

Universidad Nacional de Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



“ Control Automático de Velocidad con el Grupo Ward - Leonard y la Amplidina en Circuito Cerrado ”

T E S I S

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

ELMER HERNAN RAMIREZ QUIROZ

PROMOCION: 1984 - 1

LIMA . PERU . 1991

TABLA DE CONTENIDO

	PAG.
DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
TABLA DE CONTENIDO	III
TABLA DE NOMENCLATURA	IV
PROLOGO	V
<u>CAPITULO I</u> : INTRODUCCION	1
<u>CAPITULO II</u> : ANALISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA EN REGIMEN ESTACIONARIO Y TRANSITORIO.	3
II.1 Análisis de Funcionamiento del sistema en régimen Estacionario según modelo D-Q.	4
II.1.1 Configuración del circuito equivalente del sistema.	4
II.1.2 Aspectos físicos y algunas consideraciones.	7
II.1.3 Ecuaciones que gobiernan el sistema.	9
II.2 Análisis de Funcionamiento del sistema en régimen Transitorio según modelo D-Q.	12
II.2.1 Configuración del circuito equivalente del sistema.	12
II.2.2 Aspectos físicos, consideraciones y algunas restricciones.	14
II.2.3 Ecuaciones que gobiernan el sistema.	15
II.2.4 Desarrollo del sistema mediante diagramas de bloques.	21
<u>CAPITULO III</u> : SIMULACION DIGITAL AL SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO PARA EL ANALISIS EN REGIMEN ESTACIONARIO Y TRANSITORIO.	26

III.1	Diagramas de Flujo.	
III.1.1	Diagrama de flujo en el régimen estacionario.	27
III.1.2	Diagrama de flujo en el régimen transitorio.	27
III.2	Planteamiento de la solución digital.	30
III.2.1	Régimen Estacionario.	30
III.2.2	Régimen Transitorio.	31
III.3	Análisis de los resultados y curvas características para diferentes señales de entrada.	32
III.3.1	Régimen Estacionario.	35
III.3.2	Régimen Transitorio.	44
<u>CAPITULO IV: ENSAYO EN LABORATORIO DEL SISTEMA DE CONTROL.</u>		50
IV.1	Diagrama general de las máquinas e instrumentos del sistema.	55
IV.2	Características técnicas generales del equipo utilizado.	55
IV.2.1	Datos técnicos de las máquinas.	55
IV.2.2	Datos técnicos de Instrumentos y equipos auxiliares.	59
IV.3	Resultados y curvas características en régimen estacionario y transitorio y su comparación con el análisis teórico.	60
IV.3.1	Comportamiento en régimen estacionario.	69
IV.3.2	Comportamiento en régimen transitorio.	75
<u>CAPITULO V: APLICACIONES PRACTICAS COMO ALTERNATIVA DE SOLUCION EN EL CAMPO DE LA INDUSTRIA.</u>		77

<u>CAPITULO VI: COMPARACION CON OTROS SISTEMAS DE CONTROL DE VELOCIDAD EN AC UTILIZANDO DISPOSITIVOS ESTATICOS.</u>	91
VI.1 Control de velocidad de Motores DC con el uso de Tiristores a partir de una fuente-AC.	93
VI.1.1 Influencia de la regulación de velocidad en el Par y la Potencia.	94
VI.1.2 Características de funcionamiento de los motores DC en los cuatro -- cuadrantes.	97
VI.1.3 Regulación con control de tensión- de Armadura.	104
VI.1.4 Regulación con Control de Campo.	110
VI.1.5 Regulación con Control Combinado - de Armadura y de Campo.	112
VI.2 Control de Velocidad de Motores AC a partir de una fuente AC.	114
VI.3 Ventajas y Desventajas de los Tiristores.	118
VI.4 Comparación Final.	127
CONCLUSIONES	130
APENDICE	134
BIBLIOGRAFIA	156

TABLA DE NOMENCLATURA

- B : Gama de regulación de velocidad en las máquinas herramientas.
- B_w : Gama de regulación de velocidad del grupo Ward-Leonard.
- D : Coeficiente de pérdidas por ventilación de la máquina DC con excitación independiente, (N-m-sg/rad)
- D_a : Coeficiente de pérdidas por ventilación de la amplidina, (N-m-sg/rad.).
- D_g : Coeficiente de pérdidas por ventilación del generador DC con excitación independiente, (N-m-sg/rad.).
- : Coeficiente de pérdidas por ventilación del motor-DC con excitación independiente y la carga (generador DC), (N-m-sg/rad.).
- E_{fem} : Fuerza electromotriz de generación del taco-generador, (volt.)
- G_e^{dq}, G_a^{qd} : Inductancia rotacional entre los devanados de eje directo y cuadratura de la amplidina, (Hy).
- G_a^{qC} : Inductancia rotacional entre los devanados de eje en cuadratura y de compensación en la amplidina, (Hy).
- G_a^{qc1} : Inductancia rotacional entre los devanados de eje en cuadratura y campo de control No1 en la amplidina, (Hy).
- G_a^{qc2} : Inductancia rotacional entre los devanados de eje en cuadratura y campo de control No2 en la amplidina, (Hy).
- G_a^{qI} : Inductancia rotacional entre los devanados de eje en cuadratura e interpolos en la amplidina, (Hy).
- G_g^{fa} : Inductancia rotacional entre los devanados induc--tor e inducido del generador DC, (Hy).

- G_m^{fa} : Inductancia rotacional entre los devanados inductor e inducido del motor DC, (Hy).
- $G_{qd}^{rs}, G_{dq}^{sr}, G_q^{rs}$: Inductancia rotacional del rotor en el eje en cuadratura y estator en el eje directo, (Hy).
- I_{a1}^a : Transformada de Laplace de la corriente de armadura en la amplidina, (Amp).
- I_{a1}^{c1} : Transformada de Laplace de la corriente de campo de control N°1 en la amplidina, (Amp).
- I_{a1}^q : Transformada de Laplace de la corriente en el devanado en cuadratura de la amplidina, (Amp).
- I_{ef} : Corriente eficaz, (Amp).
- I_{gt1} : Transformada de Laplace de la corriente del generador-tacómetro en régimen transitorio, (Amp).
- I_{med} : Corriente media, (Amp).
- I_{mg1}^a : Transformada de Laplace de la corriente de armadura del grupo Ward-Leonard en régimen transitorio, (Amp).
- J : Momento de inercia de la máquina de corriente continua con excitación independiente, (Kg-m²).
- : Momento de inercia de la amplidina, (Kg-m²).
- J_{carga} : Momento de inercia de la carga (generador DC) - acoplado al motor DC, (Kg-m²).
- J_{ejes} : Momento de inercia equivalente, de los ejes del motor DC y la carga acoplados rígidamente, (Kg-m²).
- J_g : Momento de inercia del generador DC con excitación independiente, (Kg-m²).
- J_m : Momento de inercia equivalente, entre el motor DC y la carga, acoplados rígidamente, (Kg-m²).
- J_{mot} : Momento de inercia del motor DC con excitación independiente, (Kg-m²).

- K_A : Constante de ganancia, (Nw-mt/volt).
- K_B, K_C, K_b, K_c : Constante de ganancia, (volt/volt).
- K_t : Constante de tensión del generador tacométrico, - (Volt-sg/rad).
- K_p : Constante que relaciona los parámetros de diseño de la amplidina.
- L_a^C : Inductancia del devanado de compensación de la amplidina, (Hy).
- L_a^{c1} : Inductancia del devanado de campo de control N° 1 de la amplidina, (Hy).
- L_a^{c2} : Inductancia del devanado de campo de control N° 2 de la amplidina, (Hy).
- L_a^d : Inductancia de armadura del eje directo de la amplidina, (Hy).
- L_a^I : Inductancia de interpolos de la amplidina, (Hy).
- L_a^q : Inductancia de armadura del eje en cuadratura de la amplidina, (Hy).
- L_d^S : Inductancia del devanado estático del eje directo de la máquina DC con excitación independiente, (Hy).
- L_g^a : Inductancia de armadura del generador DC con excitación independiente, (Hy).
- L_g^f : Inductancia del devanado inductor del generador DC con excitación independiente, (Hy).
- L_g^I : Inductancia de interpolos del generador DC con -- excitación independiente, (Hy).
- L_m^a : Inductancia de armadura del motor DC con excitación independiente, (Hy).
- L_m^f : Inductancia del devanado inductor del motor DC -- con excitación independiente, (Hy).
- $Leq_{X/Y}$: Inductancia propia equivalente entre X e Y, (Hy).

- L_m^I : Inductancia de interpolos del motor DC con excitación independiente, (Hy).
- L_q^r : Inductancia del devanado rotórico del eje en cuadratura de la máquina DC con excitación independiente, (Hy).
- L_q^s : Inductancia del devanado estatórico del eje en cuadratura de la máquina DC con excitación independiente, (Hy).
- L_1 : Distancia del eje saliente, para el motor DC con excitación independiente, (mm).
- L_2 : Distancia axial del núcleo del motor DC con excitación independiente ó de la carga, (mm).
- L_3 : Distancia del eje saliente para la carga (generador DC con excitación independiente), (mm).
- M_a^{Cd}, M_a^{dC} : Inductancia mutua entre el campo de compensación y el devanado de eje directo en la amplitudina, (Hy).
- M_a^{Cc1}, M_a^{c1C} : Inductancia mutua entre el campo de compensación y el campo de control N°1 en la amplitudina, (Hy).
- M_a^{Cc2}, M_a^{c2C} : Inductancia mutua entre el campo de compensación y el campo de control N°2 en la amplitudina, (Hy).
- M_a^{CI}, M_a^{IC} : Inductancia mutua entre el campo de compensación y el devanado de interpolos en la amplitudina, (Hy).
- M_a^{dI}, M_a^{Id} : Inductancia mutua entre el campo de eje directo y el devanado de interpolos en la amplitudina, (Hy).
- M_a^{c1c2}, M_a^{c2c1} : Inductancia mutua entre los campos de control N°1 y N°2 en la amplitudina, (Hy).
- M_a^{c1d}, M_a^{dc1} : Inductancia mutua entre el campo de control-

Nº1 y el devanado de eje directo en la amplidina, (Hy).

M_a^{c1I}, M_a^{Ic1} : Inductancia mutua entre el campo de control-Nº1 y el devanado de interpolos en la amplidina, (Hy).

M_a^{c2d}, M_a^{dc2} . Inductancia mutua entre el campo de control-Nº2 y el devanado de eje directo en la amplidina, (Hy).

M_a^{c2I}, M_a^{Ic2} : Inductancia mutua entre el campo de control-Nº2 y el devanado de interpolos en la amplidina, (Hy).

M_g^{aI}, M_g^{Ia} : Inductancia mutua entre la armadura y el devanado de interpolos en el generador DC con excitación independiente, (Hy).

M_m^{aI}, M_m^{Ia} : Inductancia mutua entre la armadura y el devanado de interpolos en el motor DC con excitación independiente, (Hy).

$M_{qq}^{rs}, M_{qq}^{sr}, M_q^{rs}$: Inductancia mutua entre los devanados de eje en cuadratura del rotor y estator en la máquina DC con excitación independiente

N_g : Máxima velocidad del órgano fundamental en las máquinas herramientas, (RPM).

: Mínima velocidad del órgano fundamental en las máquinas herramientas, (RPM).

R_a^C : Resistencia del devanado de compensación en la amplidina, (Ω).

R_a^{c1} : Resistencia del devanado de campo de control Nº 1 en la amplidina, (Ω).

R_a^{c2} : Resistencia en el devanado de campo de control Nº 2 en la amplidina, (Ω).

R_a^{carb} : Resistencia de carbones en el eje directo δ en cuadratura en la amplidina, (Ω).

R_a^d : Resistencia de armadura del eje directo en la am-

plidina, (Ω).

- R_a^I : Resistencia de interpolos en la amplidina, (Ω).
- R_a^Q : Resistencia de armadura del eje en cuadratura en la amplidina, (Ω).
- R_d^S : Resistencia del devanado estat3rico del eje directo de la m3quina DC con excitaci3n independiente.
- R_g^a : Resistencia de armadura del generador DC con excitaci3n independiente, (Ω).
- R_g^{carb} : Resistencia de los carbones del generador DC con excitaci3n independiente, (Ω).
- R_g^f : Resistencia del devanado inductor del generador DC con excitaci3n independiente, (Ω).
- R_g^I : Resistencia de interpolos del generador DC con excitaci3n independiente, (Ω).
- R_m^a : Resistencia de armadura del motor DC, con excitaci3n independiente, (Ω).
- R_m^{carb} : Resistencia de los carbones del motor DC con excitaci3n independiente, (Ω).
- R_m^f : Resistencia del devanado inductor del motor DC con excitaci3n independiente, (Ω).
- R_m^I : Resistencia de interpolos del motor DC con excitaci3n independiente, (Ω).
- R_q^R : Resistencia del devanado rot3rico del eje en cuadratura de la m3quina DC con excitaci3n independiente, (Ω).
- R_q^S : Resistencia del devanado estat3rico del eje en cuadratura de la m3quina DC con excitaci3n independiente, (Ω).
- R_{WL} : Resistencia de armadura equivalente del grupo Ward-Leonard, (Ω).
- R_1 : Radio del n3cleo del rotor del motor DC, (mts).

