Desmagnetización.	82
3.4.1.2. Sub-unidad de Control del motor de Inducido Impreso.	82

3.4.1.3. Sub-unidad de Control del motor primo.	83
3.4.2. Unidad de Soporte del Motor.	83
3.4.3. Equipos complementarios del Banco de Pruebas.	84
3.5. ASPECTOS PRELIMINARES RELACIONADAS A LA CONFORMACION DEL BANCO DE PRUEBAS.	84
3.5.1. Análisis químico del imán permanente.	86
3.5.2. Análisis metalográfico del imán permanente	87
3.5.3. Fabricación del imán permanente tipo Alnico.	88
3.5.4. Instalación de los imanes permanentes.	89
3.5.5. Configuración física de los imanes permanentes en el motor de inducido impreso.	90
3.5.6. Punto de operación de los imanes permanentes.	92
3.5.7. Ecuaciones Magnéticas en los imanes permanentes.	92
3.5.8. Efecto de la Dispersión de Borde.	95
3.5.9. Determinación del tipo de Alnico usa- do en el motor de inducido impreso.	96
3.5.9.1. Medición de la densidad de campo magnético útil, Bg.	97
3.5.9.2. Cálculo del factor K1.	97
3.5.9.3. Cálculo del factor K2.	98

3.5.9.4. Cálculo de los parámetros $B_d$ y $H_d$ .	99
3.5.9.5. Selección del Alnico empleado.	99
3.5.10. Conceptos teóricos sobre Magnetización y Desmagnetización de imanes permanentes.	100
3.5.10.1. Magnetización.	100
3.5.10.2. Desmagnetización.	104
3.5.10.3. Estabilidad magnética.	104
3.5.10.3.1 Incrementos de temperatura.	105
3.5.10.3.2 Efectos por campos magnéticos	105
3.5.10.3.3 Efectos por golpes mecánicos y vibración.	105
3.5.11. Formas de magnetizar y desmagnetizar imanes permanentes.	105
3.5.12. Característica de la bobina magnetizadora y desmagnetizadora de los imanes permanentes.	106
3.5.13. Selección del Magnetizador y Desmagnetizador de imanes permanentes.	108
3.5.14. Estimación de la corriente magnetizante y desmagnetizante.	110
3.5.15. Determinación de las cargas eléctricas $Q_D$ , $Q_M$ y $Q_S$ .	113

3.5.15.1. Preparación del circuito eléctrico para el magnetizado, desmagnetizado y saturación de los imanes permanentes.	114
3.5.15.2. Determinación de la carga eléctrica de desmagnetización QD.	116
3.5.15.3. Determinación de la carga eléctrica de magnetización QM.	118
3.5.15.4. Magnetización y Desmagnetización, a capacitancia constante y tensión de carga variable.	120
3.5.15.5. Determinación de la carga eléctrica, QS.	121
3.5.16. Análisis de la corriente desmagnetizante y magnetizante.	122
3.6. ESQUEMA GENERAL DEL BANCO DE PRUEBAS.	127
3.6.1. Esquema simplificado de la Unidad de Control y Magnetización.	127
3.6.1.1. Esquema simplificado de la subunidad de magnetización y desmagnetización.	128
3.6.1.2. Esquema simplificado de la subunidad de control del motor de inducido impreso.	128
3.6.1.3. Esquema simplificado de la subunidad de Control del motor primo	129



3.6.2. Esquema simplificado de la Unidad de Soporte del motor de inducido impreso.	129
3.7. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS.	130
3.7.1. Diseño Eléctrico de la Unidad de Control y Magnetización.	130
3.7.1.1. Sub-unidad de Magnetización y Desmagnetización.	131
3.7.1.1.1. Alimentación.	132
3.7.1.1.2. Regulación.	132
3.7.1.1.3. Transformación.	132
3.7.1.1.4. Rectificación.	132
3.7.1.1.5. Circuito de Carga Electrostática.	132
3.7.1.1.6. Controles, Indicadores y Dispositivos de Protección.	134
3.7.1.1.6.1. Para un nivel de tensión de 220 VAC.	134
3.7.1.1.6.2. Para un nivel de tensión de 12 VAC.	136
3.7.1.1.7. Circuito Acoplador.	139
3.7.1.2. Sub-unidad de control del motor de inducido impreso.	140
3.7.1.2.1. Alimentación.	140
3.7.1.2.2. Regulación.	140
3.7.1.2.3. Rectificación.	141

3.7.1.2.4. Controles, indicadores, y dispositivos de protección.	141
3.7.1.3. Sub-unidad de control del motor primo.	143
3.7.1.3.1. Alimentación.	143
3.7.1.3.2. Regulación.	144
3.7.1.3.3. Rectificación.	144
3.7.1.3.4. Controles, Indicadores, y Dispositivos de Protección.	144
3.7.1.4. Accesorios secundarios de la Uni- dad de Control y Magnetización.	146
3.7.1.4.1. Jack, bananas hembras, viro- la y grapas.	146
3.7.1.4.2. Regletas de conexión.	147
3.7.2. Diseño Estructural de la Unidad de Control y Magnetización.	147
3.7.2.1. Accesorios Secundarios.	148
3.7.2.1.1. Garruchas.	148
3.7.2.1.2. Cajones.	148
3.7.3. Equipamiento Eléctrico de la Unidad de Soporte del Motor.	148
3.7.3.1. Motor primo.	148
3.7.3.2. Motor de Inducido Impreso.	149
3.7.3.3. Tacogenerador.	149
3.7.3.4. Jack.	149
3.7.4. Diseño Estructural de la Unidad de Soporte del Motor.	149

3.7.4.1. Accesorios secundarios de la Unidad de Soporte del Motor.	149
3.7.4.1.1. Acople Mecánico.	149
3.7.4.1.2. Planchas de Apoyo.	150
3.7.4.1.3. Soportes de Sujeción.	150
3.7.4.1.4. Transmisión de la velocidad al Tacogenerador.	150
3.8. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.	152
3.9. MANTENIMIENTO DEL MOTOR DE INDUCIDO IMPRESO.	153
3.9.1. Procedimientos de operación.	153
3.9.1.1. Control de los parámetros característicos del motor de inducido impreso.	153
3.9.1.2. Mediciones.	153
3.9.1.3. Desmagnetizado de los imanes permanentes.	153
3.9.1.4. Desarme del motor.	153
3.9.1.5. Limpieza.	154
3.9.1.6. Inspección de las partes desarmadas.	155
3.9.1.7. Reemplazo de las partes deterioradas.	155
3.9.1.8. Rearme del motor.	156
3.9.1.9. Magnetizado de los imanes permanentes.	157

3.9.1.10. Verificación de los parámetros característicos del motor de inducido impreso.	157
3.9.2. Relación de herramientas e ins- trumentos, necesarios en el mante- nimiento del motor de inducido impreso.	157
3.9.2.1. Instrumentos.	157
3.9.2.2. Herramientas.	157
3.9.3. Material para el mantenimiento del motor de inducido impreso.	158
3.9.4. Repuestos para el mantenimiento de un motor de inducido impreso.	158
4. EVALUACION ECONOMICA.	159
4.1. INVERSION POR LA CONSTRUCCION DEL BANCO DE PRUEBAS EN EL PERU.	159
4.1.1.- Equipos y accesorios a adquirirse en el mercado local.	160
4.1.1.1. Unidad de Control y Magnetización	160
4.1.1.2. Unidad de Soporte del Motor.	163
4.1.1.3. Accesorios.	165
4.1.1.4. Otros.	166
4.1.1.5. Costo Total.	166
4.1.2. Mano de Obra empleada.	167
4.1.3. Horas-máquina usada.	168
4.1.4. Inversión Total.	169

4.2. COSTO POR EL MANTENIMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCIDO IMPRESO EN EL PERU.	170
4.2.1. Adquisición de materiales en el mercado local.	170
4.2.2. Adquisición de repuestos.	170
4.2.3. Mano de obra directa empleada.	171
4.2.4. Mano de obra indirecta.	173
4.2.5. Horas-máquina usada.	173
4.2.6. Costo total.	173
4.3. ANALISIS ECONOMICO.	174
4.3.1. Banco de Pruebas.	174
4.3.1.1. Adquisición en el extranjero.	174
4.3.1.2. Costo del Banco de Pruebas en el Perú.	174
4.3.1.3. Ahorro de divisas.	174
4.3.2. Mantenimiento de un motor de inducido impreso.	175
4.3.2.1. En el extranjero.	175
4.3.2.2. En el Perú.	175
4.3.2.3. Ahorro de divisas en el Perú.	175
4.4. COSTO DE MANTENIMIENTO POR LOS 92 MOTORES DE INDUCIDO IMPRESO DE LA MARINA PERUANA.	176

CONCLUSIONES .

APENDICES: A. PROCEDIMIENTOS DE OPERACION DEL BANCO  
DE PRUEBAS .

B. MANTENIMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS .

C. HERRAMIENTAS, INSTRUMENTOS Y MATERIAL  
PARA EL BANCO DE PRUEBAS .

D. UBICACION DEL BANCO DE PRUEBAS .

PLANOS .

BIBLIOGRAFIA .

## PROLOGO

El trabajo de investigación que se presenta como Tema de Tesis, para optar el Título Profesional de Ingeniero, tiene por objeto, implementar en el Perú, un Banco de Pruebas para motores de Imán Permanente de corriente continua con rotor de inducido impreso.

Este Banco de Pruebas permitirá controlar las principales características del motor, dados por el fabricante, así como realizar el mantenimiento y/o reparación e incrementar su confiabilidad de operación.

La Marina Peruana, emplea una buena cantidad de éstos motores de inducido impreso en los Sistemas de Armas de sus naves modernas, habiendo sido cotizado su mantenimiento por las firmas extranjeras, a precios muy elevados. Es por esta razón, que la Marina afrontará los gastos de investigación y construcción del Banco de Pruebas en nuestro medio.

Para el desarrollo de este tema de investigación, se han utilizado los Laboratorios del Simac y de la Universidad Nacional de Ingeniería, y la información técnica solicitada al extranjero, a través del Itintec. Mientras, que para la construcción del Banco de Pruebas se han adquirido los equipos, instrumentos y

materiales en el mercado local, empleándose además la mano de obra calificada del Simac.

Con el objeto de lograr un procesamiento ordenado del tema, se le ha dividido en las siguientes partes:

### **CAPITULO 1.** Introducción.

**CAPITULO 2.** Principio de funcionamiento y modelo matemático del motor de imán permanente de corriente continua con rotor de inducido impreso. El desarrollo de este capítulo, se ha podido realizar con la ayuda de la información técnica receptionada del extranjero, y con la apreciación de los componentes internos del motor, cuando este fue desarmado por medios mecánicos. En este capítulo, se hará el análisis del comportamiento del motor de inducido impreso, en estado estacionario operando en vacío y a plena carga, y también se incluyen los análisis transitorios. Al final se hará el estudio de estabilidad, durante las variaciones de carga y tensión, comparándolo con un motor de corriente continua convencional.

**CAPITULO 3.** Diseño de un Banco de Pruebas para motores de imán permanente de corriente continua con rotor de inducido impreso. En este capítulo se especifican los requerimientos técnicos de control y



mantenimiento que debe cumplir el Banco de Pruebas. El desarmado de un motor de inducido impreso por medios mecánicos, permitió, efectuar los ensayos químico y metalográfico de algunos componentes internos del motor, determinar los procedimientos para magnetizar y desmagnetizar los imanes permanentes, establecer las condiciones preliminares de selección y diseño de las unidades que conforman el Banco de Pruebas. También, en este capítulo se dan a conocer, los criterios seguidos para el diseño del Banco de Pruebas, así como las pautas a seguir para el mantenimiento de un motor de inducido impreso.

**CAPITULO 4.** Evaluación Económica. En este capítulo se efectuará la evaluación económica concerniente a:

a.- Los costos de elaboración, construcción, y pruebas finales del Banco de Pruebas.

b.- El costo de mantenimiento de un motor de inducido impreso.

c.- Análisis comparativo de costos, entre la alternativa de adquirir un Banco de Pruebas en el extranjero, y la alternativa de realizarlo en el Perú.

d.- Análisis comparativo de costos, entre la alternativa de realizar el mantenimiento de un motor de

inducido impreso en el extranjero, y la alternativa de realizarlo en el Perú.

e.- La evaluación Económica por el mantenimiento en el Perú, de 92 motores de inducido impreso, pertenecientes a la Marina Peruana.

Las **CONCLUSIONES** en este tema, contemplarán dos aspectos, el económico y el técnico.

En los **APENDICES**, se especificarán, los procedimientos de operación y mantenimiento, la relación de herramientas, los instrumentos y materiales necesarios para el Banco. Por último, se dan a conocer los **PLANOS** de diseño elaborados y la **BIBLIOGRAFIA** empleada.

## 1.- INTRODUCCION.

Se puede definir un Banco de Pruebas, como el conjunto de dispositivos agrupados convenientemente, que permiten medir las características de operación del motor dado.

El conocimiento de las características presentadas por el motor en el Banco de Pruebas, permitirán:

- Determinar si el funcionamiento del motor, está de acuerdo con las especificaciones técnicas dadas por el fabricante.

Verificar el estado del motor, después de un determinado número de horas de servicio, ó después de una reparación.

- Determinar las condiciones óptimas del funcionamiento del motor.

- Llevar a cabo trabajos de investigación científica, y facilitar las labores de entrenamiento.

Esta demás decir que el buen funcionamiento de las distintas partes del Banco de Pruebas, deberá permitir la obtención de lecturas correctas, durante los ensayos del motor.

Se tratará de mantener, lo más bajo posible el costo del Banco de Pruebas, aprovechando al máximo la mano de

obra calificada del Simac, así como el empleo de algunos componentes existentes en los almacenes de Marina.

El Banco de Pruebas será construido, como una instalación semi-móvil, es decir, que podrá trasladarse y ubicarse en cualquier lugar apropiado.

#### **1.1.- ANTECEDENTES.**

En el Perú no existe un Banco de Pruebas para los motores de inducido impreso, en razón de que la tecnología para su diseño y construcción solamente ha sido desarrollada en el extranjero. En Europa, estos Bancos de Pruebas se construyen y están cotizados a un alto precio, mientras que en Sudamérica, la Armada Argentina le ha comprado a la firma italiana Otomelara un Banco de Pruebas, ofreciendo los servicios de mantenimiento de estos motores a la Armada Peruana, a un precio menor al cotizado en Europa.

#### **1.2.- REALIDAD ACTUAL DEL MOTOR DE INDUCIDO IMPRESO EN LA MARINA PERUANA.**

En la Marina Peruana existen 92 motores de inducido impreso tipo CEM M.F.26, distribuidos de la siguiente manera:

Montajes 76/62 mm.: 06 Motores del Servosistema de Elevación

	12 Motores del Servosistema de Ronza.
Montajes 127/54 mm.:	32 Motores del Servosistema de Ronza.
	12 Motores del Servosistema de Elevación.
Lanzadores :	04 Motores del Servosistema de Elevación.
	08 Motores del Servosistema de Ronza.
Stock de Motores :	18 Motores.
	.....
<b>T O T A L</b>	<b>92 MOTORES DE INDUCIDO IMPRESO.</b>

A partir del año 1985, en las pruebas efectuadas a un Sistema Lanzador, se detectó incrementos considerables en las corrientes de éstos motores, tanto en la etapa de aceleración como en la etapa de frenado, no siendo posible destapar el motor por la alta fuerza de atracción magnética de los campos de imán permanente.

Cuando los motores presentaban éstos problemas eran cambiados por uno de repuesto, y el averiado era remitido al extranjero para su reparación; ésta última decisión involucraba un alto costo, dado que el monto de

reparación en Europa ascendía a la suma de 5,000 dólares americanos, mientras que el costo por una unidad nueva era de alrededor 11,000 dólares americanos, sin considerar los inconvenientes que ocasionaba su demora en el retorno al País, de aproximadamente 8 meses a 1 año.

En vista del alto costo que involucraba el mantenimiento de un motor de inducido impreso en Europa, la Marina Peruana solicitó a la Armada Argentina presentara su cotización por el mantenimiento de dicho motor, habiendo sido cotizado en la suma de 2,060 dólares americanos.

Al efectuar una proyección, sin variar las condiciones actuales de mantenimiento y servicio, se estimó de que a mediados de 1991, todos los motores de inducido impreso tendrían que ser cambiados por uno nuevo, o ser reparados en el extranjero. El primer caso, representa un gasto aproximado de 1'012,000 dólares americanos; mientras, que el segundo caso representa un gasto de aproximadamente 460,000 dólares americanos de repararse en Europa, y de 189,520 dólares americanos, de repararse en la Armada Argentina.

Como se podrá apreciar, las cifras son muy elocuentes, este razonamiento obligó a pensar en la posibilidad de construir un Banco de Pruebas en nuestro

medio. La evaluación de esta posibilidad, se centralizó en el estudio del equipo a probar, es decir, en el motor de inducido impreso.

Como es de suponer, éste estudio requiere conocer el funcionamiento y características de diseño del motor, siendo necesario contar con la información técnica, y el conocimiento de la disposición constructiva del motor. Para ello, se obtuvo información técnica del extranjero y, a través de una prensa hidráulica de 15 Toneladas, se pudo vencer la elevada fuerza magnética que ofrecían los imanes permanentes, destapándose por primera vez un motor de inducido impreso.

Si bien es cierto, que el desarmado del motor por medios mecánicos ocasionó, daños a algunas de sus partes constructivas, y la desmagnetización total de los imanes permanentes. Sin embargo, ello permitió efectuar: el análisis cualitativo, los análisis químico y metalográfico de algunos componentes internos, la elaboración de un circuito prototipo para las pruebas de magnetización y desmagnetización de los imanes permanentes.

### **1.3.- OBJETIVO.**

El Banco de Pruebas permitirá:

a.- Verificar el correcto funcionamiento del motor de inducido impreso, controlando para tal fin los siguientes datos característicos: fuerza electromotriz, dirección de rotación, corriente en vacío, y la corriente a un torque promedio.

b.- Magnetizar y desmagnetizar los imanes permanentes para efectuar los siguientes servicios de mantenimiento :

La limpieza interna del inducido impreso y carcasa.

- El cambio de rodamientos deteriorados.
- Cambio de inducido impreso, sí fuese necesario.
- Cambio de los elementos protectores de las caras polares.

La implementación del Banco de Pruebas en el Perú, traería consigo las siguientes ventajas:

- El ahorro de divisas en la construcción del banco de pruebas y, en la reparación de los motores de inducido impreso.

-La no dependencia de la tecnología extranjera, y la contribución al desarrollo técnico en nuestro medio.

-La posibilidad de efectuar el servicio de mantenimiento a los motores de inducido impreso, de otras Armadas vecinas.



## CAPITULO II

## 2.- MODELO MATEMATICO Y ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCIDO IMPRESO.

### 2.1.- DESCRIPCION GENERAL.

#### 2.1.1.- Generalidades.

El primer prototipo de motor de inducido impreso fue construido en EE.UU. de Norte América, en el año 1957, siendo utilizado para desplazar los potenciómetros de las calculadoras analógicas de acoplamiento directo, teniendo como características principales: su potencia nominal de 25 watts, un par máximo que alcanza una magnitud de 4200 gr.cm, una aceleración angular de 29,500 rad./seg<sup>2</sup>, regulación del torque a bajas velocidades, y exactitud de posición del inducido en fracciones de grado deseado.

En Rusia, éstos motores han sido desarrollados en rangos de 5 a 500 watts de potencia para velocidades nominales de 3000 RPM, con una constante de tiempo mecánica en un rango de 5 a 30 milisegundos.

Por otra parte, la División PMJ de la Corporación Kollenmorgen de los Estados Unidos de Norte América ha fabricado motores de inducido impreso con rangos de capacidad de 27 a 3000 watts para velocidades de 2500 a 4050 RPM, con una constante de tiempo mecánica de 1,2 a 79 milisegundos.

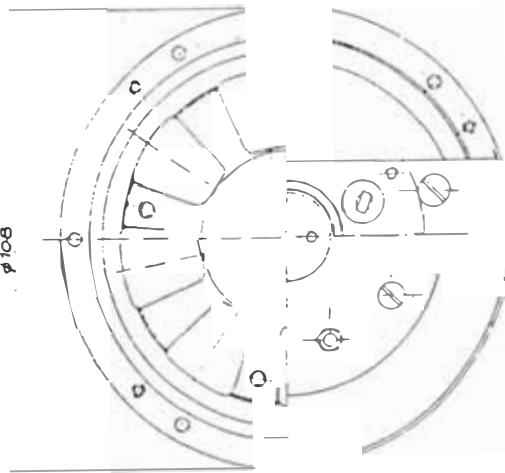
Los primeros estudios efectuados en Francia, dieron como resultado un motor tipo Servalco TM-500, (ver figura 2.1), el cual nos muestra un sistema magnético de disposición unilateral, consistente en un circuito inductor con una simple corona de imanes permanentes de un fuerte campo coercitivo, y recibiendo sobre una de sus caras imantación heteropolar.

Se pudo apreciar que la potencia utilizable en el motor TM-500, aumentaba proporcionalmente al diametro. Para aumentar los torques útiles, sin variar el diametro, se unieron varios discos de inducido impresos, y se colocaron a un mismo eje, a lo que comunmente se denominó: "Motores impresos a discos multiples" (ver figura 2.2).

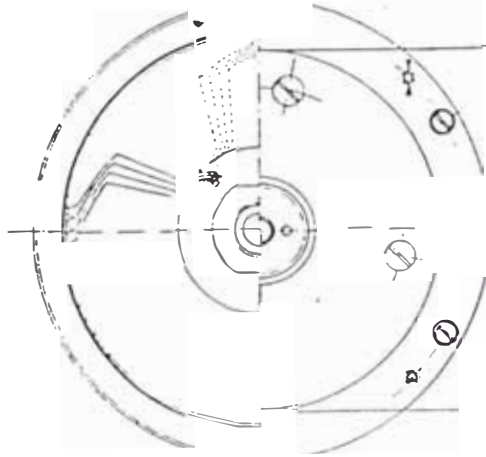
El mas simple de éstos motores a discos multiples, es aquel que consta de dos discos unidos trabajando a un mismo entrehierro. La unión de dos discos impresos origina un aumento del entrehierro, el cual e compensado poniendo dos coronas de imanes, uno frente de otro. En este motor, el campo de dispersión es reducido por lo que la inducción útil en el entrehierro es más grande que en un motor impreso a disco simple.

Posteriormente países como Rusia , Estados Unidos de Norte América, Alemania, Japón, Inglaterra, Polonia y

1/2 vista del circuito  
impreso retirado

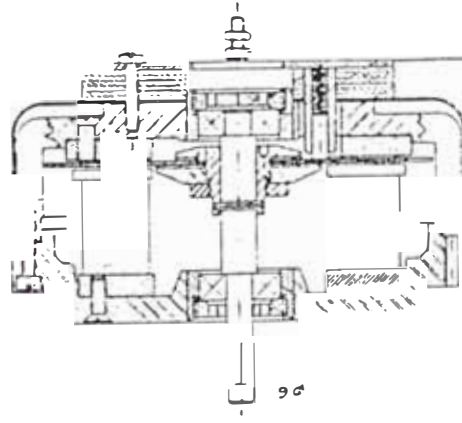


1/2 vista tapacubo  
retirada



1/4 vista exterior

1/4 vista tapa  
retirada



1/2 vista exterior

FIGURA 2.1 Diseño del conjunto del motor Servalco TM 500

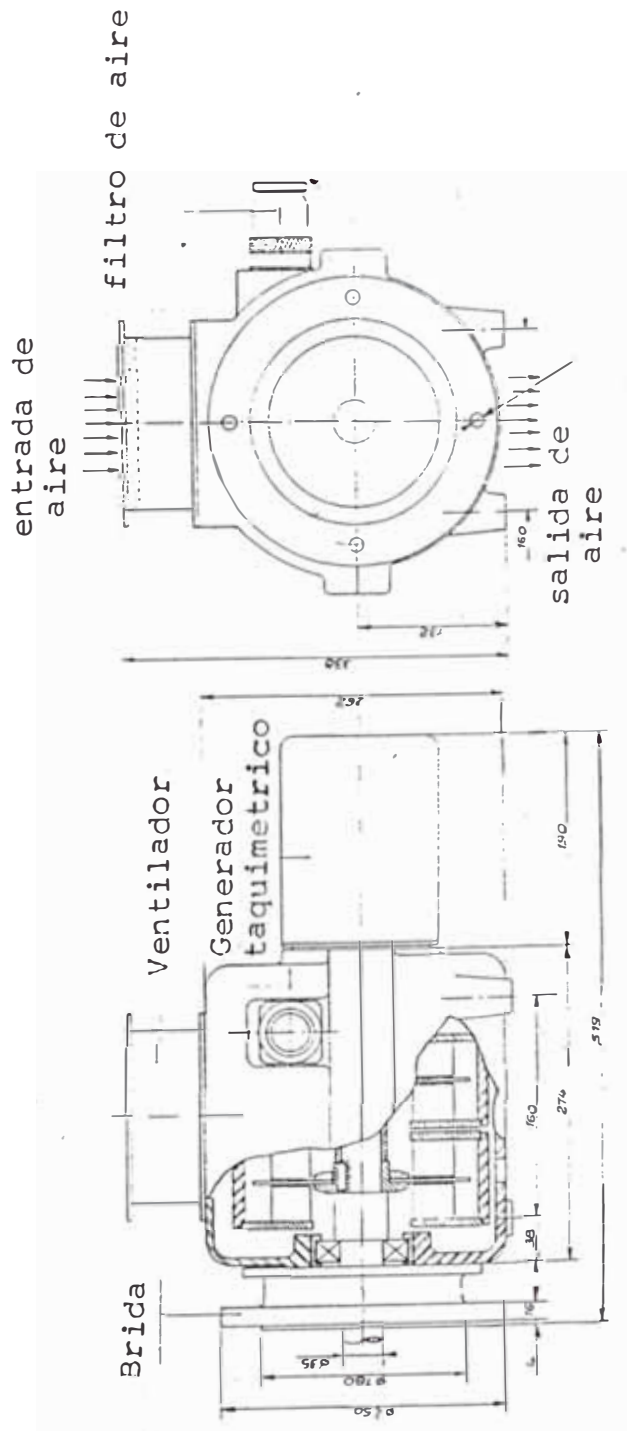


FIGURA 2.2 Motor Servalco a discos multiples.

Rumanía, en el transcurso de los años han efectuado mejoras técnicas en la utilización de los motores impresos aplicandolos en la Industria Automotriz y Textil, en la Instrumentación, en los Sistemas de Automatización, Servomecanismos, Aplicaciones Domésticas y circunscribiendo además su incidencia en el desarrollo de la Robótica Industrial, y usos netamente militares.

En los Servomecanismos de Ronza y Elevación, de los Sistemas de Armas de las modernas naves de la Marina Peruana, se encuentran instalados los motores de inducido impreso. Este motor, tiene un inducido formado por un disco delgado constituido por capas superpuestas de conductores de cobre laminado, las cuales se obtienen por estampación de laminillas de cobre con aislamiento de hojas de resina "epoxi".

Los extremos de los conductores de cobre van soldadas entre sí convenientemente, para que resulte un arrollamiento continuo. El inducido se alimenta a través de dos pares de escobillas, que rozan sobre el colector en una de las caras del disco, cerca del eje del motor.

La excitación constante , se realiza por medio de dos coronas de imanes permanentes, que van montadas en las dos bridas que cierran la carcasa del motor. El disco

impreso es ubicado en el entrehierro formado por éstas coronas.

El problema de los motores de inducido impreso se centraliza justamente, en la disminución de la densidad de campo magnético de los imanes permanentes, debido a los efectos de vibración, temperaturas excesivas de trabajo, shocks mecánicos y otros, a los cuales suele estar expuesto. Esto, trae como consecuencia la disminución de la fuerza electromotriz en el inducido, y por consiguiente un aumento de la corriente que circula en el devanado impreso, lo que podría ocasionar su deterioro. Esta es una de las razones por la cual se hace indispensable, la implementación de un Banco de Pruebas, que permita verificar y controlar las características propias de operación del motor, así como también nos permita efectuar el magnetizado y desmagnetizado de los imanes permanentes, operaciones necesarias para el mantenimiento preventivo y correctivo de los motores de inducido impreso.

#### **2.1.2.- Características de Construcción.**

Una de las características de construcción mas importantes, es el valor extremadamente bajo del momento de inercia del inducido, el cual no contiene piezas de acero, a excepción del eje de motor.

Esta característica permite al motor, desarrollar un par elevado por unidad de peso, responder inmediatamente a los impulsos de corriente y, tener una constante de tiempo mecánica muy reducida.

La excitación constante suministrada por los imanes permanentes, hacen que el torque desarrollado por el inducido sea proporcional a la corriente, mientras que la velocidad de giro será proporcional a la tensión aplicada en los bornes del inducido.

### 2.1.3.- Datos característicos de diseño del motor.

Velocidad Nominal ( $W_n$ )	.....	3000	RPM.
Torque a velocidad nominal ( $T_n$ )	.....	960	New.cm.
Potencia a 3000 RPM	.....	3000	Watts
Tensión a 3000 RPM	.....	140	Voltios.
Corriente nominal ( $I_n$ )	.....	25	Amperios.
Torque máximo (duración 0.5 seg.)	.....	9000	New.cm.
Corriente para un Torque máximo	.....	200	Amperios.
Constante del torque ( $K_t$ )	.....	42	New. cm/amp.
Constante de la fuerza electromotriz ( $K_e$ )	.....	0.044	Volt./RPM.
Constante de la			



velocidad ( $K_d$ )	.....	0.033 New.cm/RPM.
Constante de tiempo mecánica ( $t_{m\alpha c}$ )	.....	0.007 seg.
Momento de Inercia ( $J_a$ )	.....	3600 gr-masa.cm <sup>2</sup>
Torque de fricción en vacío ( $T_F$ )	.....	10 New.cm.
Resistencia del inducido (25 °C)	.....	0.18 Ohmios.
Resistencia en bornes del motor (25 °C)	.....	0.28 Ohmios.
Peso del motor completo	.....	35 Kgrs.

## 2.2.- DESCRIPCION DETALLADA.

### 2.2.1.- Constitución del motor.(Figura 2.2.1.1)

El motor eléctrico está formado por una parte fija y otra giratoria. La parte fija se encuentra conformada por: la carcaza (6); las bridas de cierre (7) y (5), correspondientes al lado de fijación del motor y a su lado opuesto; los imanes permanentes (13); y los portaescobillas (10). La parte giratoria está constituida por: el eje (8); el inducido (9); los cojinetes de apoyo (12) y (15); y el ventilador (16).

### 2.2.2.- Parte fija.

#### 2.2.2.1.- Carcaza.

La carcaza (6), es una aleación de aluminio ASTM-75S, fundido en matriz de forma cilíndrica, la cual

se cierra con las dos bridas (5) y (7), quienes descansan en los asentamientos de precisión de la carcasa.

Su cuerpo presenta una cavidad circular, donde va alojado un tapón redondo (17), provista de una junta retén, la cual va asegurada al tapón por medio de un segmento resorte. Retirando este tapón, se podrá verificar el estado y normal funcionamiento del inducido.

#### **2.2.2.2.- Brida del lado de fijación del motor.**

La brida (7), que cierra al motor por el lado de su fijación, está constituido por un disco de acero AISI 1055, taladrado en su centro para dar paso al eje del inducido (8).

Esta brida tiene tallada en su parte exterior un resalte cilíndrico, para asegurar el motor al montaje. En la parte interna, van montados diez imanes permanentes (13), y los terminales del arrollamiento de magnetización y desmagnetización, los cuales vienen a conectarse a los boquillas (14), que van encastradas a presión en propia brida.

#### **2.2.2.3.- Brida del lado opuesto al de fijación.**

La brida (5), que cierra al motor por el lado opuesto al de su fijación, está constituido por un disco

de acero AISI 1055, taladrado en su centro para dar paso al eje del inducido, que se fija a la carcaza por medio de tornillos.

En la cara externa de la brida, va tallado un resalte circular para el montaje del soporte de los componentes acoplados al motor, y de los asientos de las cuatro portaescobillas (10). En la cara interna de la brida, van montados los diez imanes permanentes (13) de la corona correspondiente, y los terminales de su arrollamiento de magnetización y desmagnetización, los cuales van conectados a las dos boquillas, encastradas a presión en la propia brida (Ver (4) en figura 2.2.1.1).

#### **2.2.2.4.- Imanes Permanentes.**

Los imanes permanentes (13) que crean el campo magnético del motor, están dispuestos en dos coronas que van montadas, una en cada una de las bridas (5) y (7). Cada corona está formada por diez imanes permanentes, cuyas caras interiores van montadas en simetría con las correspondientes a los imanes de las otras coronas, de manera que crean un entrehierro muy reducido, dentro del cual se mueve el inducido impreso (9). El campo magnético que crean los imanes permanentes se cierra a través de las dos bridas (5) y (7).

De acuerdo al análisis químico y metalográfico realizado, el imán permanente utilizado pertenece a la

familia ALNICO, caracterizado por el 25% de Cobalto en su aleación, dándole una mayor capacidad para desarrollar una orientación cristalográfica preferida.

El proceso de fabricación de la aleación es iniciado por el proceso de fundido a una temperatura de aproximadamente  $1250^{\circ}\text{C}$ . La aleación luego es enfríada en un campo magnético y envejecido a  $600^{\circ}\text{C}$ . El material fundido es moldeado después del recocido, por la operación de esmerilado o a través de una máquina electrolítica.

El objeto del tratamiento térmico es precipitar las partículas de simple dominio de una fase rica en Fe-Co, a una matriz rica en Ni-Al. Al aplicársele un campo magnético, determina que la orientación de la fase de precipitación sea paralela al campo aplicado.

Debido a que la estructura magnética está influenciada por la orientación cristalográfica del material, las mejores propiedades requieren un cuidadoso desarrollo del propio cristal.

A manera de ilustración, se podrá observar en la tabla 2.2., las características magnéticas de un grupo de imanes permanentes denominados **ALNICO**. En el capítulo 3, se explicará en una forma mas detallada , los

resultados del análisis metalográfico y químico efectuados al imán permanente.

Los diez imanes de cada corona están envueltos por una bobina, formando un devanado tipo espiral de Rovovsky. Estas bobinas tienen como fin conducir el impulso de corriente eléctrica, el cual permitirá el magnetizado y desmagnetizado de los imanes permanentes. Los terminales de dichas bobinas se conectan a dos parejas de boquillas (4) y (14), las cuales van encastradas a las dos bridas (5) y (7), respectivamente.

#### **2.2.2.5.- Portaescobillas.( Figura 2.2.1.2)**

Hay cuatro portaescobillas (10), unidas por parejas a través de una planchita metálica que hace el contacto eléctrico entre dos portaescobillas. Las escobillas (11), van dentro del cuerpo cilíndrico de los portaescobillas, llevando un muelle (27) comprimido por el tapón de cierre (28) del portaescobillas.

La planchita metálica (29) que conecta un par de escobillas, lleva un borne para fijación del terminal del conductor de alimentación.

### **2.2.3.- Parte rotatoria.( Figura 2.2.1.2)**

#### **2.2.3.1.- Eje motor.**

El eje (8) es de un acero de alta resistencia, cilíndrico y liso en su parte central, mientras que en uno de sus extremos va acanalado, para enchavetar con las tuercas acopladas (18). Este eje lleva acoplado una arandela (23), la cual fija el disco impreso y el ventilador al eje por medio de tornillos.

En la misma parte central del eje, y en correspondencia con los cojinetes de guiado (12) y (15), van torneados también los rebajos de apoyo de la pista interior de los propios cojinetes.

#### **2.2.3.2.- Cojinetes de guiado.**

Los cojinetes de guiado (12) y (15) en que se apoya el eje son del tipo estanco, ya que protegen al disco impreso del polvo y de la humedad. Además internamente contienen una cantidad de grasa lubricante suficiente para que no sea necesario otro tipo de mantenimiento durante su funcionamiento.

El cojinete (12), del lado opuesto al de fijación, es de asiento fijo. Su pista de rodamiento externo se mantiene bloqueado en su asiento, la cual va tallada en la brida de cierre (5), mediante la arandela (20) que va afirmada con tornillos a la propia brida. Su

pista de rodamiento anterior está bloqueada contra el rebajo de apoyo torneado en el eje, por medio de la arandela de fijación (19) que se enrosca al propio eje.

#### **2.2.3.3.- Ventilador.**

El ventilador (16) va fijo a la arandela (23) del eje. El disco impreso (9) se apoya directamente sobre el ventilador, manteniéndose en esa posición por medio de la arandela (22), que juntamente con los tornillos (21), fijan el ventilador a la arandela brida (23).

Este ventilador está constituido por un disco con una serie de aletas radiales destinadas a crear, en el interior del motor, una circulación de aire suficiente que evite las temperaturas excesivas.

#### **2.2.3.4.- Inducido.**

El inducido impreso es un disco de pequeño espesor, conformado por hilos de cobre, los cuales se fijan por medio de pegamento, sobre una capa de aislamiento de resina "epoxi", mientras que los extremos de los hilos de cobre van soldados entre sí, con la finalidad de tener un arrollamiento continuo. La figura 2.2.3.3.1 nos muestra la trayectoria, los puntos de unión soldada en los extremos del disco, y las zonas que forman parte de dicho arrollamiento.

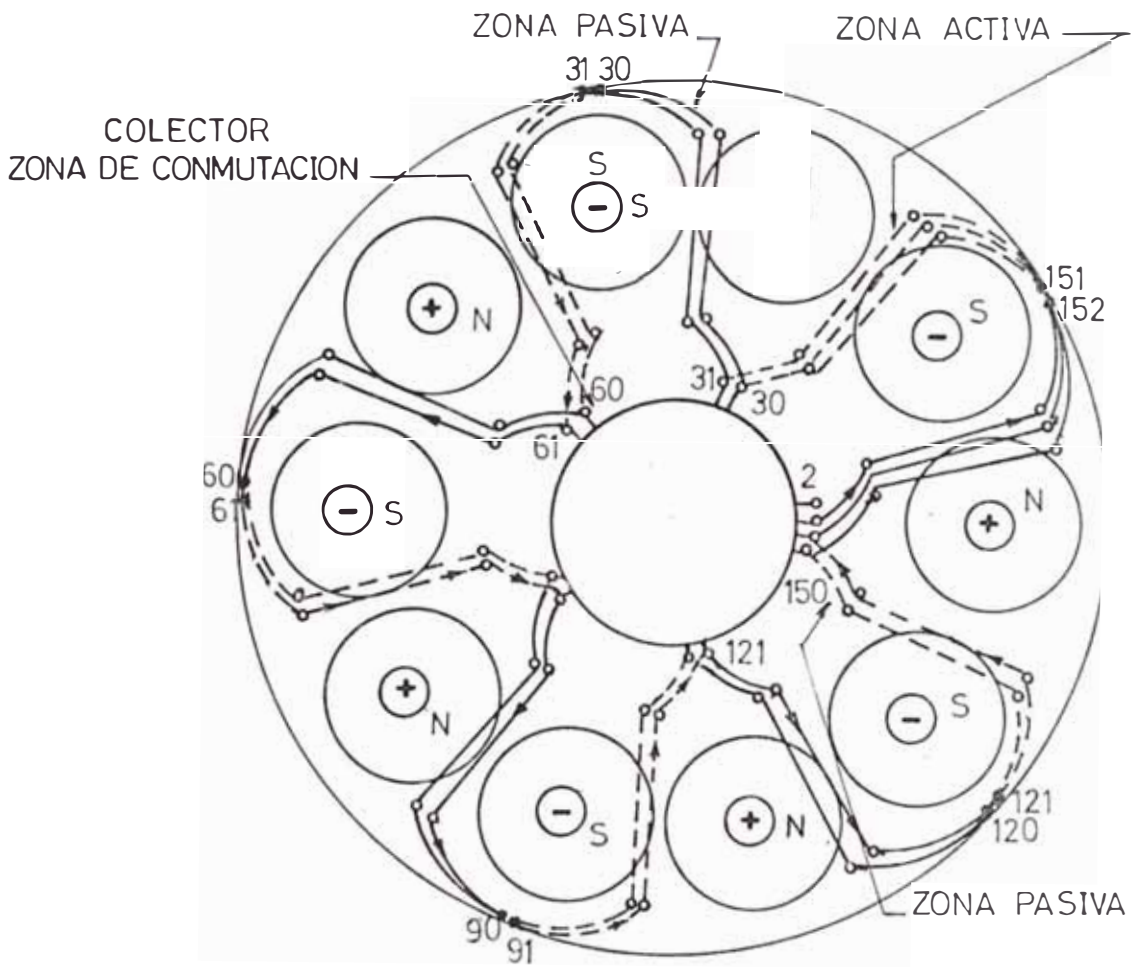


FIG. 2.2.33.1. TRAYECTORIA Y ZONA DEL ARROLLAMIENTO DEL INDUCIDO IMPRESO



El anillo colector del inducido está formado por los extremos internos de los hilos de cobre, de la cara del disco que corresponde al lado opuesto de fijación del motor.

La tecnología de los discos a bobinado impreso han requerido de un soporte aislante, de buenas cualidades mecánicas y térmicas, para lo cual se ha tenido que recurrir: a todo el arsenal de la química de resinas sintéticas, pegamentos, etc...; a los procedimientos de grabado químico, electroquímico, electro-erosión y mecanizado, y al procedimiento de galvanoplastia, el cual permite "cebar" las placas de cobre y metalizar los agujeros.

Para llevar el diseño del bobinado sobre el disco, es necesario escoger el mejor proceso que se adapte a la figura y al espesor de cobre, pudiéndose emplear: el método del ecrán de seda, el método gráfico por contacto (fotografía), o por el procedimiento "offset". El diseño original es dibujado a gran escala, siendo fotografiado y reducido a la dimensión de ejecución, para darle un cliché matriz o "master".

El inducido del motor CEM.MF-26 es un disco impreso multiple simple, en razón de que consta de dos discos impresos simples unidos por una capa aislante. La

unión de estos dos discos simples se logra soldando los extremos exteriores de ambos discos.

El tipo de devanado empleado para cada inducido impreso es el ondulado simple, con 302 hilos de cobre, 151 espiras, 151 segmentos de conmutación y , un paso de conmutación igual a 30.( Ver figura 2.2.3.3.2.)

## **2.3.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.**

### **2.3.1.- Aplicación en un Sistema de Armas.**

Como se dijo anteriormente, la Marina Peruana emplea los motores de inducido impreso para efectuar los movimientos de ronza y elevación, en diversos Sistemas de Armas de las unidades navales.( Figuras 2.3.1.1. y 2.3.1.2.)

Específicamente, esta aplicación se circunscribe al mando a distancia de mencionados sistemas, el cual está constituido basicamente por Servos, Cajas de Sincros y un Sistema de Alimentación y Control, los cuales a su vez están conectados electricamente entre sí.

Los servos de ronza y elevación están formados por el mecanismo reductor y los motores electricos. El mecanismo reductor es de engranajes, donde su eje de entrada va acoplado directamente al eje del motor eléctrico correspondiente, mientras que el eje de salida

está constituido por un piñón recto, el cual engrana en la corona dentada del sistema a mover.

### **2.3.2.- Principio de Funcionamiento.**

Los motores de inducido impreso, son aquellos motores de corriente continua cuyo inducido está formado por láminas conductoras de cobre, de sección plana, impresas en las dos caras de un disco delgado de resina "epoxi", la cual sirve al mismo tiempo de soporte y de aislante.

El arrollamiento de la armadura, puede ser designado como el equivalente anular de un devanado ondulado en serie, en el cual la conmutación ocurre fuera de la zona de los conductores activos. (Figura 2.2.3.3.1.)