- R_2 : Radio del eje del motor DC, (mts).
- T^e : Torque de origen eléctrico en la máquina DC con - excitación independiente, (N-m)
- T_a^e, T_{ao}^e : Torque de origen eléctrico en la amplidina, ins- tantánea y estacionario, (N-m).
- T_a^r, T_{ao}^r : Torque exterior aplicado al eje de la amplidina instantánea y permanente, (N-m).
- T_g^e, T_{go}^e : Torque de origen eléctrico en el generador DC; instantáneo y permanente, (N-m).
- T^r : Torque exterior aplicado al eje de la máquina - DC con excitación independiente, (N-m).
- $T_g^r, T_{go}^r, T_{g1}^r$: Torque exterior aplicado al eje del genera - dor DC con excitación independiente; instantá - neo, estacionario y transitorio, (N-m).
- $T_m^r, T_{mo}^r, T_{m1}^r$: Torque exterior aplicado al eje del motor DC con excitación independiente; instantáneo, es - tacionario y transitorio, (N-m).
- T_{OL} : Torque de la carga en régimen estacionario, (N-m).
- T_{1L} : Torque de la carga en régimen transitorio, (N-m).
- $T_{1L}(s)$: Transformada de Laplace del torque de la carga - en régimen transitorio, (N-m).
- V_{a1}^a : Transformada de Laplace de la tensión de armadura - en régimen transitorio de la amplidina, (V).
- V_{a1}^{c1} : Transformada de Laplace de la tensión en el deva - nado de control N°1 en la amplidina, (V).
- V_{a1}^{c2} : Transformada de Laplace de la tensión en el deva - nado de control N°2 en régimen transitorio en la - amplidina, (V)
- V_{a1}^q : Transformada de Laplace de la tensión en el devana - do rotórico del eje en cuadratura en régimen tran - sitorio en la amplidina, (V).
- V_{g1}^f : Transformada de Laplace de la tensión en el devana -

do de campo en régimen transitorio en el generador DC con excitación independiente, (V).

V_{gt1} : Transformada de Laplace de la tensión de armadura en régimen transitorio del generador-tacometrico (V)

Z : Número de dientes de un engranaje.

a : Radio del rotor cilíndrico de una máquina DC, (mt).

e_{abs} : Error absoluto en (%).

e_r : Error relativo en (%).

g : Número de marchas ó velocidades impulsadas en las máquinas herramientas.

g_0 : Longitud media del entrehierro en una máquina DC - (mm).

g_1 : Coeficiente de entrehierro periódico.

i^a : Corriente de armadura instantánea de la máquina DC con excitación independiente, (A)

$i_a^a, i_{ao}^a, i_{a1}^a, i_{a1}^a(0^+)$: Corriente de armadura en la amplidina; instantánea, estacionario, incremental e inicial, (A).

$i_a^C, i_{ao}^C, i_{a1}^C$: Corriente en el devanado de compensación en la amplidina; instantánea, estacionario e incremental, (A).

$i_a^{c1}, i_{ao}^{c1}, i_{a1}^{c1}, i_{a1}^{c1}(0^+)$: Corriente por el campo de control N° 1 en la amplidina; instantánea, estacionaria, incremental e inicial, (A).

$i_a^{c2}, i_{ao}^{c2}, i_{a1}^{c2}$: Corriente por el campo de control N°2 en la amplidina; instantánea, estacionaria e incremental, (A).

$i_a^d, i_{ao}^d, i_{a1}^d$: Corriente por el devanado rotórico del eje directo en la amplidina; instantánea, estacionaria e incremental, (A).

- $i_e^I, i_{a0}^I, i_{a1}^I$: Corriente por el devanado de interpolos en la amplidina; instantánea, estacionaria e incremental, (A).
- $i_a^q, i_{a0}^q, i_{a1}^q, i_{a1}^q(0^+)$: Corriente por el devanado rotórico del eje en cuadratura en la amplidina; instantánea, estacionaria, incremental e inicial, (A).
- i_g^a : Corriente de armadura instantánea en el generador DC con excitación independiente, (A).
- $i_{gt}, i_{gto}, i_{gt1}, i_{gt1}(0^+)$: corriente del generador-tacométrico; instantánea, estacionaria, incremental e inicial, (A).
- $i_g^f, i_{go}^f, i_{g1}^f$: Corriente de campo del generador DC con excitación independiente; instantánea, estacionaria e incremental, (A).
- i_m^a : Corriente de armadura instantánea en el motor DC con excitación independiente, (A).
- i_m^f, i_{mo}^f : Corriente de campo del motor DC con excitación independiente; instantánea y estacionaria, (A).
- $i_{mg}^a, i_{mgo}^a, i_{mg1}^a, i_{mg1}^a(0^+)$: Corriente de armadura del grupo Ward-Leonard; instantánea, estacionaria, incremental e inicial, (A).
- i_q^r : Corriente por el devanado rotórico del eje en cuadratura de la máquina DC con excitación independiente, (A).
- i_q^s : Corriente por el devanado estático del eje en cuadratura de la máquina DC con excitación independiente, (A).
- i_d^s : Corriente por el devanado estático del eje directo de la máquina DC con excitación independiente, (A).
- l : Longitud axial del rotor cilíndrico de la máquina DC, (m).

- m_{cu} : Peso del bobinado de armadura en el motor DC-- con excitación independiente ó la carga, (Kg).
- $m_{fe, ejes}$: Peso de los ejes salientes del motor DC con excitación independiente y la carga, (Kg).
- $m_{fe, rot}$: Peso del núcleo del rotor de la máquina DC con excitación independiente ó de la carga(generator DC con excitación independiente), (Kg).
- n : Velocidad angular expresada en (RPM).
- p : Operador matemático para la derivación.
- v^a : Tensión de armadura de la máquina DC con excitación independiente, (V).
- $v_a^a, v_{ao}^a, v_{a1}^a$: Tensión de armadura en la amplidina; instantánea, estacionaria e incremental, (V).
- v_a^C, v_{ao}^C : Tensión en el devanado de compensación en la amplidina; instantánea y estacionaria, (V).
- $v_a^{c1}, v_{ao}^{c1}, v_{a1}^{c1}$: Tensión en el devanado de campo de control-Nº1 en la amplidina; instantánea, estacionaria e incremental, (V).
- $v_a^{c2}, v_{ao}^{c2}, v_{a1}^{c2}$: Tensión en el devanado de campo de control-Nº2 en la amplidina; instantánea, estacionaria e incremental, (V).
- v_a^d, v_{ao}^d : Tensión en el devanado rotórico del eje directo en la amplidina, instantánea y estacionaria, (V).
- v_a^I, v_{ao}^I : Tensión en el devanado de interpolos en la amplidina, instantánea y estacionaria, (V).
- $v_a^q, v_{ao}^q, v_{a1}^q$: Tensión en el devanado rotórico del eje en cuadratura en la amplidina; instantánea, estacionaria e incremental, (V).
- v_g^a : Tensión de armadura del generador DC con excitación independiente, (V).
- $v_g^f, v_{go}^f, v_{g1}^f$: Tensión en el devanado de campo del generador DC con excitación independiente; instantánea, estacionaria e incremental, (V).

tánea, estacionaria e incremental, (V).

v_{gt}, v_{gto}, v_{gt1} : Tensión de armadura del generador-tacométrico; instantánea, estacionaria e incremental, (V).

v_m^a : Tensión de armadura del motor DC con excitación independiente, (V).

$v_m^f, v_{mo}^f, v_{m1}^f$: Tensión en el devanado de campo del motor DC con excitación independiente; instantánea, estacionaria e incremental, (V).

v_q^r : Tensión en el devanado rotórico del eje en cuadratura de la máquina DC con excitación independiente, (V).

v_q^s : Tensión en el devanado estatórico del eje en cuadratura de la máquina DC con excitación independiente, (V).

v_d^s : Tensión en el devanado estatórico del eje directo de la máquina DC con excitación independiente, (V).

w : Velocidad angular expresada en (rad/sg).

w^r, w_o^r, w_1^r : Velocidad angular de la máquina DC con excitación independiente; instantánea, estacionaria e incremental, (rad/seg).

$w_a^r, w_{ao}^r, w_{a1}^r$: Velocidad angular de la amplidina; instantánea, estacionaria e incremental, (rad/sg).

$w_g^r, w_{go}^r, w_{g1}^r$: Velocidad angular del generador DC con excitación independiente; instantánea, estacionaria e incremental, (rad/sg).

$w_m^r, w_{mo}^r, w_{m1}^r, w_{m1}^r(0^+)$: Velocidad angular del motor DC con excitación independiente; instantánea, estacionaria, incremental e inicial, (V).

α : Angulo de disparo de los tiristores, (grad.).

- μ_0 : Permeabilidad magnética del aire ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ hy/m)
- τ_2 : Constante de tiempo de la armadura en la amplidina, (sg).
- τ_{c1} : Constante de tiempo del campo de control N°1 en la amplidina, (sg).
- τ_{c2} : Constante de tiempo del campo de control N°2 en la amplidina, (sg).
- τ_m : Constante de tiempo mecánico en el motor DC con excitación independiente, (sg).
- τ_{mg} : Constante de tiempo de las armaduras en el grupo Ward-Leonard, (sg).
- τ_q : Constante de tiempo de la armadura del eje en cuadratura en la amplidina, (sg).
- Ω_{mi}^r : Transformada de Laplace de la velocidad angular-incremental del motor DC con excitación independiente, (RPM).
- δ_{fe} : Peso específico del fierro, (Kg/dm^3).
- \mathcal{Q} : Escalonamiento de la regulación de velocidad en las máquinas herramientas.
- ϕ_{RA} : Flujo de reacción de Armadura, (Weber).
- ϕ_I : Flujo de inducción del devanado de Interpolos, (Weber).
- η : Pendiente de la curva característica externa de la máquina DC con excitación independiente.

PROLOGO

La presente obra nace en primer lugar como necesidad de disponer otra alternativa de solución, al problema de la regulación de velocidad utilizando la máquina de corriente continua, ya que si bien es cierto en la actualidad este siendo desplazada por otras técnicas, pero aún es notorio el desconocimiento en nuestro medio y son pocos los ingenieros y técnicos que dominan la conjunción de la electrónica de potencia con las máquinas eléctricas. También mediante este estudio, es posible contribuir con todas aquellas personas que desean especializarse con el control electrónico de los motores eléctricos, de tal manera que podrán despejar dudas en lo que respecta a su comparación con la alternativa más compleja de regulación de velocidad por medio netamente eléctrico. Y en segundo lugar, con la inquietud de mostrar las bondades de la máquina de corriente continua, como dispositivo -- electromecánico de fácil regulación de velocidad, pero -- dentro de un sistema más complejo como es el grupo Ward-Leonard, donde la excitación al generador es por medio de la Amplidina con dos campos de control, siendo considerada ésta máquina como un amplificador rotativo, tal -- que para lograr la regulación de velocidad de un motor -- DC con excitación independiente, usamos dicha velocidad a través de un generador tacométrico para realimentar a la amplidina y conseguir así el objetivo trazado.

CAPITULO I

INTRODUCCION

Esta obra se ha desarrollado en principio, con el objetivo de conocer en forma completa, la manera de lograr la regulación automática de velocidad, de un motor DC con excitación independiente en lazo cerrado, utilizando para este propósito un amplificador rotativo que se encargara del efecto de la retroalimentación.

Este trabajo consta en su inicio de un análisis teórico-tal como se muestra en el Capítulo II, mediante el modelo de ejes ortogonales (D-Q) para establecer las relaciones que gobiernan a la máquina de corriente continua, ya sea para el régimen estacionario como el transitorio; aplicando además para este último régimen la técnica de linealización en la que todos los parámetros del sistema se suponen compuestas de un nivel estático ó de corriente continua, más una variación incremental con el tiempo en el entorno de dicho nivel. Por otro lado las suposiciones y restricciones hechas en el análisis, es asegurado por la correcta disposición en cuanto a su potencia--se refiere de las máquinas utilizadas en el ensayo tal como se mostrarán más adelante, también teniendo en consideración la magnitud de algunos parámetros, se logra despreciar algunas constantes de tiempo y así simplificar la solución para el análisis transitorio.

En el capítulo III análogamente para ambos regímenes plantea la solución digital de sus ecuaciones, simplificando el trabajo para la obtención de resultados, logrando así analizar sus curvas características y comparar estos resultados con los obtenidos en los ensayos de laboratorio como se explica en el capítulo IV.

En este IV capítulo denominado ENSAYO DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE CONTROL, también se detalla el equipo completo

utilizado, especificando las máquinas eléctricas como los instrumentos analógicos, digitales y registradores. Es importante indicar que en lo que se refiere a la parte experimental, fué realizado en el INSTITUTO TECNOLÓGICO "TECSUP", contando con máquinas de procedencia Sueca y los instrumentos de medición de fabricación Alemana y Americana.

Por otro lado debido a la gran variedad de pruebas - que pueden realizarse especialmente en régimen transitorio, es que el presente trabajo esta limitado para una sola condición, que consiste en pasar de un régimen estacionario a otro, a través del transitorio que experimenta un motor que se encontraba trabajando a plena carga ó un porcentaje menor de la plena carga, y ésta se anula bruscamente en su totalidad.

Luego de conseguir la compatibilidad analítica y práctica, se indica en el capítulo V diversas alternativas para su aplicación dentro del campo industrial como una solución al problema de regulación de velocidad. Finalmente como consecuencia del hecho más importante de los últimos años en el desarrollo de la electrónica de potencia, y que en la actualidad la tendencia hacia el aumento de aplicación de los motores de corriente alterna como un dispositivo de velocidad variable, se formula - en el último capítulo la comparación de los sistemas de control de velocidad utilizando los dispositivos estáticos para el control de velocidad de motores DC y AC y resaltar las ventajas y desventajas que presenta el sistema en estudio, así como las otras alternativas mediante la electrónica de potencia, no pretendiendo abordar en profundidad cada uno de estos casos, sino por el contrario solamente darnos una idea general de lo que representa cada uno de ellos.

CAPITULO II

ANALISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA EN REGIMEN ESTACIONARIO Y TRANSITORIO

Antes de iniciar el estudio de funcionamiento del sistema, tanto en el régimen estacionario como en el transitorio, es conveniente conocer en forma independiente cada una de las máquinas que conforman el sistema.

Como se sabe este sistema esta constituido por dos máquinas de corriente continua, uno de ellos actuando como generador con su respectiva máquina prima, un motor asincrono trifásico; mientras que la otra máquina actuando como motor el cual se desea regular su velocidad, dicho motor tiene conectado en su eje un generador tacométrico que se encargará de dar una señal de realimentación a la excitatriz, también en el mismo eje va la carga que proporcionará el torque variable; ambas máquinas de corriente continua estan conectadas eléctricamente que comunmente se le conoce como grupo Ward-Leonard, por otro lado, quien se encarga de dosificar la corriente de excitación al campo del generador, conforme le sea necesario para la regulación de velocidad del motor es la Amplidina, quien lleva consigo un motor trifásico asincrono como parte de un mismo eje.

Pues bien, para configurar el circuito equivalente de todo el sistema y poderlo estudiar tanto en el régimen estacionario como en el transitorio, es necesario conocer en primer lugar, los modelos matemáticos de cada máquina motor y generador de corriente continua de excitación independiente, y por su puesto también la amplidina, y en segundo lugar para efectuar el análisis del sistema, conectarlas eléctricamente.

En el Apéndice A-1, se tiene la representación según el modelo D-2 y su circuito equivalente de la máquina de-

corriente continua con excitación independiente; mientras que en el Apéndice A-2 en forma análoga al anterior tenemos el modelo de la Amplidina, con dos devanados de campo, devanado de compensación e interpolos.

Para establecer el circuito equivalente completo del sistema, se procede a interconectar salidas y entradas de todas las máquinas de corriente continua, manteniendo todos sus parámetros eléctricos que, dependiendo del régimen de trabajo van ó no a estar presentes en el análisis. Esta configuración lo podemos ver en la Figura N° 2-1 .

II.1.- Análisis de Funcionamiento del Sistema en Régimen Estacionario según modelo D-2.

II.1.1.- Configuración del Circuito Equivalente del sistema.

Para configurar el circuito equivalente del sistema en régimen estacionario, nos valemos inicialmente del circuito equivalente completo, tal como se muestra en la Figura N° 2-1, pero en cuyo caso se procede a la eliminación de todas las fuentes variables con el tiempo, así como la sustitución de las inductancias y condensadores por cortocircuitos y circuitos abiertos respectivamente, tal como se muestra en la Figura N° 2-2

Es conveniente indicar, que no es necesario representar al Generador Tacométrico con un circuito equivalente de una máquina de corriente continua, como físicamente lo es, ya que es suficiente representarlo como un dispositivo de transformación proporcional de una señal mecánica en otra señal eléctrica, puesto que sus parámetros no representan cambios fundamentales de distorsión al sistema.

II.1.2.-Aspectos físicos y algunas consideraciones

- La ecuación en régimen estacionario, para la puerta mecánica del generador y la Amplidina, no se han empleado en este razonamiento ya que dicha ecuación específica tan solo el valor del par necesario, en el eje -- del generador y Amplidina para mantener una velocidad angular constante.
- Velocidad angular constante del rotor del generador.
($w_{go}^r = \text{cte.}$)
- Velocidad angular constante del rotor de la Amplidina.
($w_{ao}^r = \text{cte.}$)
- Diferencia de potencial en los terminales del devanado inductor del motor constante. ($v_{mo}^f = \text{cte.}$)
- Se omiten la inercia del generador, motor y de la Amplidina por estar en funcionamiento en régimen estacionario.
- Se omiten las inductancias de los circuitos de armadura y campo de la Amplidina y motor-generador del grupo Ward-Leonard por estar en funcionamiento en régimen estacionario.
- Par de carga constante " T_{OL} " en la puerta del rotor del motor (Generador DC de excitación independiente).
- Como consecuencia de considerar en el sistema, la velocidad del generador, Amplidina y tensión del campo del motor como parámetros que no experimentan variación considerable; para las relaciones siguientes figurarán como parámetros constantes, lo cual origina que -- los factores K_A , K_B y K_C lo sean también.
- En el generador tacométrico, el campo magnético inductor está creado por imanes permanentes y, por tanto -- con un flujo magnético constante; por otra parte, se le hace trabajar con cargas muy pequeñas de tal forma --

que la reacción de inducido, que es proporcional a la corriente de carga, resulta en este caso despreciable. De esta forma, en el generador taconétrico, la fuerza electromotriz ya no depende ni de la corriente de excitación (puesto que no existe) ni de la reacción del inducido y solamente depende de la velocidad de la máquina, es decir se tiene la relación siguiente:

$$E_{fem.} = K_t \omega$$

de donde K_t representa la constante de tensión del taquímetro en unidades de v-seg/rad. y es un parámetro característico invariable de estos generadores, lo cual significa que para nuestra ecuación es también una constante.

II.1.3.- Ecuaciones que gobiernan el sistema.

Grupo Ward-Leonard

Armadura:

$$0 = - G_g^{fa} i_{go}^f w_{go}^r + (R_g^a + R_g^I + R_m^a + R_m^I) i_{mgo}^a + G_m^{fa} i_{mo}^f w_{mo}^r \quad (2-1)$$

Rotor-generador:

$$T_{go}^r = D_g w_{go}^r + G_g^{fa} i_{go}^f i_{mgo}^a \quad (2-2)$$

Rotor-Motor:

$$-T_{OL} = D_m w_{mo}^r - G_m^{fa} i_{mo}^f i_{mgo}^a \quad (2-3)$$

Campo del motor:

$$v_{mo}^f = R_m^f i_{mo}^f \quad (2-4)$$

Campo del generador:

$$v_{go}^f = R_g^f i_{go}^f \quad (2-5)$$

Amplidina

Armadura:

$$v_{ao}^d - v_{ao}^c - v_{ao}^I = G_a^{dq} w_{ao}^r i_{ao}^q + R_a^d i_{ao}^d - R_a^c i_{ao}^c - R_a^I i_{ao}^I \quad \dots$$

Campo en cuadratura: (2-6)

$$v_{ao}^q = -(G_a^{qc1} i_{ao}^{c1} + G_a^{qc2} i_a^{c2} + G_a^{qC} i_{ao}^C + G_a^{qI} i_{ao}^I + G_a^{qd} i_{ao}^d) w_{ao}^r + R_a^q i_{ao}^q$$

Campo de control N° 1: (2-7)

$$v_{ao}^{c1} = R_a^{c1} i_{ao}^{c1} \quad (2-8)$$

Campo de control N° 2:

$$v_{ao}^{c2} = R_a^{c2} i_{ao}^{c2} \quad (2-9)$$

Rotor-Motor:

$$T_{ao}^r = D_a w_{ao}^r + (G_a^{qc1} i_{ao}^{c1} + G_a^{qc2} i_{ao}^{c2} + G_a^{qC} i_{ao}^C + G_a^{qI} i_{ao}^I) i_{ao}^q$$

Generador Tacométrico. (2-10)

$$v_{gto}^r = K_t w_{mo}^r \quad (2-11)$$

Relaciones de ligadura del sistema:

$$i_{go}^f = i_{ao}^a = i_{ao}^C = i_{ao}^I = - i_{ao}^d \quad (2-12)$$

$$v_{ao}^d - v_{ao}^C - v_{ao}^I = v_{ao}^a = v_{go}^f \quad (2-13)$$

$$-v_{ao}^{c2} = v_{gto} \quad (2-14)$$

$$v_{ao}^q = 0 \quad (2-15)$$

$$i_{gto} = - i_{ao}^{c2} \quad (2-16)$$

resolviendo el sistema de ecuaciones planteadas anteriormente, en conjunto con las relaciones de ligadura, se obtienen las siguientes constantes, y la expresión final de la velocidad a regular en régimen estacionario.

$$K_A = \frac{G_m^{fa} v_{mo}^f}{R_m^f (R_g^a + R_g^I + R_m^a + R_m^I)} \quad \text{New-mt/volt. ...} \quad (2-17)$$

$$K_B = \frac{G_g^{fa} G_a^{dq} G_a^{qc1} (w_{ao}^r)^2 w_{go}^r}{R_a^{c1} R_a^q (R_g^f + R_a^d + R_a^I + R_a^C) + G_a^{dq} (G_a^{dq} - G_a^{qC} - G_a^{qI}) (w_{ao}^r)^2} \dots \quad (2-18)$$

(Volt./Volt.)

$$K_C = \frac{G_g^{fa} G_a^{dq} G_a^{qc2} (w_{ao}^r)^2 w_{go}^r}{R_a^{c2} R_a^q (R_g^f + R_a^d + R_a^I + R_a^C) + G_a^{dq} (G_a^{dq} - G_a^{qC} - G_a^{qI}) (w_{ao}^r)^2} \dots \quad (2-19)$$

$$R_{WL} = R_g^a + R_g^I + R_m^a + R_m^I \quad (2-20)$$

$$w_{mo}^r = \frac{1}{D_m + R_{WL} K_A^2 + K_A K_C K_t} (K_A K_B v_{ao}^{c1} - T_{OL}) \quad (2-21)$$

DETERMINACION DE LA TENSION DE REFERENCIA v_{ao}^{c1} PARA EL CUAL LA VELOCIDAD ANGULAR DEL MOTOR ES IGUAL A CERO.

Igualando a cero la relación final de w_{mo}^r :

$$0 = w_{mo}^r = \frac{1}{D_m + R_{WL} K_A^2 + K_A K_C K_t} (K_A K_B v_{ao}^{c1} - T_{OL}) \dots \quad (2-22)$$

efectuando el despeje correspondiente tenemos:

$$\boxed{v_{ao}^{c1} = \frac{T_{OL}}{K_A \cdot K_B}} \quad (2-23)$$

Este punto de ruptura ocurre en el caso en que el par de origen eléctrico, generado por el motor, se iguale-- exactamente al par de carga aplicado.

II.2.- Análisis de funcionamiento del Sistema en Régimen Transitorio según modelo D-2.

II.2.1.- Configuración del circuito Equivalente del sistema.