El colector se forma en una cara del disco, cercano a su eje y está constituido directamente por los terminales de las mismas láminas conductoras, sobre los que rozan los dos pares de escobillas conmutándolas en secuencia.

Este tipo de inducido difiere notablemente de los inducidos comunes, en razón de que estos se encuentran constituidos por un cilindro de laminillas

magnéticas de diametro relativamente considerable, sobre el cual se bobinan los arrollamientos de hilo de cobre.

Los imanes permanentes están polarizados alternativamente con polaridad norte y sur (Figura 2.3.2.1.). El flujo magnético va de polo norte a sur, recorriendo paralelamente al eje de la máquina y atravesando el disco de armadura axialmente, hasta llegar a la segunda corona de polos en que se encuentra la pieza polar magnetizada como sur. El flujo magnético atraviesa este polo, dividiendose en dos flujos que también atraviesan los polos magnéticos norte contiguos, los cuales flanquean al polo sur mencionado. Por último, éste flujo atraviesa el entrehierro y el inducido, hasta cerrar el circuito magnético a través del imán de la otra corona.

En la estructura del motor de corriente continua con entrehierro plano o axial, el torque origina que los conductores roten independiente del elemento magnetizante, es por esta razón, que la uniformidad del campo magnético no es virtualmente afectado por la rotación de la armadura.

También hay que tener en cuenta, que este motor dada su peculiar construcción, su permeabilidad magnética se mantiene constante. El único factor que

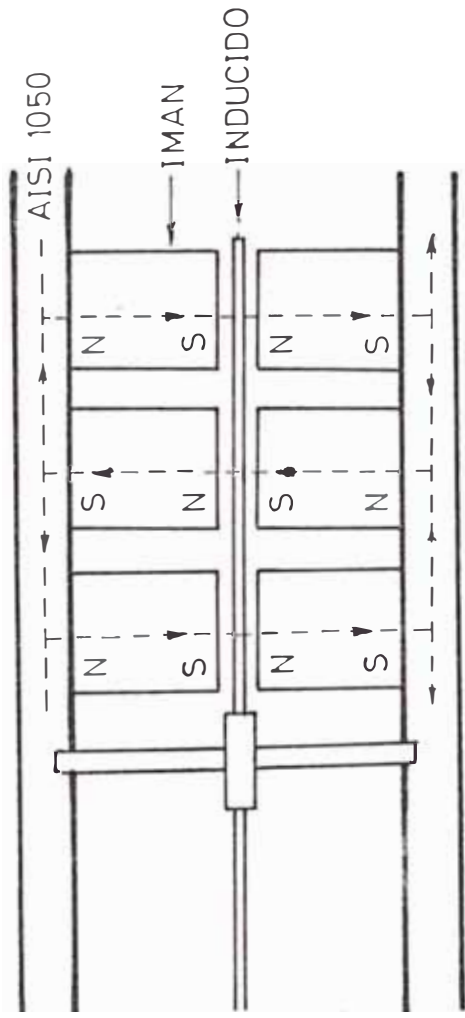


FIG. 2.3.2.1. POLARIZACION DE LOS IMANES PERMANENTES

puede originar una ligera fluctuación del torque, es la distribución de la corriente, cuando las escobillas pasan de un contacto al siguiente. Sin embargo, las pruebas realizadas con el motor han demostrado que, en respuesta a una corriente dada, la máxima variación del torque no excede del 0.5 % del valor total.

### **2.3.3.- Consideraciones previas al desarrollo del modelo matemático.**

La reducida parte metálica del inducido impreso, hace que su masa este concentrada en su eje de giro, por lo que su inercia será mínima, permitiendo obtener tiempos de respuesta cortos a los impulsos de corriente, originando aceleraciones elevadas.

Las ventajas que se obtienen manteniendo el momento de inercia dentro de valores muy bajos, resultan evidentes, sí se tiene en cuenta que la velocidad de giro del motor con respecto a la de la parte arrastrada, es muy elevada, y que el momento de inercia del motor aumenta proporcionalmente al cuadrado de la relación de transmisión entre el motor y la masa arrastrada.

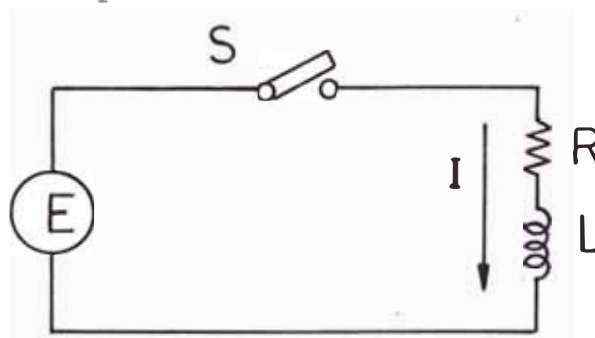
El inducido impreso pesa aproximadamente 350 gramos, razón por la que las resistencias mecánicas del motor debido a los rozamientos sean muy reducidas, y que la constante de tiempo mecánica sea pequeña.

La constante de tiempo mecánica se define, como el tiempo que el motor necesita para alcanzar, arrancando en vacío, el 63% de su velocidad de régimen nominal. La constante de tiempo eléctrica es despreciable, aproximadamente menor a una milésima de segundo; ello es debido a que la inductancia del inducido es pequeñísima comparada con su resistencia, la que solo llega a unas décimas de ohmio.

Como las resistencias eléctricas y mecánicas son pequeñas, se puede considerar sin gran error, que el torque disponible en el eje del motor es directamente proporcional a la corriente de alimentación.

Para el cálculo de la constante de tiempo eléctrica se utilizará el esquema de la figura 2.3.3.1, en la que se representa al circuito equivalente de inducido impreso.

Fig. 2.3.3.1.- Circuito equivalente del inducido impreso.



La ecuación del circuito equivalente es la siguiente:

$$I.R + L \frac{dI}{dt} = E$$

Ordenando ésta ecuación se tiene:

$$\frac{dI}{dt} + \left( \frac{R}{L} \right) \cdot I = \frac{E}{L}$$

Aplicando directamente la transformada de Laplace a ésta última ecuación:

$$S \cdot I(s) - I(0^+) + \left( \frac{R}{L} \right) \cdot I(s) = \frac{E}{L} \cdot \frac{1}{s}$$

La corriente inicial  $I(0^+)$ , inmediatamente después de cerrar el interruptor "S", será igual a cero. Reemplazando el valor de  $I(0^+)=0$  en la ecuación, resulta:

$$I(s) \cdot \left( \frac{R}{L} + s \right) = \left( \frac{E}{L} \right) \cdot \left( \frac{1}{s} \right)$$

$$I(s) = \frac{E}{L} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{\left( \frac{R}{L} + s \right)}$$

Donde:

$$\frac{1}{s \left( s + \frac{R}{L} \right)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{\left( s + \frac{R}{L} \right)}$$

Arreglando términos:

$$\frac{1}{s \left( s + \frac{R}{L} \right)} = \frac{A \left( s + \frac{R}{L} \right) + B \cdot s}{s \left( s + \frac{R}{L} \right)}$$

De los numeradores se deduce la siguiente ecuación:

$$1 = (A + B)s + A \cdot \frac{R}{L}$$

Igualando los coeficientes de igual grado en  $s$  se obtiene:

$$A + B = 0 \quad A = \frac{L}{R} \quad B = - \frac{L}{R}$$



Por lo que

$$I(s) = \frac{E}{L} \left( \frac{L/R}{s} + \frac{-L/R}{s + R/L} \right)$$

Luego:

$$I(s) = \frac{E}{R} \left( \frac{1}{s} - \frac{1}{s + R/L} \right)$$

Aplicando la Transformada de Laplace Inversa, a ésta ecuación:

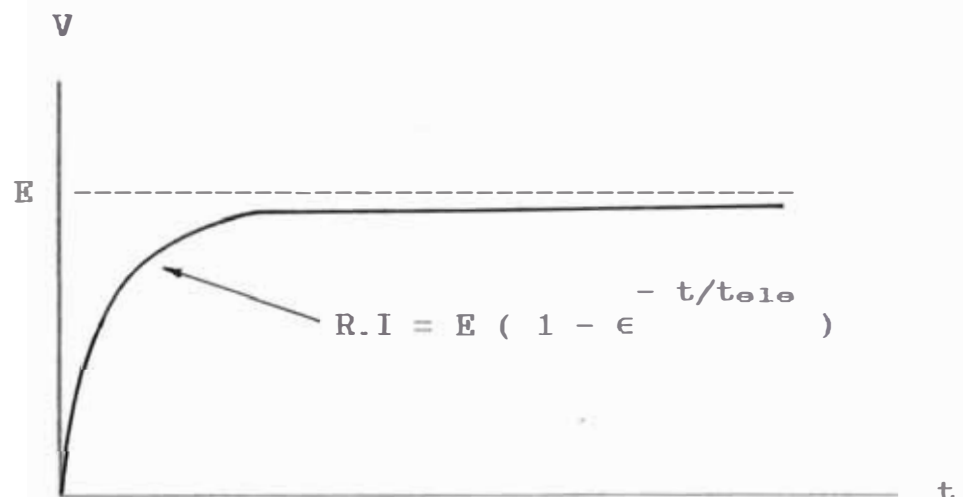
$$I = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-(R/L)t} \right) \quad \text{ó}$$

$$R.I = E \left( 1 - e^{-t/t_{e1e}} \right)$$

Donde,  $t_{e1e}$  es la constante de tiempo eléctrica, siendo igual al cociente entre la inductancia  $L$  y la resistencia  $R$ .

Esta última ecuación, se representa en la siguiente figura.

Fig. 2.3.3.2.- Representación gráfica.



De acuerdo a las mediciones efectuadas en el inducido impreso, la inductancia  $L$  tiene un valor de 30 microhenrios, y la resistencia  $R$  es de 0.28 ohmios. Por lo que la  $t_{e1e}$  tomará el valor de 0.1 milisegundos.

El cálculo de la constante de tiempo mecánica  $t_{mec}$ , será precisado en el item 2.6.

TABLA 2.2

PROPIEDADES DE ALEACIONES ALNICO

MATERIAL	B <sub>r</sub> (Gauss)	H <sub>c</sub> (Oersted)	(BH) <sub>max</sub> 10 <sup>6</sup> G.Oe	U <sub>r</sub> Perm. Relat.	(BH) <sub>u</sub> 10 <sup>6</sup> G.Oe	Gravedad Especif.	Temp. Max. de Operac. °C
ALNICO 2	7250	550	1.6	6.4	0.7	7.1	450
ALNICO 5	12500	620	5.3	4.1	1.5	7.3	550
ALNICO 5-DG	12900	650	6.1	4.0	.	7.3	550
ALNICO 5-7	13200	730	7.5	3.0	2.1	7.3	550
ALNICO 6	10500	750	3.7	4.8	1.3	7.3	550
ALNICO 8	8300	1600	5.0	2.3	2.1	7.3	550
ALNICO 8B	7800	1900	5.7	2.0	2.3	7.3	550
ALNICO 9	10450	1550	10.5	1.3	3.6	7.3	550

NOTA : TABLA OBTENIDA DEL DOCUMENTO : " PERMANENT MAGNET MATERIALS " por JOSEPH J. BECHER, FRED E. LUBORSKY Y D. LUTHER MARTIN.

## 2.4.MODELO MATEMATICO.

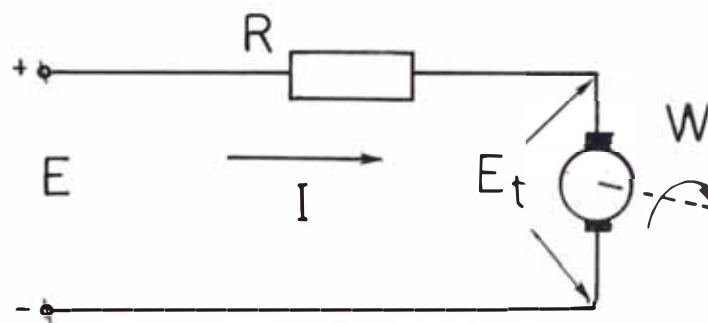
### 2.4.1.- PREMISAS

Las dos magnitudes fundamentales que caracterizan a los motores eléctricos de corriente continua, desde el punto de vista eléctrico son, la resistencia que ofrecen al paso de la corriente y, el valor del Torque creado en respuesta a una intensidad de corriente dada.

En los motores con inducido impreso, éstas dos magnitudes son representadas por, los parámetros  $R$  (resistencia del inducido y la resistencia de las escobillas, en ohmios) y  $K_t$  (constante del torque, en  $\text{Newxcm/amp.}$ ). Puede mencionarse además un tercer parámetro,  $K_e$ , el cual es la constante de la f.e.m. en volt/R.P.M., necesario para producir una variación en la velocidad de rotación del motor.

El circuito eléctrico equivalente del motor de inducido impreso, corresponde al del motor de corriente continua de excitación independiente convencional, cuya representación gráfica se muestra en la siguiente figura.

Fig. 2.4.1.- Circuito eléctrico equivalente del motor de inducido impreso.



La fuerza electromotriz  $E_t$ , es proporcional a la velocidad de giro  $W$ , mientras que el torque desarrollado por el inducido impreso, es proporcional a la corriente  $I$  del circuito. Es importante hacer notar que en éste esquema no aparece la bobina que representa la inductancia del inducido, debido a que el numero de espiras es bajo, y a que la inductancia mutua es débil.

#### 2.4.2.- Definición de ecuaciones.

Una armadura de circuito impreso no tiene fierro a saturar y, el campo suministrado por imanes permanentes es relativamente constante y uniforme sobre el régimen normal de la corriente de armadura. Como cada conductor es individualmente conmutado en movimiento y, desde que la inductancia y el arco producidos son despreciables, de un modo sorprendente, corrientes y torques uniformes son generados, siguiendo las características propias de un motor ideal de corriente continua, para el cual las siguientes ecuaciones pueden ser escritas :

## A.- Ecuación eléctrica de la Armadura

$$E = I.R + E_t + L \frac{dI}{dt} \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

E = Voltaje de alimentación en bornes del motor, en voltios

I = Corriente de armadura, en amperios .

R = Resistencia de armadura , en Ohmios.

$E_t$  = Fuerza electromotriz generada, en voltios .

L = Inductancia del devanado. en Henrios

$K_e$  = Cte.de f.e.m., en voltios/ RPM

W = Velocidad angular de la armadura en RPM.

También:

$$E_t = K_e.W \dots\dots\dots(2)$$

$$T = K_t.I \dots\dots\dots(3)$$

y, como la inductancia de la armadura es pequeña, se hace  $L=0$ . De tal forma que la ecuación (1), quedaría como:

$$E = I.R + K_e.W \dots\dots\dots(4)$$

## B.- Ecuación del movimiento de la armadura.

$$T = (J_1 + J_2) \frac{dW}{dt} + T_R + T_L$$

Luego:

$$T = J_T \frac{dW}{dt} + T_R + T_L \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

$T$  = Torque desarrollado por el motor en New.cm.

$K_t$  = Constante de torque , en New.cm/amperio.

$J_T$  = Momento de masa inercial de la armadura del motor más el momento inercial de la carga, en Gr.masa-cm<sup>2</sup> ó Newxcmxseg<sup>2</sup>.

$K_D$  Cte. de amortiguación en New.cm/RPM.

$T_R$  = Torque resistente de pérdidas, en New.cm.

$T_L$  = Torque de carga, en New.cm.

También:

$$T_R = T_D + T_F \dots\dots(6)$$

$T_D$  = Torque de amortiguación, debido a la amortiguación viscosa y corrientes parásitas.

$T_F$  = Torque de fricción, debido a los rodajes, contactos de escobillas, etc.

La ecuación (5), quedaría como:

$$T = J_T \cdot dw/dt + T_D + T_F + T_L \dots\dots(7)$$

La ecuación (7), suele escribirse también como:

$$T = T_I + T_D + T_F + T_L \dots\dots\dots(7a)$$

donde  $T_I$  , es el Torque inercial.

Muchas veces, el Torque de fricción suele desprejarse por su pequeño valor, por lo que la ecuación (7), podría quedar como:

$$T = J_T dw/dt + T_D + T_L \dots\dots\dots(7b)$$

Para un régimen estacionario, la ecuación (7b) se expresaría como:

$$T = T_D + T_L \dots\dots\dots(7c)$$

**2.4.3.- Desarrollo del circuito mecánico equivalente.**

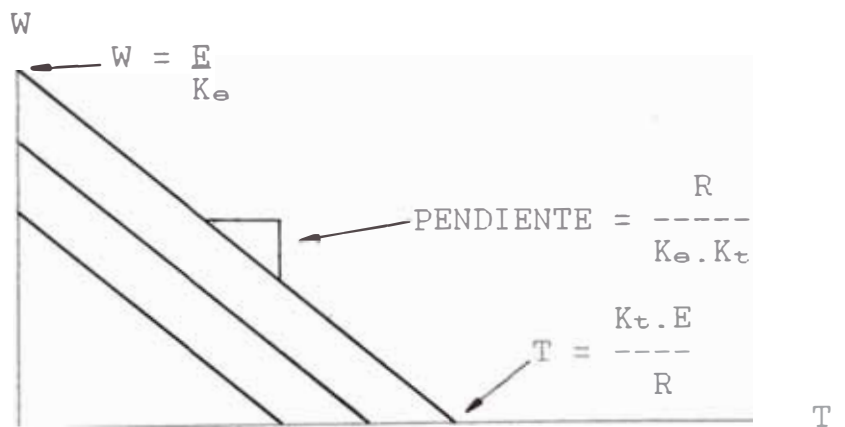
**2.4.3.1.- En condiciones estable.**

La ecuación (4), puede ser acomodada de la siguiente forma:

$$\frac{E}{K_e} = T \frac{R}{K_e \cdot K_t} + W \dots\dots(4a)$$

La representación gráfica de la ecuación (4a), se muestra en la siguiente figura.

Fig. 2.4.3.1.1.- Representación gráfica de la ecuación (4a).





En ésta figura, se puede observar una familia de rectas paralelas con una misma pendiente, diferenciándose entre ellas por el valor de tensión de suministro  $E$ , que se tome en la ecuación (4a). La pendiente  $R/K_e.K_t$ , viene a ser una medición útil de la calidad de éstas máquinas, la cual se denominará como Resistencia Mecánica equivalente ( $R_m$ ).

La ecuación (4a), puede escribirse también de las siguientes maneras:

$$W_{in} = T.R_m + W_{out} \dots\dots\dots(4b)$$

$$W_{in} = T. \frac{R}{K_e.K_t} + W_{out} \dots\dots(4c)$$

Donde:

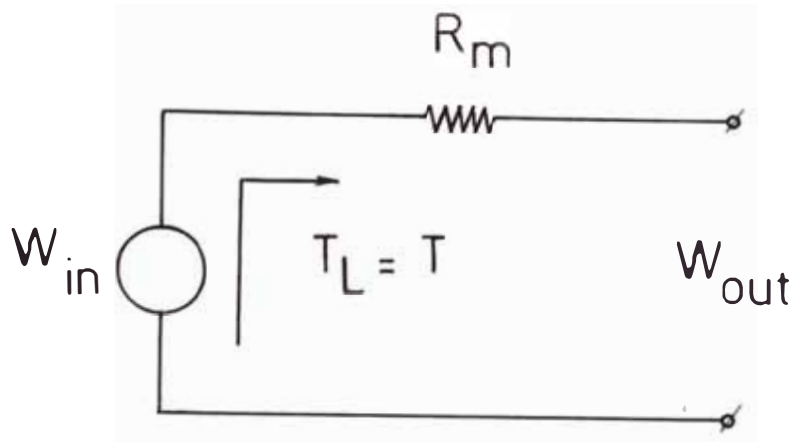
$W_{in} = E/K_e$  : Velocidad de entrada  
(Velocidad generada).

$R_m = R/K_e.K_t$  : Resistencia mecánica.

$W_{out} = W$  : Velocidad de salida.

El circuito mecánico equivalente que representa la ecuación (4b), se muestra a continuación.

Fig. 2.4.3.- Circuito mecánico equivalente obtenido de la ecuación (4b).

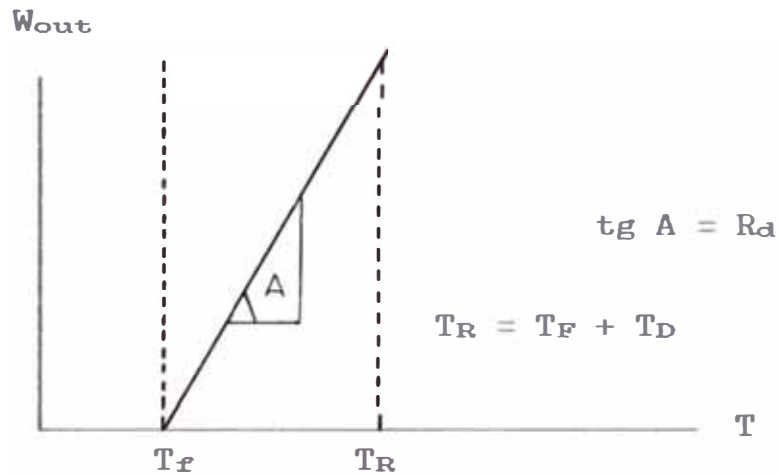


Aquí, la fuente de voltaje es remplazada por un generador de velocidad  $W_{in}$ , que al conectar una carga al eje del motor de inducido impreso, se obtiene a la salida una velocidad  $W_{out}$  menor que la generada, por la presencia de la resistencia mecánica  $R_m$ , la cual produce una caída de velocidad.

Sin embargo, la experiencia práctica con los motores de inducido impreso, han mostrado que las pérdidas totales de torque (torque resistente), siempre contienen una componente de viscosidad, la cual es proporcional a la velocidad de salida,  $W_{out}$ .

En la siguiente figura, se representará la composición del torque resistente.

Fig. 2.4.3.1.3.- Composición del torque resistente.



Ra es la pendiente de la recta de torque amortiguada, cuyo valor es la inversa de la constante Ka. También:

$$T_D = W_{out}/R_d \dots\dots\dots(4d)$$

Al reemplazar la ecuación (7c), en la ecuación (4b) se obtiene:

$$W_{out} = W_{in} - (T_L + T_D)R_m \dots\dots(4e)$$

Luego reemplazando (4c) en (4d), permite obtener:

$$W_{out} = W_{in} - T_L.R_m - \frac{W_{out}}{R_d} R_m$$

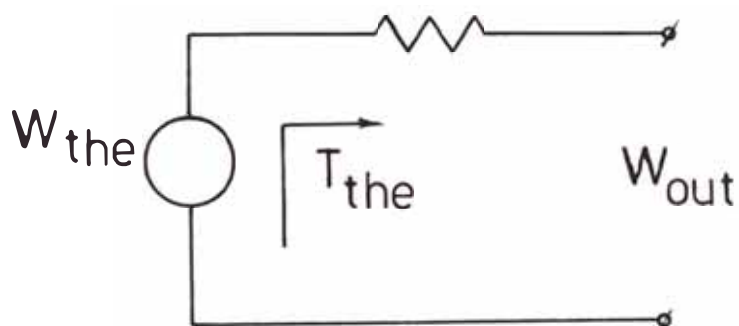
$$W_{out} (1 + R_m/R_d) = W_{in} - T_L.R_m$$

$$W_{out} = W_{in} \frac{R_d}{R_m+R_d} - T_L \frac{R_m.R_d}{R_m+R_d} \dots\dots(4f)$$

Esta ecuación tiene similitud con el circuito del Teorema de Thevenin, el cual se representa en la figura siguiente.

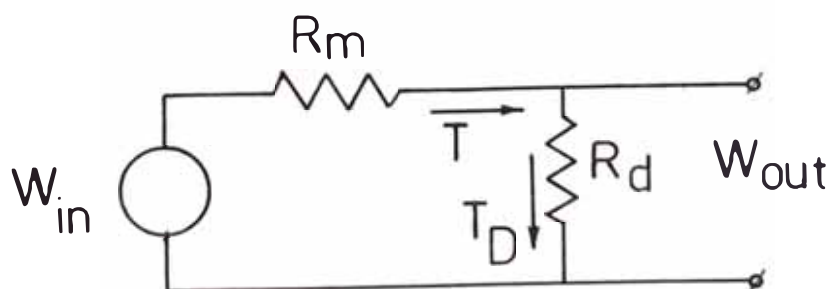
Fig. 2.4.3.1.4.- Representación del Teorema de Thevenin.

$$W_{out} = W_{the} - R_{the} \cdot T_{the}$$



Haciendo la analogía con la ecuación (4f), se deduce que  $R_a$  es una resistencia Shunt, conectada en paralelo a la resistencia  $R_m$  y a la carga, tal como se ilustra en la siguiente figura.

Fig 2.4.3.1.5.- Ubicación de la resistencia de viscosidad mecánica,  $R_a$ .

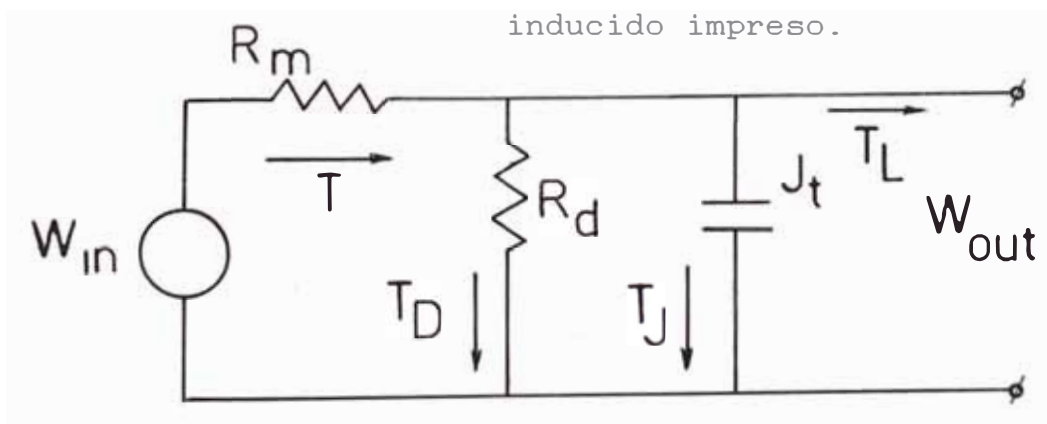


### 2.4.3.2.- En condiciones transitorias.

Para completar la red, en condiciones transitorias, se debe proveer de un componente que simule la inercia mecánica del motor y de la carga.

Observando la ecuación (7b), se llega a la conclusión de que la inercia mecánica puede ser representada por un condensador de capacidad apropiada, conectado en paralela a  $R_D$ , y a los terminales de la malla.

Fig 2.4.3.5.- Circuito equivalente mecánico del inducido impreso.



Si el motor está marchando por inercia con sus terminales en circuito abierto, la resistencia de viscosidad mecánica  $R_D$ , debe descargar la energía almacenada en el condensador inercial.

Las pérdidas de potencia son calculadas, en forma análoga al cálculo de los componentes eléctricos, es decir :

Potencia = Velocidad angular x Torque

Potencia = (Velocidad angular)<sup>2</sup> / Impedancia mec.

Energía almacenada = (Velocidad ang.)<sup>2</sup> . J<sub>T</sub> / 2

## 2.5.- ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO EN VACIO.

Bajo las condiciones de operación sin carga, se determinarán: la corriente de arranque, el torque de fricción, las curvas torque resistente vs. velocidad angular, corriente vs. velocidad angular y tensión vs. velocidad angular.

### 2.5.1.- Corriente de Arranque (I<sub>o</sub>).

Se midió la corriente de arranque con un amperímetro, el valor obtenido fue de 0.24 amperios.

### 2.5.2.- Torque de Fricción (T<sub>F</sub>).

La corriente de arranque es proporcional al Torque de fricción. La constante de proporcionalidad está dado por K<sub>t</sub>, por lo que se tiene que:

$$T_F = K_t \cdot I_o \qquad I_o = T_F / K_t$$

Reemplazando valores resulta:

$$T_F = 42 \text{ New.cm/amp.} \times 0.24 \text{ amperios}$$

$$T_F = 10 \text{ New.cm.}$$

### 2.5.3.- Relación Torque Resistente vs Velocidad Angular.

Según la ecuación (6):

$$T_R = T_D + T_F$$

Donde:  $T_F = 10 \text{ New. cm}$

$$T_D = K_d \cdot W$$

$$K_d = 0.033 \text{ New.cm/RPM}$$

Por lo tanto:

$$T_R = 0.033 w + 10 \dots\dots\dots (8)$$

La relación característica torque resistente-velocidad, de acuerdo a la ecuación (8) es una recta que se gráfica en la figura 2.5.3.. Se observará además que  $T_R$  es función directa de la velocidad y que los valores de  $T_F$  y  $T_D$  son pequeños, por lo que muchas veces éste valor  $T_R$  es despreciable.

### 2.5.4.- Relación Corriente vs. Velocidad Angular.

De la ecuación (7) se tiene que :

$$T = T_D + T_F \quad \text{ó} \quad K_t \cdot I = K_d \cdot W + T_F$$

Luego:

$$I = \frac{K_d \cdot W}{K_t} + \frac{T_F}{K_t} \dots\dots\dots (9)$$

Donde :

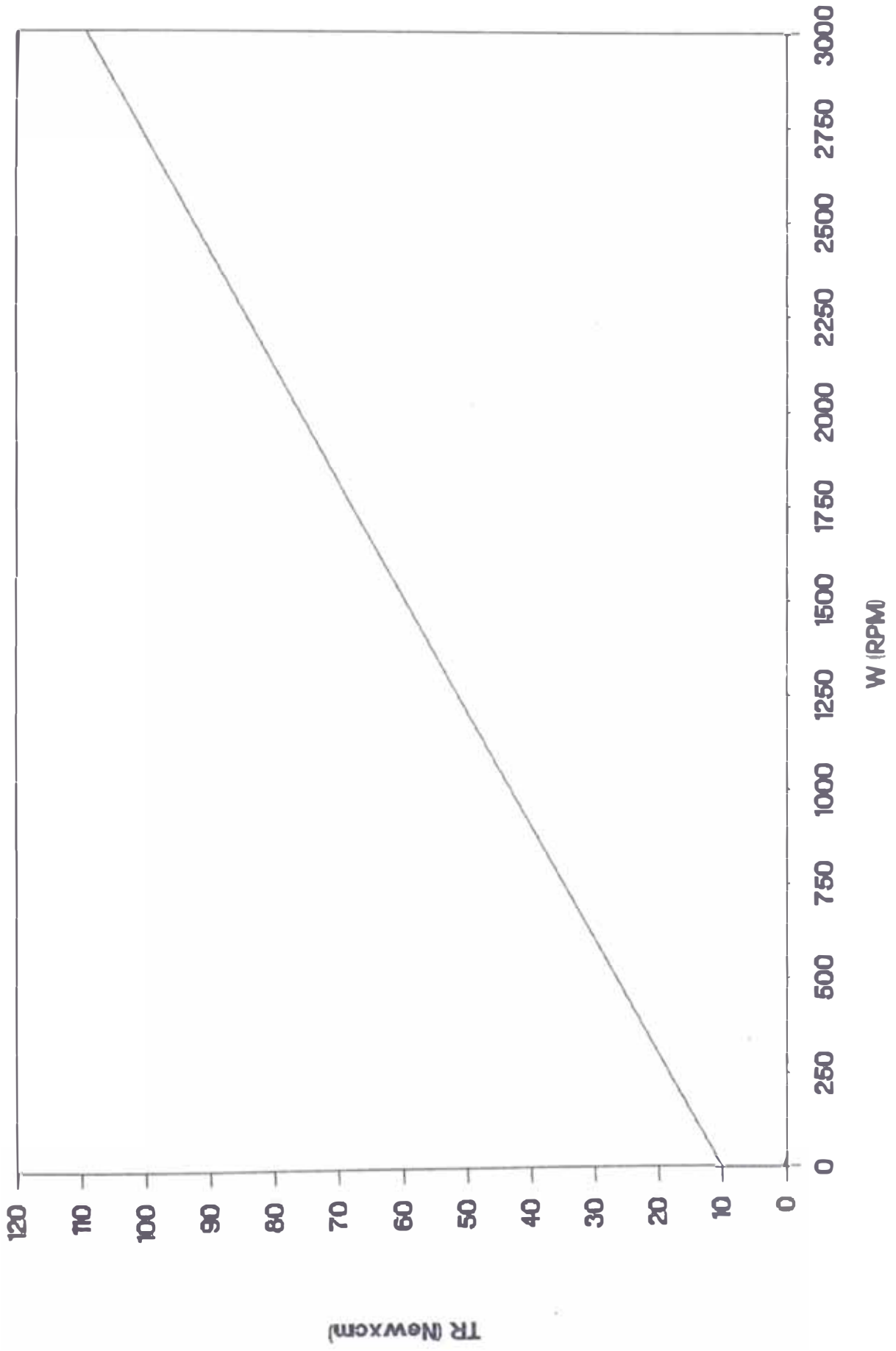
$$K_d = 0.033 \text{ New.cm./RPM.}$$

$$K_t = 42 \text{ New.cm./amp.}$$

$$T_F = 10 \text{ New.cm.}$$

# GRAFICO TORQUE RES. vs. VELOC. ANGULAR

FIG 2.5.3.





Reemplazando estos valores en la ecuación (9):

$$I = 7.5874 \times 10^{-4}W + 0.24 \quad \dots\dots(9a)$$

La ecuación (9a) es la expresión característica de una recta, cuya representación gráfica se muestra en la figura 2.5.4.. Se observa que la corriente en el inducido es proporcional a la velocidad angular.

#### 2.5.5.- Relación Corriente vs. Torque Resistente.

$$T_R = K_t \cdot I \quad \dots\dots(10) \quad T_R = 42 \cdot I \quad \dots\dots(10a)$$

En la figura 2.5.5 se representa la ecuación (10a)

#### 2.5.6.- Relación Tensión vs. Velocidad Angular.

Despejando la magnitud I de la ecuación (4) y remplazándola en la ecuación (9):

$$\frac{E - K_e \cdot W}{R} = \frac{K_d}{K_t} W + \frac{T_F}{K_t}$$

$$\frac{E}{R} = \left( \frac{K_e}{R} + \frac{K_d}{K_t} \right) W + \frac{T_F}{K_t}$$

$$E = \left( \frac{K_e \cdot K_t + R \cdot K_d}{K_t} \right) W + \frac{R}{K_t} T_F \quad \dots\dots(11)$$

Donde:

$$K_t = 42 \text{ New.cm./amp.}$$

$$R = 0.28 \text{ ohmios.}$$

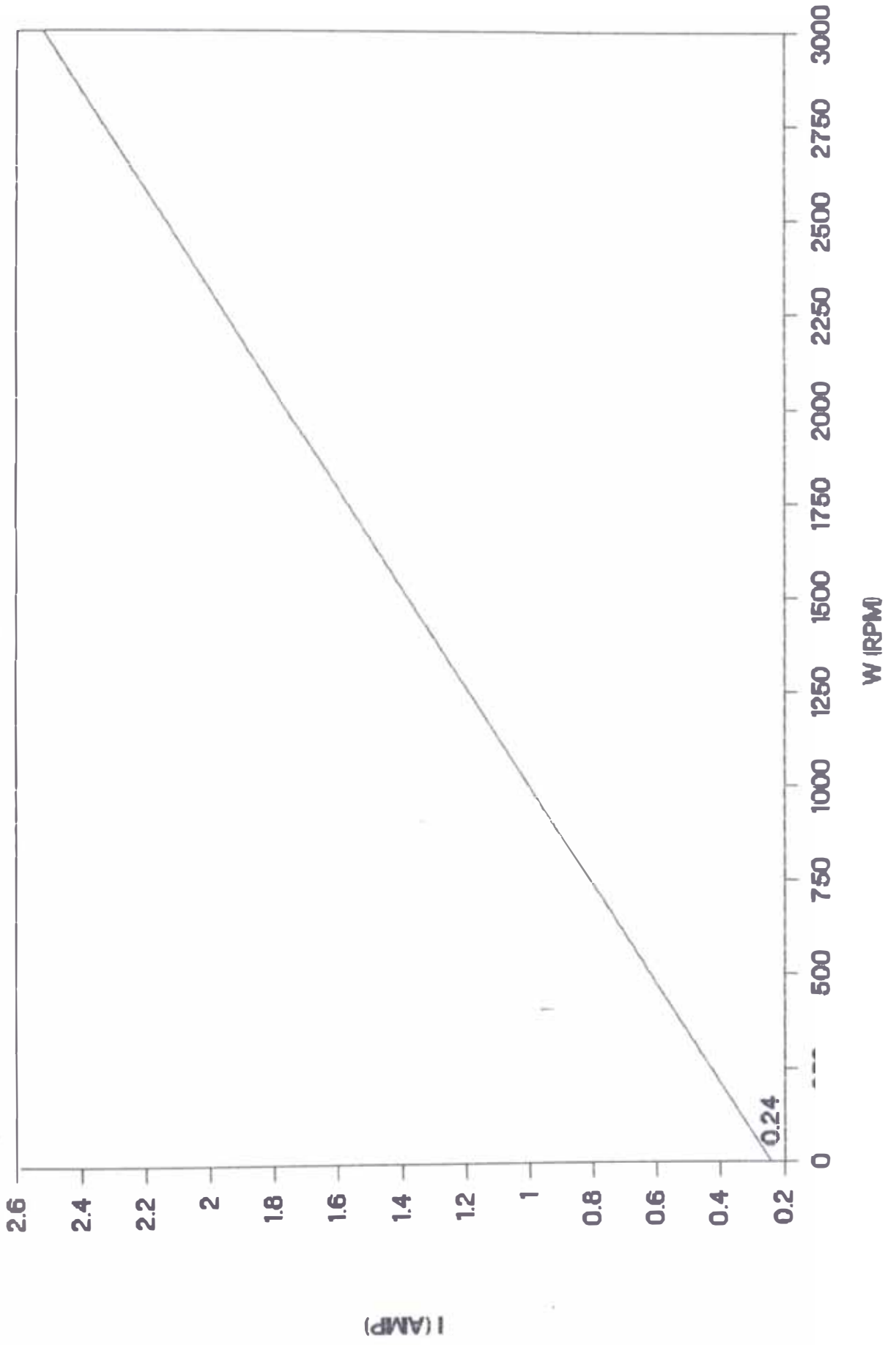
$$K_e = 0.044 \text{ volt./RPM.}$$

$$T_F = 10 \text{ New.cm.}$$

$$K_d = 0.033 \text{ New.cm./RPM.}$$

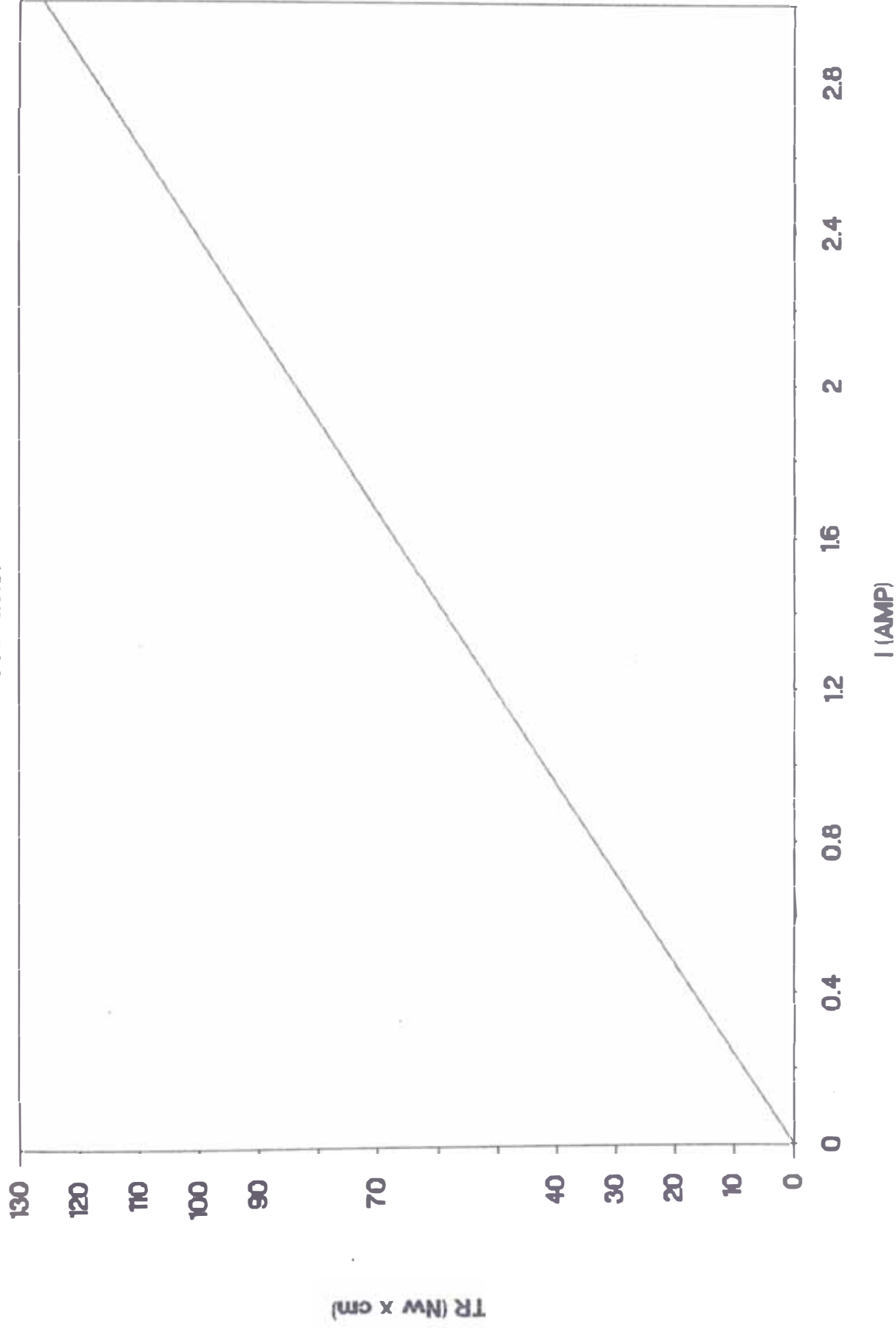
# GRAFICO CORRIENTE vs. VELOC. ANGULAR

FIG 2.5.4.



# GRAFICO TORQUE RESIST. v8. CORRIENTE

FIG 2.5.5.



Reemplazando estos valores en la ecuación (11),  
se tiene:

$$E = 0.044 W + 0.067 \dots\dots\dots(11a)$$

La ecuación (11a) es la expresión matemática de una recta, la cual se muestra graficada en la figura 2.5.6. Se observa que la tensión de suministro E, es función directa a la velocidad angular.

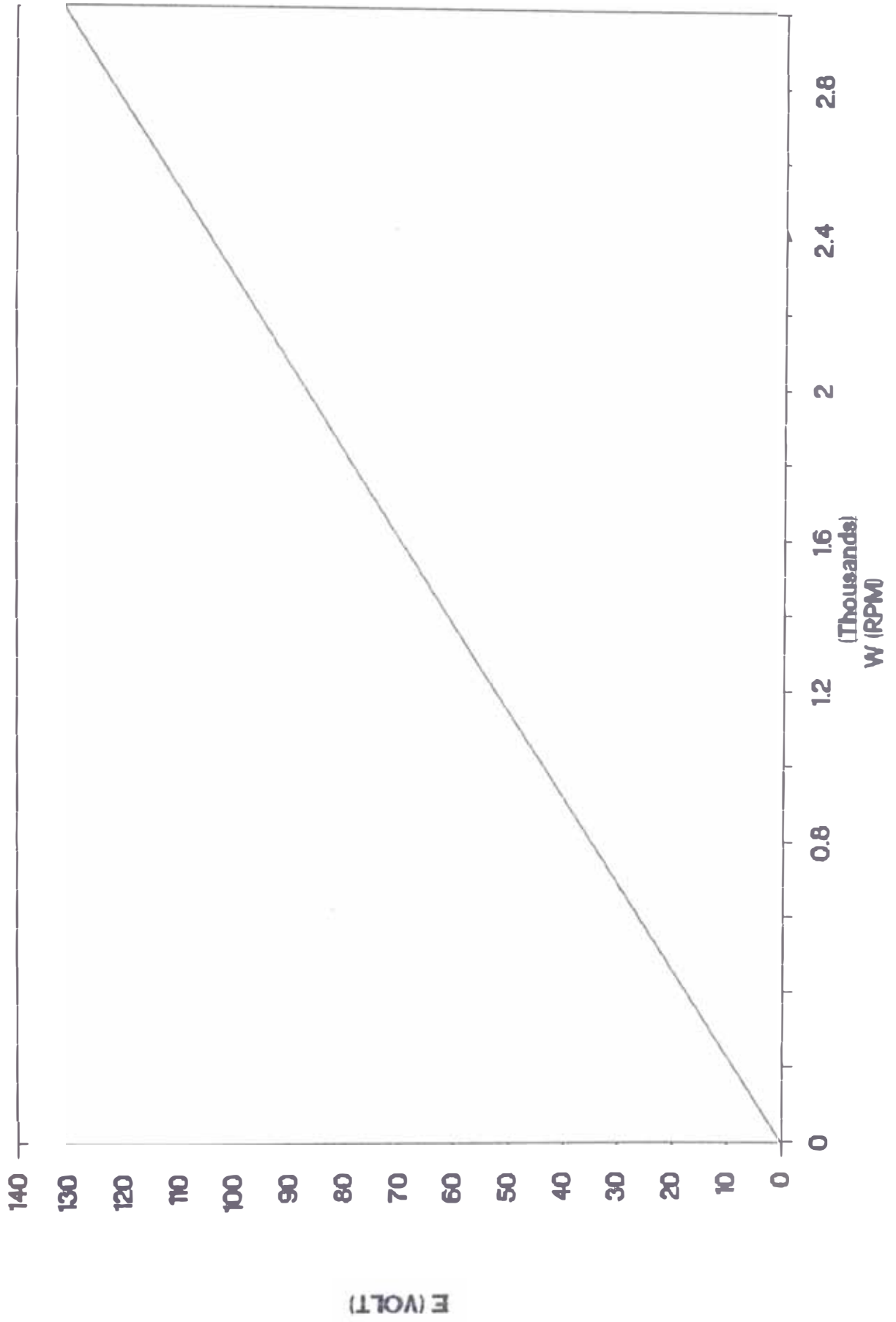
La tabla 2.5, muestra las magnitudes de  $T_R$ , I y E obtenidos de remplazar los valores de velocidad angular de 3000, 2000, 1000 y 500 RPM, en las ecuaciones (8),(9a) y (11a), respectivamente.

TABLA 2.5.- Valores de  $T_R$ , I y E en función de W, trabajando el motor en vacío.

W(RPM)	$T_R$ (New xcm)	I(Amp)	E (Voltios)
3000	109	2.52	132
2000	76	1.76	88
1000	43	1.00	44
500	26.5	0,62	22
0	10	0.24	0.067

# GRAFICO TENSION vs. VELOC. ANGULAR

FIG. 2.5.6.



## 2.6.- ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO EN REGIMEN ESTACIONARIO.

### 2.6.1.- Curva límite del motor.

Esta curva incluye las condiciones límite dentro de las cuales, el motor puede funcionar por tiempo indefinido en forma continua sin peligro de recalentamiento.

La curva límite, referida a una temperatura ambiente de 40 °C, permite determinar la magnitud del torque máximo al que puede ser sometido el motor, en funcionamiento continuo, o bien los valores máximos de velocidad admitidos para un determinado valor de torque.

La curva límite del motor es obtenida en forma experimental, por los valores de torque en el eje y la velocidad angular, referidos a una temperatura de 40 °C. En la siguiente tabla se muestran los puntos de trabajo obtenidos en forma experimental.

Tabla 2.6.1.- Puntos de trabajo obtenidos en forma experimental a una temperatura de 40 °C

PTO	A	B	C	D	E
(R.P.M)	3000	2000	1000	500	0
$T_L$ (New.cm)	960	1120	1170	1180	1190

La figura 2.6.1. representa la Curva Límite del motor.

### 2.6.2.- Relación Corriente versus Torque en el eje a RPM nominal.

En la ecuación (7) se tiene que :

$$T = T_F + T_D + T_L$$

$$K_t \cdot I = K_d \cdot W + T_F + T_L$$

$$I = \frac{T_L + T_F + K_d \cdot W}{K_t}$$

$$I = \frac{1}{K_t} T_L + \frac{T_F + K_d \cdot W}{K_t} \dots\dots(12)$$

Donde

$$K_t = 42 \text{ New.cm./amp.}$$

$$K_d = 0.033 \text{ New.cm./RPM.}$$

$$T_F = 10 \text{ New.cm.} \quad W = 3000 \text{ RPM.}$$

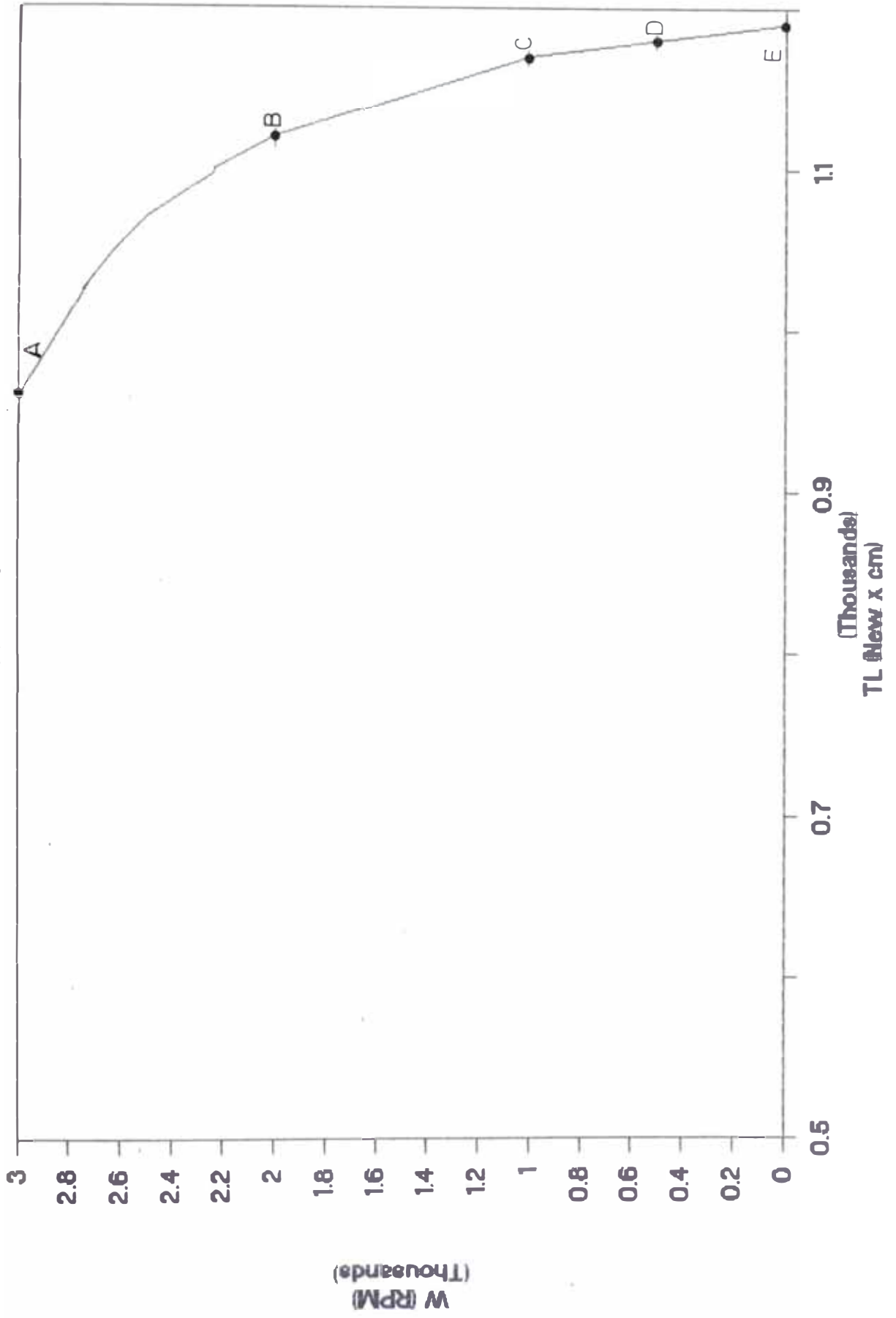
Reemplazando éstos valores en la ecuación (12), se tiene:

$$I = 0.0238 T_L + 2.595 \dots\dots\dots(12a)$$

La ecuación (12a), que relaciona la corriente con el torque en el eje a condiciones nominales, es una recta, la cual se gráfica en la figura 2.6.2.. Por lo tanto la corriente es proporcional al torque en el eje.

# CURVA LIMITE DEL MOTOR

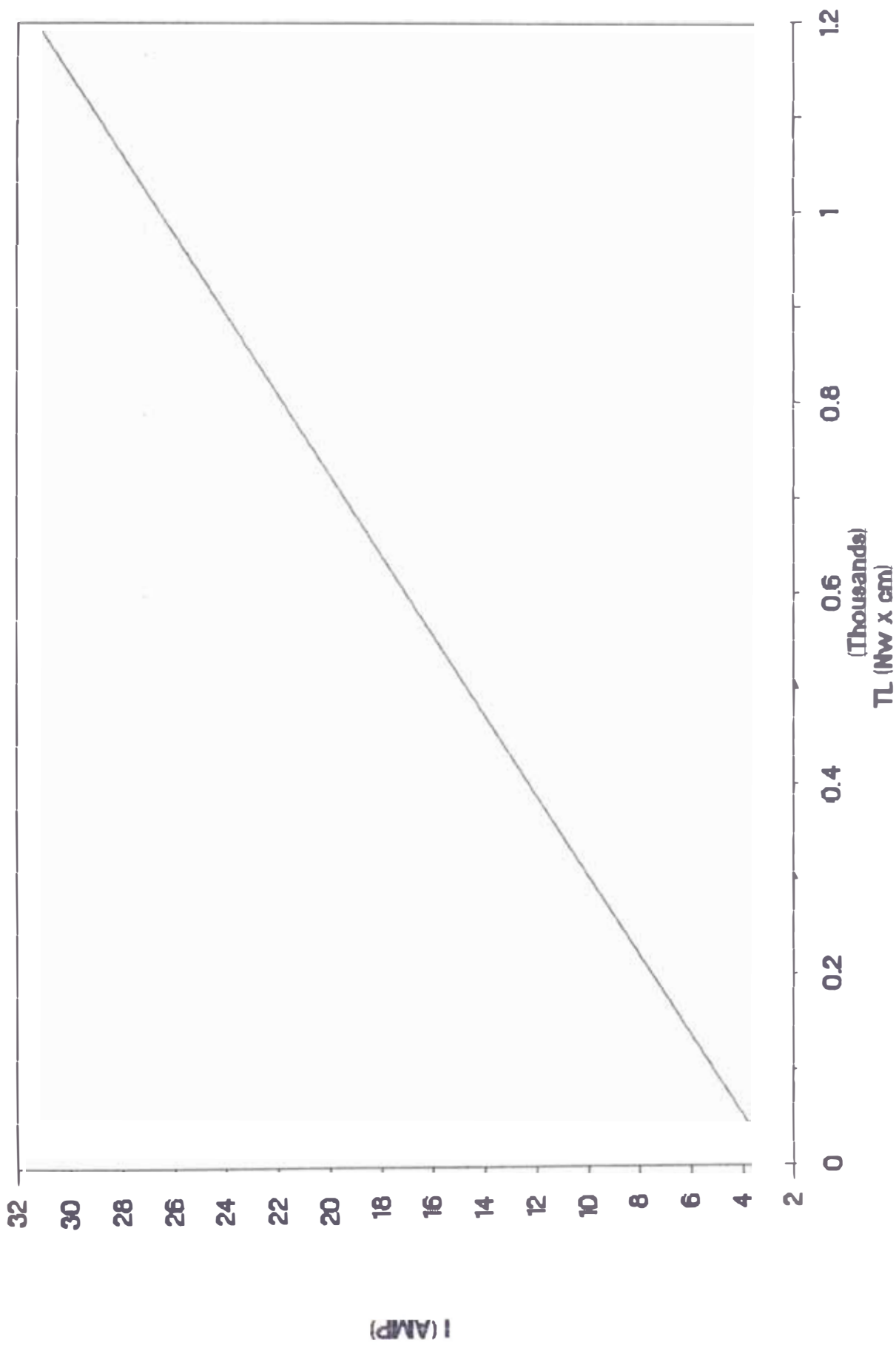
FIG. 2.61





# GRAFICO CORRIENTE vs. TORQUE (3000 RPM)

FIG. 26.2.



En la siguiente tabla se muestran los valores de corriente obtenidos al reemplazar los valores de  $W$  y  $T_L$  de la tabla 2.6.1, en la ecuación (12a).

Tabla 2.6.2.- Intensidades de Corrientes Obtenidos de la ecuación (12a)

PTO	A	B	C	D	
I (AMP)	25.44	28.47	28.88	28.67	28.57

### 2.6.3.- Relación de Velocidad Angular versus Torque a tensiones constantes.

Despejando la magnitud  $I$  de la ecuación (4), y rempazandola en la ecuación (9), se obtiene:

$$\frac{E - K_e.W}{R} = \frac{T_L + K_d.W + T_F}{K_t}$$

$$\frac{K_e.W}{R} - \frac{K_d.W}{K_t} = \frac{T_L}{K_t} - \frac{E}{R} + \frac{T_F}{K_t}$$

$$\frac{K_e.K_t.W + R.K_d.W}{R.K_t} = \frac{E.K_t - T_F.R - R.T_L}{R.K_t}$$

$$W(K_e.K_t + R.K_d) = E.K_t - R.T_F - R.T_L$$

$$W = \frac{E.K_t - T_F.R}{K_e.K_t + R.K_d} - \frac{R}{K_e.K_t + R.K_d} T_L \dots\dots(13)$$

Donde:

$$K_t = 42 \text{ New.cm./amp.}$$

$$K_d = 0.033 \text{ New.cm./RPM.}$$

$$K_e = 0.044 \text{ voltios/RPM.}$$

$$R = 0.28 \text{ ohmios} \quad T_F = 10 \text{ New.cm.}$$

Al reemplazar éstos valores en la ecuación (13), resulta:

$$W = \frac{42 E - 2.8}{1.85724} - 0.15 T_L \quad \dots\dots(13a)$$

Puede escribirse la ecuación (13a), como:

$$E = \frac{1.85724 W + 0.28 T_L + 2.8}{42} \quad \dots\dots\dots(13b)$$

En la ecuación (13a), se observa que la relación velocidad-torque estará en función de la tensión de suministro E, por lo que se tomará uno o más valores de E, para representar la curva o curvas de velocidad angular (W) versus Torque en el eje ( $T_L$ ).

Los 5 puntos seleccionados de la curva límite del motor, son reemplazados en la ecuación (13b) para obtener las tensiones de suministro, las cuales son mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 2.6.3.1 Valores de Tensión de Suministro.

PUNTO	A	B	C	D	E
<b>E</b> (Volt.)	139	96	52	30	8

Reemplazando éstos valores en la ecuación (13b) se tendría las 5 ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned}
 W - 3141.86 & \quad 0.15 T_L \quad (\text{para } E = 139 \text{ v.}) \quad \dots(13 \text{ c}) \\
 W = 2169.45 & \quad 0.15 T_L \quad (\text{para } E = 96 \text{ v.}) \quad \dots(13 \text{ d}) \\
 W = 1174.43 & \quad 0.15 T_L \quad (\text{para } E = 52 \text{ v.}) \quad \dots(13 \text{ e}) \\
 W = 676.92 & \quad 0.15 T_L \quad (\text{para } E = 30 \text{ v.}) \quad \dots(13 \text{ f}) \\
 W = 179.40 & \quad 0.15 T_L \quad (\text{para } E = 8 \text{ v.}) \quad \dots(13 \text{ g})
 \end{aligned}$$

Estas ecuaciones son presentadas en la Fig. 2.6.3, desde luego la pendiente de éstas 5 rectas es la inversa de la constante  $K_d$ .

En la Tabla 2.6.3.2. y 2.6.3.3, se muestran los puntos de intersección con la abcisa  $W$  y la ordenada  $T_L$ .

Tabla 2.6.3.2. Valores de Torque a Rotor  
Bloqueado ( $W = 0$ )

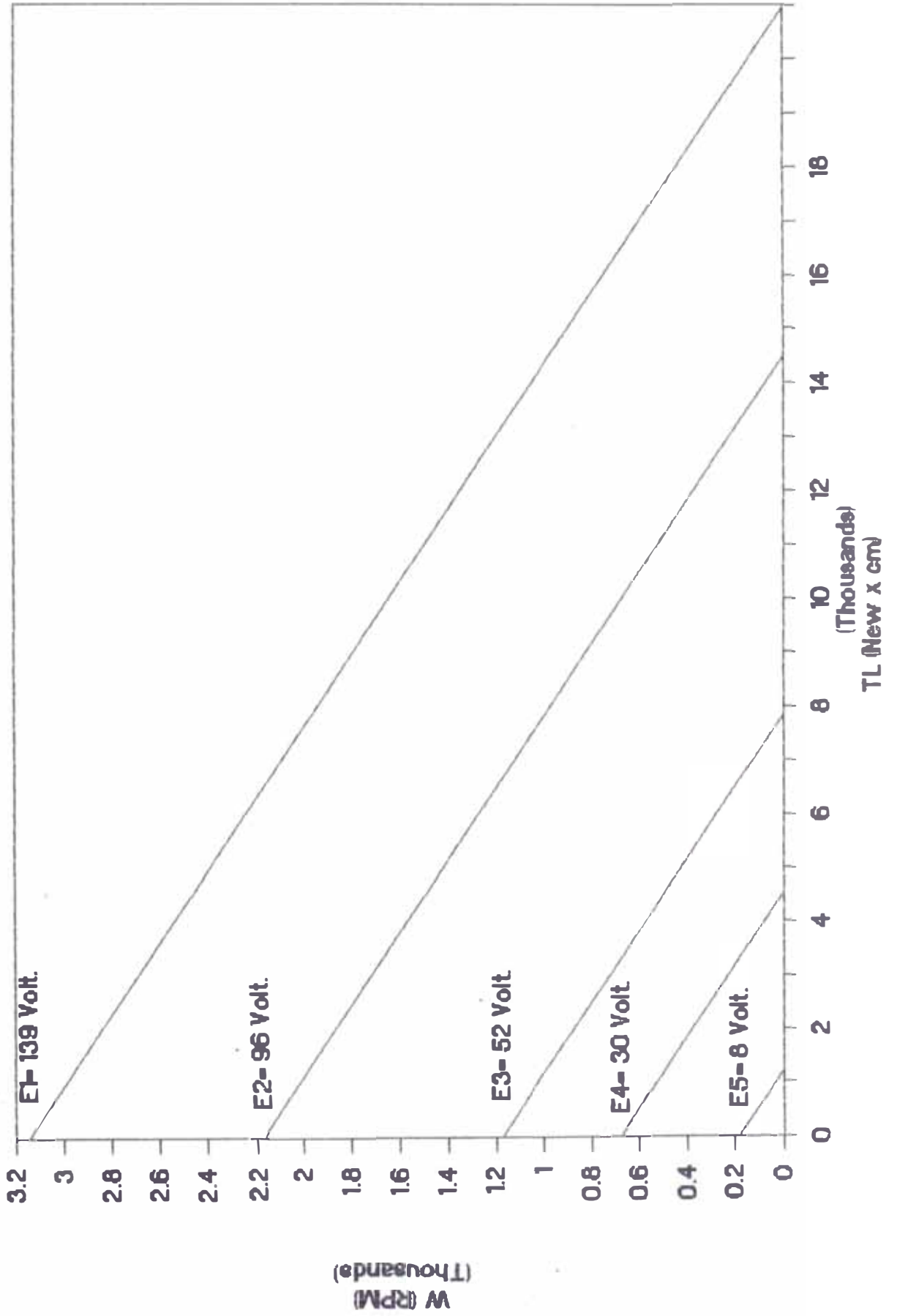
PUNTO	A	B	C	D	E
<b>E</b> (Volt.)	139	96	52	30	8
<b><math>T_{LR.B.}</math></b> (New.cm)	20,945	14,463	7,828.5	4,512.8	1,196

Tabla 2.6.3.3. Valores de  $W$  a  $T_L = 0$ .

PUNTO	A	B	C	D	E
(Volt.)	139	96	52	30	8
<b>W</b> (RPM)	3141.87	2169.45	1174.40	676.9	179.4

# GRAFICO VELOCIDAD vs. TORQUE (E = CTE.)

FIG. 2.63.



#### **2.6.4.- Diagrama característico del motor.**

Este diagrama resulta de la combinación del diagrama 2.6.2 y del diagrama 2.6.3.

En éste diagrama, conociendo el valor real de dos de los cuatro datos característicos del motor (tensión  $E$ , corriente  $I$ , torque  $T$  y velocidad angular  $W$ ), se puede obtener inmediatamente los valores reales de los otros dos.

En la figura 2.6.4 se representa el diagrama característico del motor. Se debe hacer notar en ésta curva que la recta de corriente corresponde a una RPM nominal, es decir a 3000 RPM. Las otras rectas de corriente a diferentes velocidades se encuentra graficadas en la fig. 2.6.5

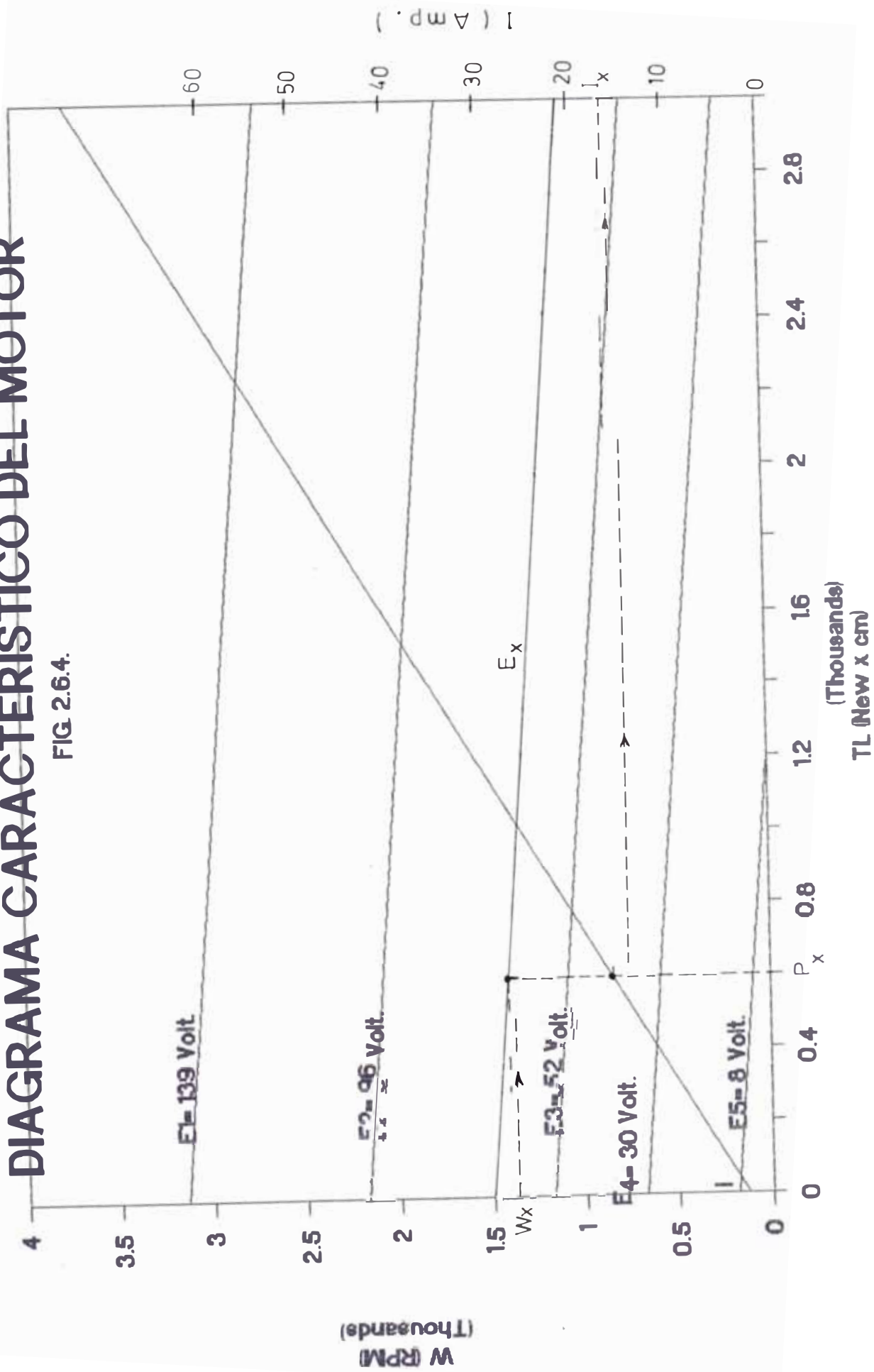
En la figura 2.6.4. por ejemplo, se ha tomado el punto "x" ( torque  $T_x$  y velocidad  $W_x$ ), al que corresponden los valores de corriente  $I_x$  y de tensión  $V_x$ .

#### **2.6.5.- Diagrama característico del límite del trabajo del motor.**

En la fig 2.6.5 se ha superpuesto el diagrama 2.6.1 en el diagrama 2.6.4, de modo que tomando un par de puntos de torque y velocidad angular; sobre la curva límite del trabajo del motor a 40 °C, se encuentren los

# DIAGRAMA CARACTERISTICO DEL MOTOR

FIG 2.6.4.



valores de tensión de suministro E, e intensidad de corriente I. En la figura por ejemplo, se ha tomado el punto C cuyas coordenadas son : W=1000 RPM y T=1170 New-cm, correspondiéndole a este punto una tensión de suministro E = 52 voltios y, una intensidad de corriente I = 28.88 AMP.

En la tabla 2.6.5. se han resumido los valores de corriente I y tensión de suministro E, obtenidos de la figura 2.6.5. para los puntos A,B,C,D y E, cuyos valores de velocidad angular y torque  $T_L$  son conocidos.

También, en ésta tabla se muestran los valores correspondientes a Potencia Eléctrica de entrada ( $P_E$ ), perdidas de potencia ( $\delta P$ ), Potencia mecánica de salida ( $P_M$ ) y Eficiencia ( $n$ ), los cuales han sido obtenidos con la ayuda de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 P_E &= E \cdot I \quad (\text{watt}) \\
 &= 1.047 \times 10^{-3} T_L \cdot W \quad (\text{watt}) \\
 \delta P &= P_E - P_M \quad (\text{watt}) \\
 n &= P_M / P_E \cdot 100 \quad (\%)
 \end{aligned}$$



# DIAGR. DEL LIMITE DE TRABAJO DEL MOTOR

FIG 2.6.5.

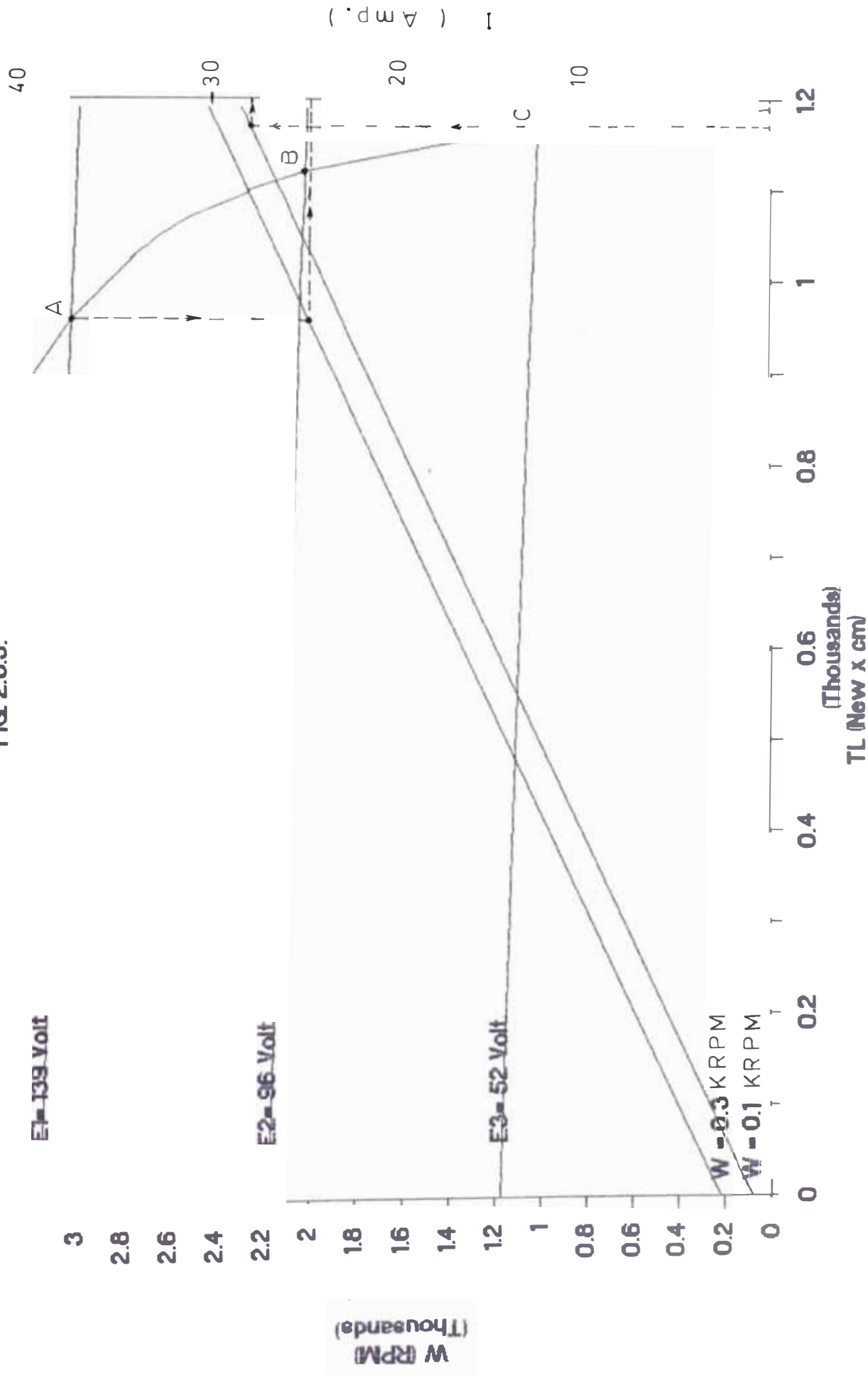


Tabla 2.6.5. Valores Obtenidos en el motor de inducido impreso en régimen estacionario.

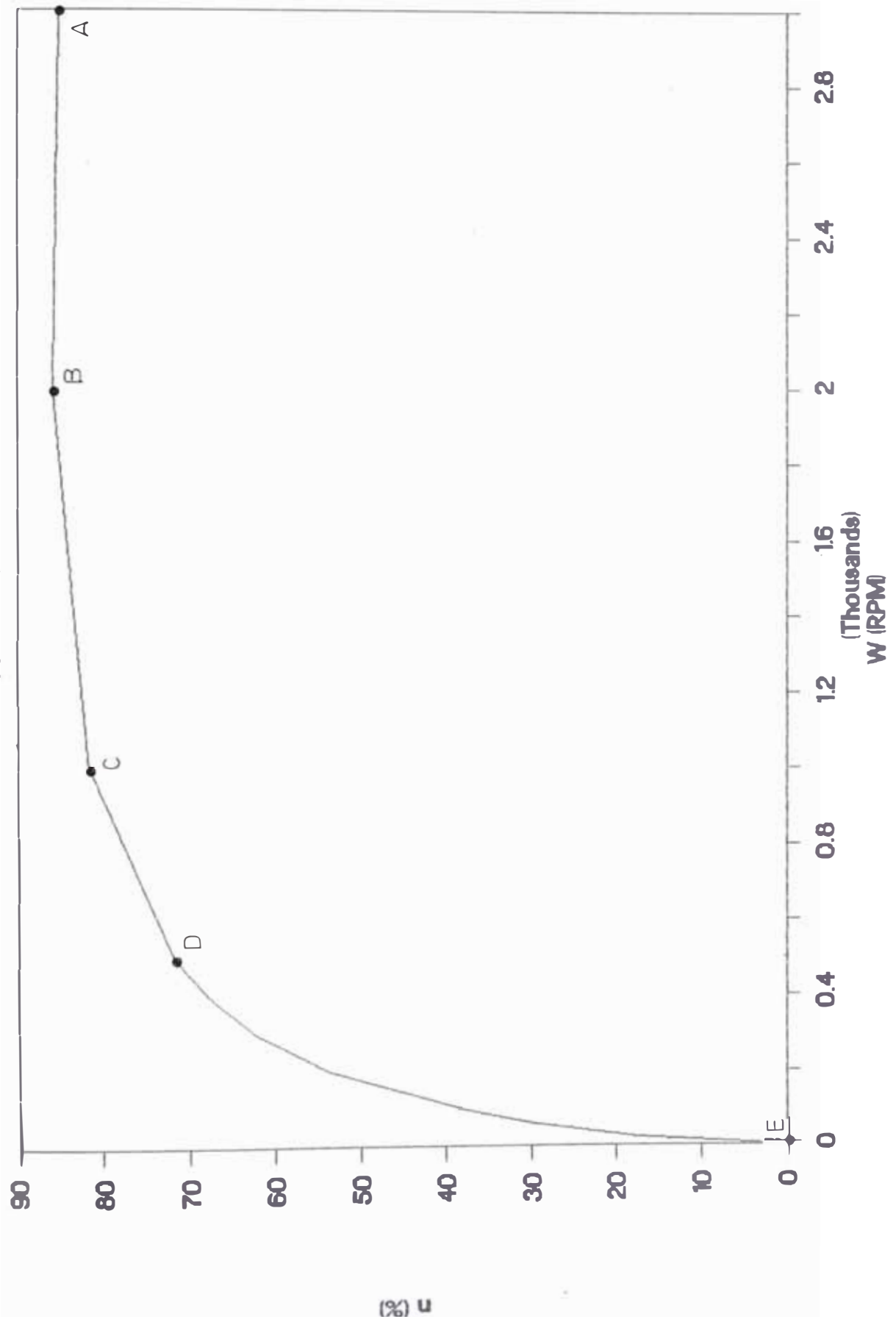
MAGNITUD	A	B	C	D	E
W (RPM)	3000	2000	1000	500	
T <sub>L</sub> (New.cm)	960	1120	1170	1180	1190
I (Amp.)	25.44	28.47	28.88	28.67	28.57
E (vol.)	139	96	52	30	
P <sub>E</sub> (watt)	3536	2733	1501	860.1	228.6
P <sub>M</sub> (watt)	3015	2345	1225	617.8	
ΔP (watt)	520.8	387.8	276.7	242.4	228.6
n (%)	85.27	85.81	81.57	71.8	0

#### 2.6.6.- Curva de la eficiencia versus velocidad angular.

De los valores obtenidos de la tabla 2.6.5, se puede mostrar a través de la curva de la figura 2.6.6, la relación entre la eficiencia y la velocidad angular. En ésta curva, se observa que la máxima eficiencia del motor se produce, cuando este funciona a velocidades de giro comprendidas entre 1800 a 3000 RPM.

# CURVA EFICIENCIA vs. VELOC. ANGULAR

FIG. 2.6.6.



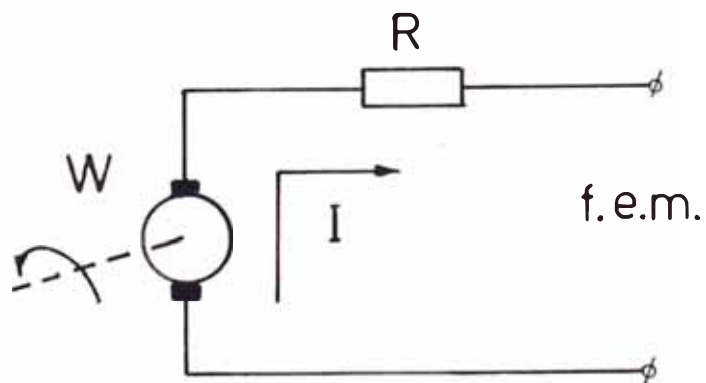
## 2.7.- Funcionamiento del Motor de Inducido Impreso como Generador de Corriente Continua.

### 2.7.1.- Premisa.

Haciendo funcionar el motor de inducido impreso como generador de corriente continua, es posible verificar la relación existente entre la fuerza electromotriz f.e.m y la velocidad angular  $W$ .

En la siguiente figura, se muestra el esquema del motor de inducido impreso funcionando como un generador de corriente continua.

Fig 2.7.1.- Esquema del motor de inducido Impreso como generador de corriente continua.



### 2.7.2. Diagrama f.e.m. versus velocidad angular.

En la fig 2.7.2. se muestra como evoluciona la f.e.m. con la velocidad angular. Este diagrama corresponde a una línea recta, cuya pendiente constituye la cte.  $K_e$  de la f.e.m., la cual ha sido obtenida de la ecuación siguiente:

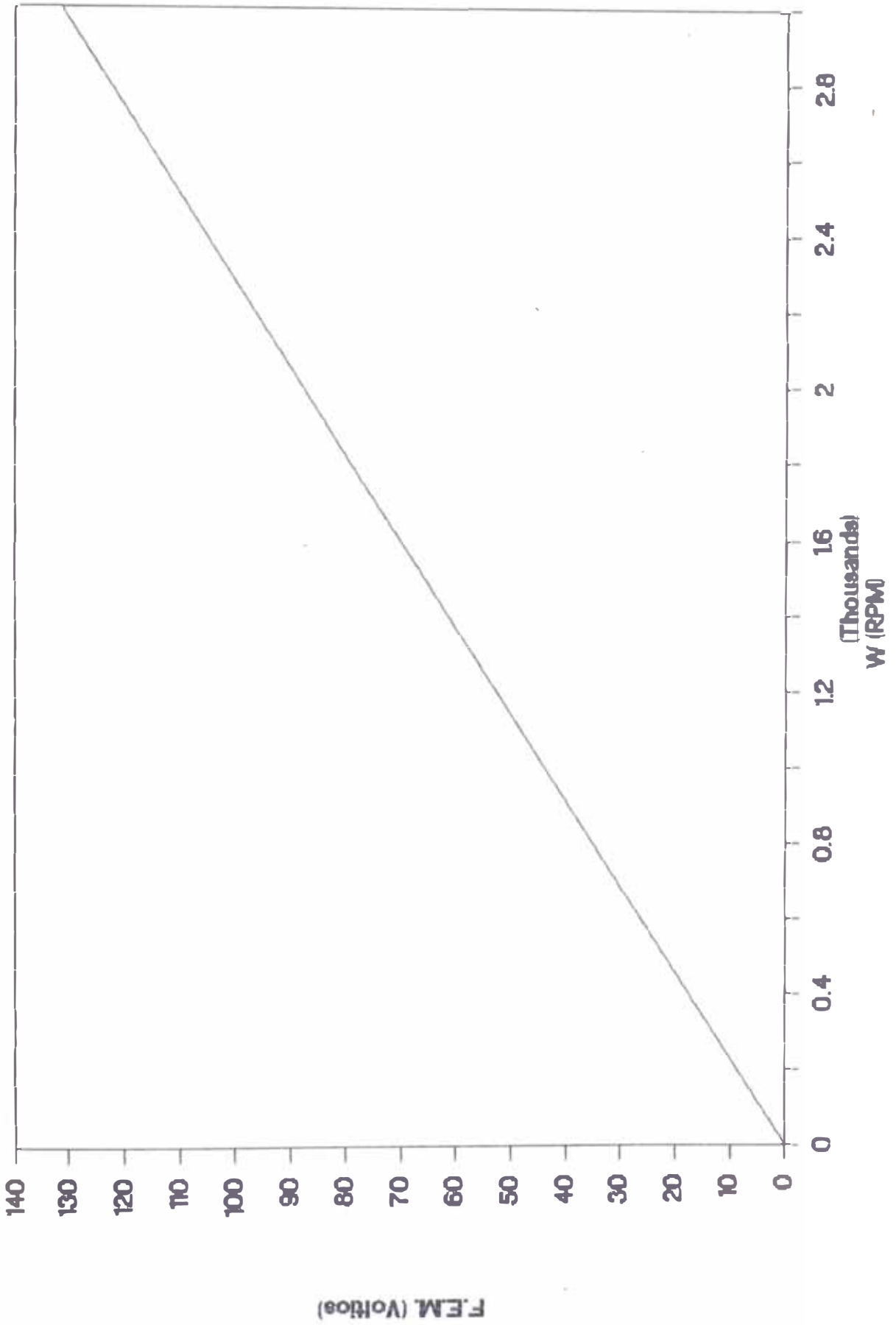
$$\text{f.e.m.} = K_e \cdot W$$

Donde  $K_e = 0.044$  volt./RPM.

También, en el citado gráfico se observa que para una velocidad angular de 3000 RPM, le corresponde una fuerza electromotriz de 132 VAC.

# RELACION F.E.M. vs. VELOCIDAD ANGULAR

FIG 2.7.2



## 2.8.- ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO.

La ecuación (2) se puede escribir de la siguiente forma:

$$T = J_t \cdot dW/dt + T_D + T_F + T_L$$

Se sabe que  $T_F$  es pequeño y que  $T_D$  es igual a  $K_d \cdot W$  por lo que ésta ecuación se reduce a:

$$T = J_t \cdot dW/dt + K_d \cdot W + T_L \dots\dots\dots(14)$$

Reemplazando la ecuación (3) en la ecuación (14) tenemos:

$$K_t \cdot I = J_t \cdot dw/dt + K_d \cdot W + T_L \dots\dots\dots(15)$$

Despejando I de la ecuación (4), y reemplazandola en la ecuación (15) se obtiene:

$$K_t \left( \frac{E - K_a \cdot W}{R} \right) = J_t \cdot dW/dt + K_d \cdot W + T_L$$

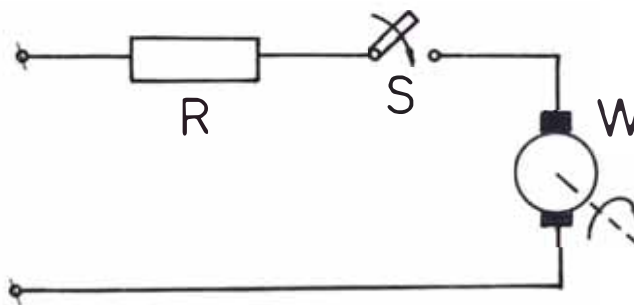
$$E \cdot K_t - K_a \cdot K_t \cdot W = R \cdot J_t \cdot dW/dt + R \cdot K_d \cdot W + R \cdot T_L$$

$$R \cdot J_t \cdot dW/dt + (R \cdot K_d + k_a \cdot K_t)W = E \cdot K_t - R \cdot T_L \dots\dots(16)$$

### 2.8.1.- En el arranque.

Las condiciones iniciales en el proceso de arranque serán:  $W = 0$  en  $t=0^+$ , es decir  $W(0^+) = 0$ . En la siguiente figura se muestra el esquema equivalente en el instante del arranque.