Un sistema eléctrico de potencia nunca mantiene largos períodos de tiempo en régimen estacionario, ya que frecuentemente por diferentes motivos existen variaciones en el sistema que disturbian el equilibrio, de modo que el sistema está casi siempre en transición entre condiciones de equilibrio; el análisis anterior es válida en régimen estacionario ó cuando las variaciones en la carga ocurren muy lentamente. Este segundo análisis comprende el comportamiento dinámico del sistema durante la transición de una condición de equilibrio a otra para ello hay la necesidad de efectuar el estudio teniendo en consideración todos los parámetros que intervienen durante este proceso tales como las inductancias propias, mutuas y rotacionales que se manifiestan en los bobinados de las máquinas, así como la inercia del motor que experimentará variación en la velocidad. Análogamente como en el caso anterior partimos del circuito equivalente completo de la Figura N° 2-1, donde en aquellas máquinas con funcionamiento a velocidad aproximadamente constante no son considerados su momento de inercia J ; sabemos además que el motor DC cuya velocidad se desea regular automáticamente es de campo constante y con excitación independiente, por lo tanto este circuito no experimentará cambios en sus parámetros con lo cual permanecerá tal como en el régimen estacionario. Después de tomar las consideraciones del caso, la configuración resultante para estas condiciones queda tal como se muestra en la Figura N° 2-3. Es importante señalar, que para obtener las ecuaciones en el régimen transitorio, se ha procedido a restar de las ecuaciones generales del sistema, tal como se presenta en el Apéndice N° A-3, las ecuaciones del régimen estacionario.

II.2.2.- Aspectos físicos, consideraciones y algunas restricciones.

- La ecuación en régimen transitorio, para la puerta mecánica del generador y la amplidina, no se han empleado en este razonamiento ya que dicha ecuación análogamente al caso anterior especifica tan solo el valor del par necesario, en el eje del generador y Amplidina para mantener una velocidad angular constante.
- Velocidad angular constante del rotor del generador, ($w_{g0}^r = \text{cte.}$).
- Velocidad angular constante del rotor de la Amplidina ($w_{a0}^r = \text{cte.}$).
- Diferencia de potencial en los terminales del devanado inductor del motor constante, ($v_{m0}^f = \text{cte.}$).
- Se omiten la inercia del generador y de la Amplidina por considerarlos con velocidad aproximadamente constante.
- Mediante un reostato en paralelo con el devanado de compensación, se efectúan los ajustes de manera que, la Amplidina se encuentre totalmente compensada, y como veremos en las ecuaciones, simplificará algunas relaciones al sistema.
- En todas las máquinas prácticamente la torsión que sufre el eje es lo bastante pequeña como para considerarla despreciable. Por lo tanto, despreciaremos el par debido a la deformación del eje.
- Se desprecia todo flujo magnético de fuga ó dispersión.

11.2.3.- Ecuaciones que gobiernan el sistema

Grupo Ward-Leonard

Armadura:

$$0 = - G_g^{fa} \left[i_{g0}^f \cdot w_{g1}^r + i_{g1}^f \cdot w_{g0}^r \right] + \left\{ (R_g^a + R_g^I + R_m^a + R_m^I) + \left[L_g^a + L_g^I + L_m^a + L_m^I - 2(M_g^{aI} + M_m^{aI}) \right] p \right\} i_{mg1}^a + G_m^{fa} \left[i_{m0}^f \cdot w_{m1}^r + i_{m1}^f \cdot w_{m0}^r \right] \quad (2-24)$$

Rotor-generator:

$$T_{g1}^r = (D_g + J_g p) w_{g1}^r + G_g^{fa} \cdot i_{g0}^f \cdot i_{mg1}^a + G_g^{fa} \cdot i_{g1}^f \cdot i_{mgo}^a \quad (2-25)$$

Rotor-Motor:

$$-T_{1L} = (D_m + J_m p) w_{m1}^r - G_m^{fa} \left[i_{m0}^f \cdot i_{mg1}^a + i_{m1}^f \cdot i_{mgo}^a \right] \quad (2-26)$$

Campo del Motor:

$$v_{m0}^f = R_m^f \cdot i_{m0}^f \quad (2-27)$$

Campo del Generador:

$$v_{g1}^f = (R_g^f + L_g^f p) i_{g1}^f \quad (2-28)$$

Amplidina

Armadura:

$$v_{a1}^a = (M_a^{c1d} - M_a^{c1C} - M_a^{c1I}) p i_{a1}^{c1} + (M_a^{c2d} - M_a^{c2C} - M_a^{c2I}) p \cdot i_{a1}^{c2} + \left[(M_a^{Cd} - M_a^{CI}) p - (R_a^C + L_a^C p) \right] i_{a1}^C + \left[(M_a^{dI} - M_a^{CI}) p - (R_a^I + L_a^I p) \right] i_{a1}^I - \left[(M_a^{Cd} + M_a^{Id}) p - (R_a^d + L_a^d p) \right] i_{a1}^d + G_a^{dq} \cdot w_{a0}^r \cdot i_{a1}^q + G_a^{dq} \cdot w_{a1}^r \cdot i_{a0}^q \dots$$

(2-29)

Campo en Cuadratura:

$$v_{a1}^q = - (G_a^{qc1} \cdot i_{a1}^{c1} + G_a^{qc2} \cdot i_{a1}^{c2} + G_a^{qC} \cdot i_{a1}^C + G_a^{qI} \cdot i_{a1}^I + G_a^{qd} \cdot i_{a1}^d) w_{a0}^r -$$

$$\left[G_a^{qc1} \cdot i_{a0}^{c1} + G_a^{qc2} \cdot i_{a0}^{c2} + G_a^{qC} \cdot i_{a0}^C + G_a^{qd} \cdot i_{a0}^d + G_a^{qI} \cdot i_{a0}^I \right] w_{a1}^r +$$

$$(R_a^q + L_a^q p) \cdot i_{a1}^q \quad (2-30)$$

Campo de Control N° 1 :

$$v_{a1}^{c1} = (R_a^{c1} + L_a^{c1} p) i_{a1}^{c1} + M_a^{c1c2} p i_{a1}^{c2} + M_a^{c1C} p i_{a1}^C + M_a^{c1I} p i_{a1}^I +$$

$$M_a^{c1d} p i_{a1}^d \quad (2-31)$$

Campo de Control N° 2 :

$$v_{a1}^{c2} = (R_a^{c2} + L_a^{c2} p) i_{a1}^{c2} + M_a^{c2c1} p i_{a1}^{c1} + M_a^{c2C} p i_{a1}^C + M_a^{c2I} p i_{a1}^I +$$

$$M_a^{c2d} p i_{a1}^d \quad (2-32)$$

Generador Tacométrico:

$$v_{gt1} = K_t \cdot w_{m1}^r \quad (2-33)$$

Relaciones de Ligadura y consideraciones al sistema:

$$v_{a1}^a = v_{g1}^f \quad (2-34)$$

$$v_{a1}^q = 0 \quad (2-35)$$

$$v_{gt1} = -v_{a1}^{c2} \quad (2-36)$$

$$v_{m1}^f = 0 \quad (2-37)$$

$$i_{a1}^a = i_{g1}^f = -i_{a1}^d = i_{a1}^C = i_{a1}^I \quad (2-38)$$

$$i_{m1}^f = 0 \quad (2-39)$$

$$i_{gt1} = -i_{a1}^{c2} \quad (2-40)$$

$$w_{a1}^r = 0 \quad (2-41)$$

$$w_{g1}^r = 0 \quad (2-42)$$

$$J_a = J_g = 0 \quad (2-43)$$

$$J_m = J_{mot} + J_{carga} \quad (2-44)$$

Tomando en cuenta las relaciones de ligadura y consideraciones, se procede a aplicar la transformada de Laplace a todas las ecuaciones que gobiernan el sistema en el régimen transitorio.

Grupo Ward-Leonard

Armadura:

$$0 = -G_g^{fa} w_{go}^r I_{a1}^a + (R_g^a + R_g^I + R_m^a + R_m^I)(1 + \tau_{mg}s) I_{mg1}^a - \left[L_g^a + L_g^I + L_m^a + L_m^I - 2(M_g^{aI} + M_m^{aI}) \right] i_{mg1}^a(0^+) + G_m^{fa} i_{mo}^f \Omega_{m1}^r \quad \dots \quad (2-45)$$

Rotor generador:

$$0 = G_g^{fa} \cdot i_{go}^f \cdot I_{mg1}^a + G_g^{fa} \cdot i_{mgo}^a \cdot I_{a1}^a \quad (2-46)$$

Rotor-Motor:

$$T_{1L}(s) = D_m(1+\zeta_m s) \Omega_{m1}^r - J_m w_{m1}^r(0^+) - G_m^f i_{mo}^f I_{mg1}^a \quad (2-47)$$

Campo del Motor:

No existe relación en Laplace. ($v_{mo}^f = R_m^f \cdot i_{mo}^f$)

Campo del Generador:

$$V_{g1}^f = (R_g^f + L_g^f s) I_{a1}^a - L_g^f \cdot i_{a1}^a(0^+) \quad (2-48)$$

Amplidina

Armadura:

$$\begin{aligned} v_{a1}^a = & (M_a^{c1d} - M_a^{c1C} - M_a^{c1I}) [sI_{a1}^{c1} - i_{a1}^{c1}(0^+)] - (M_a^{c2d} - M_a^{c2C} - M_a^{c2I}) \cdot \\ & [sI_{gt1} - i_{gt1}(0^+)] - (R_a^d + R_a^C + R_a^I) I_{a1}^a - [L_a^d + L_a^C + L_a^I - \\ & 2(M_a^{dC} + M_a^{Id} - M_a^{CI})] [sI_{a1}^a - i_{a1}^a(0^+)] + G_a^{dq} w_{ao}^r I_{a1}^q \dots \end{aligned} \quad (2-49)$$

Campo en cuadratura:

$$\begin{aligned} v_{a1}^q = 0 = & [-G_a^{qC} I_{a1}^{c1} + G_a^{qc2} I_{gt1} + (G_a^{qd} - G_a^{qC} - G_a^{qI}) I_{a1}^a] \cdot w_{ao}^r + \\ & R_a^q (1 + \zeta_q s) I_{a1}^q - L_a^q i_{a1}^q(0^+) \end{aligned} \quad (2-50)$$

Campo de Control N°1:

$$\begin{aligned} v_{a1}^{c1} = & R_a^{c1} (1 + \zeta_{c1} s) I_{a1}^{c1} - L_a^{c1} i_{a1}^{c1}(0^+) - M_a^{c1c2} [sI_{gt1} - i_{gt1}(0^+)] \\ & + (M_a^{c1C} + M_a^{c1I} - M_a^{c1d}) [sI_{a1}^a - i_{a1}^a(0^+)] \end{aligned} \quad (2-51)$$

Campo de Control N°2:

$$\begin{aligned} v_{a1}^{c2} = & -R_a^{c2} (1 + \zeta_{c2} s) I_{gt1} + L_a^{c2} i_{gt1}(0^+) + M_a^{c2c1} [sI_{a1}^{c1} - i_{a1}^{c1}(0^+)] \\ & + (M_a^{c2C} + M_a^{c2I} - M_a^{c2d}) \cdot [sI_{a1}^a - i_{a1}^a(0^+)] \end{aligned} \quad (2-52)$$

Generador Tacométrico:

$$V_{gt1} = K_t \cdot \Omega_{m1}^r \quad (2-53)$$

Efectuando algunas igualdades con las anteriores relaciones obtenemos:

10) Igualando la Ec. (2-48) con la (2-49), osea:

$$\begin{aligned} V_{g1}^f &= V_{a1}^a \\ (M_a^{c1d} - M_a^{c1C} - M_a^{c1I}) [sI_{a1}^{c1} - i_{a1}^{c1}(0^+)] &- (M_a^{c2d} - M_a^{c2C} - M_a^{c2I}) \cdot \\ [sI_{gt1} - i_{gt1}(0^+)] + G_a^{dq} w_{ao}^r I_{a1}^q &= (R_a^d + R_a^C + R_a^I + R_g^f) \\ [(1 + \zeta_a^s) I_{a1}^a - L_a^d + L_a^C + L_a^I + L_g^f - 2(M_a^{dc} + M_a^{Id} - M_a^{CI})] &i_{a1}^a(0^+) \quad .. \end{aligned} \quad (2-54)$$

20) Igualando la Ec. (2-52) con la (2-53), osea:

$$\begin{aligned} -V_{a1}^{c2} &= V_{gt1} \\ R_a^{c2}(1 + \zeta_{c2}^s) I_{gt1} - L_a^{c2} i_{gt1}(0^+) - M_a^{c2c1} [sI_{a1}^{c1} - i_{a1}^{c1}(0^+)] - \\ (M_a^{c2C} + M_a^{c2I} - M_a^{c2d}) \cdot [sI_{a1}^a - i_{a1}^a(0^+)] &= K_t \Omega_{m1}^r \quad (2-55) \end{aligned}$$

donde las constantes de tiempo quedan definidas de la forma siguiente:

$$\tau_{mg} = \frac{L_g^a + L_g^I + L_m^a + L_m^I - 2(M_g^{aI} + M_m^{aI})}{R_g^a + R_g^I + R_m^a + R_m^I} \text{ sg.} \quad (2-56)$$

$$\tau_a = \frac{L_a^d + L_a^C + L_a^I + L_g^f - 2(M_a^{dC} + M_a^{Id} - M_a^{CI})}{R_a^d + R_a^C + R_a^I + R_g^f} \text{ sg.} \quad (2-57)$$

$$\tau_{c1} = \frac{L_a^{c1}}{R_a^{c1}} \text{ sg.} \quad (2-58)$$

$$\tau_{c2} = \frac{L_a^{c2}}{R_a^{c2}} \text{ sg.} \quad (2-59)$$

$$\tau_q = \frac{L_a^q}{R_a^q} \text{ sg.} \quad (2-60)$$

$$\tau_m = \frac{J_m}{D_m} \text{ sg.} \quad (2-61)$$

En base al conjunto de ecuaciones especificadas con los números: (2-27), (2-45), (2-47), (2-50), (2-51) y del (2-54) al (2-61) se procede a graficar el diagrama de bloques completo del sistema, tal como se aprecia en la Figura N°(2-4), en ella se observa la configuración del sistema respecto a la interacción de los parámetros -- eléctricos y mecánicos para su funcionamiento.