Fig. 2.8.1. Esquema equivalente en el proceso de arranque.



EL switch "S" inicialmente está abierto. En el tiempo  $t=0^+$ , el switch "S" se cierra.

Aplicando transformadas de Laplace en la ecuación (16) se obtiene:

$$S.W(s) - W(0^+) + \left( \frac{R.K_d + K_e.K_t}{R.J_t} \right) W(s) = \frac{1}{s} \left( \frac{E.K_t - R.T_L}{R.J_t} \right)$$

$$W(s) = \frac{E.K_t - R.T_L}{R.J_t} \cdot \frac{1}{s \left( s + \frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t} \right)} \quad \dots (17)$$

El segundo miembro de la ecuación (17), puede ser expresado en función de coeficientes con el propósito de aplicar la Transformada de Laplace inversa.

$$\frac{1}{s \left( s + \frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t} \right)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s + \frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t}} \quad \dots (18)$$

$$\frac{1}{s \left( s + \frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t} \right)} = \frac{A \left( s + \frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t} \right) + B.s}{s \left( s + \frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t} \right)}$$



$$1 = (A + B)s + \frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t} \cdot A$$

De aquí se deduce que  $A+B = 0$ , por lo que  $A=-B$  y:

$$\frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t} \cdot A = 1$$

Donde:

$$A = \frac{R.J_t}{K_d.R + K_e.K_t} \quad B = -\frac{R.J_t}{K_d.R + K_e.K_t}$$

Reemplazando los valores de A y B en la ecuación (18) resulta:

$$\frac{1}{s \left( s + \frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t} \right)} = \frac{R.J_t}{K_d.R + K_e.K_t} \cdot \frac{1}{s}$$

$$\frac{R.J_t}{(K_d.R + K_e.K_t) \cdot \left( s + \frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t} \right)}$$

Factorizando términos comunes ésta expresión podría expresarse como:

$$\frac{1}{s \left( s + \frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t} \right)} = \frac{R.J_t}{K_d.R + K_e.K_t} \left( \frac{1}{s} \right)$$

$$\frac{1}{s + \frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t}} \dots (19)$$

Reemplazando la ecuación (19) en la ecuación (18):

$$W(s) = \frac{E.K_t - R.T_L}{K_d.R + K_e.K_t} \left( \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t}} \right) \dots (20)$$

Aplicando la transformada de Laplace inversa a ésta última ecuación, se obtiene:

$$W(t) = \frac{E.K_t - R.T_L}{K_d.R + K_e.K_t} \left( 1 - e^{-\left(\frac{K_d.R + K_e.K_t}{R.J_t}\right)t} \right)$$

Esta ecuación puede ser expresada finalmente como:

$$W(t) = W_m \cdot \left( 1 - e^{-t/t_{mec}} \right) \dots (21)$$

Donde:

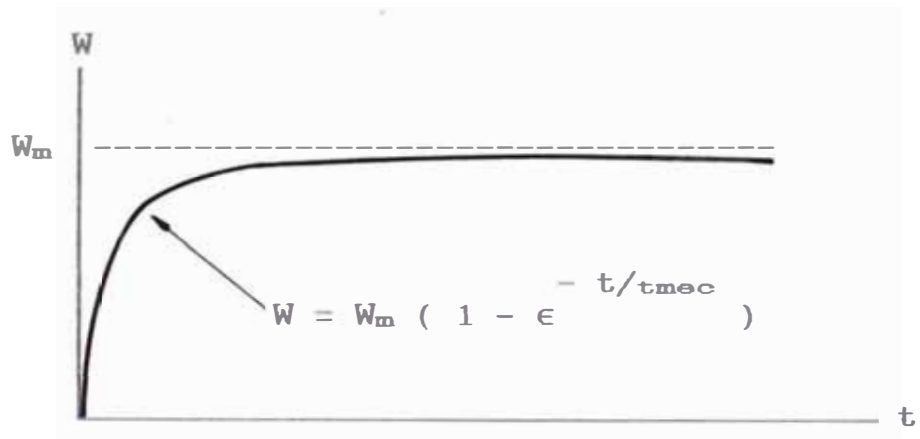
$$W_m = \frac{E.K_t - R.T_L}{K_d.R + K_e.K_t} \dots (22) \quad t_{mec} = \frac{R.J_t}{K_d.R + K_e.K_t} \dots (23)$$

Siendo:  $W_m$  , la velocidad en estado estacionario.

$t_{mec}$  , la constante de tiempo mecánica.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de la velocidad del motor durante el transitorio de arranque.

Fig. 2.8.2. Comportamiento del motor en el arranque.



Haciendo :  $W_m = 3000$  R.P.M. ,  $E = 139$  voltios ,  $t_m = 0.007$  seg. y reemplazando los valores de  $K_d$ ,  $K_e$ ,  $K_t$  y  $R$  en las ecuaciones (22) y (23) respectivamente se tiene:

$$T_L = 960 \text{ New.cm.} \quad J_T = 0.443 \text{ New.cm.sec}^2.$$

Como se conoce que  $J_A$  es igual a  $0.36$  New.cm.sec<sup>2</sup>, entonces el momento de inercia de la carga  $J_c$ , respecto al eje del motor de inducido impreso, es igual a  $0.083$  New.cm.sec<sup>2</sup>.

Para obtener la aceleración inicial  $a_o$ , derivamos la ecuación (21) obteniendo:

$$a_o = W_m \cdot ( e^{-t/t_{mec}} \cdot 1/t_{mec} )$$

Para el arranque se hace,  $t=0$  en ésta ecuación :

$$a_o = W_m / t_{mec} \dots\dots\dots(24)$$

Reemplazando valores en (24), se obtiene:

$$a_o = \frac{3000 \cdot 2 \cdot \pi}{60 \cdot 0.007}$$

$$a_o = 44,880 \text{ rad./seg}^2$$

El torque en el arranque ( $T_J$ ), fue definido en la ecuación (5) como:

$$T_J = T_I - T_L - T_R$$

Donde  $T_I$ , es el torque instantáneo desarrollado por el motor. Considerando la ecuación (4c) en la última ecuación, resulta:

$$T_J = \frac{W_{in} - W_{out}}{K_e \cdot K_t} - T_L - T_R$$

En el arranque:  $W_{in} = E/K_e$  ,  $W_{out} = 0$  , y  $T_L = 960 \text{ New.cm}$  , se obtiene:

$$T_J = E/R \cdot K_t - T_L - T_R \dots\dots\dots(25)$$

Reemplazando valores en la ecuación (25), se tendrá

$$T_J = \frac{139}{0.28} \cdot 42 - 960 - 10$$

$$T_J = 19,900 \text{ New.cm.}$$

La corriente de arranque  $I_{arr}$ , es igual al torque de arranque  $T_J$  entre la constante  $K_t$ .

Es decir :

$$I_{arr} = T_J / K_t.$$

Reemplazando valores se obtiene:

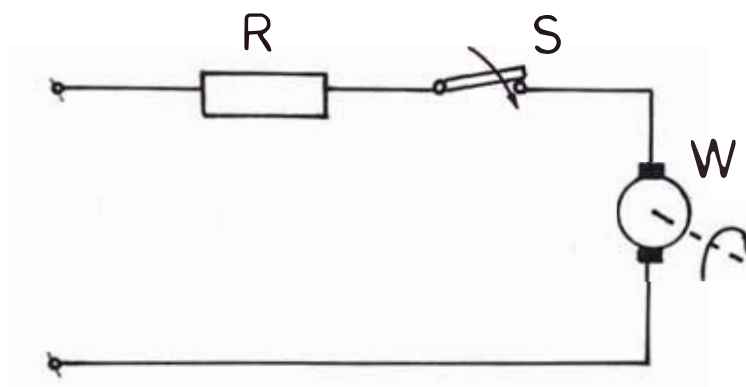
$$I_{arr} = 19,900 / 42$$

$$I_{arr} = 473.8 \text{ amperios.}$$

### 2.8.2.- En la parada.

En la siguiente figura se muestra el esquema eléctrico equivalente en la parada.

Fig. 2.8.2.1. Esquema eléctrico equivalente en la parada.



El switch "s" inicialmente se encuentra cerrado. El switch se abre para un tiempo  $t=0$ . Luego, en  $t=0^+$  se tiene:  $W(0^+) = W_m$  ,  $T_L = 0$  ,  $J_T = J_C$  ,  $I=0$ ,  $T_F=0$  y  $T=0$ ; por lo que la ecuación de movimiento se reduce a:

$$dW/dt + ( K_a/J_C \cdot W ) = 0$$

Aplicando la transformada de Laplace a ambos miembros de la ecuación se tiene:

$$s.W(s) - W(0^-) + (K_d/J_c \cdot W(s)) = 0$$

$$s.W(s) - W_m + (K_d/J_c \cdot W(s)) = 0$$

$$W(s) \cdot (s + K_d/J_c) = W_m$$

$$W(s) = \frac{W_m}{s + K_d/J_c} \dots\dots\dots(26)$$

Aplicando la transformada de Laplace en la ecuación (26) se logra:

$$W(t) = W_m \cdot e^{-(K_d/J_c) \cdot t}$$

$$W(t) = W_m \cdot e^{-t/t_{mecd}} \dots\dots\dots(27)$$

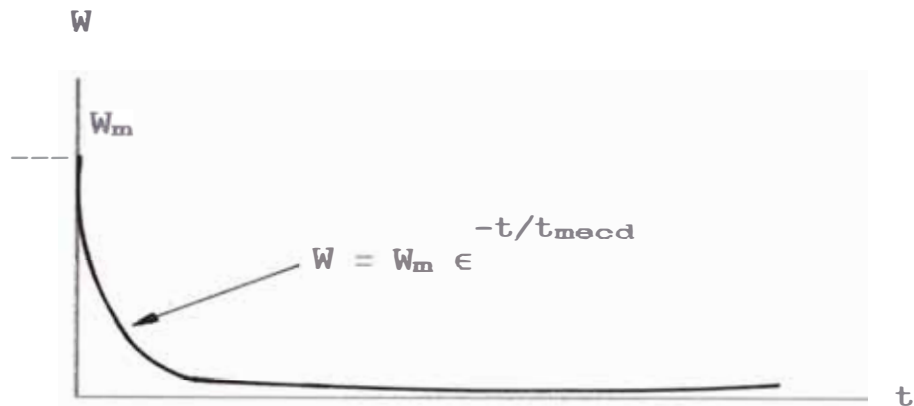
Donde  $t_{mecd} = J_c/K_d$ , representa la constante de tiempo mecánica en la desaceleración o parada. Luego:

$$t_{mecd} = \frac{0.08 \text{ New.cm.sec}^2}{0.033 \text{ New.cm/R.P.M.}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}$$

$$t_{mecd} = 0.2538 \text{ seg.}$$

En la siguiente figura se muestra el comportamiento del motor de inducido impreso en el transitorio de parada.

Fig. 2.8.2.2. Comportamiento del motor de inducido  
impreso en el transitorio de parada.



Derivando la ecuación (27), se obtiene la desaceleración inicial en el transitorio de parada, la cual se designará como  $a_d$ .

Siendo:

$$a_d = -K_a/J_c \cdot W_m$$

$$a_d = -\frac{0.033 \cdot 3000 \cdot 2 \cdot \pi}{60 \cdot 0.08} = -129.59$$

$$a_d = -129.59 \text{ rad./seg}^2$$

## 2.9.- ANALISIS DE ESTABILIDAD DURANTE LAS VARIACIONES DE CARGA Y TENSION.

El análisis consiste en evaluar el comportamiento del motor de inducido impreso ante fallas imprevistas, durante su operación normal, ocasionadas por las

variaciones en la tensión de suministro y por variaciones de carga, perturbando su funcionamiento en régimen estacionario.

Las magnitudes características del motor de inducido impreso ante citadas perturbaciones serán:

$$E = E_m + \delta E \quad \dots\dots(28) \quad I = I_m + \delta I \quad \dots\dots\dots(29)$$

$$W = W_m + \delta W \quad \dots\dots(30) \quad T_L = T_{Lm} + \delta T_L \quad \dots\dots(31)$$

Los subíndices "m" señalan las magnitudes en estado estacionario. Los  $\delta E$ ,  $\delta W$ ,  $\delta T_L$  y  $\delta I$  representan las perturbaciones en la tensión de suministro, velocidad, torque de carga y en la corriente respectivamente. Reemplazando las ecuaciones (28) al (31) en las ecuaciones (1) y (14) se tiene:

$$E_m + \delta E - R \cdot I_m + R \cdot \delta I + L \cdot \frac{d\delta I}{dt} + L \cdot \frac{d\delta I_m}{dt} + K_e \cdot W_m + K_e \cdot \delta W \quad \dots\dots\dots(32)$$

$$K_t \cdot I_m + K_t \cdot \delta I = J_T \cdot \frac{d\delta W}{dt} + J_T \cdot \frac{d\delta W_m}{dt} + K_d \cdot W_m + K_d \cdot \delta W + T_{Lm} + \delta T_L \quad \dots\dots\dots(33)$$

Como:  $E_m - R \cdot I_m + L \cdot \frac{d\delta I_m}{dt} + K_e \cdot W_m$  y

$$K_t \cdot I_m = J_T \cdot \frac{dW_m}{dt} + K_d \cdot W_m + T_{Lm}$$



Las ecuaciones (32) y (33) quedarían expresadas como:

$$\delta E = R \cdot \delta I + L \cdot \frac{d\delta I}{dt} + K_a \cdot \delta W \quad \dots\dots\dots(34)$$

$$K_t \cdot \delta I = J_T \cdot \frac{d\delta W}{dt} + K_d \cdot \delta W + \delta T_L \quad \dots\dots\dots(35)$$

Despejando  $\delta I$  de la ecuación (35), y reemplazándola en la ecuación (34):

$$\delta E = R \cdot \frac{J_T}{K_t} \cdot \frac{d\delta W}{dt} + R \cdot \frac{K_d}{K_t} \cdot \delta W + \frac{R}{K_t} \cdot \delta T_L + L \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{J_T}{K_t} \cdot \frac{d\delta W}{dt} + \frac{K_d}{K_t} \cdot \delta W + \frac{\delta T_L}{K_t} \right) + K_a \cdot \delta W \quad \dots(36)$$

Como el valor de la inductancia  $L$  está en el orden de los microhenrios, puede despreciarse y ordenarse la ecuación (36) de la siguiente forma:

$$\frac{\delta E \cdot K_t}{R \cdot J_T} - \frac{\delta T_L}{J_T} = \frac{d\delta W}{dt} + \left( \frac{K_d}{J_T} + \frac{K_t \cdot K_a}{R \cdot J_T} \right) \cdot \delta W$$

Aplicando las transformadas de Laplace:

$$\frac{1}{s} \cdot \left( \frac{\delta E \cdot K_t}{R \cdot J_T} - \frac{\delta T_L}{J_T} \right) = s \cdot \delta W(s) - \delta W(0) + \left( \frac{K_d}{J_T} + \frac{K_t \cdot K_a}{R \cdot J_T} \right) \cdot \delta W(s)$$

En estado estacionario se tiene que  $\delta W(0)=0$ , por lo que ésta última ecuación quedará como:

$$\frac{1}{s} \cdot \left( \frac{\delta E \cdot K_t}{R \cdot J_T} - \frac{\delta T_L}{J_T} \right) = \delta W(s) \cdot \left( s + \frac{K_d}{J_T} + \frac{K_t \cdot K_e}{R \cdot J_T} \right)$$

Despejando  $\delta W(s)$  de ésta última ecuación, se tiene:

$$\delta W(s) = \frac{\left( \frac{\delta E \cdot K_t}{R \cdot J_T} - \frac{\delta T_L}{J_T} \right)}{s \cdot \left( s + \frac{K_d \cdot R + K_t \cdot K_e}{R \cdot J_T} \right)} \quad \dots \dots \dots (37)$$

La ecuación (37) es de la forma:

$$\delta W(s) = K \cdot \frac{1}{s(s+a)}$$

cuya transformada inversa es:  $\delta W(t) = \frac{e^{-at} - 1}{-a} \cdot k$

Aplicando en forma análoga, la transformada inversa a la ecuación (37), resulta:

$$\delta W(t) = \frac{\left( \frac{\delta E \cdot K_t}{R \cdot J_T} - \frac{\delta T_L}{J_T} \right)}{\frac{K_d \cdot R + K_t \cdot K_e}{R \cdot J_T}} \cdot \left( 1 - e^{-at} \right) \cdot t$$

Ordenando la ecuación se tendrá:

$$\delta W(t) = \frac{\delta E \cdot K_t - \delta T_L \cdot R}{K_d \cdot R + K_t \cdot K_e} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{K_d \cdot R + K_t \cdot K_e}{R \cdot J_T} \cdot t} \right) \dots\dots\dots(38)$$

**2.9.1.- Para  $\delta T_L=0$ , y  $\delta E$  diferente de cero.**

Bajo éstas condiciones la ecuación (38) queda como:

$$\delta W(t) = \frac{\delta E \cdot K_t}{K_d \cdot R + K_t \cdot K_e} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{K_d \cdot R + K_t \cdot K_e}{R \cdot J_T} \cdot t} \right) \dots\dots\dots(39)$$

Para variaciones de tensión del orden de  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$ , y  $\pm 20\%$ , se calculan las magnitudes  $\delta W$  y el tiempo en el cual se produce la estabilización.

Para  $\delta E = \pm 5\% E = \pm 6.95$  voltios.

t(seg)	0	0.001	0.005	0.007	0.01	0.015
$\delta W$ (RPM)	0	$\pm 20.94$	$+80.29$	$+99.42$	$\pm 119.59$	$\pm 138.83$
0.020	0.025	0.050	0.070	0.080	0.090	
$\pm 148.25$	$\pm 152.86$	$\pm 157.15$	$\pm 157.27$	$+157.28$	$+157.28$	

Para  $\delta E = \pm 10\% E = \pm 13.90$  voltios.

---

t(seg)	0	0.001	0.005	0.007	0.01	0.020
$\delta W$ (RPM)	0	$\pm 41.88$	$\pm 83.76$	$\pm 198.84$	$\pm 239.18$	$\pm 296.50$
	0.050	0.070	0.080	0.090	0.100	0.110
	$\pm 314.30$	$\pm 314.54$	$\pm 314.56$	$\pm 314.56$	$\pm 314.56$	$\pm 314.56$

Para  $\delta E = +15\% E = +20.85$  voltios.

---

t(seg)	0	0.001	0.005	0.007	0.01	0.020
$\delta W$ (RPM)	0	$\pm 62.82$	$\pm 240.87$	$\pm 298.26$	$\pm 358.77$	$\pm 444.75$
	0.050	0.070	0.080	0.090	0.100	0.110
	$\pm 471.45$	$\pm 471.81$	$\pm 471.84$	$\pm 471.84$	$\pm 471.84$	$\pm 471.84$

---

Para  $\delta E = \pm 20\% E = +27.80$  voltios.

---

t(seg)	0	0.001	0.005	0.007	0.01	0.020
$\delta W$ (RPM)	0	$\pm 83.76$	$\pm 321.16$	$\pm 397.68$	$\pm 478.36$	$\pm 593.00$
	0.050	0.070	0.080	0.090	0.100	0.110
	$\pm 628.60$	$\pm 629.08$	$\pm 629.12$	$\pm 629.12$	$\pm 629.12$	$\pm 629.12$

Como se podrá observar, la estabilización ocurre en un tiempo de 0.08 segundos ante una variación de

tensión de suministro  $\delta E$ . El gráfico de la figura 2.9.1, mostrará el comportamiento del motor ante variaciones de tensión  $\delta E$ .

**2.9.2.- Para  $\delta E = 0$ , y  $\delta T_L$  diferente de cero.**

La ecuación (38) quedará como:

$$\delta W(t) = \frac{-\delta T_L \cdot R}{K_d \cdot R + K_t \cdot K_e} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{K_d \cdot R + K_t \cdot K_e}{R \cdot J_T} \cdot t} \right) \dots\dots\dots(40)$$

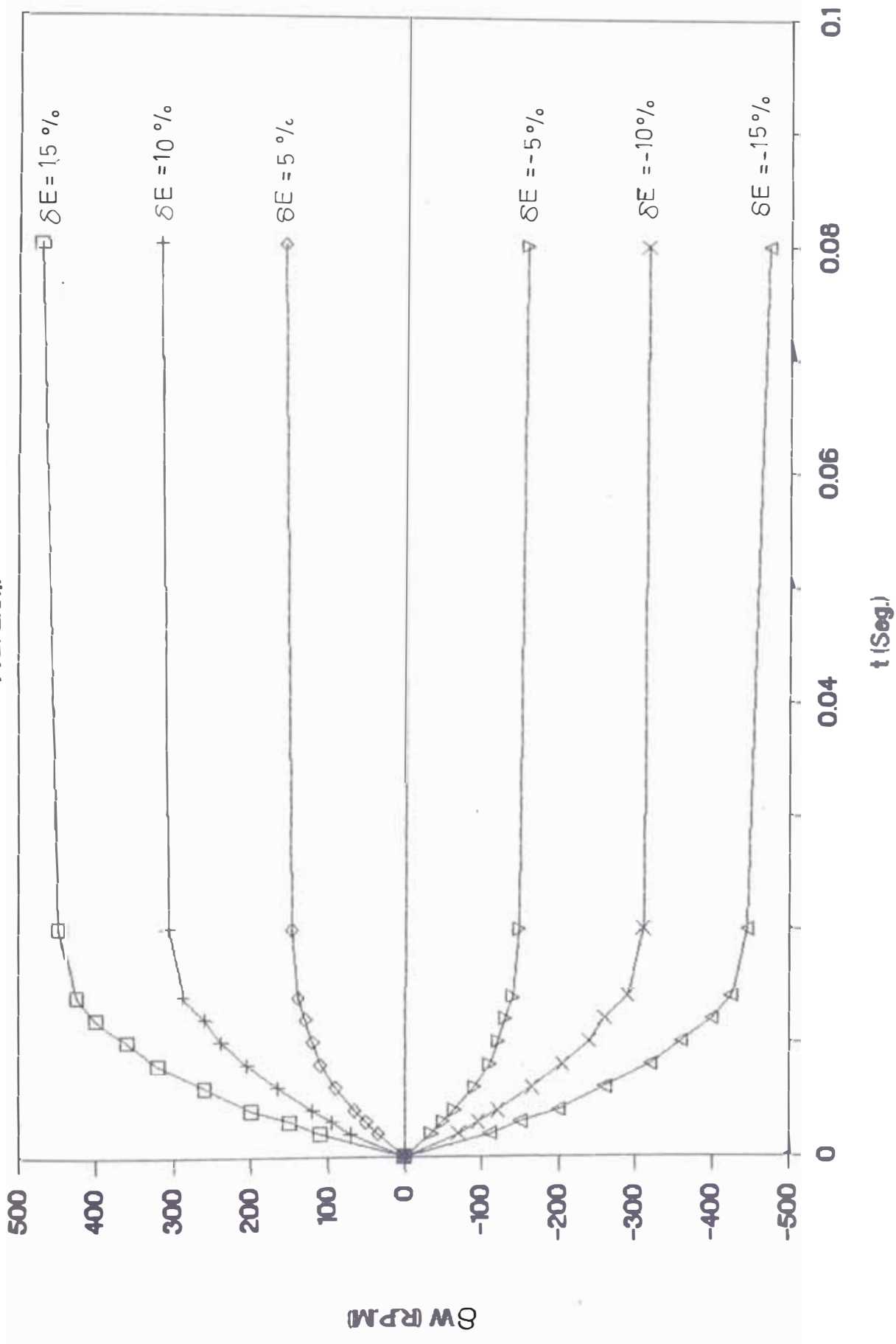
Para variaciones del torque en el eje, del orden de  $\pm 5\%$ ,  $+10\%$ ,  $15\%$ , y  $\pm 20\%$ , se calculan las magnitudes  $\delta W$  y el tiempo en el cual se produce la estabilización.

Para  $\delta T_L = \pm 5\% T_L = \pm 48.00 \text{ New.cm.}$   
 -----

t(seg)	0	0.001	0.005	0.007	0.01	0.050
$\delta W(\text{RPM})$	0	$\pm 0.964$	$\pm 3.6900$	$\pm 4.580$	$\pm 5.510$	$+ 7.230$
	0.050	0.070	0.080	0.090	0.100	0.110
	$+ 7.230$	$\pm 7.240$	$\pm 7.242$	$\pm 7.243$	$\pm 7.243$	$\pm 7.243$

# GRAFICO $\delta W$ vs. $t$ , PARA VARIACIONES $\delta E$

FIG. 29.1.



Para  $\delta T_L = +10\%$   $T_L = \pm 96.00$  New.cm.

t(seg)	0	0.001	0.005	0.007	0.01	0.050
$\delta W$ (RPM)	0	$\pm 1.928$	$\pm 7.3800$	$\pm 9.160$	$\pm 11.020$	$\pm 14.460$
	0.050	0.070	0.080	0.090	0.100	0.110
	$\pm 14.460$	$\pm 14.480$	$\pm 14.484$	$\pm 14.486$	$\pm 14.486$	$\pm 14.486$

Para  $\delta T_L = +15\%$   $T_L = \pm 144.00$  New.cm.

t(seg)	0	0.001	0.005	0.007	0.01	0.050
$\delta W$ (RPM)	0	$\pm 2.892$	$\pm 11.070$	$\pm 13.740$	$\pm 16.530$	$\pm 21.690$
	0.050	0.070	0.080	0.090	0.100	0.110
	$\pm 21.690$	$\pm 21.720$	$\pm 21.720$	$\pm 21.720$	$\pm 21.720$	$\pm 21.720$

Para  $\delta T_L = \pm 20\%$   $T_L = +192.00$  New.cm.

t(seg)	0	0.001	0.005	0.007	0.01	0.050
$\delta W$ (RPM)	0	$\pm 3.856$	$\pm 14.760$	$\pm 18.320$	$\pm 22.040$	$\pm 28.920$
	0.050	0.070	0.080	0.090	0.100	0.110
	$\pm 28.920$	$\pm 28.960$	$\pm 28.960$	$\pm 28.960$	$\pm 28.960$	$\pm 28.960$

Como se podrá observar, la estabilización ocurre en un tiempo de 0.08 seg. ante una variación de torque en el eje  $\delta T_L$ . El gráfico de la figura 2.9.2., mostrará el comportamiento del motor ante las variaciones de torque  $\delta T_L$ .

Se puede resumir que, ante variaciones de la tensión de suministro  $\delta E$  o ante variaciones de torque en el eje  $\delta T_L$ , el motor de inducido impreso funcionando bajo condiciones estables recupera su estabilidad de operación, pero con una variación en la velocidad angular final. Esto es más notorio cuando ocurren las variaciones de tensión de suministro  $\delta E$ , por lo que se puede afirmar que el motor de inducido impreso tiene un mejor comportamiento ante variaciones de carga  $\delta T_L$ .

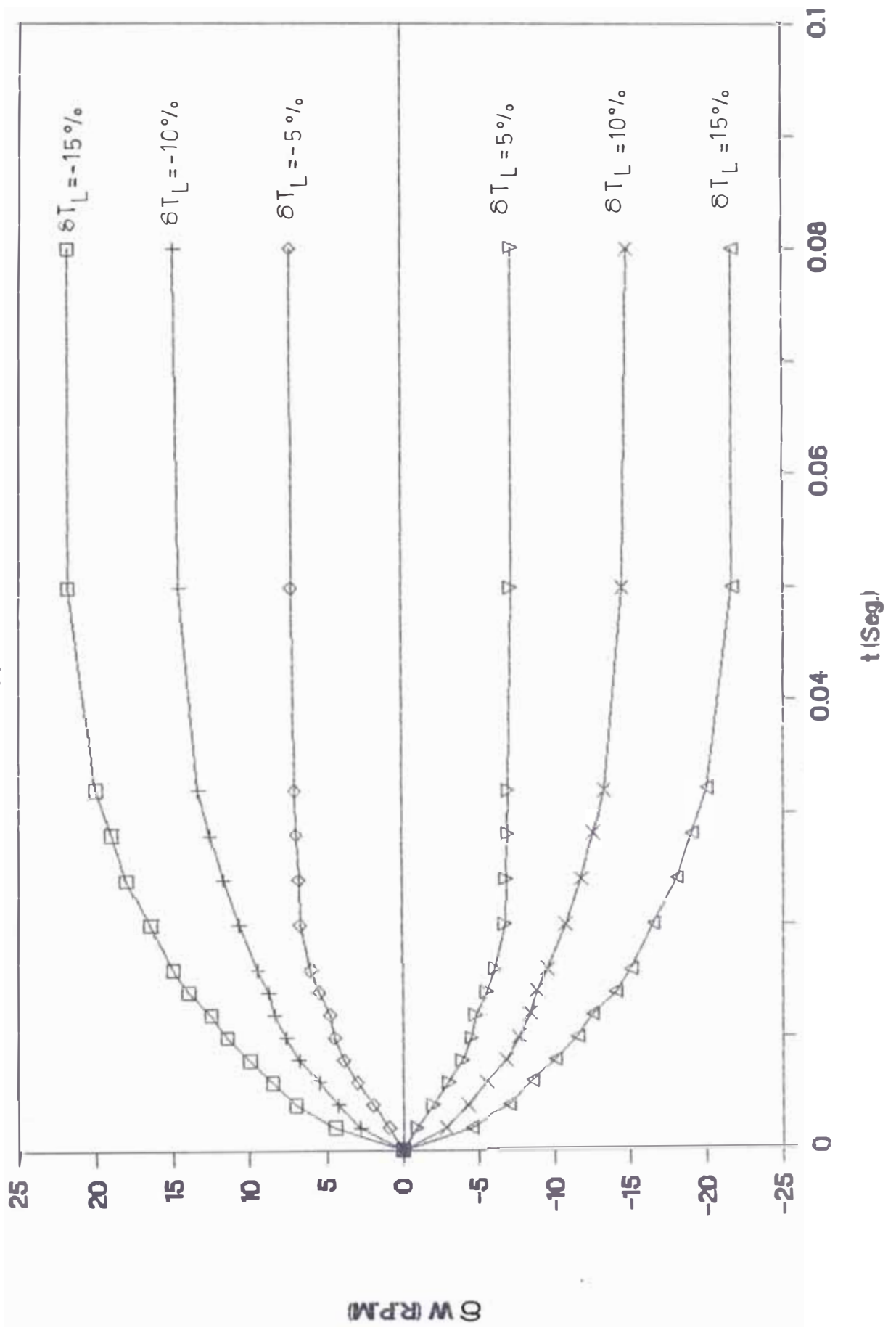
## 2.10.- ANALISIS COMPARATIVO DE ESTABILIDAD CON LOS MOTORES ELECTRICOS CONVENCIONALES DE CORRIENTE CONTINUA.

Con el fin de establecer, las comparaciones entre las respuestas a perturbaciones durante las operaciones de un motor de inducido impreso con un motor eléctrico convencional, se selecciona un motor eléctrico de corriente continua de excitación independiente con los valores de  $K_d$ ,  $K_e$ ,  $K_t$ , Potencia al eje nominal  $T_L$ , velocidad angular nominal  $W$ , y tensión de suministro  $E$ , similares a los valores del motor de inducido impreso,



# GRAFICO $\delta W$ vs. $t$ PARA VARIACIONES $\delta T_L$

FIG. 29.2.



exceptuándose de esta similitud al momento de inercia de la armadura, la cual será cinco veces mayor. Es decir, el motor convencional tendrá un  $J_A$  igual a 1.80 New.cm.sec<sup>2</sup>, lo que haría que el  $J_T$  es igual a 1.88 New.cm.sec<sup>2</sup>.

### 2.10.1.- Para $\delta T_L = 0$ , y $\delta E$ diferente de cero.

Reemplazando el nuevo valor de  $J_T$  en la ecuación (39), se obtienen las siguientes tablas:

Para  $\delta E = \pm 5\% E = + 6.95$  voltios.

t(seg)	0	0.01	0.03	0.05	0.08	0.100
$\delta W$ (RPM)	0	$\pm 44.96$	$\pm 99.97$	$\pm 128.0$	$\pm 146.56$	$\pm 151.76$
	0.100	0.300	0.400			
	$\pm 151.76$	$\pm 157.16$	$\pm 157.17$			

Para  $\delta E = +10\% E = +13.90$  voltios.

t(seg)	0	0.01	0.03	0.05	0.08	0.100
$\delta W$ (RPM)	0	$\pm 89.91$	$\pm 199.9$	$\pm 256.0$	$\pm 284.60$	$\pm 303.50$
	0.100	0.300	0.400			
	$\pm 303.50$	$\pm 314.32$	$\pm 314.34$			

Para  $\delta E = +15\% E = +20.85$  voltios.

---

t(seg)	0	0.01	0.03	0.05	0.08	0.100
$\delta W$ (RPM)	0	$\pm 134.87$	$\pm 299.9$	$+384.0$	$\pm 439.67$	$\pm 455.28$
	0.100	0.300	0.400			
	$\pm 455.28$	$+471.49$	$\pm 471.51$			

---

Para  $\delta E = +20\% E = +27.80$  voltios.

---

t(seg)	0	0.01	0.03	0.05	0.08	0.100
$\delta W$ (RPM)	0	$+179.82$	$+399.9$	$\pm 512.0$	$\pm 586.23$	$+607.04$
	0.100	0.300	0.400			
	$\pm 607.04$	$+628.65$	$+628.67$			

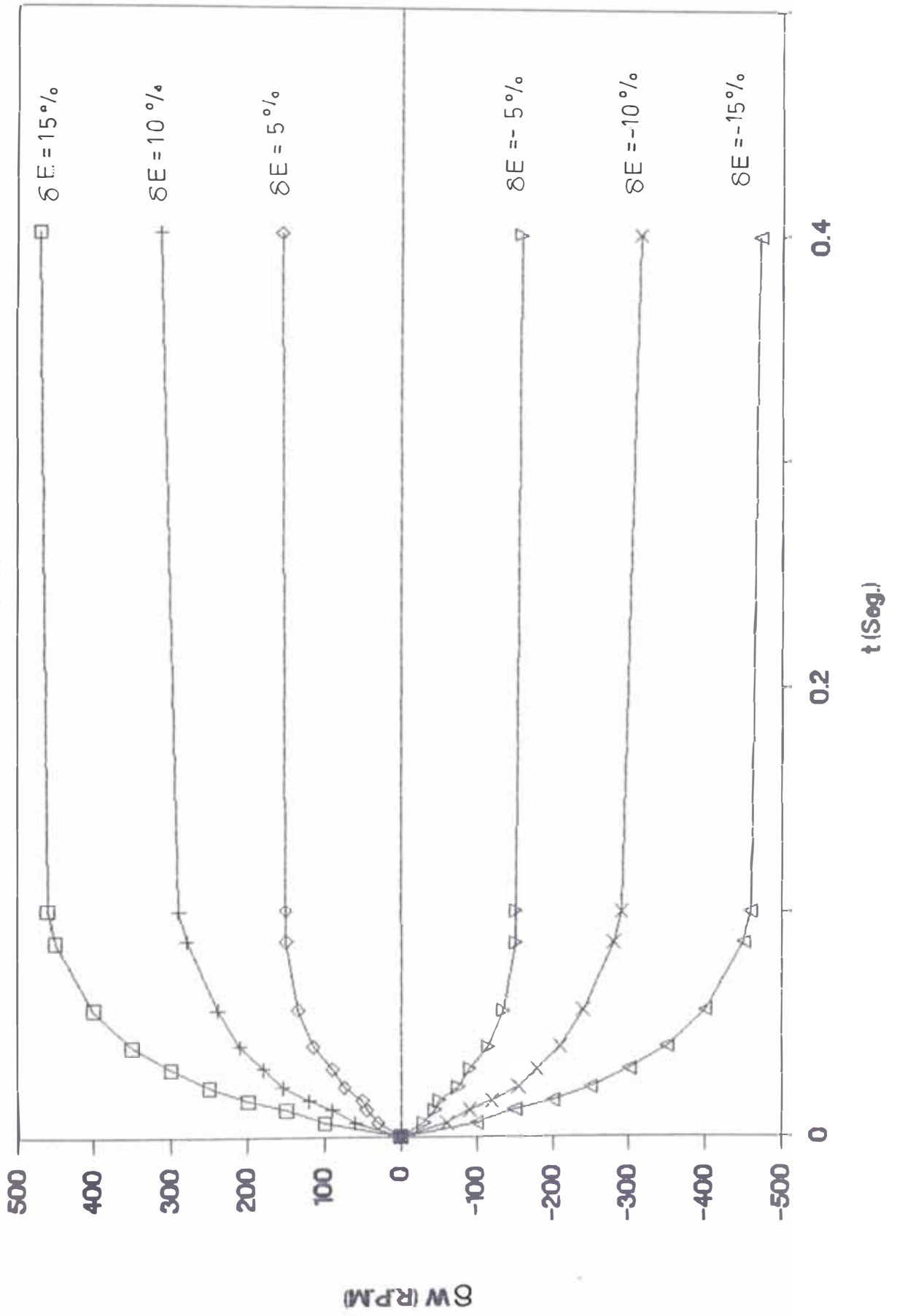
De éstos resultados tabulados se puede afirmar que éste motor convencional, ante variaciones de tensión suministrada  $\delta E$ , recupera un régimen final estable en 0.4 seg, el cual es cinco veces mayor al tiempo que toma un motor de inducido impreso. En la figura 2.10.1.1., se muestra el comportamiento de éste motor convencional ante variaciones de tensión  $\delta E$ .

#### 2.10.2.- Para $\delta E = 0$ , y $\delta T_L$ diferente de cero.

Reemplazando el nuevo valor de  $J_T$  en la ecuación (40), se obtienen las siguientes tablas.

# GRAFICO $\delta W$ vs. $t$ , PARA DIVERSOS $\delta E$

FIG. 2.10.11



Para  $\delta T_L = \pm 5\%$   $T_L = \pm 48.00$  New.cm.

---

t(seg)	0	0.01	0.03	0.05	0.08	0.1
$\delta W$ (RPM)	0	$\pm 2.070$	$\pm 4.60$	$\pm 5.89$	$\pm 6.75$	$\pm 6.99$
	0.1	0.3	0.4			
	$\pm 6.99$	$\pm 7.230$	$\pm 7.240$			

Para  $\delta T_L = \pm 10\%$   $T_L = \pm 96.00$  New.cm.

---

t(seg)	0	0.01	0.03	0.05	0.08	0.1
$\delta W$ (RPM)	0	$\pm 4.14$	$\pm 9.21$	$\pm 11.79$	$\pm 13.50$	$\pm 13.97$
	0.1	0.3	0.4			
	$\pm 13.97$	$\pm 14.46$	$\pm 14.47$			

Para  $\delta T_L = \pm 15\%$   $T_L = \pm 144.00$  New.cm.

---

t(seg)	0	0.01	0.03	0.05	0.08	0.1
$\delta W$ (RPM)	0	$\pm 6.21$	$\pm 13.81$	$\pm 17.68$	$\pm 20.24$	$\pm 20.96$
	0.1	0.3	0.4			
	$\pm 20.96$	$\pm 21.70$	$\pm 21.71$			

Para  $\delta T_L = \pm 20\% T_L = +192.00 \text{ New.cm.}$

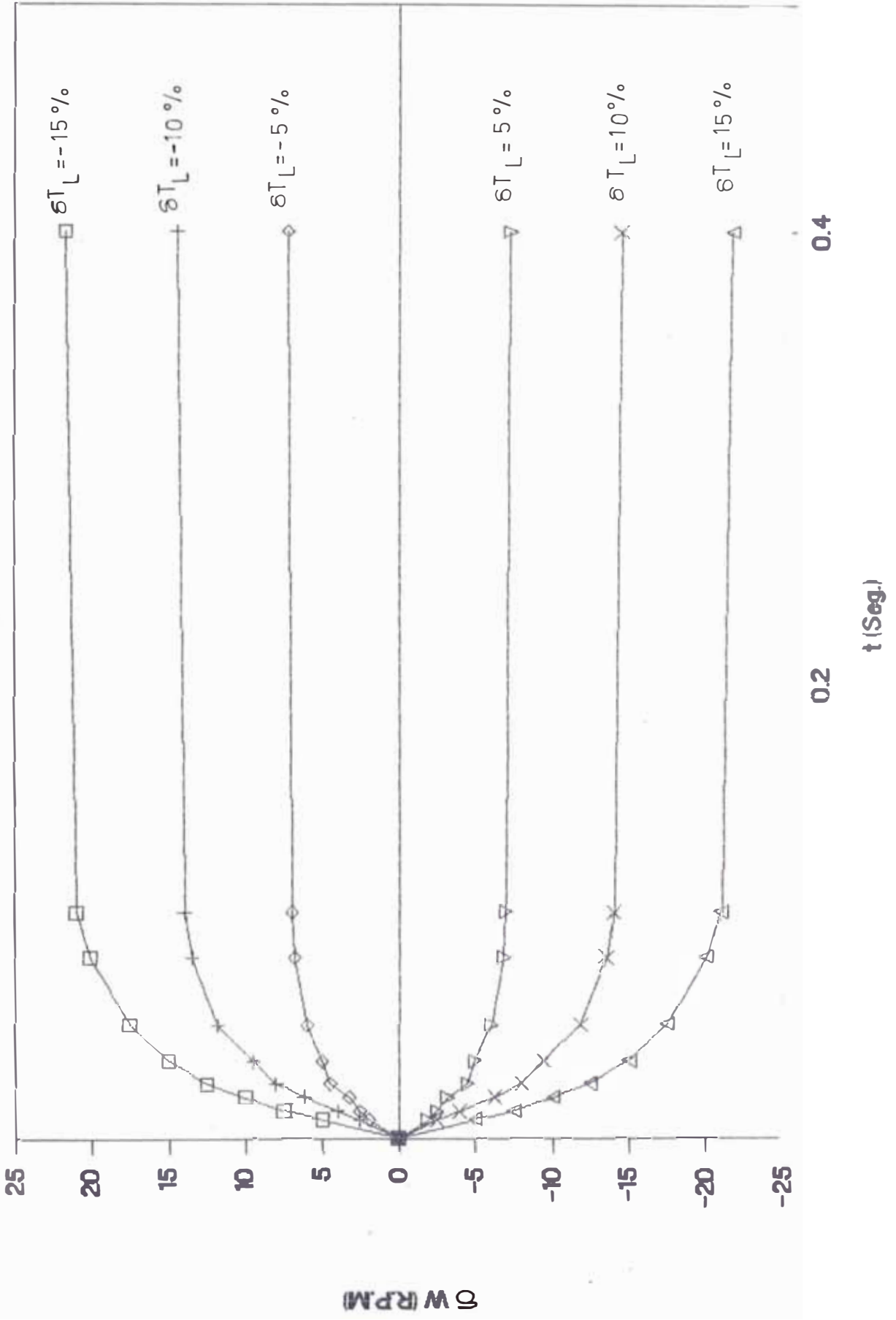
---

t(seg)	0	0.01	0.03	0.05	0.08	0.1
$\delta W(\text{RPM})$	0	$\pm 8.28$	$+18.41$	$+23.58$	$\pm 26.99$	$\pm 27.95$
	0.1	0.3	0.4			
	$\pm 27.95$	$\pm 28.94$	$\pm 28.95$			

De éstos resultados, se puede afirmar que la estabilidad para éste motor convencional, ante variaciones de carga  $\delta T_L$ , ocurre en 0.4 seg., el cual es cinco veces mayor al tiempo que toma un motor de inducido impreso. En la figura 2.10.1.2., se muestra el comportamiento de éste motor convencional ante variaciones de torque  $\delta T_L$ .

# GRAFICO $\delta W$ vs. $t$ , PARA DIVERSOS $\delta L$

FIG. 2.10.12.



## CAPITULO III



### 3.- DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE IMANES PERMANENTES .

#### 3.1.- PREMISA.

En el capítulo 2 se han reunido los modelos y herramientas matemáticas para el pronóstico teórico del comportamiento del motor, con la ayuda de los datos dados por el fabricante.

En el presente capítulo se mostrarán las pautas seguidas para la implementación de un banco de pruebas a utilizarse para los ensayos de recepción y el cumplimiento de los planes de mantenimiento de los motores de inducido impreso tipo CEM.MF 26, así como la relación de pruebas de aceptación de un motor ya reparado.

También, se mostrarán los resultados de las experiencias efectuadas en el LABORATORIO de ELECTRICIDAD de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería, las cuales permitieron determinar las características de ciertos componentes que conforman la Sub-unidad de magnetización y desmagnetización.

### 3.2.- JUSTIFICACION.

Como se mencionó en el acápite 1.2., la reparación o mantenimiento de un motor de inducido impreso por la firma fabricante está valorado en \$5000, incluyendo los repuestos para su mantenimiento, mientras que el costo de un motor nuevo es de \$11000. Ambas cotizaciones resultan aún más elevadas, si se considera la existencia de 92 motores en la Marina Peruana, los cuales requieren de un mantenimiento periódico.

El mantenimiento de los 92 motores de inducido impreso en Italia, nos demandaría la cantidad de \$460,000, con la garantía de que estos motores no presenten anomalías por un espacio de 3 años. Una alternativa sería comprarle a la firma fabricante italiana, un Banco de Pruebas para el mantenimiento de estos motores, cuyo precio está cotizado en \$142,480.

Si bien es cierto, que ésta última alternativa requiere menor gasto, resulta aún costoso para los intereses de la Marina Peruana. Por ésta razón, se optó por efectuar la investigación y estudio del motor de inducido impreso, para posteriormente confeccionar en nuestro medio un Banco de Pruebas que se adecue a nuestros requerimientos y capacidad económica.

Justamente, el objetivo de este tema de Tesis consiste en efectuar el estudio de Implementación de un Banco de Pruebas, para los ensayos de recepción, cumplimiento de los planes de mantenimiento, y determinación de las pruebas de aceptación del motor de inducido impreso.

### **3.3.- REQUERIMIENTOS TECNICOS DE CONTROL Y MANTENIMIENTO QUE DEBE CUMPLIR EL BANCO DE PRUEBAS.**

El Banco de Pruebas debe efectuar el control de las magnitudes de corriente y fuerza electromotriz, las cuales permitirán determinar la situación operativa del motor de inducido impreso.

Para los efectos de mantenimiento preventivo y/o correctivo, es un requerimiento indispensable que el Banco de Pruebas realice también, el desmagnetizado y remagnetizado de los imanes permanentes que conforman el campo de excitación del motor.

#### **3.3.1.- Control de la f.e.m.**

Para poder efectuar el control de la f.e.m., el Banco de Pruebas debe contar con una unidad preparada para hacer funcionar el motor de inducido impreso como un generador. El valor de la f.e.m. del motor de inducido impreso, funcionando como generador a través de un motor

primero, que lo hará rotar a una velocidad angular de 3000 R.P.M., es de  $132 \pm 2$  voltios.

### **3.3.2.- Control de la dirección de rotación.**

Intercambiando la polaridad de las conexiones en la alimentación del motor, lograremos que el motor gire en sentido contrario.

### **3.3.3.- Control de la corriente en vacío.**

Se hace funcionar el motor a una tensión de suministro de 132 VDC., obteniéndose una velocidad angular de 3000 R.P.M.. Después de 2 minutos de funcionamiento se verificará, que el valor de la corriente absorbida no sea mayor de 3 amperios.

### **3.3.3.4.-Control de la corriente para un torque promedio, a la velocidad angular nominal.**

Esta prueba se fundamenta en la absorción de corriente a un torque promedio, usando para tal efecto un equipo dinamométrico, el cual sera seleccionado previamente para un torque de 1 Kgf-m. Este equipo dinamométrico se desconectará, cuando el motor tome el valor preseleccionado. En ésta situación se debe verificar, que la corriente de armadura no sea mayor de 25 amperios.

### **3.3.3.5.- Desmagnetización y magnetización.**

El Banco de Pruebas debe efectuar los procesos de desmagnetizado y magnetizado en forma sucesiva hasta alcanzar el nivel de fuerza electromotriz requerido (Ver ítem 3.3.1.). La desmagnetización del motor de inducido impreso permitirá realizar el mantenimiento preventivo o correctivo del motor, el cual será detallado en el ítem 3.9.

### **3.4.- UNIDADES QUE CONFORMAN EL BANCO DE PRUEBAS.**

De acuerdo a los requerimientos técnicos de control y mantenimiento, mencionados en el ítem 3.3., se ha podido determinar que el Banco de Pruebas estará conformado por dos unidades, la Unidad de Control y Magnetización, y la Unidad de Soporte del motor.

#### **3.4.1.- Unidad de control y magnetización.**

Esta unidad estará conformada por las siguientes subunidades:

- Sub-Unidad de Magnetización y desmagnetización.
- Sub-Unidad de Control del motor de inducido impreso.
- Sub-Unidad de Control del motor primo.

Los componentes electromecánicos y electrónicos de las sub-unidades, estarán instalados dentro de la cabina de ésta Unidad.

#### **3.4.1.1.- Sub-unidad de magnetización y desmagnetización.**

Esta sub-unidad magnetizará y desmagnetizará el campo de excitación de los motores de inducido impreso, los cuales están conformados por 20 imanes permanentes.

Las pruebas de magnetización y desmagnetización serán llevadas a cabo, operando exclusivamente el panel de Control, el cual estará ubicado en la Unidad de Control y Magnetización.

Para la selección de los componentes de dicha sub-unidad, se considerará los datos a obtener en las pruebas a efectuar en el LABORATORIO DE ELECTRICIDAD de la Universidad Nacional de Ingeniería.

#### **3.4.1.2.- Sub-unidad de control del motor de inducido impreso.**

Esta sub-unidad cumplirá el propósito de controlar las magnitudes que son sometidas a prueba, tales como la velocidad angular, absorción de corriente, etc...

Para la selección de los componentes que conforman dicha sub-unidad, se debe considerar los datos característicos obtenidos en el capítulo anterior, es decir los valores de tensión de suministro, corrientes y torques a diferentes condiciones.

Esta sub-unidad funciona en forma independiente de las demás subunidades.

#### **3.4.1.3.- Sub-unidad de control del motor primo.**

Esta sub-unidad controlará la velocidad y el sentido de giro del motor primo, el cual permitirá determinar la fuerza electromotriz del motor de inducido impreso funcionando como generador.

La selección de los componentes de ésta sub-unidad estará en función de las características del motor primo a seleccionar.

#### **3.4.2.- Unidad del soporte del motor.**

Esta unidad servirá como base de apoyo y fijación del motor de inducido impreso, del motor primo y del tacogenerador.

El acople mecánico entre el motor de inducido impreso y el motor primo es del tipo deslizante y de accionamiento manual. Cuando el acople se encuentre conectado, permitirá la operación del motor de inducido impreso como generador.

El motor primo tendrá un eje de dos salidas, en un extremo se instalará el acople mecánico, mientras que al otro extremo se le conectará un tacogenerador de dos polos, el cual permitirá visualizar en un instrumento las

R.P.M. del motor primo y del inducido impreso, cuando funcionan acoplados.

### 3.4.3.- Equipos complementarios del banco de pruebas.

Como equipos complementarios del Banco de Pruebas, se deberá disponer de un equipo dinamométrico con una capacidad de 1Kgf-m. o más, con el propósito de medir la corriente con carga.

### 3.5.- ASPECTOS PRELIMINARES RELACIONADOS A LA CONFORMACION DEL BANCO DE PRUEBAS.

Los motores de imán permanente con inducido impreso, ofrecen ciertas ventajas sobre los motores de corriente continua con conmutador.

La eficiencia de éste motor es mayor que la de una máquina con devanado de campo, en virtud de la eliminación de las pérdidas eléctricas de campo.

En este motor no se requiere controlar el campo, por el uso de imanes, simplificando la construcción de la máquina y eliminando los terminales eléctricos.

Los problemas y riesgos de usar excitación con imán permanente, radican en que este se puede desmagnetizar por la fuerza magnetomotriz de la reacción de armadura.



La desmagnetización puede provenir de: un diseño inadecuado, de una corriente excesiva en la armadura originada por una falla o por un transitorio brusco, por una conexión inadecuada del circuito de armadura, por un desplazamiento impropio de las escobillas, o por efectos de la temperatura.

De las unidades y sub-unidades que conforman el Banco de Pruebas, la sub-unidad de magnetización y desmagnetización requiere de un estudio preliminar de los imanes permanentes que conforman el campo de excitación del motor de inducido impreso.

Este estudio permitirá conocer los elementos constitutivos del campo, el comportamiento estático de los imanes actuando dentro del circuito magnético, los métodos para magnetizar y desmagnetizar los imanes, la estabilidad magnética, y por último las pruebas experimentales efectuadas en el LABORATORIO DE ELECTRICIDAD de la Universidad Nacional de Ingeniería, a fin de determinar las cargas eléctricas para el magnetizado y desmagnetizado de los imanes permanentes en un circuito prototipo elaborado.

### 3.5.1.- Análisis químico del imán permanente.

En la parte introductoria de este tema se manifestó que se había desmontado un motor de inducido impreso usando métodos mecánicos, lo que había traído como consecuencia la desmagnetización de los imanes y el deterioro de ciertos componentes internos del motor.

De dicho motor, se tomó un imán permanente, al cual se le hizo un análisis químico en el Laboratorio Químico del Servicio Industrial de la Marina-Callao (Simac), obteniéndose los siguientes resultados:

Elementos	Porcentajes obtenidos
Aluminio	7.37 %
Niquel	13.75 %
Cobalto	25.44 %
Cobre	2.80 %
Fierro	Resto.

Del libro "Permanent Magnets and Magnetism" de D.Hadfield, y del "Manual de aleaciones de Ingeniería" de Norman E. Woldman, se determinó que el material de imán permanente usado para ésta aplicación corresponde a un grupo de materiales ferromagnéticos duros denominados Alnicos. En la figura 3.5.1., extraída del libro

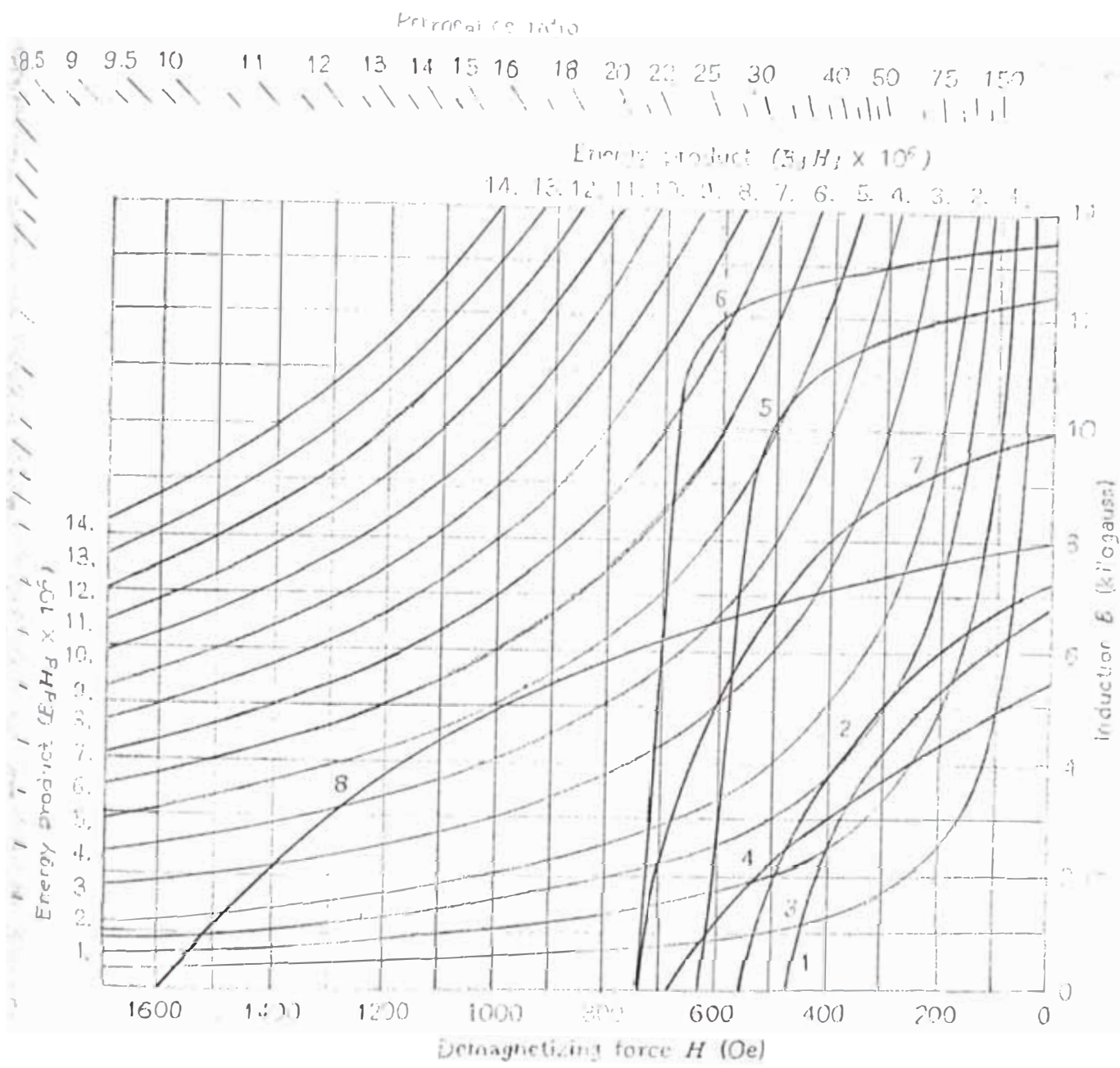


FIGURA 3.5.1 Curvas de Desmagnetización de los imanes Permanentes tipo ALNICO: 1, Alnico I; 2, Alnico II; 3, Alnico III; 4, Alnico IV; 5, Alnico V; 6, Alnico V-2; 7, Alnico VI; y 8, Alnico VIII.

"Electromecánica y Máquinas Eléctricas" de Nasar Unnewehr, se muestra los comportamientos magnéticos de ciertos Alnicos, bajo la configuración de anillos toroidales.

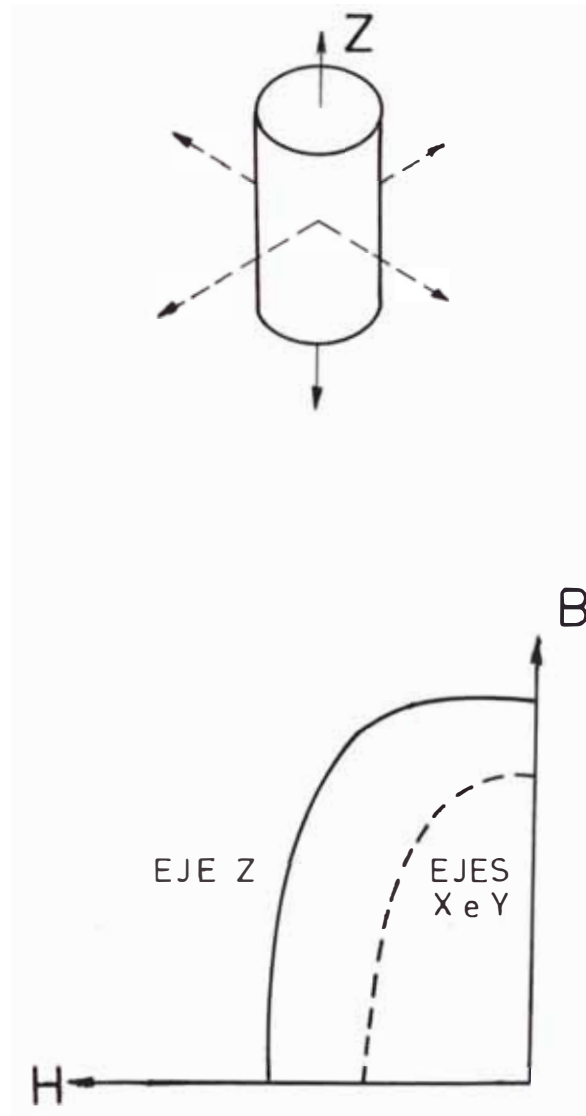
Joseph Becker, en la publicación técnica "Permanent Magnets", manifiesta que a los Alnicos se les suele conocer también, con los nombres de Ticonal, Alcomax y Columax.

### **3.5.2.- Análisis metalográfico del imán permanente.**

De acuerdo al análisis metalográfico efectuado en el Laboratorio de Metalurgia del Simac, se determinó que la microestructura que presentaba el mencionado material era de cristales tipo Columnar con un comportamiento anisotrópico, es decir, cuando se aplica un campo magnético determinado, las propiedades magnéticas mejoradas se concentran en un solo eje.

En la figura siguiente se muestra la característica de un material anisotrópico.

Fig. 3.5.2.- Característica del material anisotrópico.



### 3.5.3.- Fabricación del imán permanente tipo Alnico.

El proceso general para obtener un Alnico es como se explica a continuación. La aleación es horneada y fundida, seguida de un tratamiento térmico a  $1250^{\circ}\text{C}$ . En el caso de que la aleación tuviese Silicio o Zirconio, la aleación será llevada a  $900^{\circ}\text{C}$ . Posterior al tratamiento térmico, la aleación es enfriada en un campo magnético controlado. Luego, la aleación es recocida a  $600^{\circ}\text{C}$ . El

material es moldeado con la operación del esmerilado o a través del uso de una máquina electrolítica.

El objeto del tratamiento térmico es precipitar las partículas de simple dominio de una fase rica en FeCo, en una matriz rica en NiAl. El campo magnético aplicado, origina que en la fase de precipitación se obtengan propiedades mejoradas en una dirección paralela al campo aplicado. Para mejorar la orientación cristalográfica se usan moldes exotérmicos, capaces de lograr uniformidad de enfriamiento en el fondo del material

Estos métodos de producción son empleados actualmente en forma comercial, pese a que los Alnicos son duros (aproximadamente 56 Rockweel C), frágiles dificultosos para trabajar. Sus buenas propiedades magnéticas, su excelente estabilidad y su bajo costo le han permitido constituirse como el mejor imán permanente usado hoy en día.

#### **3.5.4.- Instalación de los imanes permanentes.**

Con las recientes mejoras en adhesivos, no existe el peligro de que las juntas magnéticas se separen por grandes fuerzas magnéticas o por altas temperaturas. El tipo de adhesivo que se emplea para juntar los imanes a las tapas de fierro, es de resina epóxica, la cual

requiere para su aplicación que las superficies de los imanes y las tapas de fierro, se encuentren completamente desengrasadas y ligeramente rasqueteadas.

### **3.5.5.- Configuración física de los imanes permanentes en el motor de inducido impreso.**

Del análisis químico y metalográfico, se ha podido determinar que el iman permanente usado en el motor de inducido impreso, pertenece a la familia de Alnicos anisotrópicos. En la Tabla 3.5.5., se muestra una gran variedad de ésta familia de Alnicos, coincidiendo muchos de ellos con la composición química obtenida en el ítem 3.5.1..

Para determinar con exactitud el tipo de Alnico anisotrópico empleado en el motor de inducido impreso, es necesario determinar el punto de operación del imán, el cual depende en gran medida de su configuración física en el motor.

En la siguiente figura se mostrará la configuración física que guardan los imanes permanentes en el motor de inducido impreso. Asimismo se representará la trayectoria del flujo magnético de los imanes y, las dimensiones de los principales componentes del motor.





**Tabla 3.5.5 Los Alnicos Anisotrópicos.**

(i) Random crystals (ii) Semi-Columnar crystals (iii) Fully-Columnar crystals

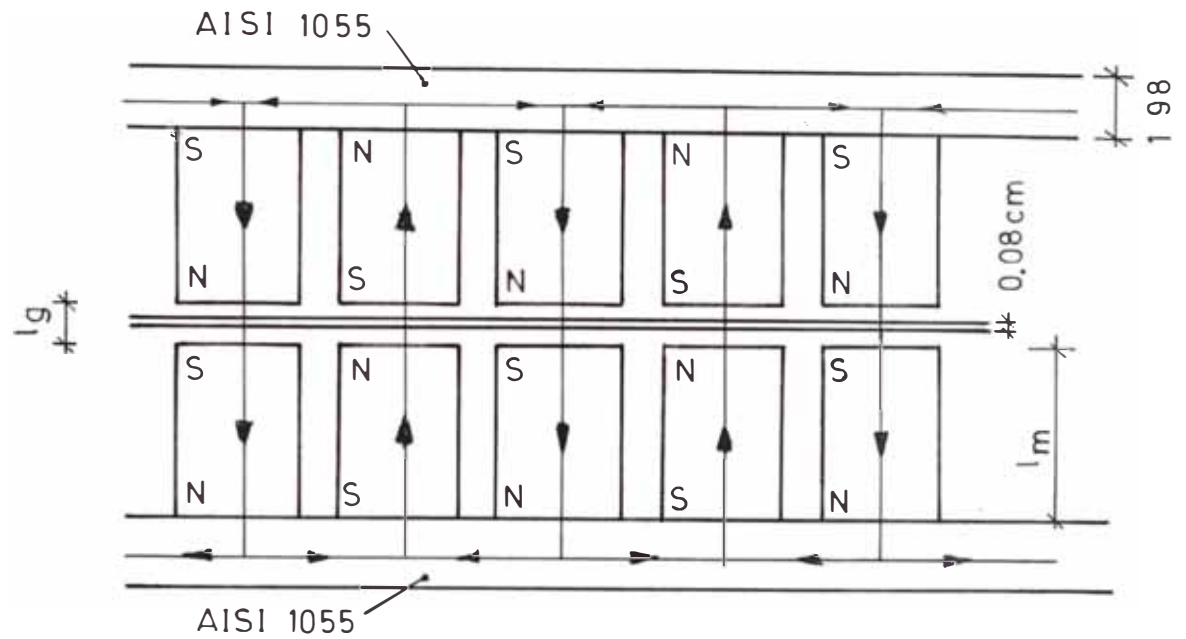
Reference	Composition (Balance Fe)						Magnetic Properties				Physical Properties			
	Al	Ni	Co	Cu	Nb	Ti	SJ	$H_c$ [Oe]	$(H/H_c)_{100}$ [Gauss]	$H_c$ [Oe]	$H_c$ [Gauss]	Saturation J [kG]	Curie Temperature -°C	Specific Gravity
5.9/40	8	14	24	3	—	—	—	57,100 - 57,800 [7.3 - 7.5]	59,500 - 51,500 [7.5 - 6.5]	—	—	—	—	—
5.9/41	8	13-5	24	3	0.5	—	—	58,700 - 62,000 [7.3 - 8.0]	59,500 - 66,500 [7.5 - 8.6]	1-17 - 1-12 [11,200 - 11,200]	50,800 - 61,100 [6.0 7.0]	1.68 [16,800]	810 1,500	7.30 7.35

• Divide  $J/m^2$  values by 2 to obtain maximum stored energy (ref. Sections 2.6.3 and 6.14.1)

REFERENCES

- 5.9/1 Tiomal E (GER);  
 5.9/2 Hycomax II (GER);  
 5.9/3 Kozel 250 (GER);  
 5.9/4 Tiomal N (GER);  
 5.9/5 Alcomax IV (GER);  
 5.9/6 Alcomax II (GER);  
 5.9/7 Alnico V C (USA);  
 5.9/8 Alcomax III; Tiomal C (GER);  
 5.9/9 Alcomax IV; Tiomal H (GER);  
 5.9/10 Tiomal F; 44/44 (GER);  
 5.9/11 Tiomal D (3-8) (GER);  
 5.9/12 Tiomal E (42/50) (GER);  
 5.9/13 Alnico V AH (USA);  
 5.9/14 Tiomal G (GER); (HOL); Alnico VI; (Orange) (USA); Alnico 400; (Aurifer) (USA);  
 (GER); N. K. S. 3; (MIA);  
 (GER); M. K. S. 3; (MIA);  
 5.9/15 Alnico V A (USA);  
 5.9/16 Alnico V F; Alnico V C (USA);  
 5.9/17 Alnico V; B (White) (USA);  
 5.9/18 Alnico VI AB (USA);  
 5.9/19 Alnico VI A (USA);  
 5.9/20 Kozel 250 (GER);  
 5.9/21 Low-Cobalt Alcomax (early type) (GER);  
 5.9/22 Alnico 400 (GER); (minimum figures are those specified by German Standard DENE7410);  
 5.9/23 Alnico VII (Purple) (USA);  
 5.9/24 Hycomax (GER);  
 5.9/25 Alnico 200; Permitt 200 (AUSTRIA);  
 5.9/26 Alnico (normal) (GER), as in reference 5.9/15 but cooled in a magnetic field from 1,250°C (2,280°F);  
 5.9/27 Kozel 190 (GER), as in reference 5.9/26, but field cooled as above;  
 5.9/28 Alcomax II SC (GER);  
 5.9/29 Alcomax III SC (GER);  
 5.9/30 Alcomax IV SC (GER);  
 5.9/31 Alnico V B, DG, (USA); Tiomal GX (GER); (110L);  
 5.9/32 Alnico V SC (GER);  
 5.9/33 Alnico V SC (GER);  
 5.9/34 Alnico V SC (GER);  
 5.9/35 Alnico V SC (GER);  
 5.9/36 Alnico V SC (GER);  
 5.9/37 Alnico V SC (GER);  
 5.9/38 Alnico V SC (GER);  
 5.9/39 Alnico V SC (GER);  
 5.9/40 Alnico V SC (GER);  
 5.9/41 Alnico V SC (GER);  
 5.9/42 Alnico V SC (GER);  
 5.9/43 Alnico V SC (GER);  
 5.9/44 Alnico V SC (GER);  
 5.9/45 Alnico V SC (GER);  
 5.9/46 Alnico V SC (GER);  
 5.9/47 Alnico V SC (GER);  
 5.9/48 Alnico V SC (GER);  
 5.9/49 Alnico V SC (GER);  
 5.9/50 Alnico V SC (GER);  
 5.9/51 Alnico V SC (GER);  
 5.9/52 Alnico V SC (GER);  
 5.9/53 Alnico V SC (GER);  
 5.9/54 Alnico V SC (GER);  
 5.9/55 Alnico V SC (GER);  
 5.9/56 Alnico V SC (GER);  
 5.9/57 Alnico V SC (GER);  
 5.9/58 Alnico V SC (GER);  
 5.9/59 Alnico V SC (GER);  
 5.9/60 Alnico V SC (GER);  
 5.9/61 Alnico V SC (GER);  
 5.9/62 Alnico V SC (GER);  
 5.9/63 Alnico V SC (GER);  
 5.9/64 Alnico V SC (GER);  
 5.9/65 Alnico V SC (GER);  
 5.9/66 Alnico V SC (GER);  
 5.9/67 Alnico V SC (GER);  
 5.9/68 Alnico V SC (GER);  
 5.9/69 Alnico V SC (GER);  
 5.9/70 Alnico V SC (GER);  
 5.9/71 Alnico V SC (GER);  
 5.9/72 Alnico V SC (GER);  
 5.9/73 Alnico V SC (GER);  
 5.9/74 Alnico V SC (GER);  
 5.9/75 Alnico V SC (GER);  
 5.9/76 Alnico V SC (GER);  
 5.9/77 Alnico V SC (GER);  
 5.9/78 Alnico V SC (GER);  
 5.9/79 Alnico V SC (GER);  
 5.9/80 Alnico V SC (GER);  
 5.9/81 Alnico V SC (GER);  
 5.9/82 Alnico V SC (GER);  
 5.9/83 Alnico V SC (GER);  
 5.9/84 Alnico V SC (GER);  
 5.9/85 Alnico V SC (GER);  
 5.9/86 Alnico V SC (GER);  
 5.9/87 Alnico V SC (GER);  
 5.9/88 Alnico V SC (GER);  
 5.9/89 Alnico V SC (GER);  
 5.9/90 Alnico V SC (GER);  
 5.9/91 Alnico V SC (GER);  
 5.9/92 Alnico V SC (GER);  
 5.9/93 Alnico V SC (GER);  
 5.9/94 Alnico V SC (GER);  
 5.9/95 Alnico V SC (GER);  
 5.9/96 Alnico V SC (GER);  
 5.9/97 Alnico V SC (GER);  
 5.9/98 Alnico V SC (GER);  
 5.9/99 Alnico V SC (GER);  
 5.9/100 Alnico V SC (GER);

Fig. 3.5.5.- Configuración de los imanes permanentes en el motor de inducido impreso.



Las dimensiones, de la longitud del entrehierro  $l_g$ , y del espesor del disco son: 0.38cm. y 3.55cm., respectivamente. El imán permanente es de forma cilíndrica, con un radio de 5.4 cms., y una longitud  $l_m$  de 3.55 cms.

### 3.5.6.- Punto de Operación de los imanes permanentes.

En un diseño práctico, la elección de un imán permanente se basa en los factores de costo, disponibilidad, requerimientos de dureza y resistencia, espacio disponible en el circuito magnético, así como también del punto de operación magnética ( $B_m, H_m$ ).

El punto de operación de un iman permanentes es determinado por, la configuración física del circuito magnético del cual forma parte, y por las ecuaciones magnéticas El punto de operación, también puede ser determinado con la ayuda de las curvas de desmagnetización de los imanes permanentes, siempre y cuando se conozca la calidad de imán. Previamente, en muchos casos los imanes deben pasar por una rutina estabilizadora antes de usarse.

En nuestro caso, se usaran las ecuaciones magnéticas en razón de que no se conoce con exactitud la calidad del imán permanente.

### 3.5.7.- Ecuaciones Magnéticas en los imanes permanentes.

Las dos ecuaciones magnéticas a utilizar en nuestro circuito, son las siguientes:

$$H_m \cdot l_m = H_g \cdot l_g + V_{m1} \dots \dots \dots (41)$$

Donde:

$H_m$  : Intensidad del campo magnético del imán, en Oerstedes.

$l_m$  : Longitud del imán, en cm.

$H_g$  : Intensidad de campo en el entrehierro, en Oerstedes

$B_g$  : Densidad de flujo magnético útil en el entrehierro, en Gauss.

$l_g$  : Longitud del entrehierro, en cm.

$V_{m1}$  : Caída de fuerza magnetomotriz, en las partes ferromagnéticas, en gilberts.

$$\text{Luego : } \phi_m = \phi_g + \phi_f \dots\dots\dots(42)$$

Donde:

$\phi_m$  : Flujo magnético suministrado por el imán permanente, en líneas.

$\phi_g$  : Flujo magnético creado en el entrehierro.

$\phi_f$  : Flujo magnético de fuga o dispersión.

Las ecuaciones (41) y (42), pueden ser expresadas de la siguiente manera:

$$H_m \cdot l_m = K_2 \cdot H_g \cdot l_g \dots\dots\dots(43)$$

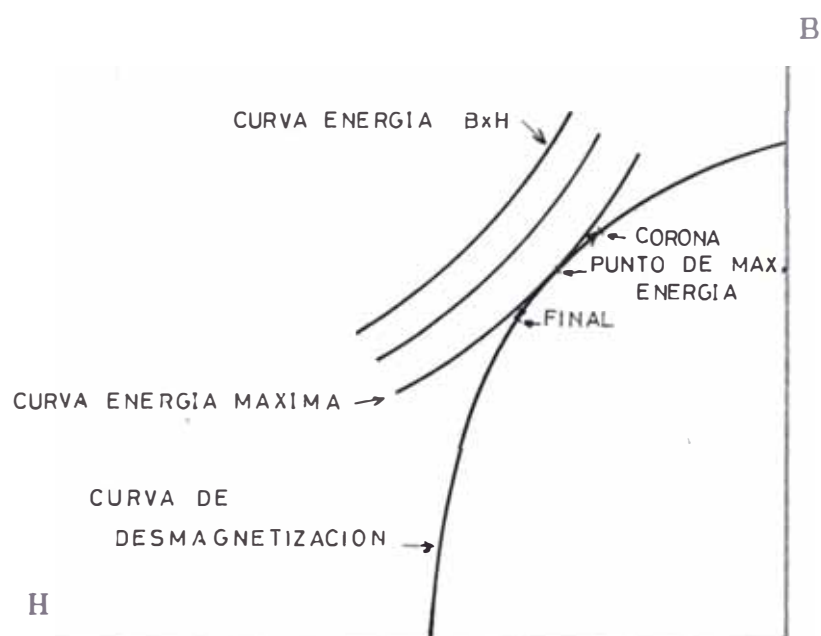
siendo  $K_2$ , el factor de corrección que contempla la caída de reluctancia en la parte de hierro dulce.

$$B_m \cdot A_m = K_1 \cdot B_g \cdot A_g \dots\dots\dots(44)$$

siendo  $K_1$ , el factor de corrección por fuga o dispersión, en las regiones de espacio entre el entrehierro de aire y el imán permanente.

Por lo general, el fabricante trata de obtener el mayor provecho de energía magnética, haciendo que éste trabaje en el punto de máxima energía, el cual es encontrado intersectando la curva de desmagnetización y la curva  $(BH)_{max}$ , como se muestra en la figura siguiente.

Fig. 3.5.6.3.- Puntos de operación real de un imán permanente.



D. Hadfield en su libro "Permanent Magnet and Magnetism", manifiesta que el punto de operación del imán permanente es en realidad un rango de puntos, comprendido entre un punto corona y un punto final, pero que para efectos de cálculos se considera como punto de operación del imán, el punto de máxima energía, en razón de que los errores a cometer no influirán en los resultados.

Bajo éstas consideraciones, las ecuaciones (43) y (44) serían:

$$H_d = \frac{K_2 \cdot H_E \cdot l_E}{l_m} \dots (45) \quad B_d = \frac{K_1 \cdot A_E \cdot B_E}{A_m} \dots (46)$$

Como  $H_E = B_E / \mu_0$ , la ecuación (46) quedaría así:

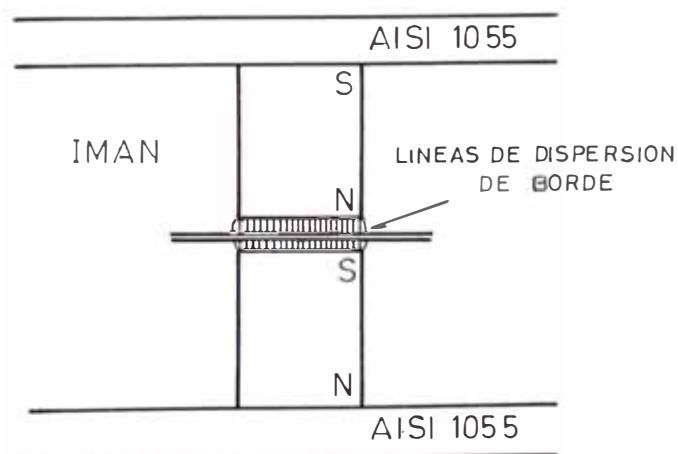
$$H_d = \frac{K_2 \cdot B_E \cdot l_E}{\mu_0 \cdot l_m} \dots (47)$$

Donde  $(B_d, H_d)$  representa el punto de operación en que los imanes suministran la máxima energía magnética.

### 3.5.8.- Efecto de la Dispersión de Borde.

La dispersión de borde describe el ensanchamiento de las líneas de flujo, en el entrehierro de aire de un circuito magnético. La siguiente figura ilustra este efecto.

Fig. 3.5.7.- Efecto de borde en el entrehierro del motor de inducido impreso.



Cuando se calcula la sección del entrehierro, introducimos el factor de borde (f.b.), el cual está en función de la sección del imán permanente. Para un imán de sección circular el f.b. será  $2.l_g$ .

De acuerdo a la figura 3.5.7, el área del entrehierro ( $A_g$ ) será:

$$A_g = \frac{\pi.(d_m + f.b.)^2}{4} \dots\dots\dots(48)$$

Como para un imán de sección circular:

$$f.b. = 2.l_g \dots\dots\dots(49)$$

Por lo tanto:

$$A_g = \frac{\pi.(d_m + 2.l_g)^2}{4} \dots\dots\dots(50)$$

Donde:  $d_m$  : diámetro del magneto.

$l_g$  : longitud del entrehierro.

### 3.5.9.- Determinación del tipo de Alnico usado en el motor de inducido impreso.

Con el propósito de determinar cual de los Alnicos anisotrópicos se aproxima al imán permanente de nuestro caso, deberemos remitirnos a la tabla 3.5.5. con la composición química y el punto  $(B_a, H_a)$ , el cual previamente será calculado bajo condiciones estáticas.

### 3.5.9.1.- Medición de la densidad de campo magnético útil, $B_g$ .

Con el empleo de una punta plana sensora del Gaussímetro Yokogawa, modelo 3251-00, se midió la densidad de campo magnético útil  $B_g$ , en el entrehierro del motor de inducido impreso, cuyo valor fue de 7,100 gauss.

### 3.5.9.2.- Cálculo del factor $K_1$

Como se dijo, el valor  $K_1$  es un factor de corrección, el cual contempla las pérdidas de fuga por dispersión. Para el cálculo de este factor, se han desarrollado fórmulas empíricas y métodos gráficos, siendo la más usada la planteada por Maynard y Tenzer, en razón de su mayor exactitud que llega al orden del +10%.

Las fórmulas de Maynard y Tenzer se aplican para diferentes configuraciones de los imanes permanentes, sin interesar el tipo de imán que se trate.

Para la configuración mostrada en el ítem 3.5.5, Maynard y Tenzer plantean la siguiente fórmula:

$$k_1 = 1 + \frac{l_g}{A_g} \left( 1.1 \cdot U_a \cdot \frac{0.67 \cdot l_m}{0.67 \cdot l_m + l_g} \right) \left( 1 + \frac{l_g}{l_m} \right) \dots (51)$$

Donde

$l_g$  : Longitud del entrehierro entre dos caras polares.



$A_g$  : Área efectiva en el entrehierro.

$l_m$  : Longitud del imán

$U_a$  : Perímetro de la sección transversal del imán =  $\pi \cdot d_m$

$d_m$  : Diametro del imán.

Se sabe que :  $l_g=0.38$  cm. ;  $d_m=5.4$  cm.

$l_m=3.55$  cm.

$$A_g = \frac{\pi(d_m + 2l_g)^2}{4} = 29.8 \text{ cm}^2 \quad (\text{Ver ecuac.48})$$

$$U_a = \pi \cdot d_m = 16.96 \text{ cm}^2$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (51), se tiene:

$$K_1 = 1.227 \quad (*)$$

(\*) El valor de  $K_1$  es adimensional.

### 3.5.9.3.- Cálculo del factor $K_2$ .

Según Megaw, el factor de corrección  $K_2$  para imanes de sección circular con, diametro  $d_m$  y entrehierro  $l_g$ , puede ser calculado como:

$$K_2 = 1 + l_g/5d_m \dots\dots(52)$$

Conociendose que:  $l_g = 0.38$  cm. ;  $d_m = 5.4$  cm., se tiene que:

$$K_2 = 1.014 \quad (*)$$

(\*) El valor de  $K_2$  es adimensional.

#### 3.5.9.4.- Cálculo de los parámetros $B_a$ y $H_a$ .

$$\text{Como: } A_m = \pi \cdot d_m^2 / 4 \quad \pi \cdot 5.4^2 / 4 = 22.9$$

$$A_m = 22.9 \text{ cm}^2 \quad ; \quad l_m = 3.55 \text{ cm.}$$

De la ecuación (46), se tendrá:

$$B_a = \frac{1.227 \cdot 7100 \cdot 29.8}{22.9} = 11,336.6 \text{ Gauss}$$

$$B_a = 11,340 \text{ Gauss.}$$

De la ecuación (47), se obtiene:

$$H_a = \frac{1.014 \cdot 7100 \cdot 0.38}{1 \cdot 3.55} = 770.64 \text{ Oersted.}$$

$$H_a = 770 \text{ Oersted.}$$

#### 3.5.9.5.- Selección del Alnico empleado.

Con la composición química:

$$\text{Al : 7.37\%} \quad \text{Ni : 13.75\%}$$

$$\text{Co : 25.44\%} \quad \text{Cu : 2.8\%}$$

y, con los valores de  $B_a = 11,340$  Gauss y  $H_a = 770$  Oersted, se ingresa a la Tabla 3.5.5., obteniéndose que el imán empleado para el motor de inducido impreso es el COLUMAX

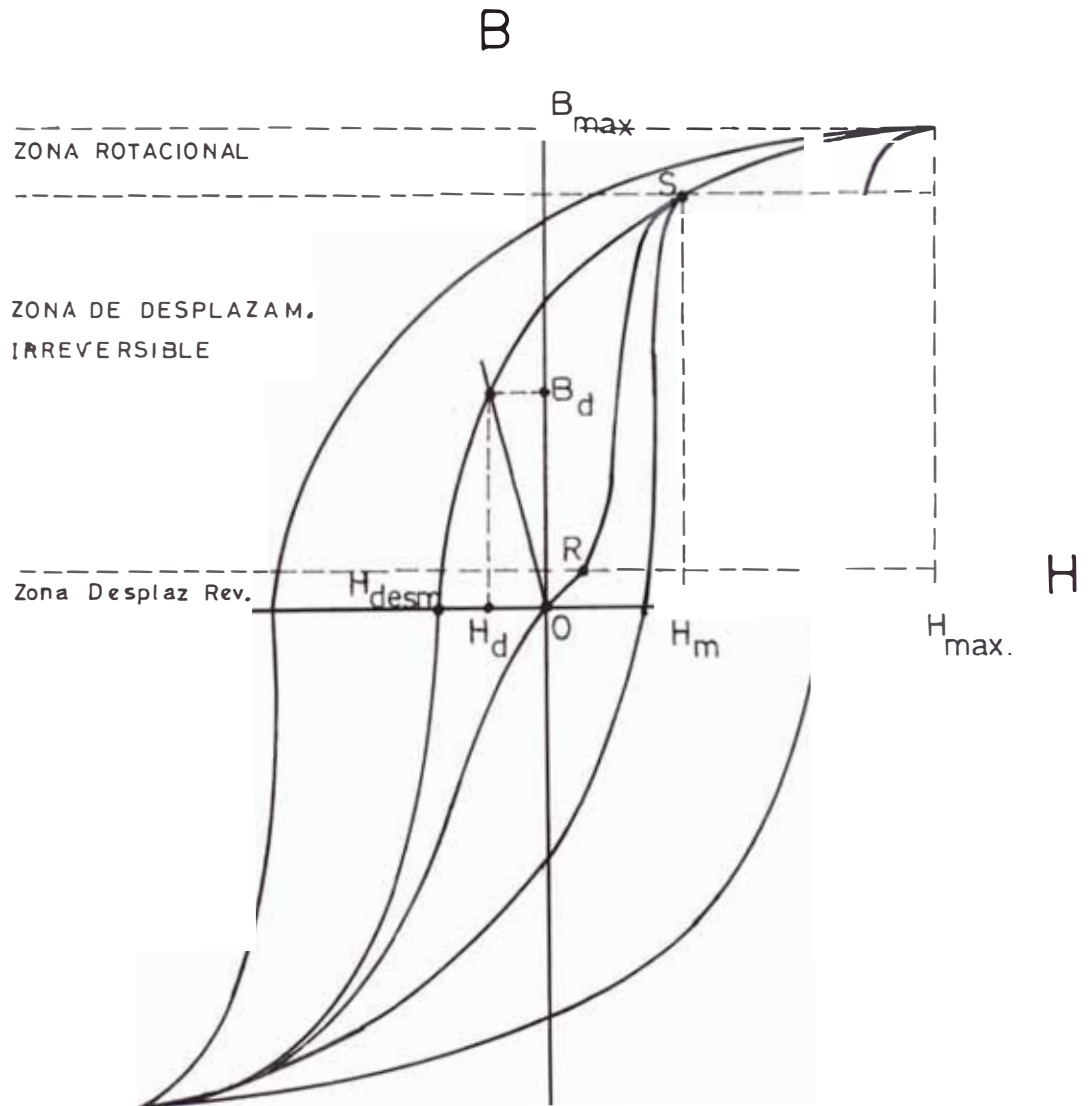
### 3.5.10.- Conceptos teóricos sobre Magnetización y Desmagnetización de Imanes Permanentes.