Por otro lado, antes de realizar las pruebas correspondientes a ambos regímenes se reguló la amplidina para su compensación total ver Apéndice N°(A-4), lo que significa que algunos bloques de transferencia directa y de retroalimentación sean eliminadas por relaciones de algunas constantes. También para el análisis transitorio se ha considerado sin condiciones iniciales, por lo tanto, lo que resulta como consecuencia a estas dos premisas es el diagrama de bloques Simplificado tal como se muestra en la Figura N°(2-5). Finalmente efectuando las simplificaciones hasta su última expresión en este último diagrama, logramos simplificar hasta obtener el diagrama final de bloques, tal como se presenta en la Figura N°(2-6), allí se establece la relación de la velo ci dad del motor en el dominio de Laplace en función de los parámetros de las máquinas y las señales de regulación y perturbadora, teniendo presente que para simpli-

ficar la expresión se han definido las siguientes constantes:

K_A , definido en la relación (2-17)

$$K_b = \frac{G_g^{fa} G_a^{dq} G_a^{qc1} w_{go}^r (w_{ao}^r)^2}{R_a^{c1} R_a^q (R_a^d + R_a^C + R_a^I + R_g^f)} \text{ Volt./Volt.} \quad (2-62)$$

$$K_c = \frac{G_g^{fa} G_a^{dq} G_a^{qc2} w_{go}^r (w_{ao}^r)^2}{R_a^{c2} R_a^q (R_a^d + R_a^C + R_a^I + R_g^f)} \text{ Volt./Volt.} \quad (2-63)$$

dividiendo (2-63) : (2-62) se obtiene:

$$\frac{K_c}{K_b} = \frac{G_a^{qc2} R_a^{c1}}{G_a^{qc1} R_a^{c2}} \quad (2-64)$$

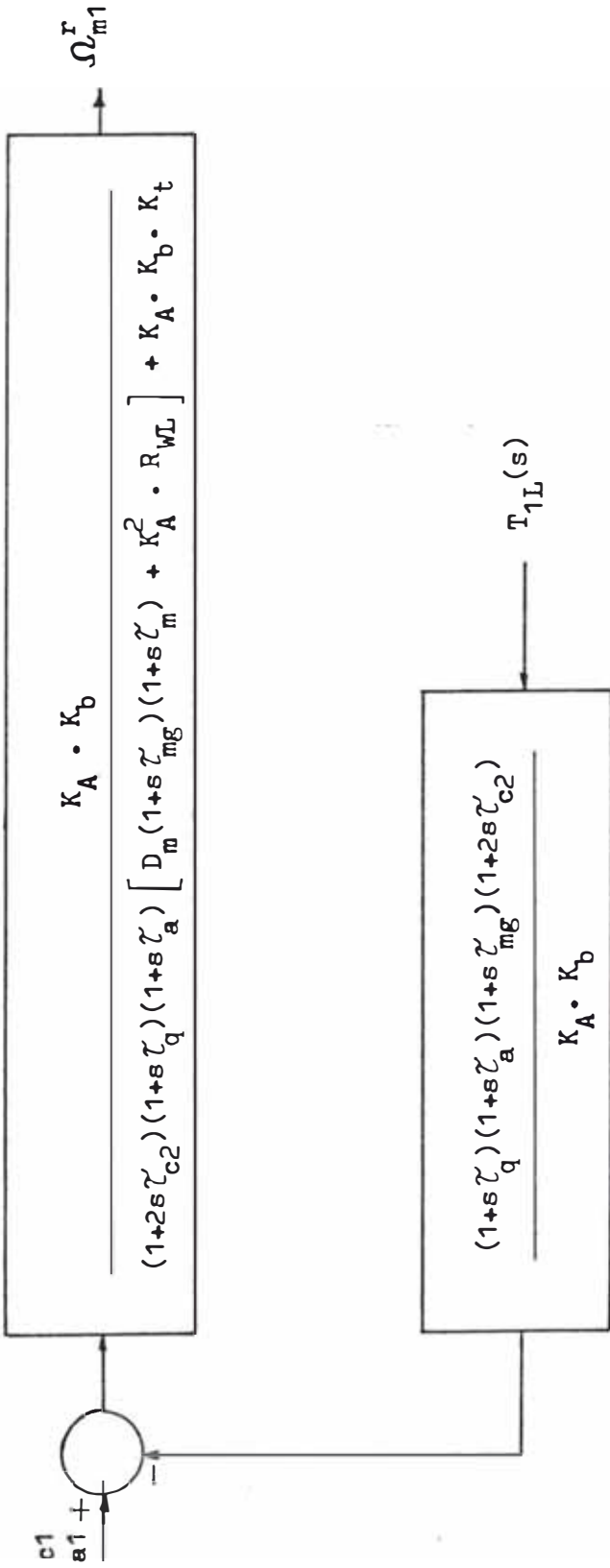
II.2.4.- Desarrollo del sistema mediante diagramas de bloques.

A continuación se presentan los diagramas de bloques completo, simplificado y reducido del sistema correspondientes a las Figuras N^o (2-4), (2-5) y (2-6) respectivamente, de tal modo que la expresión de la velocidad en el dominio de Laplace después de efectuar las últimas reducciones queda definida de la siguiente manera:

$$\Omega_{m1}^r = \frac{K_A \cdot K_b \cdot V_{a1}^{c1} - (1+s\tau_q)(1+s\tau_a)(1+s\tau_{mg}) \cdot T_{1L}(s)}{(1+2s\tau_{c2})(1+s\tau_q)(1+s\tau_a) \left[D_m (1+s\tau_{mg})(1+s\tau_m) + K_A^2 \cdot R_{WL} \right] + K_A \cdot K_b \cdot K_t}$$

... (2-65)

FIG. NO (2-6) : DIAGRAMA DE BLOQUES REDUCIDO DEL SISTEMA.



CAPITULO III

SIMULACION DIGITAL AL SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO PARA EL ANALISIS EN REGIMEN ESTACIONARIO Y TRANSITORIO.

A continuación presentaremos el programa, los resultados y su análisis, de las ecuaciones que gobiernan al sistema en ambos regímenes con ayuda de la informática, cabe resaltar que este análisis se realizará sin aún su comparación con los resultados prácticos, ya que ello se efectuará en el siguiente capítulo.

Esta simulación digital del comportamiento del sistema mediante programas, tiene por objetivo simplificar el trabajo, especialmente en el régimen transitorio donde como se ha observado mediante la relación (2-65), es una ecuación muy compleja y su solución por consiguiente muy tedioso.

Para el régimen estacionario de acuerdo a la relación (2-21), es obvio que la respuesta es una función lineal donde no existe mucho problema para seleccionar el programa; en la actualidad existen una gran variedad de estos lenguajes de programación de modo tal que se ha seleccionado para nuestro propósito el programa "MATHCAD" versión (1.1a); todo ello por razón de su simplicidad que presenta sus sentencias y la similitud con las expresiones ya estudiadas, originando un aspecto sencillo y agradable en el análisis. Sin embargo no ocurre lo mismo con el régimen transitorio ya que la ecuación esta en el dominio de Laplace, para ello se utilizó el programa: "MAT LAB" versión (3.13), que resuelve ecuaciones en Laplace de cualquier orden; es importante señalar, que para llevar a cabo la realización del programa se hicieron algunas simplificaciones a la ecuación general (2-65), por su puesto, en lo que respecta a las constantes de tiempo

muy pequeñas en su valor absoluto, estos por consiguiente serán intrascendentes en la solución; además también este programa no puede ser utilizado por cualquier microcomputadora P/C común y corriente, ya que es necesario adicionarle a ella un Co-procesador matemático para correr dicho programa.

Para este capítulo exclusivamente para el análisis transitorio, fué necesario utilizar el laboratorio de Informática de la Universidad Nacional de Ingeniería "UNI" por disponer del programa "MAT LAB". Cabe mencionar también - que para el régimen estacionario pudo utilizarse el programa del "MAT LAB", pero no fué así porque la simplicidad de la ecuación (2-21) no amerita su uso.

III.1.- Diagramas de Flujo.

III.1.1.- Diagrama de Flujo en el régimen estacionario.

En la Figura Nº (3-1) se muestra el Diagrama de Flujo del programa en "MATHCAD", desarrollado para el análisis de la ecuación que gobierna el control de la velocidad del motor DC en régimen estacionario.

III.1.2.- Diagrama de Flujo en el régimen transitorio.

En la Figura Nº (3-2) se muestra el Diagrama de Flujo del programa en "MAT LAB", desarrollado para el análisis de la ecuación que gobierna el control de la velocidad del motor DC en régimen transitorio.

FIG. No (3-1): DIAGRAMA DE FLUJO EN REGIMEN ESTACIONARIO
(Prog en MATCAD)

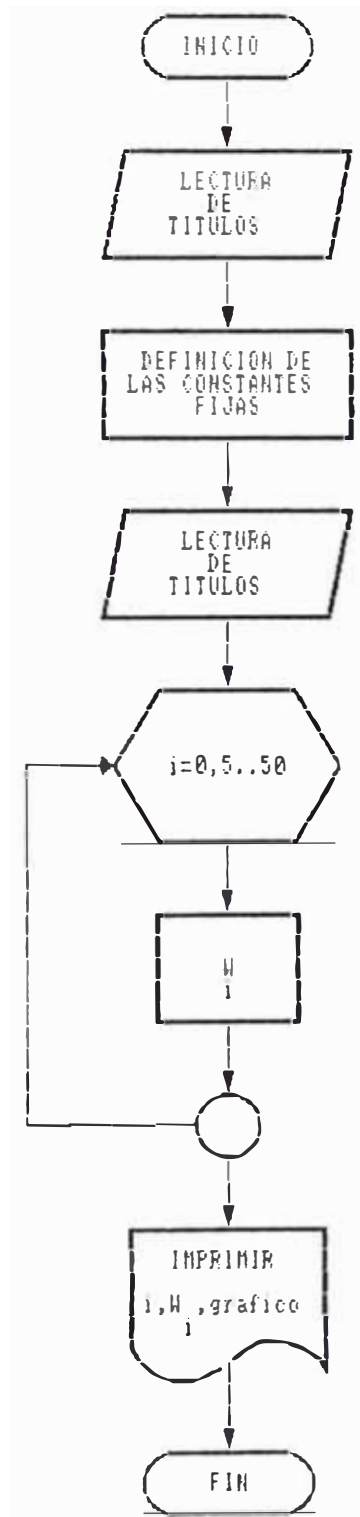
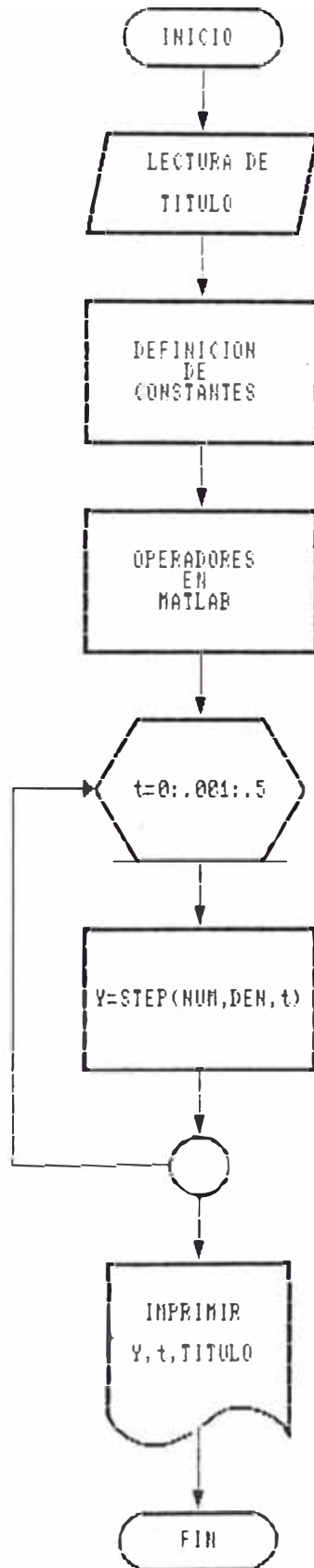


FIG No (3-2): DIAGRAMA DE FLUJO EN REGIMEN
TRANSITORIO (Prog en MATLAB)



III.2.- Planteamiento de la solución digital.