#### 3.5.10.1.- Magnetización.

La teoría de magnetización de los materiales ferromagnéticos, sugerida en 1907 por Weiss y aceptada hoy en día, explica la existencia de algunas regiones o dominios en éstos materiales. Dichos dominios son regiones microscópicas en un material ferromagnético, donde los movimientos magnéticos están todos orientados en la misma dirección, aun en la ausencia de campos externos.

La magnetización solo llega a ser evidente cuando un campo magnético es aplicado. Ello, no es debido a una intensidad incrementada de magnetización, sino al cambio de dirección de los dominios individuales. La relación característica entre magnetización de un cuerpo ferromagnético ( $B$ ) y campo magnetizante ( $H$ ), es mostrada en la siguiente figura.

Fig. 3.5.10.1.-Curva de magnetización y lazos de histéresis para campos magnetizantes.



La curva B-H, es naturalmente dividida en tres zonas, por puntos convencionalmente conocidos como el inicio y la rodilla ó codo. La primera zona de la curva, es conocida como "Zona de desplazamiento reversible", en razón de que los dominios del material ferromagnético se alinean en diferentes direcciones y en forma desordenada.

Esta zona está comprendida entre el punto de origen "O", y el punto de inicio "R".

La segunda zona de la curva, es conocida como la "Zona de desplazamiento irreversible", porque al ser sometido el material ferromagnético a un campo magnético externo, una gran parte de sus dominios se alinean en la dirección del campo aplicado. Esta zona está comprendida entre el punto de inicio "R", y el punto de rodilla "S".

La tercera zona, es conocida como la "Zona rotacional", porque todos los ejes de los dominios se alinean en la misma dirección del campo aplicado. Esta zona está comprendida entre el punto de rodilla "S", y el punto "T". Cuando un material ferromagnético llega al límite de esta zona, se dice que está saturado.

Para magnetizar los imanes permanentes del motor de inducido impreso, se suministrará un campo magnetizante a través de las bobinas de magnetización y desmagnetización del motor. En el ítem 3.5.15, se explicará en detalle el proceso de magnetización empleado.

En la siguiente tabla se mostrarán los fuertes campos magnetizantes, necesarios para saturar los materiales magnéticos comunmente usados.

Tabla 3.5.10.1.- Coercitividad y Campos Magnetizantes de imanes permanentes.

IMAN PERMANENTE	COERCITIVIDAD	CAMPO MAGNETIZANTE
Imanes de acero	Por encima de $2 \times 10^4$ Amp-V/m. (250 Oerstedes)	$8 \times 10^4$ Amperios-V/m. (1000 Oerstedes)
Aleaciones Alnico Isotrópicos	$4 \times 10^4 - 5.6 \times 10^4$ Amperios-V/m. (500-700 Oe.)	$2 \times 10^5$ Amperios-V/m. (2500 Oerstedes)
Aleaciones Alnico Anisotrópicos	$4 \times 10^4 - 5.6 \times 10^4$ Amperios-V/m. (500-700 Oe.)	$1.6 \times 10^5$ Amperios-V/m. (2000 Oerstedes)
Aleaciones Alnico Anisotrópicos	$5.6 \times 10^4 - 6.6 \times 10^4$ Amperios-V/m. (700-825 Oe.)	$1.75 \times 10^5$ Amperios-V/m. (2200 Oerstedes)
Aleaciones Alnico Isotrópicos	$6 \times 10^4 - 7.6 \times 10^4$ Amperios-V/m. (750-960 Oe.)	$3.5 \times 10^5$ Amperios-V/m. (4400 Oerstedes)
Aleaciones Alnico Anisotrópicos	$7.5 \times 10^4 - 9.5 \times 10^4$ Amperios-V/m. (940-1200 Oe.)	$4 \times 10^5$ Amperios-V/m. (5000 Oerstedes)
Aleaciones Cobalto Platino	$3.8 \times 10^5$ Amperios-V/m. (4800 Oerstedes.)	$1.6 \times 10^6$ Amperios-V/m. (20000 Oerstedes)
Ferritas de Bario, Isotrópicos ó Anisotrópicos	$1.2 \times 10^5 - 1.6 \times 10^5$ Amperios-V/m. (1500-2000 Oe.)	$8.7 \times 10^5$ Amperios-V/m. (11000 Oerstedes)

Nota : Esta tabla ha sido obtenida del libro "Permanent Magnet and Magnetism" D. Hadfield.

### **3.5.10.2.- Desmagnetización.**

La desmagnetización será de interés para el usuario, cuando le sea necesario desmontar los imanes, pero en cambio, para el fabricante es un problema, dado a que en la fabricación de los imanes permanentes, el proceso de desmagnetización permitirá una fácil maniobrabilidad en el maquinado y en las mediciones a realizar.

Desmagnetización, implica someter al imán permanente a campos magnetizantes negativos, usando en forma sucesiva valores reducidos de H. De esta manera, el imán atraviesa pequeños lazos de histéresis, hasta que H alcance el valor de CERO (B también se acerca a cero). En ese instante se puede decir, que el imán ha sido desmagnetizado

La desmagnetización de los imanes permanentes del motor de inducido impreso, se realizará invirtiendo la polaridad en el suministro del campo magnetizante a las bobinas de magnetización y desmagnetización. En el ítem 3.5.15 se explicará en detalle el proceso de desmagnetización empleado.

### **3.5.10.3.- Estabilidad Magnética.**

La variación de las cualidades magnéticas en el imán son originadas por, incrementos de temperatura,

campos magnéticos externos, shocks mecánicos y vibraciones.

#### **3.5.10.3.1.- Incrementos de temperatura.**

Las aleaciones Alnico, pueden trabajar a temperaturas del orden de los 500°C, sin que se altere sus características estructurales internas, y por ende sus cualidades magnéticas. Al someterse el imán a temperaturas por encima de los 500°C, se producen variaciones en su estructura interna.

#### **3.5.10.3.2.- Efectos por campos magnéticos externos.**

Los campos magnéticos externos, varían las características magnéticas de los imanes para los cuales fueron diseñados, razón por la cual se recomienda no someter a los imanes a campos magnéticos externos.

#### **3.5.10.3.3.- Efectos por golpes mecánicos y vibración.**

Los imanes no deben estar sometidos a golpes o vibraciones, porque esto conllevaría a la disminución de la densidad e intensidad del campo magnético.

#### **3.5.11.- Formas de magnetizar y desmagnetizar imanes permanentes.**

Hay muchas formas de magnetizar y desmagnetizar imanes permanentes. El campo magnetizante para el magnetizado, puede ser entregado por un imán permanente,



por un electromagneto, un simple solenoide o bobina, y es mantenido solo por poco tiempo, puesto que la magnetización es virtualmente instantánea. Por lo general, la ubicación, la forma y el tipo del imán, darán las pautas para el uso de un magnetizador adecuado.

Los imanes permanentes del motor de inducido impreso, emplean el método magnetizante y desmagnetizante por solenoides o bobinas, por las cuales circula una corriente de muy alto valor, en un breve período de tiempo, la cual origina pulsos magnetizantes o desmagnetizantes, dependiendo de la conexión realizada. La magnitud de esta corriente, se eleva y decrece exponencialmente con el tiempo.

La fuente de corriente conectada a las bobinas, pueden ser un transformador de impulso, un ignitrón con un circuito de control de medio ciclo, o un banco de condensadores.

#### **3.5.12.- Características de la bobina magnetizadora y desmagnetizadora de los imanes permanentes.**

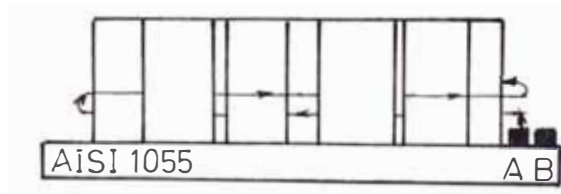
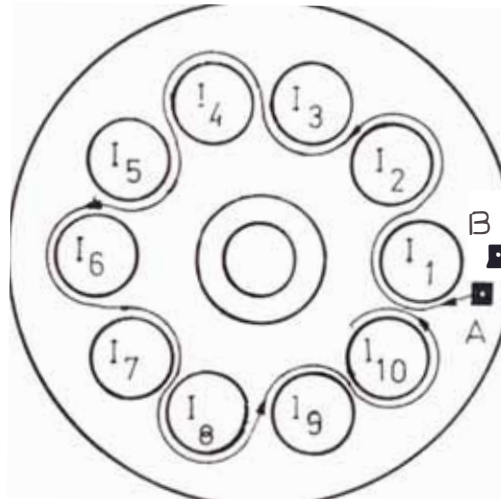
El motor de inducido impreso tipo CEM.MF-26 posee características de diseño bien definidas por el fabricante, cuyos principales componentes pueden observarse en la figura 2.3.1.1..

Como se dijo en el capítulo 2, cada corona está formada por diez imanes permanentes, cuyas caras van montadas en forma simétrica con las correspondientes a los imanes de la otra corona, siendo envuelta cada corona por una bobina, consistente en un conductor de cobre calibre 16 AWG, con aislamiento P.V.C.. El devanado con que envuelve la bobina a cada corona, es del tipo Espiral de Rovovsky, la cual se muestra en la figura 3.5.12.1..

Este devanado se formará de la siguiente manera: El conductor se desplazará en forma alternada, entre la parte exterior e interior de cada imán. Al llegar al último imán retornará por los mismos imanes recorridos, completando una vuelta por imán. La bobina se formará en su totalidad, cuando el conductor realice la misma operación por cuatro veces consecutivas. De lo manifestado, se puede concluir que cada imán permanente tiene cuatro vueltas.

El devanado Espiral tipo Rovovsky permite, que las operaciones de magnetizado o desmagnetizado de los imanes permanentes se realicen en forma conjunta y uniforme, para lo cual es necesario que las bobinas de las coronas, se conecten en paralelo. Además, dicho devanado permite un buen confinamiento del campo magnético en los imanes permanentes, haciendo que las pérdidas por dispersión sean mínimas.

Fig. 3.5.12.1.- El Devanado tipo Rovovsky.



### 3.5.13.- Selección del magnetizador y desmagnetizador de imanes permanentes.

La corriente máxima, que puede conducir la bobina de una corona de imanes permanentes, trabajando en forma continua, es de aproximadamente 20 amperios. Por lo tanto, el campo magnetizante máximo que pueda proporcionar una fuente de energía eléctrica a la bobina, es:

$$H_n = \frac{I_n \cdot n \cdot 0.01257}{l_m} \dots\dots\dots(53)$$

$H_n$  : Campo magnetizante máximo que se puede entregar a los imanes permanentes, a través de la bobina magnetizadora en Oersted.

$I_n$  : Corriente admisible de la bobina, en amperios.

$n$  : Número de vueltas.

$l_m$  : Longitud del imán, en metros.

Como:  $I_n = 20$  amperios ,  $n = 4$  vueltas ,  
 $l_m = 0.0355$  m.

Reemplazando estos valores en la ecuación (53), se obtiene:

$$H_n = 28.3 \text{ Oersted.}$$

Este campo magnetizante es insuficiente, si se compara con los campos magnetizantes de la Tabla 3.5.10.1, por lo que se desecha la idea de que los imanes permanentes del motor de inducido impreso, puedan ser magnetizados con el campo suministrado por una fuente de energía eléctrica, conectado a la bobina de los imanes, y operando en forma continua.

Por lo manifestado, se concluye que la energía necesaria para magnetizar y desmagnetizar imanes Alnico anisotrópicos, es del tipo pulsante, es decir que se

requiere de una elevada corriente por un breve período de tiempo.

Entre los tipos de magnetizadores de imanes permanentes vistos en el ítem 3.5.11., se escoge el magnetizador a través de condensadores. La elección se justifica por la versatilidad que presenta, en razón de que variando los valores de tensión o capacidad, se podrán obtener diferentes cargas eléctricas, no requiriendo para tal efecto diseños o instalaciones exigentes, como sí lo requerirían el transformador de impulsos o el ignitrón.

#### **3.5.14.- Estimación de la corriente magnetizante y desmagnetizante.**

Como el equipo para magnetizar y desmagnetizar los imanes permanentes, estará constituido por un banco de condensadores, las principales características a considerar para su selección, serán el voltaje y la capacidad total, que en conjunto determinará la carga eléctrica necesaria para cumplir el cometido mencionado.

La determinación de las cargas eléctricas para el magnetizado, desmagnetizado y saturación del material ferromagnético, serán realizadas en forma experimental, partiendo de la estimación de la corriente magnetizante, la cual es mayor que la corriente desmagnetizante en

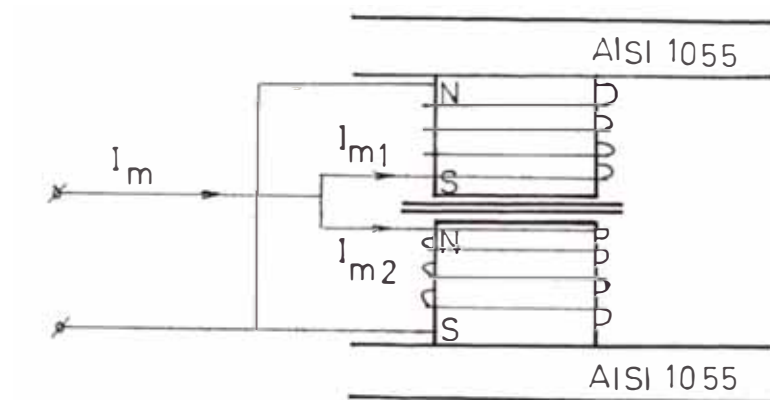
razón de que el  $H_{desm}$  es menor que el  $H_{mag}$ . (Ver fig. 3.5.10.1). Por lo tanto bastará con estimar la corriente magnetizante.

De la tabla 3.5.10.1, puede observarse que el campo magnetizante para saturar el imán permanente tipo Alnico anisotrópico, es de  $1.75 \times 10^5$  amperios-Vuelta/metro ó 2200 Oersted, para una coercitividad comprendida entre 700-825 Oersted.

Si bien es cierto, que en la tabla 3.5.10.1. no se especifica el tipo de configuración, para la cual esta información deba ser aplicado, se asumirá que el campo magnetizante requerido para magnetizar los imanes permanentes será de 2200 Oersted.

En la siguiente figura se muestra, la forma de conexión de las bobinas de magnetización y desmagnetización para el proceso de magnetizado.

Fig. 3.5.14.1.- Conexión de las bobinas de magnetización en el proceso de magnetizado.



De la figura se observa también, que la corriente de magnetización se divide en dos corrientes magnetizantes iguales  $I_{m1}$ , e  $I_{m2}$ , cuyas expresiones pueden ser obtenidas de la ecuación (53). Es decir:

$$I_{m1} = \frac{H_m \cdot l_m}{n \cdot 0.01257} \dots \dots \dots (54)$$

Donde:  $H_m = 2200$  Oersted ;  $l_m = 0.0355$  m.

$n = 4$  vueltas.

Reemplazando estos valores en la ecuación (54), se obtiene:

$$I_{m2} = I_{m1} = 776.65 \text{ amperios.}$$

Esto significa, que la corriente  $I_m$  para magnetizar las dos coronas de imanes permanentes, es de aproximadamente 1553.3 amperios.

Con un multímetro digital y un medidor de inductancias, se logró medir la resistencia e inductancia de cada corona, resultando  $R_{m1} = R_{m2} = 0.4$  ohmios, y  $L_{m1} = L_{m2} = 30$  microhenrios.

La tensión de carga de los condensadores, es calculada despreciando la inductancia de la corona, en razón de su valor pequeño. Por lo que:

$$V_c = I_{m1} \cdot R_{m1} \dots(55)$$

Reemplazando valores en la ecuación (55), resulta:

$$V_c = 776.65 \times 0.4$$

$$V_c = 310.6 \text{ voltios.}$$

### 3.5.15.- Determinación de las cargas electricas $Q_D$ , $Q_M$ y $Q_S$ .

$Q_S$ .

Para determinar las cargas eléctricas  $Q_D$ ,  $Q_M$  y  $Q_S$ , se realizaron pruebas experimentales con la ayuda de un circuito prototipo, conformado principalmente por: la fuente de tensión continua variable, que alimenta a los



condensadores; los condensadores, que almacenan las cargas eléctricas para realizar los procesos de desmagnetizado, magnetizado y saturación de los imanes permanentes; y los diodos SCR, que controlarán los elevados impulsos de corriente, originados por la descarga eléctrica de los condensadores sobre los imanes permanentes.

Los condensadores mas aconsejables para estos procesos son los electrolíticos de corriente continua, cuya selección está en función de la carga eléctrica que puedan almacenar, cumpliendose la siguiente ecuación:

$$Q = C \cdot V \dots\dots\dots(56)$$

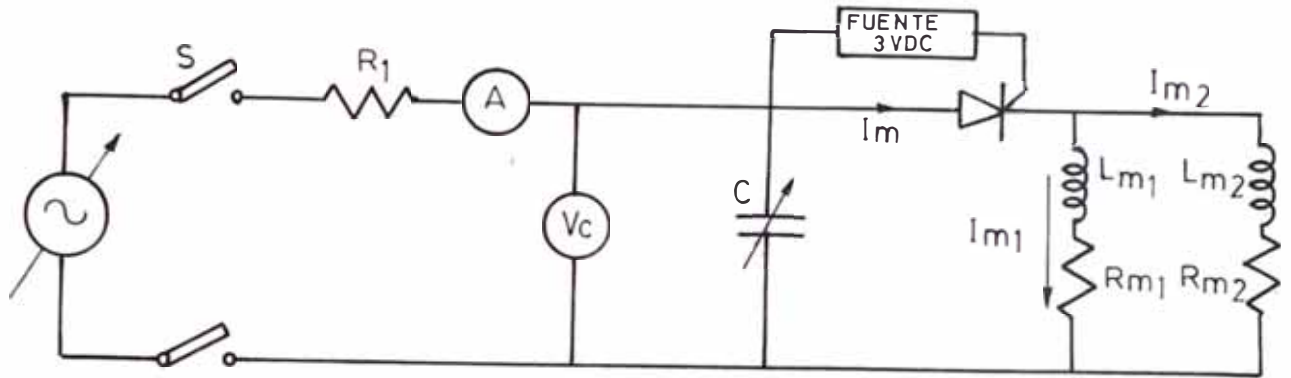
Donde:

- Q : Carga eléctrica de los condensadores, en coulombs.
- C : Capacitancia eléctrica, en faradios.
- V : Tensión de carga, en voltios.

### **3.5.15.1.- Preparación del circuito eléctrico para el magnetizado , desmagnetizado y saturación de los imanes permanentes.**

En la siguiente figura, se mostrará el prototipo de circuito eléctrico empleado, para las pruebas experimentales, las cuales determinarán las cargas eléctricas para : el magnetizado, desmagnetizado y saturación de los imanes permanentes.

Fig. 3.5.15.1.- Prototipo de circuito eléctrico empleado en el magnetizado y desmagnetizado de imanes permanentes.



Los componentes del circuito prototipo, serán seleccionados considerando la tensión de carga de 310 voltios y una corriente de 1550 amperios. Dichos componentes, son los siguientes:

- \* Una fuente variable de 0-500 Voltios D.C.
- \* Una llave cuchilla de 25 amperios.
- \* Una resistencia variable de 100 ohmios-50 watts.
- \* Un amperímetro de bobina móvil de 0-10 amperios.
- \* Un voltímetro de bobina móvil de 0-500 voltios.
- \* Cincuenta condensadores electrolíticos de 2100 microfaradios-450 Voltios D.C.

- \* Un diodo SCR ECG 5599, para una corriente  $I_{rms}$  de 1880 amperios.
- \* Una fuente de voltaje de 3 Voltios D.C., para el disparo del gate del diodo SCR.

Las pruebas experimentales fueron efectuadas en el **LABORATORIO DE ELECTRICIDAD** de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería, brindandose en dicho Laboratorio las facilidades del uso, del Gaussímetro Yokogawa, del instrumental y componentes señalados en la figura 3.5.15.1, a excepción, del diodo SCR, los condensadores electrolíticos y la fuente de 3 Voltios D.C..

### **3.5.15.2.- Determinación de la carga eléctrica de desmagnetización $Q_D$ .**

Se midió con el Gaussímetro, la densidad de campo magnético útil en el entrehierro de un motor operativo, cuya lectura fue de de 7100 gauss.

La desmagnetización de los imanes permanentes se produjo al suministrar, una carga eléctrica pulsante de polaridad invertida a la señalada en la figura 3.5.14.2.. Aumentaremos poco a poco la capacidad de los condensadores electrolíticos, manteniendo constante la tensión de carga en 310 voltios, hasta obtener una densidad de campo magnético útil entre 0-600 gauss,

puesto que entre estos valores, se puede considerar desmagnetizado los imanes del motor. En la siguiente tabla se muestra los resultados de esta experiencia.

Tabla 3.5.15.2.- Valores de Capacitancia ( $C_D$ ) y Densidad de campo magnético útil ( $B_u$ ), durante la desmagnetización.

$C_D$ (faradios)	0-0.0315	0.0336	0.0378	0.0420
$B_u$ (gauss)	7100	6200	4800	3500
	0.0462	0.0504	0.0546	
	2250	1350	600	

De ésta tabla, se puede deducir que para una tensión de carga de 310 voltios, la capacitancia necesaria para iniciar la descarga magnética es de 0.0336 faradios, a la cual le corresponde una carga eléctrica de 10.42 coulombs. De la ecuación (56), la carga eléctrica  $Q_D$  necesaria para lograr una desmagnetización de los imanes permanentes, es:

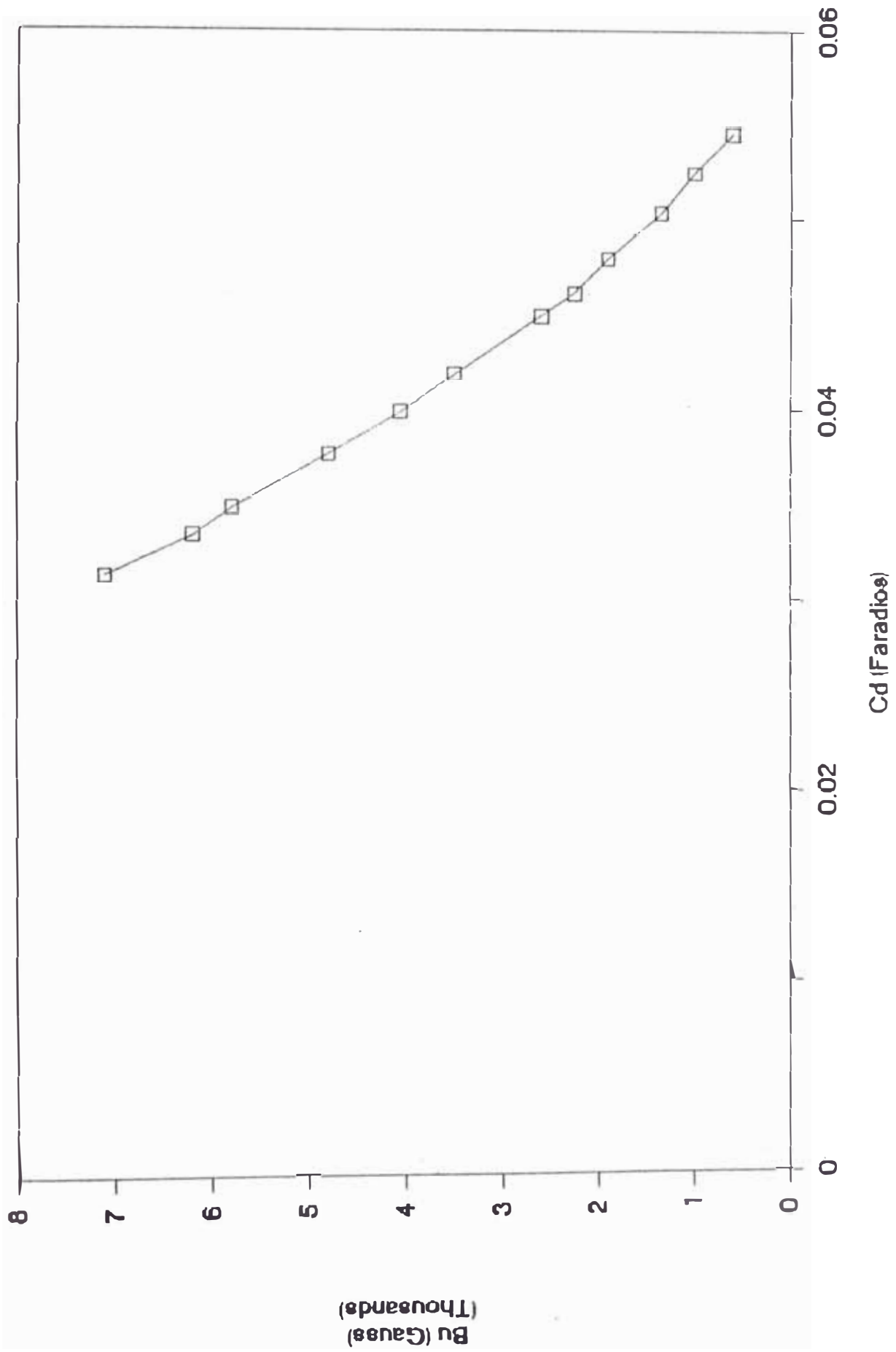
$$Q_D = 0.0546 \cdot 310 = 16.93 \text{ coulombs.}$$

$$Q_D = 17 \text{ coulombs.}$$

En la fig. 3.5.15.2, se muestra gráficamente los resultados de la tabla 3.5.15.2, para cuando los

# CURVA Bu vs. Cd (Vc = 310 v.)

FIG. 3.5.15.2



imanes permanentes del motor de inducido impreso son desmagnetizados.

### 3.5.15.3.- Determinación de la carga eléctrica de magnetización, $Q_M$ .

La magnetización de los imanes permanentes del motor de inducido impreso, se produce al suministrar una carga eléctrica pulsante de igual polaridad al que se indica en la figura 3.5.14.2.. Se aumenta poco a poco, la capacidad de los condensadores manteniendo constante la tensión de carga, hasta obtener la densidad de campo magnético útil de 7100 gauss.

En la siguiente tabla, se muestra los resultados de esta experiencia.

Tabla 3.5.15.3.- Valores de Capacitancia ( $C_M$ ) y Densidad de campo magnético útil ( $B_U$ ), durante la magnetización.

$C_M$ (faradios)	0-0.0335	0.0336	0.0378	0.0406	
$B_U$ (gauss)	600	650	750	900	
	0.054	0.0609	0.0672	0.078	0.0846
	1400	2200	3500	5500	6100
			0.101	0.105	
			7000	7100	

De ésta tabla, se puede deducir que para una tensión de carga de 310 voltios, la capacitancia necesaria para iniciar la magnetización es de 0.0336 faradios, correspondiéndole una carga eléctrica de 10.42 coulombs.

De la ecuación (56), la carga eléctrica necesaria  $Q_M$ , para magnetizar los imanes permanentes es:

$$Q_M = 0.105 \times 310 = 32.55 \text{ coulombs.}$$

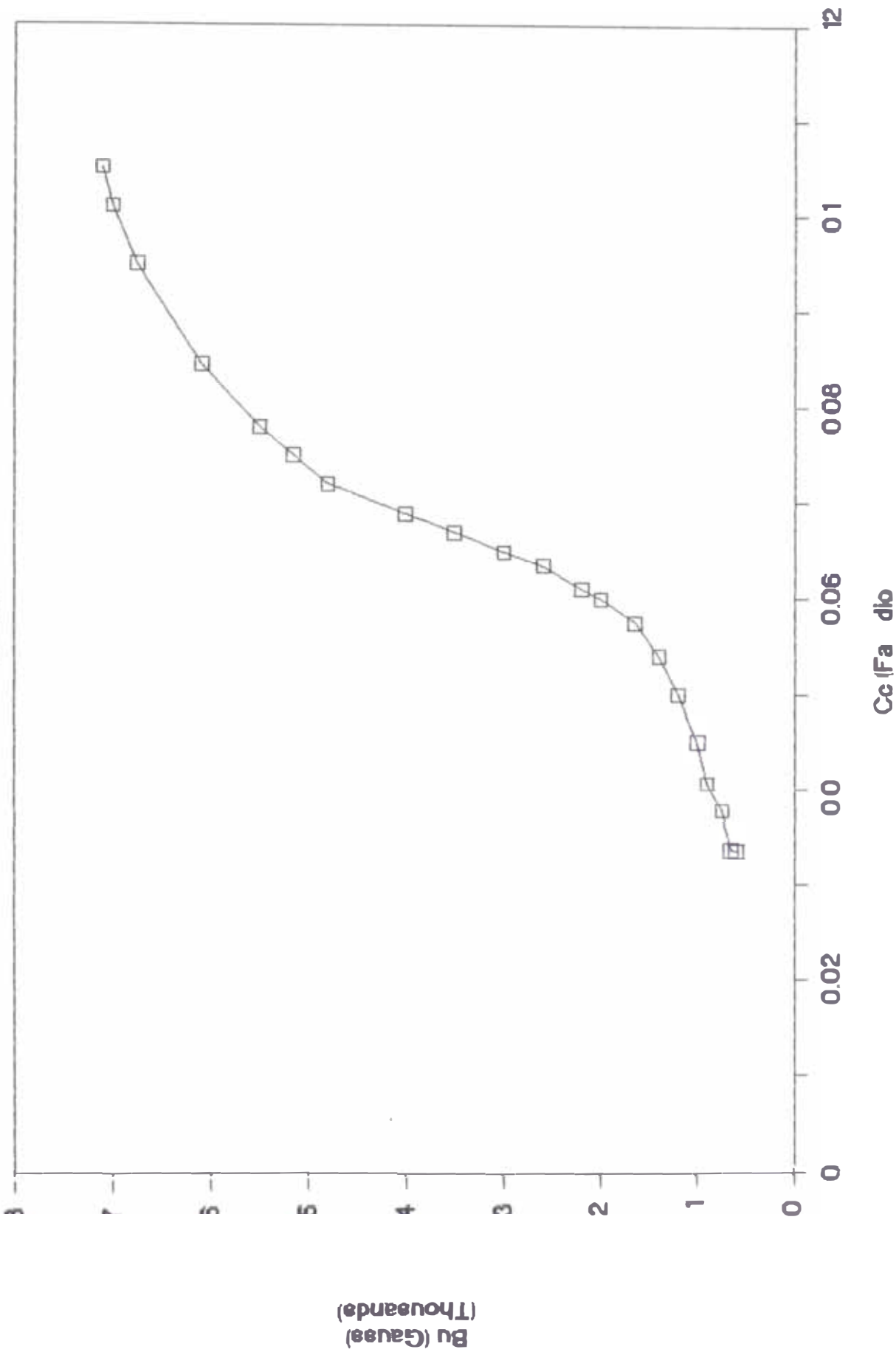
$$Q_M = 32.6 \text{ coulombs.}$$

En la figura 3.5.15.3, se muestra el desarrollo gráfico de la tabla 3.5.15.3, para cuando los imanes permanentes del motor de inducido impreso son magnetizados.

Para la elaboración de las tablas 3.5.15.2 y 3.5.15.3, no ha habido carencia de carga eléctrica, en razón de que se han empleado 50 condensadores electrolíticos, de 0.0021 faradios-450 voltios D.C. c/u, y que al conectarseles en paralelo producen una capacitancia total de 0.105 Faradios, con una carga eléctrica nominal de 47.25 coulombs, satisfaciendo los requerimientos exigidos en las pruebas.

# CURVA Bu vs. Cm (Vc = 310 v.)

FIG. 3.5.15.3.





#### 3.5.15.4.- Magnetización y Desmagnetización a capacitancia constante y tensión de carga variable.

Una de las alternativas que suele emplearse para el magnetizado y desmagnetizado de los imanes permanentes, es mantener constante la capacitancia en el banco de condensadores y, variar la tensión de carga. Esta alternativa permite una mayor maniobrabilidad, sin necesidad de realizar desconexiones en el banco de condensadores, fijándose para ello, los valores de tensión y corriente para cada operación. Considerando:  $Q_M = 32.6$  coulombs. ·  $Q_D = 17$  coulombs.  $C = 0.105$  faradios.; tiempo de la descarga eléctrica =  $R.C = 0.021$  seg; se tendrá:

\* Para la magnetización.

De la ecuación (56) :

$$V_M = Q_M/C = 310 \text{ voltios.}$$

$$I_M = Q_M/t = Q_M/R.C = 1550 \text{ amperios.}$$

Para la desmagnetización.

De la ecuación (56) ·

$$V_D = Q_D/C = 162 \text{ voltios.}$$

$$I_D = Q_D/t = Q_D/R.C = 806 \text{ amperios.}$$

Los valores de corriente y voltaje necesarios para la magnetización, son mayores a los valores que corresponden a la desmagnetización.

### 3.5.15.5.- Determinación de la carga eléctrica de saturación, $Q_s$ .

Para saturar los imanes permanentes en el motor de inducido impreso, se mantendrá constante la capacitancia en 0.105 faradios, variándose la tensión de carga. Se iniciará esta experiencia, con una densidad de campo útil en el entrehierro de 600 gauss. En la siguiente tabla, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.5.15.5.- Densidad de campo útil( $B_u$ ) a diferentes tensiones de carga.

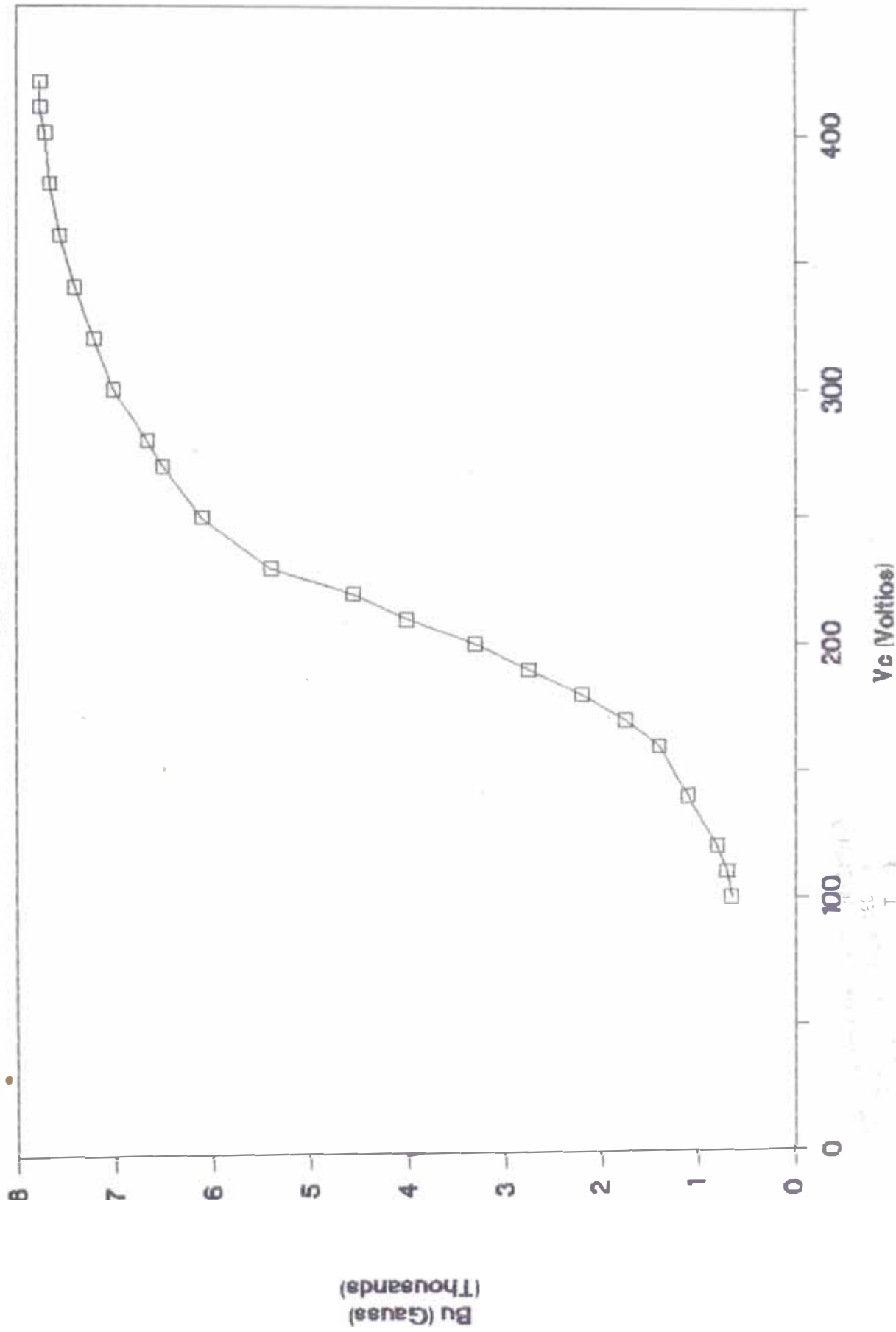
$V_c$ (volt.)	100	110	120	160	180
$B_u$ (gauss)	650	700	800	1400	2200
	200	230	250	280	300
	3300	5400	6100	6650	7000
	340	360	380	400	410
	7400	7550	7650	7700	7750

En ésta tabla, se observa que la tensión de saturación ocurre para una tensión de 410 voltios, y para una densidad de campo magnético de 7750 gauss.

En la figura 3.5.15.5 se muestra la representación gráfica de la tabla 3.5.15.5.

# CURVA Bu vs. Vc (C = 0.105 F)

FIG. 3.5.15.5.



De la ecuación (56), la carga de saturación

$Q_s$  es:

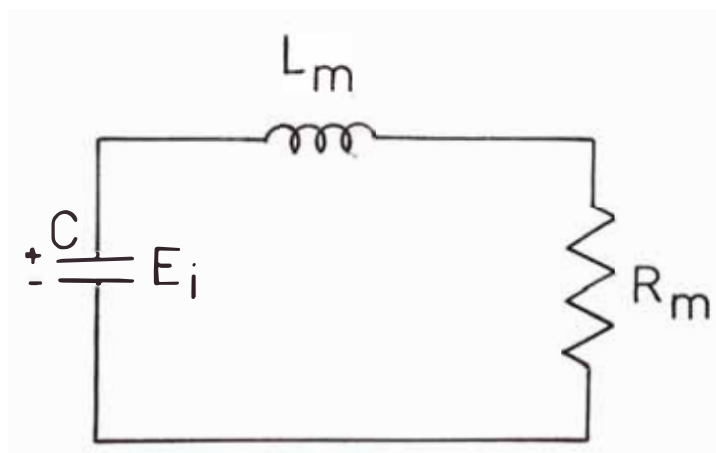
$$Q_s = 0.105 \cdot 410 = 43 \text{ coulombs.}$$

$$Q_s = 43 \text{ coulombs.}$$

### 3.5.16.- Análisis de la corriente magnetizante y desmagnetizante.

El objeto de éste análisis, es verificar el comportamiento de la corriente pulsante durante los procesos de magnetizado y desmagnetizado de los imanes permanentes. La siguiente figura mostrará el circuito RLC, equivalente al circuito conformado por los imanes, los cuales son estimulados por un almacenaje inicial de energía, dado por los condensadores.

Fig. 3.5 16.1.- Circuito RLC estimulado por un almacenaje inicial de energía.



Donde:  $E_1$  , es la energía inicial almacenada en los condensadores.

$R_m$  , es la resistencia equivalente de los imanes permanentes e igual a 0.2 ohms.

$L_m$  , es la inductancia equivalente de los imanes permanentes e igual a  $30 \times 10^6$  hy.

$C$  , es la capacitancia del banco de condensadores, la cual es 0.105 F.

La ecuación diferencial para el circuito de la figura 3.5.16.1. es :

$$L_m (di/dt) + R_m.i + 1/C \int_{\infty}^t (i dt) = 0 \dots(57)$$

$$L_m (d^2i/dt^2) + R_m (di/dt) + i/C = 0 \dots(58)$$

Los valores iniciales son determinados por la energía almacenada en la inductancia y capacitancia.

$$\begin{aligned} \text{Para } t=0: \quad i(0) &= I_1 \\ i'(0) &= 0 \end{aligned}$$

La ecuación (57) quedaría como:

$$L_m ( di(0)/dt ) + R_m.i(0) + E_o = 0 \dots(59)$$

$$\text{Donde resulta que: } E_o = I_1 . R_m \dots\dots\dots(60)$$

La ecuación (58) es una ecuación diferencial de segundo orden, la cual necesita dos constantes arbitrarias para su desarrollo y cuya solución se puede plantear de la siguiente forma:

$$i(t) = A_1 \cdot \epsilon^{p_1 t} + A_2 \cdot \epsilon^{p_2 t} \dots \dots \dots (61)$$

donde A y p, son las constantes señaladas.

La primera y segunda derivada de la ecuación (61), serán:

$$di/dt = A_1 \cdot p_1 \cdot \epsilon^{p_1 t} + A_2 \cdot p_2 \cdot \epsilon^{p_2 t} \dots \dots \dots (62)$$

$$d^2i/dt^2 = A_1 \cdot p_1^2 \cdot \epsilon^{p_1 t} + A_2 \cdot p_2^2 \cdot \epsilon^{p_2 t} \dots \dots \dots (63)$$

Sustituyendo las ecuaciones (62) y (63) en la ecuación (58), permite obtener:

$$A_1 \cdot \epsilon^{p_1 t} (L_m \cdot p_1^2 + R_m \cdot p_1 + 1/C) + A_2 \cdot \epsilon^{p_2 t} (L_m \cdot p_2^2 + R_m \cdot p_2 + 1/C) = 0 \dots (64)$$

si se quiere tener una solución de segundo orden. los términos entre paréntesis deben ser cero.

Así cada una de las p, satisfacería una ecuación de la forma:

$$p^2 + R_m \cdot p/L_m + 1/L_m \cdot C = 0 \dots \dots (65)$$

Los dos valores de p son:

$$p_{1,2} = -R_m/2L_m + \sqrt{(R_m/2L_m)^2 - (1/L_m \cdot C)}$$

$$p_{1,2} = -X \pm \sqrt{X^2 - W_0^2} \dots \dots \dots (66)$$

$$\text{Donde: } X = R_m/2L_m \quad W_o = \sqrt{1/L_m \cdot C}$$

Reemplazando los valores de  $R_m$ ,  $L_m$  y  $C$  en las ecuaciones anteriores, se obtiene:

$$X = 3333.33 \quad W_o = 563.44$$

De aquí, se observa que  $X \geq W_o$ , por lo que podemos afirmar que la ecuación (58) se trata de un caso de **SOBREAMORTIGUAMIENTO**.