III.2.1.- Régimen Estacionario.

SIMULACION DIGITAL PARA EL CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR DC EN REGIMEN ESTACIONARIO.

PARAMETROS Y CONSTANTES QUE GOBIERNAN EL CONTROL DE LA VELOCIDAD EN EL REGIMEN ESTACIONARIO.

```
Dm := 0.001850
RwL := 4.90
KA := 0.3023
KB := 34.23
KC := 34.23
Kt := 0.19863
ToL := 0
i := 0,5 ..50
```

ECUACION GENERAL QUE GOBIERNA EL CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR EN REGIMEN ESTACIONARIO

$$W_i := \frac{30}{c} \frac{KA \cdot KB \cdot i - ToL}{Dm + RwL \cdot KA^2 + KA \cdot KC \cdot Kt}$$

-
- NOTAS:
- 1) $V_{c1} = 1$
 - 2) $c = 3.1416$
-

III.2.2.- Régimen Transitorio.

PROGRAMA EN MATLAB PARA EL ANALISIS DEL SISTEMA

EN REGIMEN TRANSITORIO

```
    tmg - 0.01147;  
    tm  - 11.24;  
    dm  - 0.001850;  
    Ka  - 0.3023;  
    Kb  - 133.5;  
    Kt  - 0.19863;  
    rwl - 4.9;  
    t1l - -8.0;  
    num1= [tmg1];  
    den1= [tmg1];  
    den2= [tm1];  
    K    = Ka*(Ka*rwl+Kb*Kt);  
    den  = dm*den1; den=conv(den,den2);  
    den  = sumpol(den,K);  
    num  = -num1*t1l;  
    t    = 0:.001:.5;  
    y    = step(num,den,t);  
  
plot(t,y),grid,title('CURVA CARACTERISTICA  
EN REGIMEN TRANSITORIO PARA TORQUE  
T1L=-8.0 N-m.')
```

III.3.- Análisis de los resultados y curvas características para diferentes señales de entrada.

Antes de pasar al análisis de los resultados teóricos, es conveniente explicar más en detalle la procedencia de las constantes y su magnitud, que intervienen en las ecuaciones generales para ambos regímenes, tal como se ha observado en los programas desarrollados para cada uno de ellos. Como se observará, en el próximo capítulo específicamente en la parte (IV.3), se describe la manera de como se han obtenido los parámetros eléctricos y constantes en forma independiente; mientras que en seguida se dará a conocer como se calcularán y que consideraciones adicionales se han tomado, para hallar estos parámetros y constantes que son funciones de otros, y que intervienen en las ecuaciones generales que gobiernan la velocidad en los dos regímenes.

Coefficiente de pérdidas por ventilación del motor-carga.

La magnitud de este parámetro se explica detalladamente en el Apéndice NO (A-6), su valor es:

$$D_m = 0.001850 \text{ (N-m-sg/rad)..} \quad (3-1)$$

Resistencia equivalente de armadura del grupo Ward-Leonard (R_{WL}).

Utilizando la relación (2-20), se ha tenido que agregar la resistencia de los dos carbones tanto del generador como del motor, por ser máquinas DC de dos polos; resultando finalmente la expresión y su magnitud como sigue:

$$R_{WL} = R_g^a + R_g^I + R_m^a + R_m^I + 2R_g^{carb} + 2R_m^{carb} \quad (3-2)$$

$$R_{WL}^{20^{\circ}C} = 4.39 \Omega \quad (3-3)$$

Como sabemos la temperatura de funcionamiento es por lo general más elevada que la temperatura ambiente, por lo que debe efectuarse la corrección oportuna que tenga en

cuenta este cambio de temperatura. Para ello se empleo - la siguiente fórmula:

$$R^{t^{\circ}\text{C}} = R^{20^{\circ}\text{C}} \cdot \frac{t^{\circ}\text{C} + 234.5}{20^{\circ}\text{C} + 234.5} \quad (3-4)$$

donde: $t^{\circ}\text{C}$ - Temperatura en ($^{\circ}\text{C}$) del devanado en caliente, que para nuestro caso asumiremos (50°C)

234.5 - Constante característica del material em--pleado en el devanado (cobre).

$$R_{\text{WL}}^{50^{\circ}\text{C}} = 4.90 \Omega \quad (3-5)$$

CONSTANTES DE GANANCIA

Constante "K_A" : Utilizando la relación (2-17) determinamos la constante de ganancia "K_A", con la diferencia de utilizar en este caso la resistencia de armadura equivalente corregida, lo que quiere decir, considerando las resistencias de los carbones y referida a la temperatura de 50°C , tal como muestran las relaciones (3-2) y (3-4) respectivamente.

$$K_A = 0.3023 \text{ N-m/volt.} \quad (3-6)$$

Constantes "K_B y K_C" : De acuerdo a la similitud de los devanados de campo de control N^o: 1 y 2 en la amplidina, se demuestra que las constantes - K_B y K_C son de magnitudes iguales, lo cual es suficiente determinar uno de ellos y el otro automáticamente queda determinado. Utilizando la relación (2-18) ó (2-19) y - agregandole la resistencia de los carbones de la armadura en la amplidina previamente corregidos a la temperatura de funcionamiento, se procede a reemplazar valores obteniendo:

$$K_B = K_C = 34.23 \text{ volt./volt.} \quad (3-7)$$

Constante "K_b" : Análogamente al caso anterior con la --
relación (2-62) obtenemos:

$$K_b = 133.5 \text{ Volt./Volt.} \quad (3-8)$$

Constante de tensión del generador tacométrico.

Este parámetro queda determinado por característica propia de la máquina:

$$K_t = 0.19863 \text{ Volt-seg/rad.} \quad (3-9)$$

CONSTANTES DE TIEMPO

Constante de tiempo de la armadura en la amplidina "τ_a".

Utilizando la relación (2-57):

$$\tau_a = 0.002672 \text{ sg.} \quad (3-10)$$

Constante de tiempo de los campos de control N^o(1 y 2).

De igual modo considerando la similitud de ellos se puede utilizar las relaciones (2-58) ó (2-59).

$$\tau_{c1} = \tau_{c2} = 0.00116 \text{ sg.} \quad (3-11)$$

Constante de tiempo de las armaduras en el grupo Ward - Leonard "τ_{mg}".

Utilizando la relación (2-56); aquí es importante referirse a las inductancias mutuas que han sido determinadas -- según muestra el Apéndice N^o(A-5).

$$\tau_{mg} = 0.01147 \text{ sg.} \quad (3-12)$$

Constante de tiempo de la armadura del eje en cuadratura en la amplidina "τ_q".

Utilizando la relación (2-60).

$$\tau_q = 0.00389 \text{ sg.} \quad (3-13)$$

Constante de tiempo mecánico del motor DC "τ_m".

Utilizando la relación (2-61).

$$\tau_m = 11.24 \text{ sg.} \quad (3-14)$$

III.3.1.- Régimen Estacionario.

Mediante los Gráficos N^o [(3-1),(3-2)... y (3-6)] se observan las curvas características de la velocidad del motor DC en régimen estacionario, para diferentes condiciones de torque de carga tales como (0,2,4,6,8 y 8.5)N respectivamente, y todos ellos en función de la variación de la tensión en el campo de control N^o 1 de la amplidina en el rango de (0,50)volts., quién es nuestro parámetro de regulación de velocidad; adjunto a cada curva mostramos dos cuadros, siendo uno de ellos con la nomenclatura i (tensión en el campo de control en volt.) y el siguiente W_i (velocidad del rotor en RPM).

Según los resultados obtenidos, es evidente la proporcionalidad que experimenta la tensión en el campo de control N^o 1 en la amplidina, respecto a la velocidad del motor para un régimen estacionario; lo que quiere decir, que si deseamos aumentar ó disminuir la velocidad del motor DC, es suficiente regular la excitación del campo de control en la amplidina, en la proporción de la variación de velocidad que deseamos tener. Por otro lado, con el incremento de la carga aplicada al eje origina un desplazamiento de esta curva de proporcionalidad en forma descendente, pero con la misma pendiente, y que se traduce de la manera siguiente: " Para una misma tensión de excitación al campo de control en la amplidina, se conseguira menor velocidad en la medida que el motor tome mayor carga en el eje." Para que sea más obvio lo anteriormente dicho, en el Gráfico N^o (3-7), se observa en un mismo sistema de ejes coordenados dos curvas características, correspondientes a los gráficos N^o (3-1) y (3-6) o sea, con funcionamiento del motor sin carga ($T_{OL} = 0$) y aproximadamente a los $\frac{3}{4}$ de plena carga ($T_{OL} = 8.5N-m$)

Considerando que es de importancia también, aclaramos que los valores " W_i " que representa la velocidad del motor con signo negativo, quiere decir una condi --

ción diferente de excitación al campo de control N° 1 en la amplidina, para mantener sin movimiento al motor en diferentes condiciones de carga. Para ello presentamos la Tabla N° (3-1) adicional, que expresa la tensión necesaria de aplicación en bornes al campo de control N° 1 - en la amplidina, para diferentes Torques y que se obtiene una velocidad cero ($w_{mo}^r = 0$). Este cálculo es factible con la utilización de la relación N° (2-23).

TABLA N° 3-1

TENSION DE REFERENCIA V_{ao}^{c1} PARA EL CUAL LA VELOCIDAD ANGULAR DEL MOTOR ES IGUAL A CERO.

T_{OL}	V_{ao}^{c1}	w_{mo}^r
Nw-m.	Voltios	RPM
0	0	
2	0.193	
4	0.387	
6	0.580	0
8	0.774	
8.5	0.821	
10	0.967	
10.5	1.015	

GRAFICO No (3-1)

TABULACION DE RESULTADOS Y CURVA CARACTERISTICA PARA EL REGIMEN ESTACIONARIO CON UN TORQUE DE CARGA ($T_{oL} = 0 \text{ Nw-m}$)

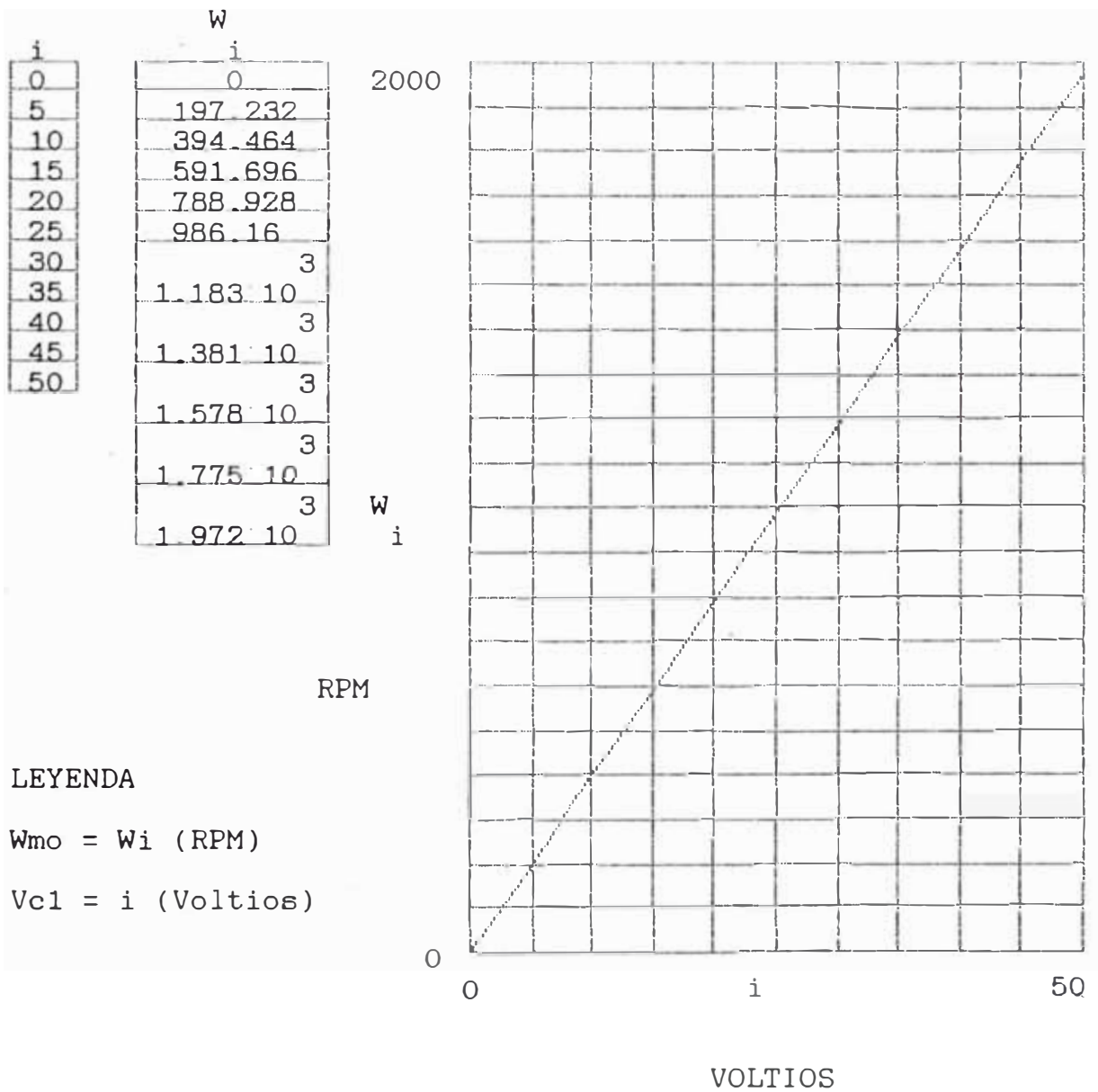


GRAFICO No (3-2)

TABULACION DE RESULTADOS Y CURVA CARACTERISTICA PARA EL REGIMEN ESTACIONARIO CON UN TORQUE DE CARGA ($T_{oL} = 2 \text{ Nw-m}$)

i	W
0	-7.624
5	189.608
10	386.84
15	584.072
20	781.304
25	978.536
30	3
35	1.176 10
40	3
45	1.373 10
50	3
	1.57 10
	3
	1.767 10
	3
	1.965 10

2000

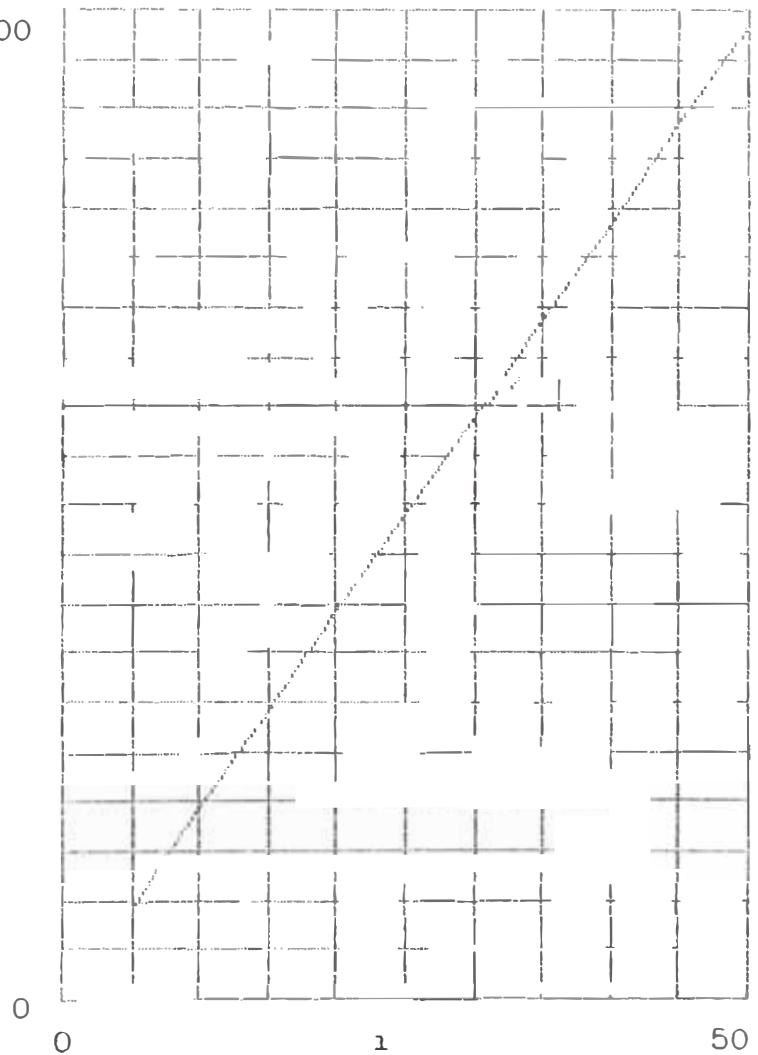
W
i

RPM

LEYENDA

$W_{mo} - W_i$ (RPM)

$V_{c1} - i$ (Voltios)



VOLTIOS

GRAFICO No (3-3)

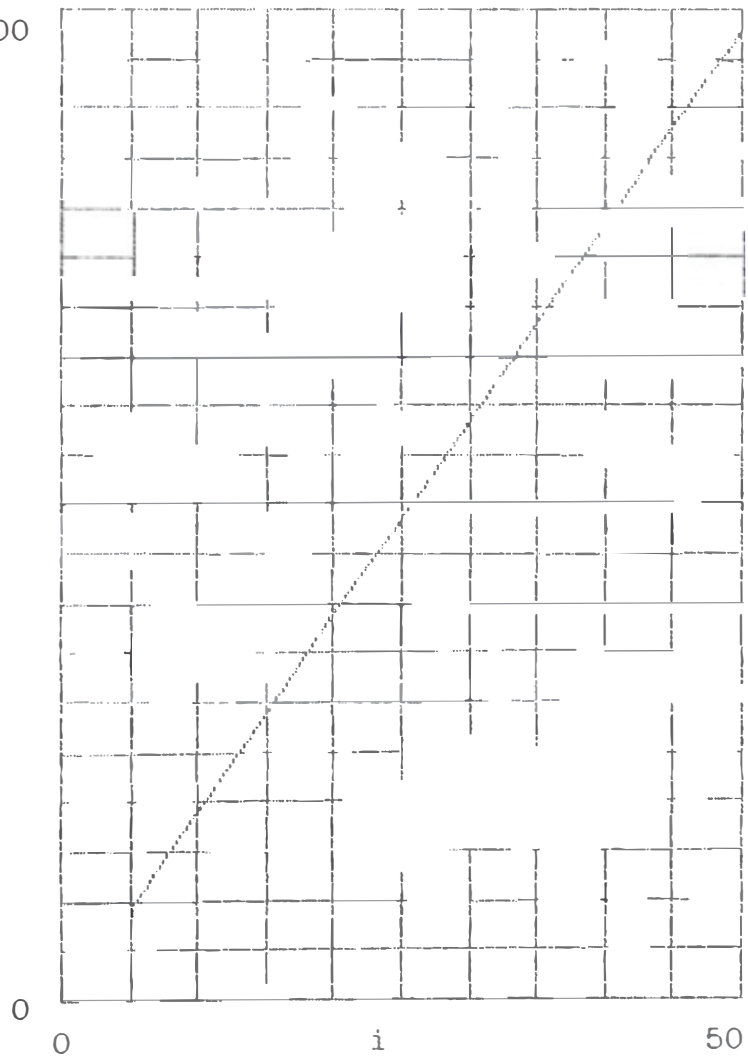
TABULACION DE RESULTADOS Y CURVA CARACTERISTICA PARA EL REGIMEN ESTACIONARIO CON UN TORQUE DE CARGA ($T_{oL} = 4 \text{ Nw-m}$)

i	W
0	-15.248
5	181.984
10	379.216
5	576.448
20	773.68
25	970.912
30	3
35	1 168 10
40	3
45	1 365 10
50	3
	1 563 10
	3
	1.76 10
	3
	1.957 10

2000

W
 i

RPM



LEYENDA

$W_{mo} - W_i$ (RPM)

$V_{cl} - i$ (Voltios)

VOLTIOS

GRAFICO No (3-4)

TABULACION DE RESULTADOS Y CURVA CARACTERISTICA PARA EL REGIMEN ESTACIONARIO CON UN TORQUE DE CARGA ($T_{oL} = 6 \text{ Nw-m}$)

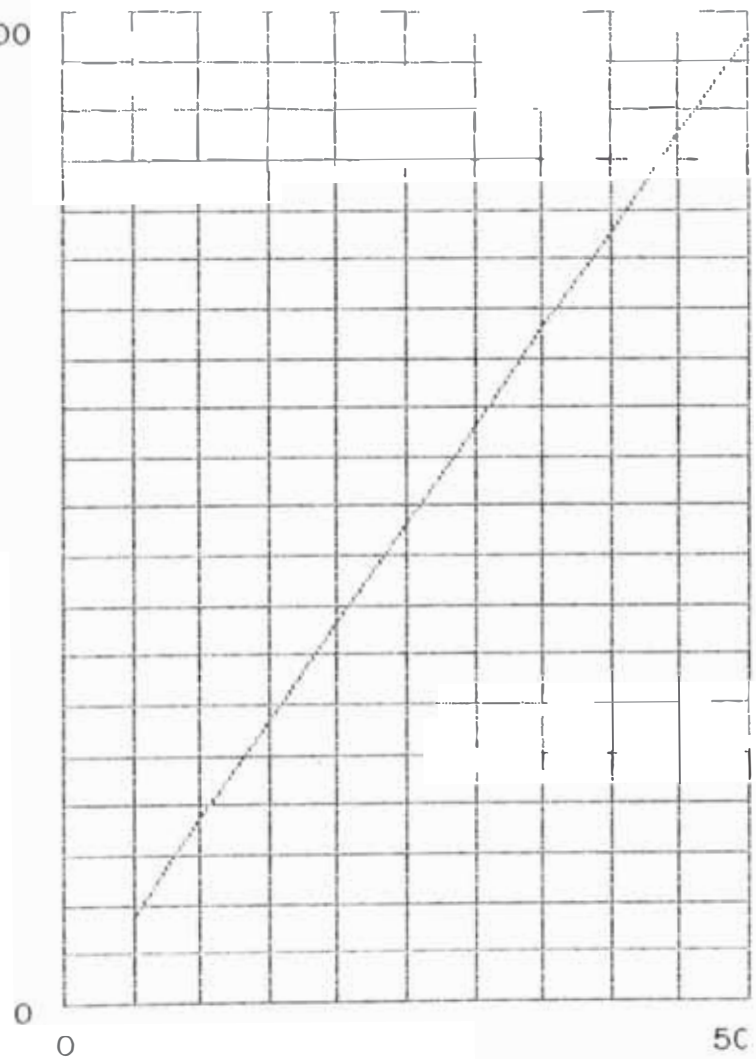
	W	i
0		-22.872
5		174.36
10		371.592
15		568.824
20		766.056
25		963.288
30		3
35		1.161 · 10
40		3
45		1.358 · 10
50		3
		1.555 · 10
		3
		1.752 · 10
		3
		1.949 · 10

RPM

LEYENDA

$W_{mo} = W_i \text{ (RPM)}$

$V_{c1} = i \text{ (Voltios)}$

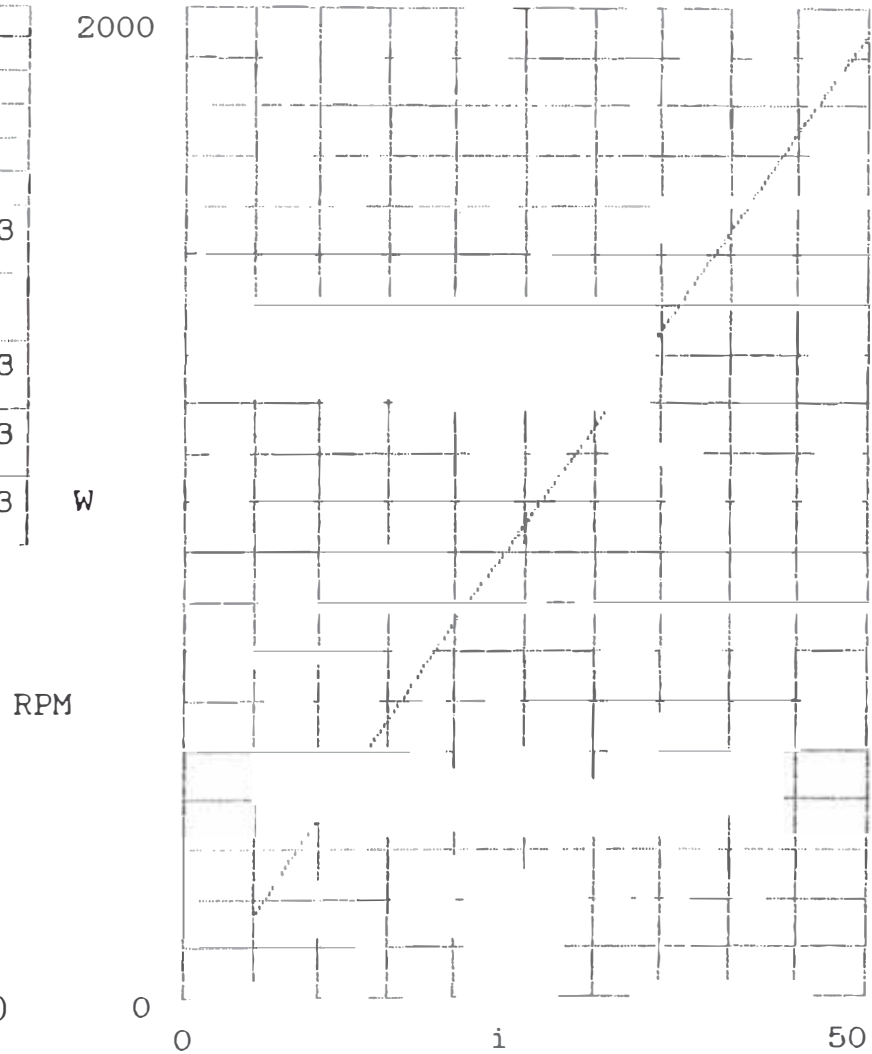


VOLTIOS

GRAFICO No (3-5)