Reemplazando los valores de  $X$  y  $W_o$  en la ecuación (66), se tiene:  $p_1 = -47.96$   $p_2 = -6618.7$

Los valores de  $A$  serán determinados para las condiciones iniciales, y empleando las ecuaciones (61) y (62). Es decir:

$$i(0) = I_1 = A_1 + A_2 \quad \dots\dots\dots(67)$$

$$i'(0) = 0 = A_1 \cdot p_1 + A_2 \cdot p_2 \quad \dots\dots\dots(68)$$

Resolviendo las ecuaciones, resulta:

$$A_1 = p_2 \cdot I_1 / (p_2 - p_1) \quad A_2 = -p_1 \cdot I_1 / (p_2 - p_1)$$

Reemplazando los valores de  $p_1$  y  $p_2$  en éstas dos últimas ecuaciones, se tiene:

$$A_1 = 1.0073 \quad A_2 = -0.0073$$

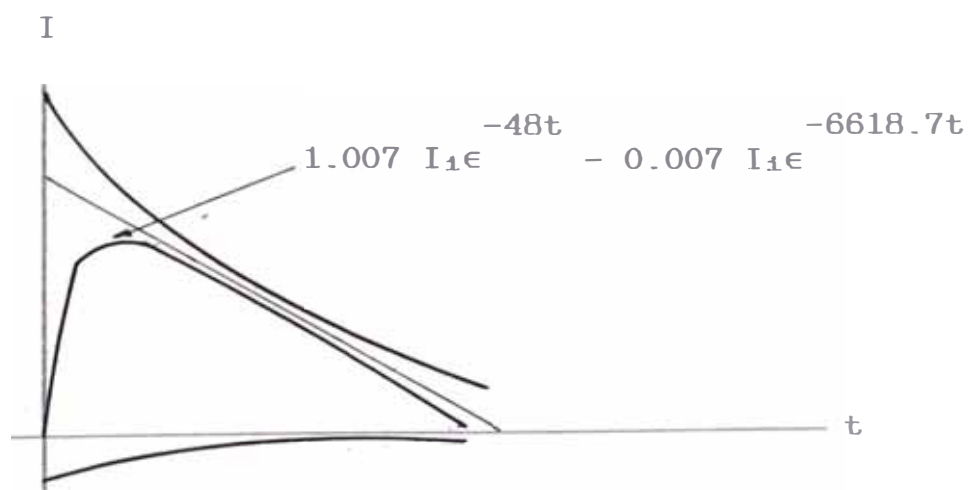
La ecuación (60) quedaría como:

$$i(t) = 1.0073 I_1 e^{-48t} - 0.0073 I_1 e^{-6618.7t} \quad \dots\dots(69)$$

El valor de  $I_1$  será encontrado de la ecuación (60), donde el valor de  $E_0$  a reemplazar dependerá si el proceso es de magnetización o desmagnetización. En el ítem 3.5.15.4., se determinó que la tensión  $E_0$  para la magnetización es 310 voltios, mientras que la tensión  $E_0$  para la desmagnetización es 161 voltios, ambas para una capacidad constante de 0.105 faradios.

En la siguiente figura, se muestra la representación gráfica de la corriente pulsante, expresada en la ecuación (69), la cual es válida para ambos procesos.

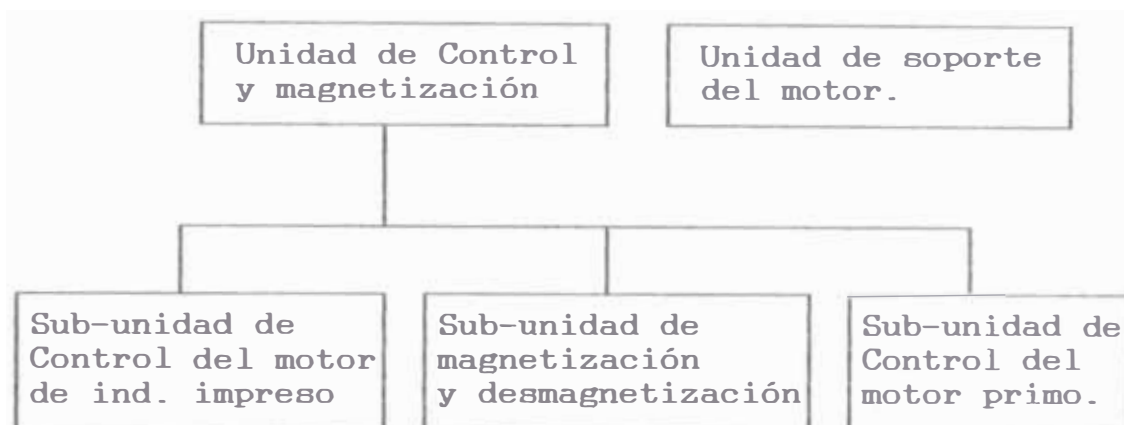
Fig. 3.5.16.2.- Representación de la corriente pulsante.





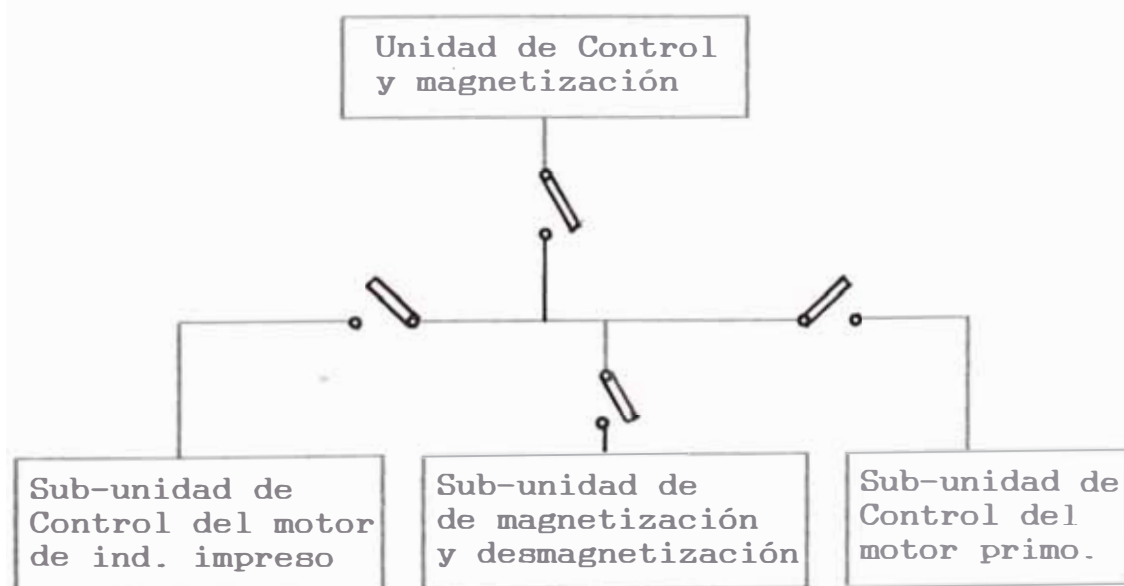
### 3.6.- ESQUEMA GENERAL DEL BANCO DE PRUEBAS.

El banco de pruebas tiene el siguiente esquema general:

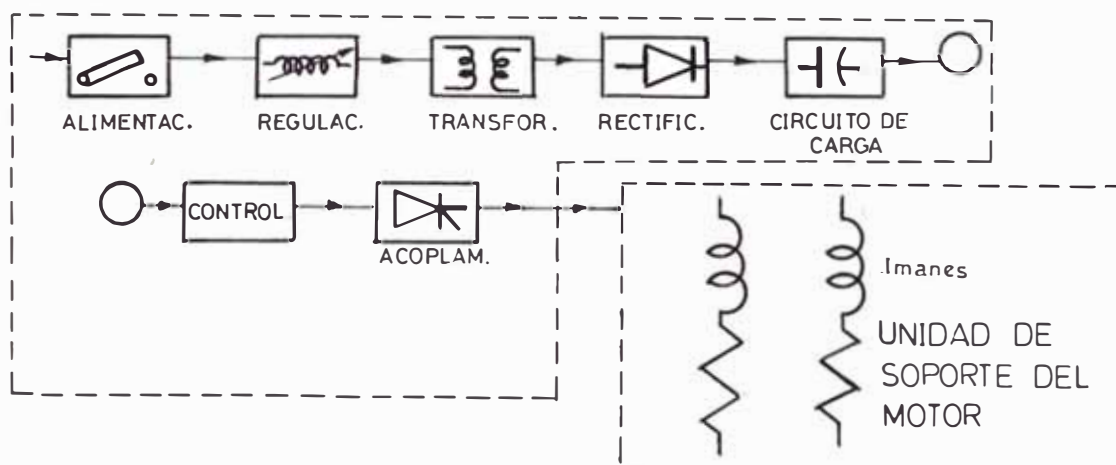


#### 3.6.1.- Esquema simplificado de la Unidad de Control y Magnetización.

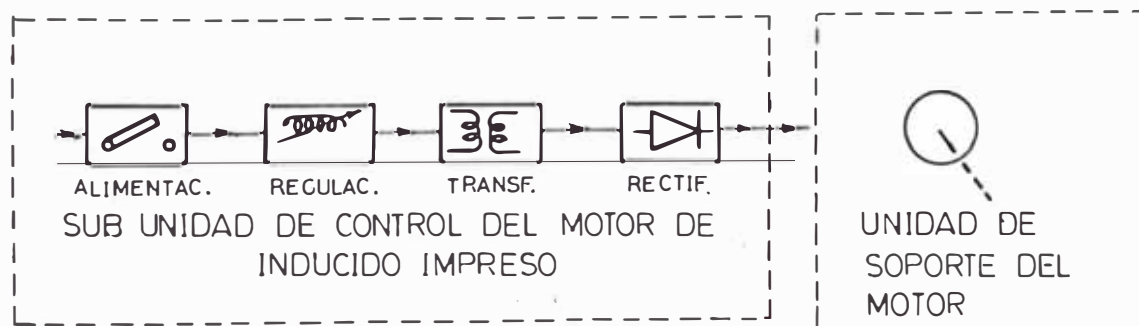
La unidad de control y magnetización tiene la siguiente composición simplificada:



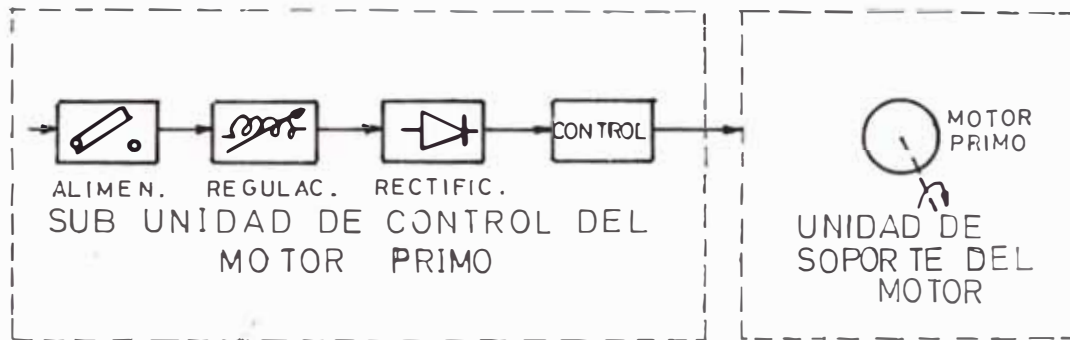
3.6.1.1.- Esquema simplificado de la Sub-unidad de magnetización y desmagnetización.



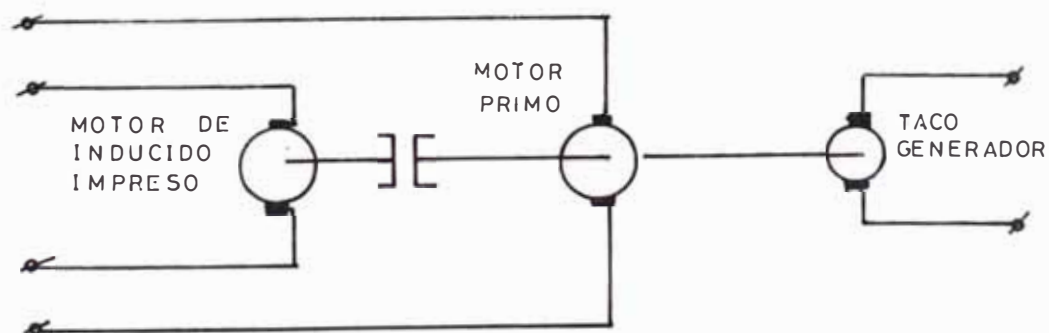
3.6.1.2.- Esquema simplificado de la Sub-unidad de control del motor de inducido impreso.



3.6.1.3.- Esquema simplificado de la Sub-unidad de control del motor primo.



3.6.2.- Esquema simplificado de la Unidad de soporte del motor de inducido impreso.



### **3.7.- DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS.**

El banco de pruebas será empleado para probar los motores de inducido impresos nuevos, y aquellos que se encuentran operativos, así como también intervenir a los motores inoperativos desmagnetizando y magnetizando sus imanes permanentes.

Como se dijo en el ítem 3.4, el banco de pruebas estará conformado por:

- a.- Unidad de Control y Magnetización. (plano PG-1)
- b.- Unidad de Soporte del Motor. (plano PG-2)

El desarrollo del diseño de cada una de éstas dos sub-unidades, se ha dividido en partes eléctrica y mecánica, respectivamente.

#### **3.7.1.- Diseño Eléctrico de la Unidad de Control y Magnetización.**

Esta unidad está conformada por tres sub-unidades, que operan en forma individual, las cuales se encuentran distribuidos en el panel de control (plano PG-3), y en la misma unidad (plano PG-4).

El suministro de energía eléctrica a la unidad, es garantizada a través del interruptor termomagnético STM-1 (plano PE-1), el cual además proporcionará la

protección a la unidad, contra cortocircuitos y sobrecargas que puedan ocurrir.

La selección del interruptor termomagnético STM-1, estará en función de la capacidad de corriente máxima que equiera alguna de las tres sub-unidades: la sub-unidad de magnetización y desmagnetización requiere una corriente de 3 amperios para cargar los condensadores electrolíticos, la sub-unidad de control de los motores de inducido impreso requieren de una corriente de carga de aproximadamente 25 amperios, y la sub-unidad de control del motor primo requiere de una corriente en vacío de 5 amperios.

Como las tres sub-unidades no trabajarán a la vez, puede seleccionarse el interruptor termomagnético STM-1, para una corriente de 1.4 veces la corriente de carga del motor de inducido impreso, es decir 35 amperios, para una tensión de 220 voltios AC-60 Hz.

3.7.1.1.- Sub-unidad de magnetización y desmagnetización.

(Ver plano PE-2)

En el esquema general de ésta sub-unidad se notan siete secciones: alimentación, regulación, transformación, rectificación, circuito de carga electrostática, control y circuito de acoplamiento.

#### **3.7.1.1.1.- Alimentación.**

Constituído por el interruptor termomagnético STM-2, el cual protege a la sub-unidad de cortocircuitos y sobrecargas. Para la selección del interruptor se considerará, una corriente de 8 amperios y un tensión de 220 VAC.

#### **3.7.1.1.2.- Regulación.**

Constituído por un variac VR-1, el cual es seleccionado para una capacidad de corriente de 6 amperios, y una regulación de tensión de 0 a 220 VAC.

#### **3.7.1.1.3.- Transformación.**

Constituído por un transformador de potencia T1, seleccionado para una relación de transformación 220/440 y una potencia de 1.5 KVA.

#### **3.7.1.1.4.- Rectificación.**

Constituído por un puente de rectificación de onda completa, D1, formado por cuatro diodos de silicio para una corriente de 3 amperios y una tensión pico inversa de 800 VAC.

#### **3.7.1.1.5.- Circuito de carga electrostática.**

Constituído por una resistencia de carga y por los condensadores electrolíticos, cuyo producto de

magnitudes representa el tiempo que se demora en cargar dichos condensadores.

a.- Cálculo de  $R_o$ .

Se conoce que la capacitancia total a emplear es de 0.105 faradios, y asumiendo una constante de tiempo para la carga de los condensadores de 5 segundos. Por lo que:

$$R_o = t_c/C = 5/0.105 = 47.61 \text{ ohmios.}$$

$$R_o = 50 \text{ ohmios.}$$

Donde la potencia  $P_o$  en la resistencia  $R_o$ , es :

$$P_o = I^2 \cdot R_o = 3^2 \cdot 50 = 450 \text{ watts.}$$

La resistencia  $R_o$  a seleccionar será de 50 ohmios y 450 watts.

b.- Selección del número de condensadores electrolíticos.

En razón de que la tensión de saturación ocurre para una tensión de 410 VDC., manteniendo la capacitancia constante en 0.105 faradios, se escogieran los condensadores con una tensión de 450 VDC y con una capacidad de valor comercial, de forma que al conectarse en paralelo, se obtenga una capacidad total de 0.105 faradios.

De los catálogos se seleccionará condensadores de 2100 microfaradios-450 VDC. Donde el número de condensadores (nº de cond.) será igual a :

$$\text{nº de cond.} = 0.105 / 2100 \times 10^6 = 50.$$

Por lo que se muestra, la selección final será de 50 condensadores electrolíticos de 2100 microfaradios-450 VDC.

#### **3.7.1.1.6.- Controles, Indicadores y Dispositivos de Protección.**

Los controles, indicadores y dispositivos de protección están divididos en dos niveles de tensión, los de 220 VAC. y los de 12 VAC., respectivamente.

##### **3.7.1.1.6.1.- Para un nivel de tensión de 220 VAC.**

###### **A.- Controles.**

###### **a.- Contactor A1.**

Los contactos del Contactor A1, permiten conectar la tensión de suministro a los condensadores electrolíticos. El contactor se seleccionará para una tensión de 220 VAC, y para una corriente de 5 amperios en los contactos principales del contactor.

###### **b.- Pulsador PB3.**

El pulsador PB3 es un pulsador normalmente abierto, que conecta la energía eléctrica a la



bobina del contactor A1, seleccionándose para una corriente de 1 amperio.

## B.- Indicadores.

### a.- Lámparas de señalización.

Las lámparas de señalización serán seleccionadas como lámparas de Neón, para una tensión de 220 VAC y una potencia de 1 watt.

#### - Lámparas de color verde PL1 y PL6.

Cuando la lámpara PL1 se encuentra encendida, indicará que la sub-unidad se encuentra energizada.

Cuando la lámpara PL6, se encuentra encendida, indicará que los condensadores electrolíticos se encuentran listos para ser cargados.

#### - Lámpara de color rojo PL2.

Cuando la lámpara PL2 se encuentra encendida, indicará que los condensadores electrolíticos no se encuentran listos para su cargado.

### b.- Instrumentos.

#### - Voltímetro V1.

Permite visualizar la tensión de carga de los condensadores electrolíticos, seleccionándose como un voltímetro de bobina móvil con un rango de 0-500 VDC.

- Amperímetro A1.

Permite visualizar la corriente de carga de los condensadores electrolíticos, seleccionándose como un amperímetro de bobina móvil en un rango de 0-5 amperios DC.

C.- Dispositivos de Protección.

a.- Microswitchs.

Los microswitchs serán seleccionados para una capacidad de corriente de 1.0 amperio.

- Los microswitchs SW1 y SW2, están ubicados en las puertas de acceso de la unidad de control y magnetización.

El microswitch SW3 está ubicado en el variac VR1, asegurando que el cargado de los condensadores se inicie desde 0 voltios.

**3.7.1.1.6.2.- Para un nivel de tensión de 12 VAC.**

A.- Controles.

a.- Transformador de potencia.

El transformador de potencia T2 será seleccionado con una relación de transformación 220/12 v. y 30 VA de potencia.

b.- Puente Rectificador.

Constituido por cuatro diodos de silicio, seleccionados para una corriente de 3 amperios y una tensión pico inversa de 100 VAC.

c.- Relés de 12 VAC.

El relé f, permite encender la lámpara PL4 indicando que el seguro ha sido retirado.

El relé K, permite encender la lámpara PL5 indicando que los SCR se encuentran habilitados para el disparo.

El relé b, permite encender la lámpara PL7 indicando que los condensadores se encuentran listos para la descarga.

El relé g, permite el disparo del gate del SCR1, de forma que los condensadores descarguen la energía eléctrica almacenada sobre la bobina de los imanes permanentes.

El relé h, permite el disparo del gate del SCR2, en situaciones de emergencia o en el caso de haber cargas residuales en los condensadores, de forma que su carga eléctrica almacenada se deposite en las bobinas de los imanes permanentes.

d.- Pulsadores.

Los pulsadores serán seleccionados para una corriente de 1 amperio. Los pulsadores PB1, PB4, PB5 y PB6 son pulsadores normalmente abiertos, que permiten conectar la energía eléctrica a los relés k, b, g y h.

El pulsador PB2 es un pulsador normalmente cerrado, que permite desenergizar la bobina del relé k.

## B.- Indicadores

### a.- Lámparas de señalización.

La selección de éstas lámparas seran de filamento, para una tensión de 12 VAC y una potencia de 5 watt.

Lámparas de color verde PL4, PL5 y PL7

Cuando la lámpara PL4 se encuentra encendida, indicará que la unidad se encuentra con el seguro retirado.

Cuando la lámpara PL5 se encuentra encendida, indicará que los SCR se encuentran habilitados para el disparo.

Cuando la lámpara PL7 se encuentra encendida, indicará que los condensadores se encuentran listos para la descarga.

### - Lámpara de color rojo PL3.

Cuando la lámpara PL3 se encuentra encendida, indicará que la sub-unidad se encuentra asegurada.

### b.- Instrumentos.

Voltímetro V2.

Permite visualizar la tensión de disparo, la cual será suministrada a los gates de los SCR,

seleccionándose como un instrumento de bobina móvil en un rango de 0-5 VDC.

#### C.- Dispositivos de Protección.

##### a.- Microswitch SWL1.

El microswitch SWL1 está conectado al tambor de una chapa de seguridad, asegurando que los gates de los SCR no sean disparados accidentalmente. La selección de éste microswitch se realizará considerando una capacidad de corriente de 1.0 amperio.

#### 3.7.1.1.7.- Circuito Acoplador.

Conformados por los SCR, los cuales permitirán descargar la energía eléctrica almacenada en los condensadores, sobre las bobinas de magnetización y desmagnetización de los imanes permanentes. Los SCR permitirán además, descargar la energía eléctrica residual de los condensadores a través de la resistencia  $R_a$ .

Los SCR serán seleccionados tomando en cuenta la corriente rms de 1550 amperios y una tensión de disparo para el gate de 3 VDC.

La tensión de disparo para el gate del diodo SCR sera tomada a través de los 12 voltios en el secundario del transformador T2, la cual es reducida a

una tensión de 3 voltios por la resistencia R1 o R2, con un valor de 30 ohmios y 3 watts de potencia.

La resistencia  $R_3$  para la descarga residual de los condensadores, o para en casos de emergencia, sera seleccionada como una resistencia de 150 ohmios y 1 kilowatt, respectivamente.

### **3.7.1.2.- Sub-unidad de Control del motor de inducido impreso.(Ver plano eléctrico PE-3)**

Esta sub-unidad se encuentra conformada por 4 secciones: alimentación, regulación, rectificación y control.

#### **3.7.1.2.1.- Alimentación.**

Constituído por el interruptor termomagnético STM3, el cual protege a la sub-unidad de cortocircuitos y sobrecargas, seleccionándose para un voltaje de 220 VAC y una corriente de 30 amperios.

#### **3.7.1.2.2.- Regulación.**

Constituído por un variac VR-2, seleccionándose para una corriente de 30 amperios y una regulación de tensión de 0-220 voltios.

### 3.7.1.2.3.- Rectificación.

Constituído por un puente de rectificación de onda completa D3, con cuatro diodos de silicio, seleccionados para una corriente de 26 amperios y una tensión pico inversa de 150 VAC.

### 3.7.1.2.4.- Controles, Indicadores y Dispositivos de Protección.

#### A.- Controles.

##### a.- Contactores.

Los contactos de los contactores D y E, permiten conectar la tensión de 139 VDC al motor de inducido impreso, y además permiten la rotación del motor en los sentidos horario y antihorario, respectivamente.

Los contactores, serán seleccionados para una tensión de 220 VAC y una corriente en sus contactos de 50 amperios.

##### b.- Pulsadores.

Los pulsadores PB7 y PB8 son normalmente abiertos, cumpliendo la función de poner en marcha el motor en un sentido determinado. El pulsador PB9 es normalmente cerrado, cumpliendo la función de detener la marcha del motor .

Los pulsadores serán seleccionados para una corriente de 1 amperio.

## B.- Indicadores.

### a.- Lámparas de señalización.

Las lámparas serán de Neón, para una tensión de 220 VAC y 1 watt de potencia.

#### - Lámparas de color verde PL8, PL9, PL10 y PL12.

Cuando la lámpara PL8 se encuentra encendida, indicará que la sub-unidad esta energizada.

Cuando la lámpara PL9 se encuentra encendida, indicará que el motor está listo para girar en sentido horario.

Cuando la lámpara PL10 se encuentra encendida, indicará que el motor está listo para girar en sentido antihorario.

Cuando la lámpara PL12 se encuentra encendida, indicará que la sub- unidad no está asegurada.

### b.- Instrumentos.

#### - Amperímetro A2.

Permite visualizar la corriente que ésta circulando por el inducido, seleccionándose como un instrumento de bobina móvil, con un rango de selección de 0-30 amperios DC.

#### Voltímetro V3.

Permite visualizar la tensión de suministro al inducido del motor, seleccionándose como un instrumento de bobina móvil de 0-150 VDC.



### C.- Dispositivos de Protección.

#### a.- Microswitchs.

Los microswitchs seran seleccionados para una corriente de 1 amperio.

El microswitch SW4 está ubicado en el variac VR-2, asegurando que la puesta en marcha se inicie en forma paulatina hasta alcanzar la tensión requerida.

b.- El microswitch SWL2 está ubicado en el tambor de una chapa, asegurando que el motor no sea operado en forma accidental.

### 3.7.1.3.- Sub-unidad de Control del motor primo (Ver plano PE-4).

Esta sub-unidad está conformada por 4 secciones : alimentación, regulación, rectificación, y control.

#### 3.7.1.3.1.- Alimentación.

Constituido por un interruptor termomagnético STM4, el cual protege a la sub-unidad de cortocircuitos y sobrecargas, seleccionandose para una tensión de 220 VAC y para una capacidad de corriente de 7 amperios AC.

### 3.7.1.3.2.- Regulación.

Constituído por un variac VR3, seleccionado para una capacidad de corriente de 6 amperios AC y una regulación de tensión de 0-220 VAC.

### 3.7.1.3.3.- Rectificación.

Constituído por un puente de rectificación de onda completa D4, con cuatro diodos de silicio, seleccionándose para una tensión pico inversa de 220 VAC y una corriente de 6 amperios.

### 3.7.1.3.4.- Controles, Indicadores y Dispositivos de Protección.

#### A.- Controles.

##### a.- Contactor.

Los contactos del contactor P, permiten conectar la tensión de suministro al motor primo, seleccionándose para una tensión en la bobina de 220 VAC, y una corriente de 10 amperios para los contactos del contactor.

##### b.- Pulsadores.

El pulsador PB12 es normalmente abierto, permitiendo el arranque del motor primo, mientras que el pulsador PB13 es un pulsador normalmente cerrado, el cual permite su parada. Los pulsadores serán seleccionados para una corriente de 1 amperio.

## B.- Indicadores.

### a.- Lámparas de señalización.

Las lámparas de señalización serán de Neón, para una tensión de 220 VAC y 1 watt.

Lámparas de color verde PL13, PL14 y PL15.

Cuando la lámpara PL13 se encuentra encendida, indicará que la sub-unidad está energizada.

Cuando la lámpara PL14 se encuentra encendida, indicará que la sub-unidad se encuentra sin seguro.

Cuando la lámpara PL15 se encuentra encendida, indicará que el motor se encuentra listo para girar.

Lámpara de color rojo PL16.

Cuando la lámpara PL16 se encuentra encendida, indicará que la sub-unidad se encuentra asegurada.

### b.- Instrumentos.

Voltímetro V4.

Permitirá visualizar la tensión de suministro en el motor primo, seleccionándose como un voltímetro de bobina móvil con un rango de 0-220 VDC.

- Medidor de R.P.M.

Permitirá visualizar las RPM del motor primo, con la ayuda de un tacogenerador, para lo cual

se seleccionará un voltímetro de bobina móvil con un rango de 0-150 VAC.

#### C.- Dispositivos de Protección.

##### a.- Microswitch.

Constituído por el microswitch SW5, el cual se encuentra ubicado en el variac VR3, para asegurar que la puesta en marcha del motor en forma paulatina, desde cero hasta la tensión requerida. El microswitch sera seleccionado para una corriente de 1 amperio.

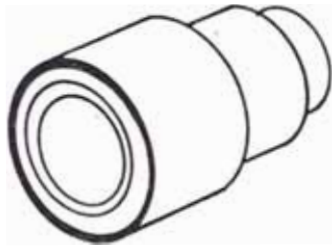
#### **3.7.1.4.- Accesorios Secundarios en la Unidad de Control y Magnetización.**

##### **3.7.1.4.1.- Jack, bananas hembras, virola y grapas.**

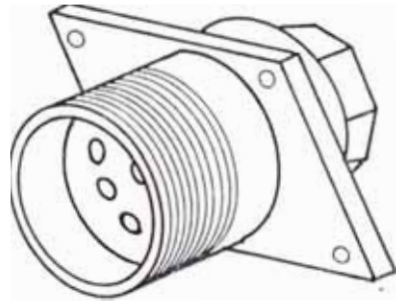
(Ver Fig. 3.7.1.4.1)

El jack y las bananas hembras, permitirán conectar la Unidad de Control y magnetización con la Unidad de Soporte del motor. El jack estará constituído por 7 terminales, con una capacidad de corriente de 30 amperios, mientras que las bananas hembras seran seleccionadas para una corriente de 15 amperios.

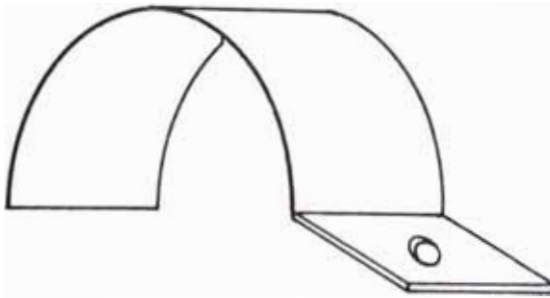
La virola es un accesorio de plástico semiduro, la cual sirve para evitar que el cable de suministro de energía se deteriore, cuando ingresa a la



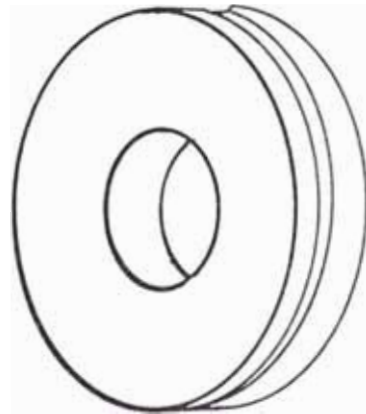
BANANA HEMBRA



JACK



GRAPA



VIROLA

FIG. 3.7.1.4.1 ACCESORIOS DE LA UNIDAD DE CONTROL Y MAGNETIZACION

Unidad de Control y Magnetización. Se seleccionará para un diámetro interior de 12 mm.

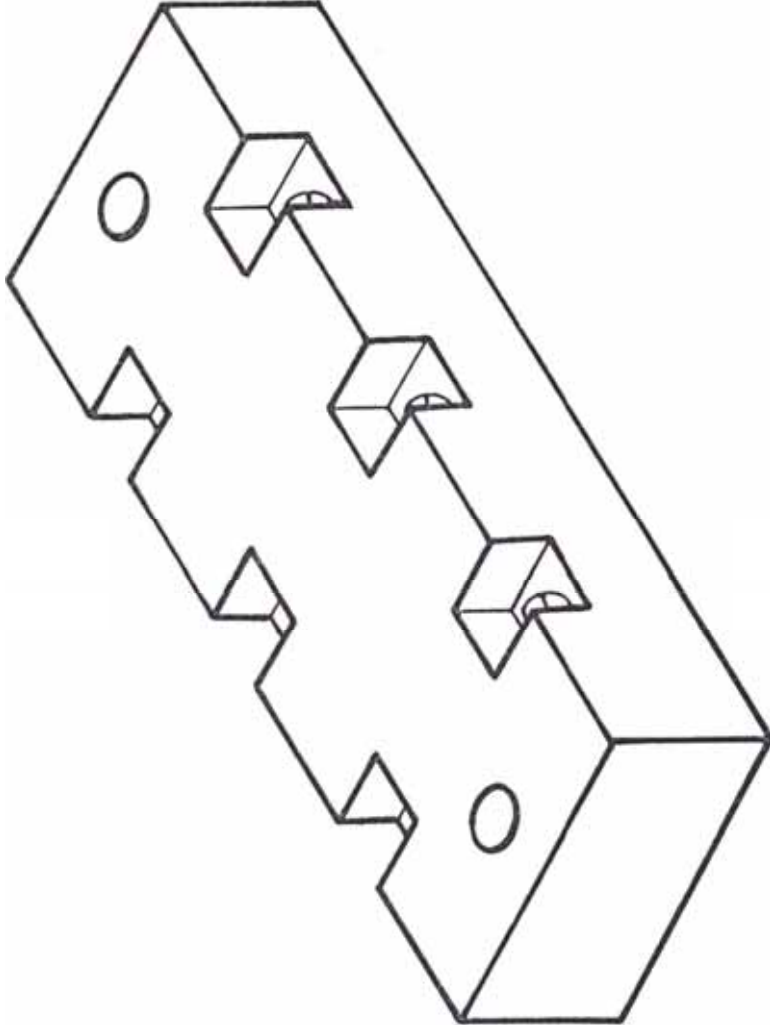
Las grapas a usar son metálicas, cumpliendo la función de fijar el cable de suministro de energía a la estructura de la Unidad de Control y Magnetización. Se seleccionará para un diámetro interior de 12 mm.

#### **3.7.1.4.2.- Regletas de conexión.**

Con el propósito de realizar las conexiones entre los componentes de las sub-unidades, se emplearán las regletas de conexión, cuyos terminales serán seleccionadas para corrientes de 30, y 1 amperios. (Fig. 3.7.1.4.2.)

#### **3.7.2.- Diseño Estructural de la Unidad de Control y Magnetización.**

El diseño estructural de ésta Unidad, se encuentra representado en los planos, PES-1, PES-2, PES-3, PES-4 y PES-5.



F: 3.7.4.2. REGLETA DE CONEXION

### **3.7.2.1.- Accesorios Secundarios.**

#### **3.7.2.1.1.- Garruchas.**

Las garruchas serán de caucho sintético, y seleccionadas para un peso de 50 Kgrs.(Fig. 3.7.2.1.1)

#### **3.7.2.1.2.- Cajones.**

Los cajones seran armados con ángulos de 1"x1"x 1/8", forrados con planchas de fierro galvanizado de 1/16" de espesor. (Fig. 3.7.2.1.2.)

### **3.7.3.- Equipamiento Eléctrico de la Unidad de Soporte del motor.**

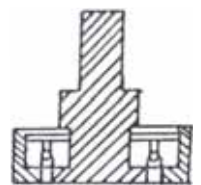
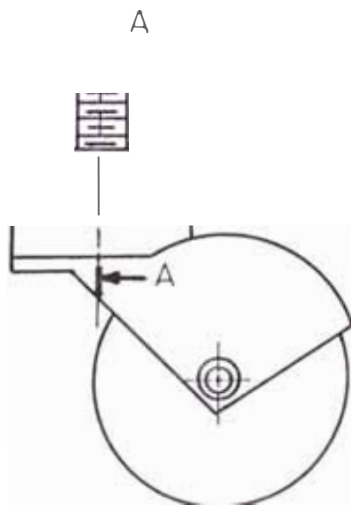
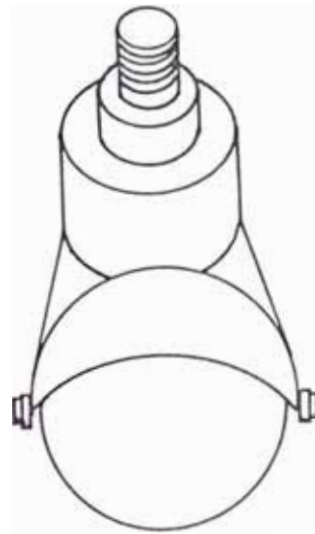
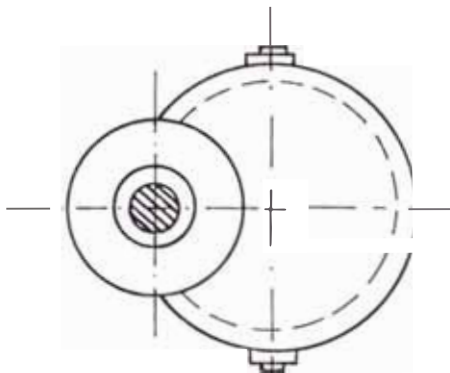
Esta unidad estará constituido por el motor primo, el motor de inducido impreso, el tacogenerador, y el jack. (plano PE-5)

#### **3.7.3.1.- Motor Primo.**

El motor primo será seleccionado como un motor Shunt DC, con una velocidad de 3000 RPM, tensión de alimentación de 220 VDC, y una potencia de 3500 watts.

El eje del motor primo tendrá dos salidas, donde en uno de los extremos se instalará el acople mecánico, mientras que al otro extremo se conectará el tacogenerador.





CORTE A-A

FIG. 3.7.2.1.1. GARRUCHA

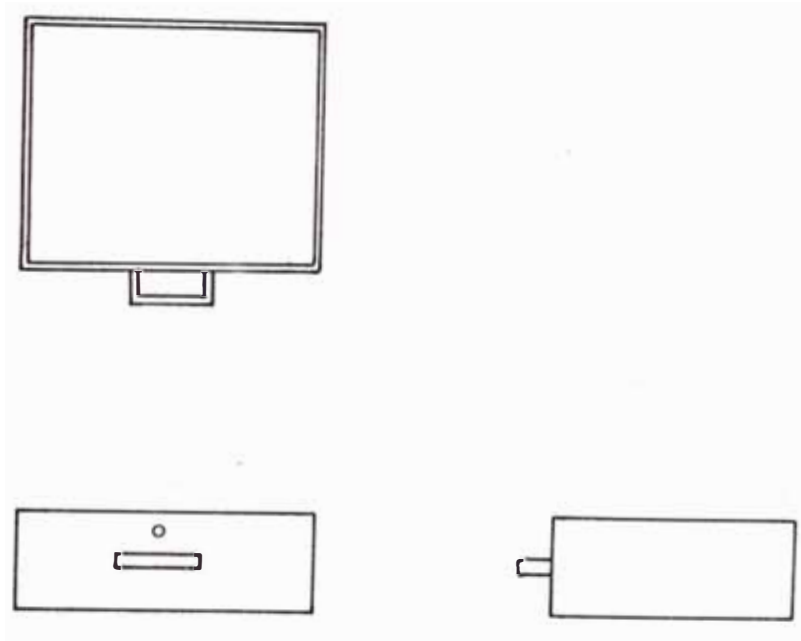
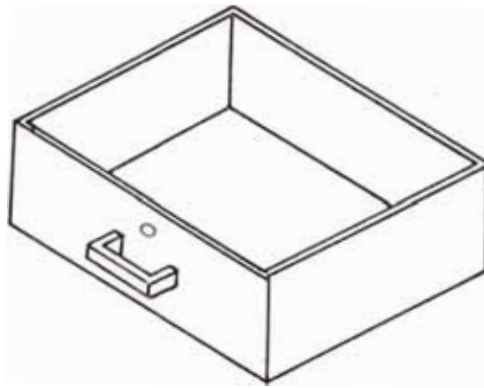


FIG. 3.7.2.1.2 CAJON

### **3.7.3.2.- Motor de Inducido Impreso.**

Los datos característicos de este motor fueron indicados en el capítulo 2.

### **3.7.3.3.- Tacogenerador.**

Permitirá visualizar el valor de la velocidad de rotación del motor primo, a través de un instrumento de bobina móvil. El tacogenerador a seleccionar será de dos polos, debiendo convertir los 3000 RPM en 139 voltios.

### **3.7.3.4.- Jack.**

El jack será de 7 terminales, para una corriente de 30 amperios.

### **3.7.4.- Diseño Estructural de la Unidad de Soporte del motor.**

El diseño estructural de la Unidad de Soporte, se encuentra representado en los planos PES-5, PES-6, y PES-7.

#### **3.7.4.1.- Accesorios Secundarios de la Unidad de Soporte del motor.**

##### **3.7.4.1.1.- Acople Mecánico.**

El acople mecánico será confeccionado de acero SAE 1040, del tipo deslizante y de accionamiento manual. Este accesorio, acopla el eje del motor de

inducido impreso con el eje del motor primo. En su interior, lleva un rodaje de la serie 6013-2Z, el cual le permite girar conjuntamente con los ejes de los motores. En el plano PES-8, se muestran los detalles de dicho acople.

#### **3.7.4.1.2.- Planchas de apoyo.**

Sobre éstas planchas, se apoyaran las columnas de la estructura de la Unidad de Soporte del motor. Serán de un espesor de 1/4" de espesor. En el plano PES-9, se muestran los detalles.

#### **3.7.4.1.3.- Soportes de sujección.**

El motor primo es fijado en la Unidad de Soporte a través de unos soportes de sujección, los cuales se detallan en el plano PES-10.

#### **3.7.4.1.4.- Transmisión de la velocidad al Tacogenerador.**

La transmisión de la velocidad al Tacogenerador es efectuada a través de una faja de sección circular, la cual se desplazará a través de dos poleas, ubicadas tanto en el motor primo como en el tacogenerador. (plano PES-9)

##### **a.- Poleas. (plano PES-11)**

Las poleas serán de material de aluminio.

La polea instalada en el motor primo, tendrá las siguientes características:

$$\varnothing_{\text{ext}} = 3'' \quad \varnothing_{\text{int}} = 1'' \quad ; \text{ espesor} = 3/4''$$

La polea instalada en el tacogenerador, tendrá las siguientes características:

$$\varnothing_{\text{ext}} = 1'' \quad \varnothing_{\text{int}} = 1/4'' \quad ; \text{ espesor} = 3/16''$$

b.- Faja. (plano PES-11)

La faja instalada en las poleas es de caucho sintético , con una longitud de 40 cms. y una sección circular de 3 mm. de diámetro.



### **3.9.- MANTENIMIENTO DEL MOTOR DE INDUCIDO IMPRESO.**

#### **3.9.1.- Procedimientos de operación.**

##### **3.9.1.1.- Control de las magnitudes características del motor de inducido impreso.**

(Apéndice A).

##### **3.9.1.2.- Mediciones.**

Las siguientes mediciones deben efectuarse antes de desmontarse y después de montarse el motor de inducido impreso.

- a.- Realizar las pruebas de aislamiento entre las escobillas y, chequear que el valor medido esté por encima de los 20 Megaohms.
- b.- Chequear que la resistencia eléctrica entre las escobillas es aproximadamente 0.28 ohmio.

##### **3.9.1.3.- Desmagnetizado de los imanes permanentes.**

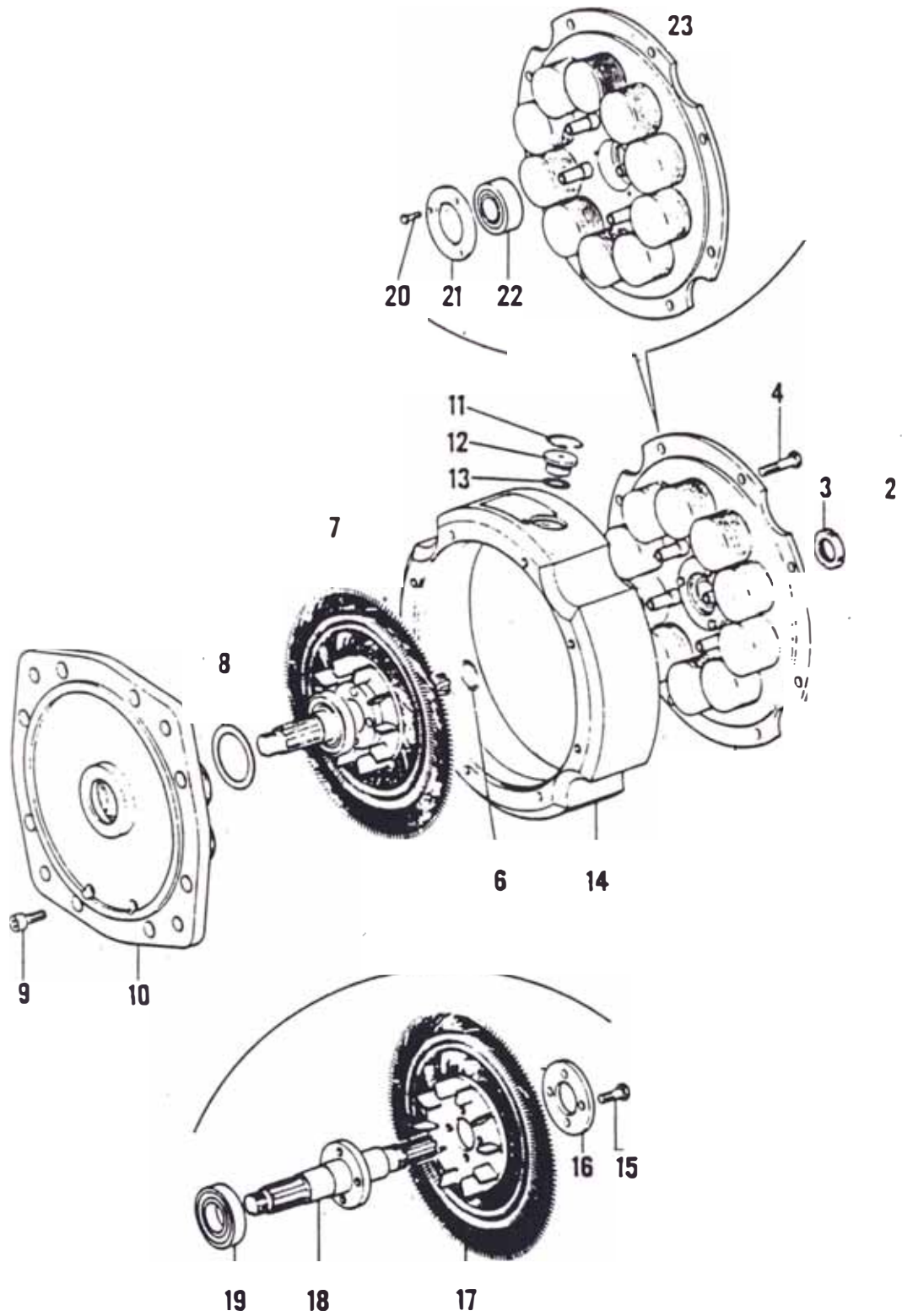
(Apéndice A)

##### **3.9.1.4.- Desarme del motor.**

(Figura 3.9.1.4)

- a.- Asegurar que el motor de inducido impreso esté bien posesionado a la unidad de soporte del motor.
- b.- Retirar las tapas portaescobillas, para extraer las escobillas de carbón.
- c.- Usando la llave para tuercas, retirar la rosca de fijación del eje. Posteriormente, retirar los tornillos de la brida superior, donde se encuentran ubicadas las escobillas y la tuerca de fijación.

FIGURA 3.9.1.4 Desarme del motor de Inducido Impreso.





- 1.- Tapa
- 2.- Escobillas
- 3.- Tuerca
- 4.- Tornillo
- 5.- Brida anterior
- 6.- Arandelas o laines
- 7.- Rotor
- 8.- Anillo de empuje
- 9.- Tornillo
- 10.- Brida posterior
- 11.- Seguro
- 12.- Plug de acceso
- 13.- O´ring
- 14.- Caja del motor
- 15.- Tornillo
- 16.- Anillo
- 17.- Rotor impreso
- 18.- Eje del rotor
- 19.- Cojinete
- 20.- Tornillo
- 21.- Anillo
- 22.- Cojinete
- 23.- Brida

- d.- Usando el extractor de bridas, retirar la brida superior y los anillos que sirven para regular el entrehierro del motor.
- e.- Retirar el motor de la unidad de soporte y, extraer el conjunto rotor.
- f.- Extraer los rodajes con el extractor de cojinetes y retirar el anillo de presión.
- g.- Retirar los tornillos de la brida inferior y separar la caja de la brida inferior.

#### **3.9.1.5.- Limpieza.**

Precaución: Tener cuidado de no dañar los componentes internos del motor.

- a.- Sí el motor ha sido desarmado, limpiar correctamente los componentes internos con solventes para equipamiento eléctrico.
- b.- Sí el motor no ha sido desarmado, retirar las escobillas de la brida superior y, extraer el plug de inspección retirando previamente el seguro. Introducir aire seco a una presión de 20 libras/pulg<sup>2</sup> por las boquillas de los portaescobillas, de forma que los residuos de carbón dejados por las escobillas salgan por el agujero del plug de inspección.

#### **3.9.1.6.- Inspección de las partes desarmadas.**

- a.- Chequear que el circuito impreso del rotor no esté dañado

- b.- Verificar el estado de los imanes permanentes, bobinas de magnetización y desmagnetización y bridas.
- c.- Verificar el estado de los rodajes y otros componentes.
- d.- Chequear la longitud de las escobillas.

#### **3.9.1.7.- Reemplazo de las partes deterioradas.**

- a.- Reemplazar las escobillas si la longitud es menor que 8 mm.
- b.- Reemplazar el disco impreso o el eje del motor ,si alguno de ellos se encuentra deteriorado, procediendo como sigue:
  - Retirar los tornillos que unen el disco impreso al eje del motor.
  - Reemplazar la parte deteriorada y rearmar el disco al eje.
  - Verificar que el eje se encuentre perpendicular al disco, para evitar oscilaciones durante la rotación del conjunto
- c.- Reemplazar los rodajes, si se encuentran deteriorados, teniendo cuidado de no dañar los imanes permanentes y el disco impreso al efectuar esta operación.
- d.- Reemplazar las cubiertas de protección de las caras de los imanes permanentes, si éstas se encuentran deterioradas

### 3.9.1.8.- Rearme del motor.

(Figura 3.9.1.4)

- a.- Posesionar la brida inferior en la caja, y asegurarlo con los tornillos.
- b.- Posesionar el anillo de presión, luego ensamblar el disco impreso, insertando el rodaje dentro de su alojamiento; chequear que entre el disco impreso y los imanes permanentes exista un claro de aproximadamente 1 mm.
- c.- Posesionar las arandelas o laines de regulación en el eje.
- d.- Posesionar la brida superior haciendola coincidir con los agujeros, y usando el extractor de bridas insertar la brida en la caja; asegurar la brida sin ajustar los tornillos.
- e.- Por el agujero del plug de inspección, chequear que:
  - El disco impreso esté centrado con respecto a los imanes permanentes, si fuese necesario regular con las arandelas de fino espesor.
  - El disco impreso no interfiera con los imanes permanentes, rotando el eje de giro.
  - El disco se encuentre perpendicular al disco impreso.
- f.- Ajustar los tornillos de la brida superior.
- g.- Usando aire comprimido seco , limpiar el interior del motor. Instalar el plug de inspección en el agujero respectivo

- h.- Usando la llave para el anillo de tuerca, instale la rosca de fijación del eje.
- i.- Instale las escobillas y asegúrelas con las tapas.
- j.- Chequear que no haya interferencia mecánica, realizar giros al eje en forma manual.

#### **3.9.1.9.- Magnetizado de los imanes permanentes.**

(Apéndice A)

#### **3.9.1.10.- Verificación de los parámetros característicos del motor de inducido impreso.**

(Apéndice A)

#### **3.9.2.- Relación de herramientas e instrumentos necesarios, en el mantenimiento del motor de inducido impreso.**

##### **3.9.2.1.- Instrumentos.**

- Tester Simpson de 20000 ohmios/voltio.
- Megóhmetro de 500 VDC.
- LLave torquimétrica de 1 Kgrf-m.

##### **3.9.2.2.- Herramientas.**

- Adaptador hexagonal.(plano PES-12)
- Extractor de bridas.(plano PES-13)
- Extractor de rodajes.
- Cable de conexión entre las unidades del banco de pruebas.(Figura 3.9.2.2.1)
- Cables de conexión para el magnetizado y

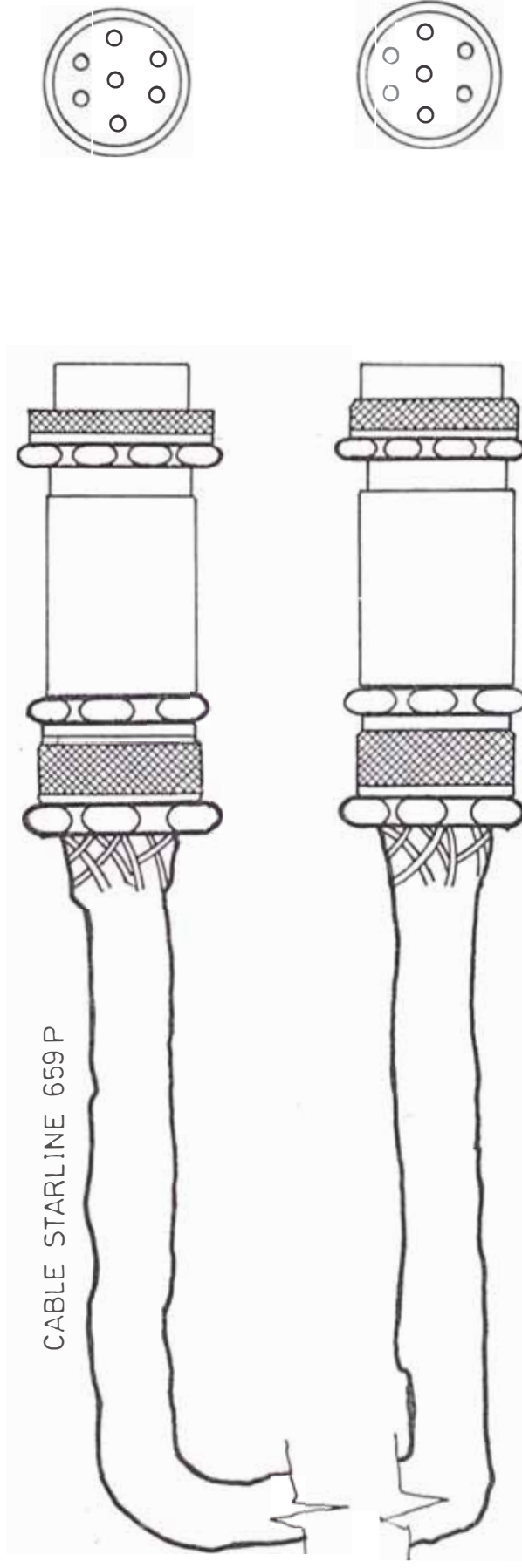


FIG. 39.2.21 CABLE DE CONEXION ENTRE UNIDADES  
DEL BANCO DE PRUEBAS

desmagnetizado.(Fig. 3.9.2.2.2)

**3.9.3.-Material para el mantenimiento del motor de inducido impreso.**

Solvente SS-25.

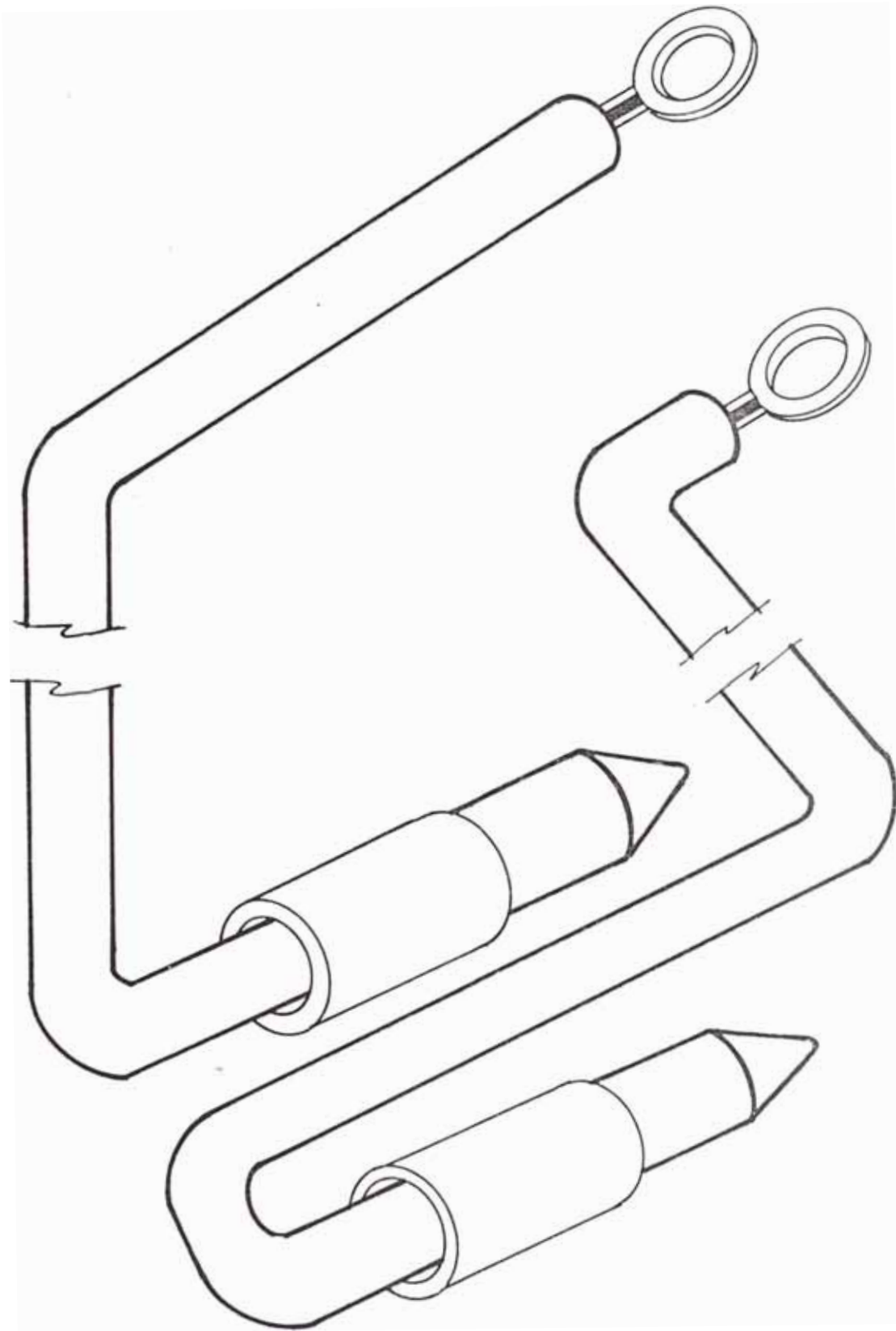
- Loctite 495.
- Papel pescado con polyester.
- Aceite de 90° ("3 en 1")
- Lija de agua # 360.
- Spray Scotch # 1602.

**3.9.4.- Repuestos para el mantenimiento del motor de inducido impreso.**

Cojinetes.

Escobillas de carbón.

- Inducido impreso.



IG. 3.9.2.2.2 CABLES DE CONEXION PARA EL  
MAGNETIZADO Y DESMAGNETIZADO



## **CAPITULO IV**

#### 4.-EVALUACION ECONOMICA.

##### 4.1.- INVERSION POR LA CONSTRUCCION DEL BANCO DE PRUEBAS EN EL PERU.

La inversión será de capital fijo, siendo asumido por la Marina Peruana bajo las siguientes consideraciones.

- a.- Los equipos, accesorios y materiales a adquirirse, serán exclusivamente del mercado local, y con los recursos con que se cuenta en la Marina Peruana.
- b.- Para la construcción de las Unidades del Banco de Pruebas, el Departamento del Sistema de Armas y Electrónica del Simac-Callao prestará sus servicios en la mano de obra directa.
- c.- Para el mantenimiento de los 92 motores de inducido impreso se adquirirán 92 inducidos impresos del extranjero.
- d.- Una vez que se cuente con el Banco de Pruebas, la Marina Peruana en forma exclusiva efectuará el mantenimiento y reparación de sus motores.

4.1.1.- Equipos y accesorios a adquirirse en el mercado local.

4.1.1.1.- Unidad de Control y Magnetización.

No	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	CANT	PRECIO UNIT.\$	PRECIO TOTAL \$
A.- Componentes eléctricos					
01	Interruptor Termomagnético.	220VAC-7amp.	1	20	20
02	Interruptor Termomagnético	220VAC-8amp.	1	20	20
03	Interruptor Termomagnético	220VAC-30amp.	1	20	20
04	Interruptor Termomagnético.	220VAC-35amp.	1	24	24
05	Regleta de Conexión.	30 amp.	2	20	40
06	Regleta de Conexión.	6 amp.	2	8	16
07	Regleta de Conexión.	1 amp.	1	5	5
08	Variac	0-220VAC,6amp.	2	461	922
09	Variac	0-220VAC,30amp.	1	920	920
10	Transf. de Pot.	220/440-1.4KVA	1	40	40
11	Transf. de Pot.	220/12-30 VA	1	18	18
12	Rectif. de Sil.	800VAC-3amp.	4	5	20
13	Rectif. de Sil.	100VAC-3amp.	4	1	4
14	Rectif. de Sil.	250VAC-30amp.	4	35	140
15	Rectif. de Sil.	250VAC-6amp.	4	3	12

No	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	CANT	PRECIO UNIT. \$	PRECIO TOT. \$
16	Contactador	220VAC-5amp.	1	23	23
17	Contactador	220VAC-50 amp.	2	108	216
18	Contactador	220VAC-10amp.	1	28	28
19	Relé	12VDC	5	2	10
20	Pulsador N.A.	220VAC-1amp.	8	22	176
21	Pulsador N.C.	220VAC-1amp.	3	22	66
22	Lámp. Neón c/verde	220VAC-1 watt.	9	19	171
23	Lámp. Neón c/rojo	220VAC-1 watt.	3	19	57
24	Lámp. Filamento c/verde	12 VAC-5watt.	3	19	57
25	Lámp. Filamento c/rojo	12 VAC-5watt.	1	19	57
26	Banana hembra	15 amperios	1	10	10
27	Banana macho	15 amperios	1	12	12
28	Microswitch	1 amperio.	5	46	230
29	Microswitch con llave de segur.	1 amperio.	2	70	140
30	Resistencia	50ohms-450watt.	1	10	10
31	Resistencia	150ohms-1Kwatt.	1	15	15
32	Resistencia	30ohms-3watt.	2	0.5	1
33	Condens. electr.	450VDC-2100 $\mu$ F.	50	35	1750

No	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	CANT	PRECIO UNIT.\$	PRECIO TOT.\$/
34	Diodos SCR	1880amp.-450VDC	2	450	900
35	Volt.Bob. móvil	0-500 VDC.	1	30	30
36	Amp.bob. móvil	0-5 amp.DC.	1	10	10
37	Volt.bob.móvil	0-5 VDC	1	12	12
38	Amp.bob.móvil	0-30 amp. DC.	1	35	35
39	Volt.bob.móvil	0-150 VDC	1	35	35
40	Volt.bob.móvil	0-220 VDC	1	30	30
41	Volt.bob.móvil	0-150 VDC(RPM)	1	32	32
42	Conduc.de Cu	TW-10AWG	20m	2	40
43	Conduc.de Cu	TW-16AWG	50m	1.5	75
44	Conduc.de Cu	TW-18AWG	50m	1.5	75
45	Conduc. de Cu con forro Neoprene.	14 AWG	15m	6	90
46	Conduc.de Cu con forro Silic.vidr.	10 AWG	10m	4	40
47	Conduc.Cu con forro Silic.vidr.	12 AWG	50m	3.5	175
48	Conduc.Cu con forro Silic.vidr.	14 AWG	50m	3.5	175
49	Conduc.de Cu.	TW-12AWG	5m	1	5
50	Jack 659SN (*)	7sockets-30amp	1	10	10
SUB-TOTAL					\$7001
B.- Componentes mecánicos.					
01	Angulo de fierro	1.5"x1.5"x1/8"	5 m	8	40
02	Angulo de fierro	1/4"x1"x1"	34m	10	340

No	DESCRIPCION	CARACTERISTICA	CANT	PRECIO UNIT. \$	PRECIO TOT. / \$
03	Plancha de Fe gal	4'x9'x1/16"	3Pza	13	39
04	Perno de Acero	1"x3/16"cza.av	100Pz	0.25	25
05	Plancha de Fe	5'x2'x1/8"	1 Pz	20	20
06	Perno de Acero	2'x5/32"cza.re	25Pza	0.18	4.5
07	Virola de Plást.	12mm.diam.int.	1 Pz	1.5	1.5
08	Grapas metálicas.	12mm.diam.int.	11Pza	0.50	5.5
09	Perno autorosc.	1/2"x1/8"	30Pza	0.10	3
10	Perno autorosc.	5/32"x5/8"	30Pza	0.15	4.5
11	Perno autorosc.	1"x5/32"	30Pza	0.20	6
12	Garruchas 3"diam.	caucho sintét.	4 Pza	70	280
13	Chapa de escrit.	con 2 llaves	2 Pza	2.5	5
SUB-TOTAL					\$774
T O T A L					\$ 7775

(\*) Entregado por la Marina Peruana.

#### 4.1.1.2.- Unidad de Soporte del Motor

No	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	CANT	PRECIO UNIT. \$	PRECIO TOT. \$/
A.- Componentes eléctricos					
01	Conductor de Cu	TW-10AWG	2 m.	2	4
02	Conductor de Cu	TW-18AWG	5 m.	1.5	7.5
03	Jack 659SN (*)	7sockets-30amp	1Pza	10	10
04	Motor primo DC(*)	220VDC-3.5Kw.	1Pza	2000	2000

No	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	CANT	PRECIO UNIT.\$	PRECIO TOT.\$/
05	Tacogenerador (*)	0-140VDC,3KRPM.	1	500	500
SUB-TOTAL					\$2521.5
B.- Componentes mecánicos					
01	Angulo de fierro	1"x1"x1/4"	6m.	20	120
02	Angulo de fierro	3.5"x3.5"x1/2"	12m.	72	864
03	Plancha de fierro	25"x25"x3/4"	1Pza	50	50
04	Plancha de fierro	34"x20"x1/8"	2Pza	34	68
05	Perno de fierro	1/2"x1.5"cza.hx	16	0.4	6.4
06	Perno de fierro	2"x1/2"cza.hex.	6	0.5	3
07	Perno de fierro	2"x1/8"cza.hex.	8	0.5	4
08	Platina de Acero.	6"x25"x1/4"	1	1	10
07	Pernos de Acero	1/2"x1/8"cza.hx	4	0.3	1.2
08	Polea de Aluminio	1"x2"	1	8	8
09	Polea de Aluminio	3/16"x2"	1	5	5
10	Faja caucho sint.	1/16" espesor.	1	1.8	3
SUB-TOTAL					\$1146.6
C.- ACOUPLE MECANICO.					
01	Eje Acero circ.	SAE1040-2"x5"d.	1Pza.	10	10
02	Eje Acero cuadr.	SAE1040-5"x5"x 1.25"	1Pza.	8	8
03	Eje Acero circ.	SAE1040-2.5"x4"	1Pza.	7	7
04	Eje Acero circ.	SAE1040-5"x5"x 1/2"	1	12	12
05	Anillo de Acero	SAE1040- 5.5"d. ext.,5"d.int.	1	5	5
06	Pernos de Acero	2.5"x1/2"	2	0.5	1

No	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	CANT	PRECIO UNIT.\$	PRECIO TOT.\$/
07	Estobol rosca f.	1 1/4"x1/2"	2	0.4	0.8
08	Eje de Acero	SAE1040-7"x1/4" diametro	1	8	8
09	Rodaje de bolas	6013-2Z	1	8	8
SUB-TOTAL:					\$ 51.8
T O T A L					\$3719.9

(\* ) Entregado por la Marina Peruana.

#### 4.1.1.3.- Accesorios.

No	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	CANT.	PREC. UNIT.	PRECIO TOT.\$/
A.- Disco Extractor de Bridas.					
01	Disco de Acero	SAE1040-9"diam. x 1/2" esp.	1 Pza	10	10
02	Perno Acero cza.h	6"x1/2"diam.	1 Pza	3	3
03	Perno Acero cza.h	1"x 1/4"diam.	4Pzas	0.5	2
SUB-TOTAL					\$ 15
B.- Adaptador.					
01	Barra de Acero	SAE1040-3"x1.5" diametro.	1 Pza	8	8
SUB-TOTAL					\$ 8
C.- Conexión entre Unidades del Banco de Pruebas.					
01	Cable Conexión(*)		1 Pza	40	40
SUB-TOTAL					\$40
T O T A L					\$63

(\* ) Entregado por la Marina Peruana.



## 4.1.1.4.- Otros

No	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	CANT.	PREC. UNIT.	PRECIO TOT.\$/
01	Pintura	Epóxica gris	1/2gal	20	10
02	Pintura	Acrílica	1/2gal	16	8
03	Catalizador	Acrílico	1/2gal	7	3.5
04	Electródos p/sol	6011-1/8"Pto.Az	10Kgrs	2.5	25
05	Electródos p/sol	6011-5/16" P.Az	10Kgrs	3	30
06	Oxigeno.		2 Bot.	15	30
T O T A L					\$106.5

## 4.1.1.5.- Costo Total.

a.- Unidad de Control y Magnetiz.	...\$	7,775.00
b.- Unidad de Soporte del Motor.	....\$	3,719.90
c.- Accesorios.	.....\$	63.00
d.- Otros.	.....\$	106.50

T O T A L            \$11,664.40

La adquisición del material, fue realizado por el Servicio Industrial de la Marina Callao, entre los primeros días del mes de Febrero y a fines del mes de Marzo, del año 1990.

## 4.1.2.- Mano de Obra empleada.

ACTIVIDAD	PERSONAL REQUERIDO	TIEMPO (DIAS)	H.D. (**) CONSUMIDOS	H.D(**) TOTAL
Construcción Estructura de la Unid. Soporte.	Tec.Mecánico	20	20	35
	Tec.Soldador	5	5	
	Tec.Calderero	10	10	
Construcción Estructura de la Unid. Contr. y Mag	Tec.Mecánico	20	20	30
	Tec.Soldador	5	5	
	Tec.Calderero	5	5	
Construcción del Acople Mecánico.	Tec.Mecánico	5	5	10
	Tec.Tornero	5	5	
Instalación Accesorios Principales y Secund.	Tec.Mecánico	5	5	10
	Tec.Electric.	5	5	
Conexión eléctrico en unidades	Tec.Electric.	10	10	10
Ajustes Mecánicos.	Tec.Mecánico	5	5	5
Pruebas en frio.	Tec.Mecánico	2.5	2.5	5
	Tec.Electric.	2.5	2.5	
Pruebas con E.E. y motor de inducido impreso	Tec.Electric.	5	5	5
Pruebas finales y entrega.	Tec.Electric.	5	5	5
TOTAL				115 H.D.

(\*\*) H.D. Hombre Día.

Los trabajos para la construcción de las Unidades del Banco de Pruebas, fueron realizados por el Servicio Industrial de la Marina Callao, entre los primeros días del mes de Abril y la segunda semana del mes de Junio.

El costo de la mano de obra en esa fecha fue de \$8 el Hombre -Día, es decir \$1 la Hombre-Hora. Por lo que se puede deducir:

$$\text{Costo mano de obra} = 115 \text{ H.D.} \times \$ 8/\text{H.D.}$$

$$\text{Costo mano de obra} = \$ 920.$$

#### 4.1.3.- Horas-Máquina usada.

Las Horas-Máquina usadas serán aproximadamente el 10% de los Hombre-Hora consumidas. Del item anterior se dedujo que la mano de obra empleada fue de 115 Hombres-Día ó 920 Hombres-Hora. Por lo tanto:

$$\text{Horas-Máquina} = 920 \text{ Hombre-Hora} \times 0.1$$

$$\text{Horas-Máquina} = 92 \text{ Hombre-Hora.}$$

Como el Hombre-Hora del Servicio Industrial de la Marina(Simac), está a \$1 . Entonces tendremos:

$$\text{Costo Horas-Máquina} = 92 \text{ Hras-Hom.} \times \$1/\text{Hra-Hom.}$$

$$\text{Costo Horas-Máquina} = \$92.$$

#### 4.1.4.- Inversión total.

En la inversión total, se consideró un rubro de imprevistos, el cual contempló los gastos administrativos y los gastos de útiles de escritorio y dibujo. El monto por este rubro, fue estimado en el 5% de la suma de los costos por mano de obra, costo de materiales en el mercado local, y costo de las horas-máquina usadas.

Por lo tanto, la inversión total será:

a.- Por compra de equipos y componentes en el mercado local	.....\$	11,664.40
b.- Por mano de obra empleada	.....\$	920.00
c.- Por horas-máquinas usadas	.....\$	92.00
d.- Por imprevistos (8,934.5 + 920 + 92)0.05	.....\$	638.82

**I N V E R S I O N   T O T A L :   \$ 13,310.22**

**4.2.- COSTO POR MANTENIMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCIDO  
IMPRESO EN EL PERU.**

Consideraremos los costos, por adquisición de materiales en mercado local, adquisición de repuestos, mano de obra directa e indirecta, y horas-máquina usada.

**4.2.1.- Adquisición de materiales en el mercado local.**

Los precios unitarios y totales están en dólares.

No	DESIGNACION	CARACTERISTICA	CANT.	P.Unit	P.Total
01	Solvente	SS-25	1/8gal	40	5
02	Loctite	# 495	0.3Pza	100	30
03	Papel pescado	con Polyester.	6Pzas	12	72
04	Aceite de 90o	"3 en 1"	8 Onz.	0.4	3.2
05	Lija de agua	# 360	1Plie.	1.8	1.8
06	Spray Scotch	# 1602	1 Pza.	10	10
<b>TOTAL</b>					<b>\$ 122</b>

**4.2.2.- Adquisición de repuestos.**

Los repuestos necesarios para la reparación y/o mantenimiento de un motor de inducido impreso, dependerán de la inspección previa que se les efectúe para determinar el estado de sus componentes. Sin embargo en este ítem, se presenta una relación de repuestos mínimos necesarios para la reparación y/o mantenimiento de un motor de inducido impreso.

El repuesto que requiere ser adquirido en el extranjero es el inducido impreso, el cual ha sido cotizado por la firma italiana Otomelara en \$ 807, mientras que la firma francesa Alshtom lo ha cotizado en \$145, respectivamente. Actualmente, la Marina Peruana está estudiando la factibilidad de fabricar los inducidos impresos en nuestro medio.

A.-RELACION DE REPUESTOS A COMPRARSE EN EL EXTRANJERO.					
No	DESIGNACION	FABRICANTE	CANT.	P.UNIT (\$)	P.TOT. (\$)
01	Induc. impreso.	Alshtom-Francia	1 Pza.	145	145
SUB-TOTAL					\$145
B.-RELACION DE REPUESTOS A COMPRARSE EN EL MERCADO LOC					
07	Rodaje	6009-2z	1 Pza.	20	20
08	Rodaje	6209-2z	1 Pza.	18	18
09	Escob. de carb.	grafito ECG-389	4 Pzas	2	8
SUB-TOTAL					\$ 46
T O T A L					\$ 191

#### 4.2.3.- Mano de obra directa empleada.

En el siguiente cuadro se muestra la mano de obra directa a emplear en la reparación de un motor de inducido impreso.

ACTIVIDAD	PERSONAL REQUERIDO	TIEMPO (hras)	H.H. (& CONSUMIDO	H.H. (& TOTAL
Control de los parámet. del motor de ind. impreso	Tec.Electric.	0.5	0.5	0.5
Mediciones.	Tec.Electric.	0.3	0.3	0.3
Desmagnetiz. motor.	Tec.Electric.	0.1	0.1	0.1
Desarme del motor de ind impreso.	Tec.Mecánico	0.4	0.4	0.4
Limpieza del motor de inducido impreso.	Tec.Mecánico Tec.Electric.	2 4	2 4	6
Inspección de partes desmontadas.	Tec.Electric. Tec.Mecánico	0.1 0.1	0.1 0.1	0.2
Reemplazo de comp. deter.	Tec.Mecánico Tec.Electric	0.5 0.5	0.5 0.5	1
Rearme del motor.	Tec.Mecánico	0.5	0.5	0.5
Magnetiz.del motor de inducido impreso	Tec.Electric.	0.5	0.5	0.5
Verificación de parámetr. del motor.	Tec.Electric.	0.5	0.5	0.5
			TOTAL	10 H.H

(&) H.H.: Hora Hombre.

En Enero de 1991, el Costo Hombre-Hora en el Servicio Industrial del Callao es de \$13. Entonces:

Costo mano de obra - 10 H.H. x \$ 13/H.H.

Costo mano de obra = \$ 130.

#### 4.2.4.- Mano de Obra Indirecta.

Este rubro contempla los gastos administrativos y los gastos en la elaboración del informe del estado de entrega del motor que ha sido reparado o efectuado el mantenimiento respectivo. Se estima en este rubro un 5% del monto de la mano de obra. Es decir:

Costo de Mano de obra Indirec. - 0.05 x \$130

Costo de mano de obra Indirec. - \$ 6.50.

#### 4.2.5.- Horas-máquina usada.

El empleo del Banco de pruebas, instrumental y herramientas, será cotizado en el 10% del total de la mano de obra directa empleada. Es decir:

Costo empleo máquinas = 0.1 x \$ 130

Costo empleo máquinas = \$ 13.

#### 4.2.6.- Costo Total.

a.- Por compra de materiales en		
el mercado local.	.....	\$ 122.00
b.- Por compra de repuestos	.....	\$ 191.00
c.- Por mano de obra directa	.....	\$ 130.00



d.- Por mano de obra indirecta	.....	\$	6.50
e.- Por horas-máquina empleada	.....	\$	13.00
T O T A L			\$ 462.50

#### 4.3.- ANALISIS ECONOMICO.

Se realizará una comparación de costos, entre lo que cuesta la adquisición de un Banco de Pruebas en el extranjero, y la construcción del mismo Banco de Pruebas en el Perú. Así también, se efectuará la comparación entre los costos de mantenimiento de un motor de inducido impreso, en el Perú y en el extranjero.

##### 4.3.1.- Banco de Pruebas.

##### 4.3.1.1.- Adquisición en el extranjero.

La firma italiana Otomelara cotizó la venta de un banco de pruebas en \$ 142,480.00.

##### 4.3.1.2.- Costo del Banco de Pruebas en el Perú.

La Marina Peruana ha invertido la cantidad de \$ 13,310.22

##### 4.3.1.3.- Ahorro de Divisas.

La Marina Peruana ha ahorrado la suma de \$ 129,169.78, por la no adquisición de un Banco de Pruebas en el extranjero.

#### **4.3.2.- Mantenimiento de un motor de inducido impreso.**

##### **4.3.2.1.- En el extranjero.**

La firma Otomelara ha cotizado el mantenimiento de un motor de inducido impreso en aproximadamente \$ 5,000.00.

Por otra parte, la Armada Argentina quien compró el Banco de Pruebas a la firma italiana Otomelara, ha cotizado el mantenimiento de un motor de inducido impreso en la suma de \$ 2,060.00.

##### **4.3.2.2.- En el Perú.**

La Marina Peruana estaría cotizando el mantenimiento de un motor de inducido impreso, en aproximadamente \$ 500.

##### **4.3.2.3.- Ahorro de Divisas.**

La Marina estaría ahorrando la suma de \$ 1,560, por el mantenimiento de cada motor de inducido impreso. Por 92 motores de inducido impreso, el ahorro de divisas será de \$ 143,520.00.

4.4. COSTO DE MANTENIMIENTO POR LOS 92 MOTORES DE  
INDUCIDO IMPRESO DE LA MARINA PERUANA.

El monto neto que requiere la Marina Peruana, para realizar el mantenimiento de un motor de inducido impreso, es \$462.5.

Entonces para efectuar el mantenimiento a los 92 motores de inducido impreso, la Marina Peruana requerirá de la suma de \$ 41.625.

## CONCLUSIONES.

### ASPECTO ECONOMICO

Con la construcción del Banco de Pruebas para los motores de inducido impreso, se han obtenido los siguientes beneficios económicos:

a.- Un ahorro de divisas de \$ 129.169.78. por la construcción del Banco de Pruebas, en razón de que el monto por su construcción en el Perú es: \$ 13.310.22 . mientras que en el extranjero se cotizó la adquisición del Banco de Pruebas. en 142.480.00.

b.- Un ahorro de divisas de 160.724.00. por el mantenimiento de 92 motores de inducido impreso en razón de que el costo por el mantenimiento de estos motores en el Perú, es: \$ 41.825. mientras que el monto cotizado por la Armada Argentina es de \$ 147.895.00

c.- Captación de Divisas en el Mercado Internacional, puesto que la Marina Peruana podría ofertar sus servicios por el mantenimiento de los motores de inducido impreso. a otras Armadas de países vecinos.

### ASPECTO TECNICO

Con la construcción del Banco de Pruebas para los motores de Inducido Impreso se han obtenido los siguientes beneficios técnicos:

a.- Desarrollo Tecnológico en el País, encuadrado en la investigación del principio de funcionamiento, modelos matemáticos, características principales de diseño y aplicaciones del motor de inducido impreso.

b.- Entrenamiento del personal de la Marina Peruana, en el mantenimiento y/o reparación del motor de inducido impreso.

c.- Elaboración de Proyectos de Factibilidad, por la construcción del motor de inducido impreso en el Perú.

d.- Conocimiento de los métodos y pautas seguidas, para magnetizar y desmagnetizar los imanes permanentes del motor de inducido impreso.

e.- El desarrollo de un Programa de Mantenimiento Preventivo de los motores de inducido impreso.

## BIBLIOGRAFIA

### PUBLICACIONES TECNICAS

- 1.- "DC MOTORS WITH FOUR LAYER DEPOSITED DISK ARMATURE",  
V.I. Adas'ko, V.N. Veselovskii, I.B. Raisin, Yu T.  
Duvanov y B. Ya-Chistov. Elektrotehnika, vol. 50,  
Nº 4 - 1979, pags.34-35.
- 2.- "PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF ELECTRIC MACHINES USING  
PRINTED AND STAMPED WINDINGS", V.I. Adas'ko, V.A.  
Muylar, I.B. Raisin y O.P. Sidorov. Elektrotehnika,  
vol. 52, Nº 6 - 1981, pags. 42-45.
- 3.- "LES MACHINES ELECTRIQUES A BOBINAGES IMPRIMES",  
Jacques Henry Baudot. Assn des Ingenieurs  
Electriciens Sortis de l'Institut Electrotechnique  
Montefiore-Bul, vol. 73, Nº 2 y 3 - Feb. y Mar.1960.  
pags. 119-138.
- 4.- "PERMANENT MAGNET MATERIALS", Joseph J. Becker, Fred  
E. Luborsky y D. Luther Martin. IEEE Transactions on  
Magnetics, vol. MAG-4, Nº 2. Junio 1968.
- 5.- "THE PRINTED MOTOR: A NEW APPROACH TO INTERMITTENT  
AND CONTINUOS MOTION DEVICES IN DATA PROCESSING  
EQUIPMENT" R.P. Burr., Proc. Eastern joint Computers  
Conf., vol. 18 - 1960, pags. 325 - 342.

- 6.- " PROBLEMAS DE DESMAGNETIZACION EN MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA DE IMANES PERMANENTES", R. Fischer. ETZ (Edición A), v. 89, No 11 - 24 Mayo 1968, pags. 266-269.
- 7.- "VIBRATION CHARACTERISTICS OF THE PRINTED CIRCUIT MOTOR"  
Hu P. Y., IBM Boulder Colo, ASME N° 72 - 9 Sept.1973 pags. 1-6.
- 8.- "GEOMETRY OF AN ARMATURE WITH PRINTED", B.K. Karpenko. Elektrichestvo N° 12-Dic.1970, pags. 46-51.
- 9.- "CALCULO DEL MOTOR MAGNETICO CON BOBINADO IMPRESO", B.K. Karpenko. I.G. Ivanova. Elektrichestvo N° 3-1965, pags. 48-51.
- 10.- "CALCULO DEL DEVANADO IMPRESO EN NUCLEOS DEL TIPO FERROMAGNETICOS", M.A. Markvelidze. M.I. Gol'dgaum, O.N. Dalakishvili. Electromekhanika N° 11 - 1966, pags. 1254-1260.
- 11.-" PRINTED CIRCUIT MOTORS FOR HIGH SPEED INCREMENTING OF INERTIAL AND DISSIPATIVE LOAD", Van Clifton Martin. Trans. on Indust. Electronics. vol. IE-10. N° 1 - May. 1963, pags. 28-45.
- 12.- "A PULSED POWER SUPPLY FOR INJECTION BUMP MAGNETS", Walter F. Praeg. Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, vol. IECI-26, N° 1 - Feb.1979.

- 13.- "EFFECT OF THE CONSTRUCTION OF A DC. MOTORS ON ITS DYNAMIC PARAMETERS", J. Pustola. Arch Elektrotechniki, vol. 19 - 1970, pags. 325-342.

**TEXTOS.**

- 1.- "MAQUINAS ELECTRICAS II", Dario Biella Bianchi. 1974-UNI s/edición.
- 2.- "TEORIA Y PROBLEMAS DE CIRCUITOS ELECTRICOS", Joseph A. Edminister. Copyright 1970, libros Mc Graw Hill de Mexico.
- 3.- "TEORIA Y ANALISIS DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS", A.E. Fitzgerald. Copyright 1971 , Mc Graw Hill.
- 4.- "PERMANENT MAGNETS AND MAGNETISM", D. Hadfield., London Edic. Iliffe Books Ltd. 1962.
- 5.- "PRINCIPIOS DE LAS MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA", Alexander Langsdorf, 6ª Edición 1964, España.
- 6.- "ELECTROMECHANICA Y MAQUINAS ELECTRICAS". Nasar Unnewehr. Editorial Limusa, primera edición 1962.
- 7.- "ELECTROMAGNETICS DEVICES", Herbert C. Roters. Copyright, Canada 1941.
- 8.- "ANALISIS DE CIRCUITOS I". Scott. 4ª Edición 1978.
- 9.- "PRACTICAS DE ELECTRONICA INDUSTRIAL", Paul B. Zbar Editorial Marcombo, 2ª Edición 1977.



## MANUALES TECNICOS

- 1.- "OPERACION Y MANTENIMIENTO DE LOS MONTAJES 76/62 MM."  
Otomelara, año 1975.
- 2.- "OPERACION Y MANTENIMIENTO DE LOS MONTAJES 127/54  
MM." Otomelara, año 1980.
- 3.- "MANUAL DE ALEACIONES EN INGENIERIA", Norman E.  
Woldman, Editirial Limusa, 1980.
- 4.- "EL ACERO EN LA CONSTRUCCION" . José Pinos Calvet,  
Editorial Reverté, 1972.

## CATALOGOS

- 1.- MOTORES ELECTRICOS.  
Delcrosa  
Brown Boveri.
- 2.- EQUIPOS DE CONTROL Y AUTOMATIZACION.  
Telemecanique  
Manufacturas eléctricas.  
Agut.
- 3.- ACEROS.  
Bohler.
- 4.- CONECTORES DE CONTROL Y POTENCIA.  
Star-Line.
- 5.- CABLES ELECTRICOS.  
Indeco.