TABULACION DE RESULTADOS Y CURVA CARACTERISTICA PARA EL REGIMEN ESTACIONARIO CON UN TORQUE DE CARGA ($T_{oL} = 8 \text{ Nw-m}$)

i	W
0	-30.497
5	166.735
10	363.967
15	561.199
20	758.431
25	955.663
30	3
35	1 153 10
40	3
45	1.35 10
50	3
	1 547 10
	3
	1.745 10
	3
	1.942 10



LEYENDA

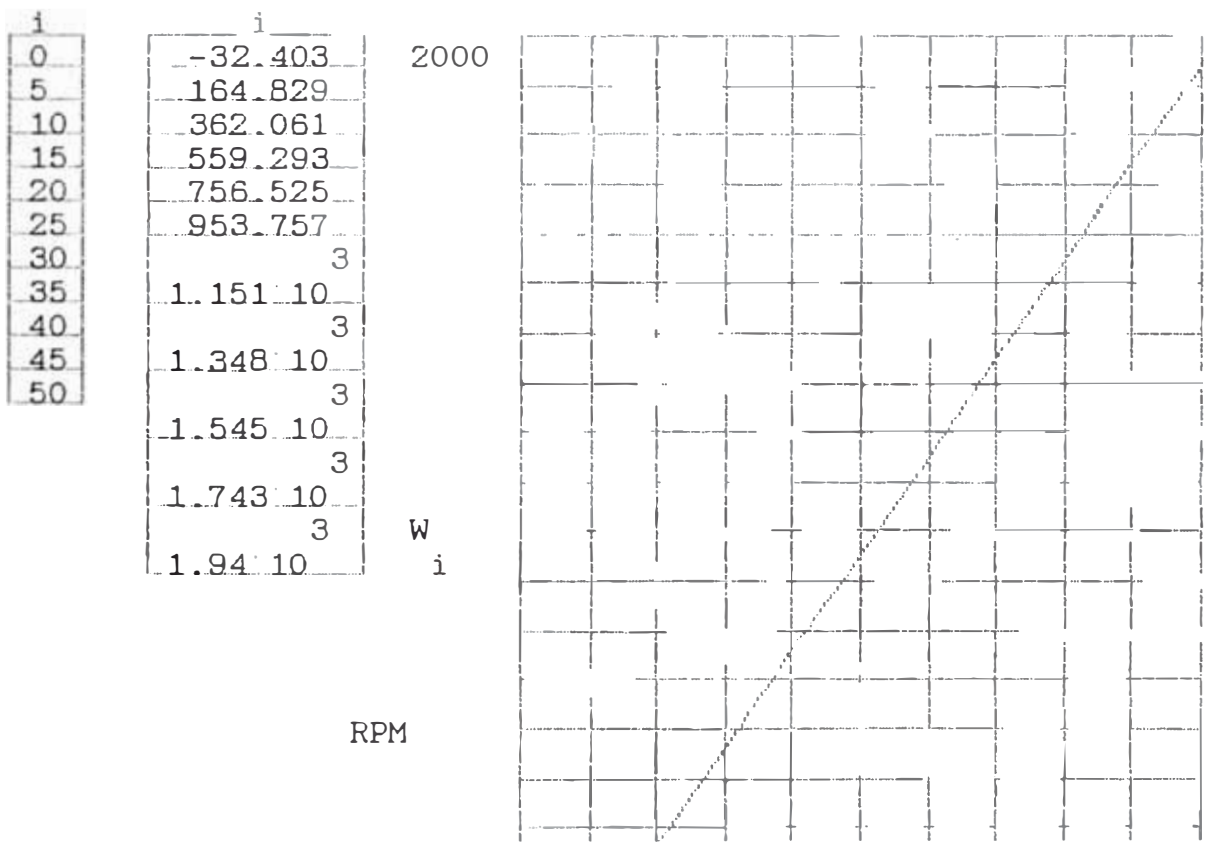
$W_{mo} - W_i$ (RPM)

$V_{c1} - i$ (Voltios)

VOLTIOS

GRAFICO No (3-6)

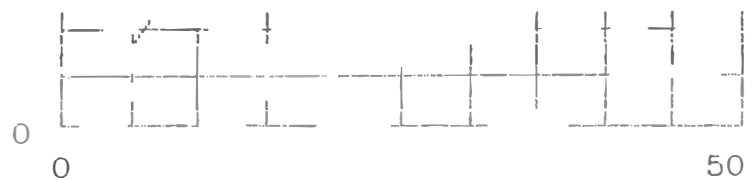
TABULACION DE RESULTADOS Y CURVA CARACTERISTICA PARA EL REGIMEN ESTACIONARIO CON UN TORQUE DE CARGA ($T_{oL} = 8.5 \text{ Nw-m}$)



LEYENDA

$W_{mo} - W_i$ (RPM)

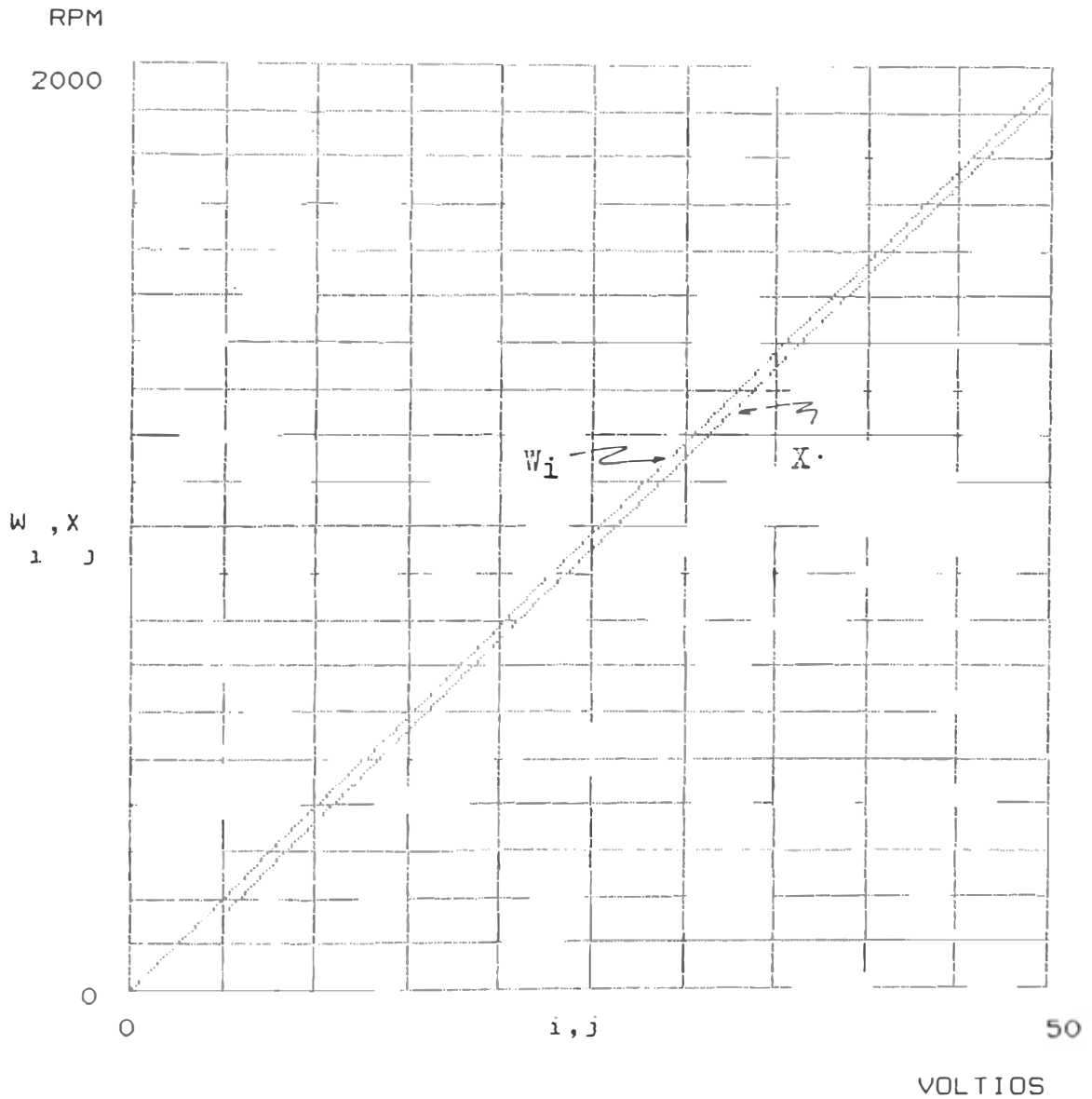
$V_{c1} - i$ (Voltios)



VOLTIOS

GRAFICO No (3-7)

CURVAS CARACTERISTICAS PARA EL REGIMEN ESTACIONARIO
CON TORQUES DE CARGA EN VACIO, 3/4 PLENA CARGA



LEYENDA

- W_i - W_{m0} (RPM) / T_{oL} - 0 Nw-m.
- X_i - W_{m0} (RPM) / T_{oL} - 8.5 Nw-m.
- i, j - V_{c1} (Voltios)

III.3.2.- Régimen Transitorio.

Antes de analizar resultados en este régimen es importante explicar algunos conceptos aplicados, para simplificar el trabajo, y de este modo obtener respuestas lo más aproximado posible.

Refiriendonos en primer lugar a la relación N° (2-65), que expresa la velocidad incremental en el régimen transitorio, notamos algunos parámetros, constantes numéricas y constantes de tiempo que intervienen en el gobierno de la velocidad. En segundo lugar observamos la magnitud de las constantes, a través de las relaciones N° S -- [(3-5), (3-6), .. (3-14)] que son valores experimentales, para luego determinar que las constantes de tiempo τ_a , τ_q y τ_{c2} son tan insignificantes que sin alterar considerablemente el resultado es posible despreciarlas. Además debemos tener presente que los ensayos realizados para diferentes condiciones de carga, tuvieron como condición que ante un estado de funcionamiento del motor con carga, bruscamente se eliminó dicha carga hacia las condiciones de vacío, lograndose por consiguiente un régimen transitorio. Cabe señalar que los ensayos fueron efectuados -- para un valor fijo de la tensión del campo de control N° 1 en la Amplidina (v_{a1}^{c1}), lo que quiere decir que el motor tenía una velocidad pre-establecida, por lo tanto -- ($v_{a1}^{c1} = 0$). Finalmente a este preámbulo podemos decir, que ante una ecuación de la velocidad incremental de 5^{to} orden en el análisis previo, se logró reducir dicha ecuación a uno de segundo orden.

Una vez definida la ecuación final con el cual vamos a trabajar, se procedió a crear un programa en MATLAB, tal como se muestra en (III.2.2), luego se procedió a correr el programa para cuatro condiciones de carga diferentes tales como (1.85, 3.7, 7 y 8) N-m, obteniendose los Gráficos N° S (3-8), (3-9), (3-10) y (3-11), que representa la variación de la velocidad incremental w_{m1}^r en el tiempo pa

ra el motor DC en un régimen transitorio, de modo tal -- que por convención de signos tomado en el Capítulo II -- ésta velocidad es negativa.

Como se puede apreciar de los gráficos de acuerdo a su velocidad de error (incremental), el sistema es SUBAMORTIGUADO ya que se aproxima al valor final rápidamente y podemos destacar lo siguiente:

- La magnitud de la velocidad incremental máxima y de estabilización está en aumento conforme aumente la carga conectada en el eje.
- El tiempo de origen de la velocidad incremental máxima y de estabilización, es siempre la misma para cualquier condición de carga.

ello lo podemos ver mediante la Tabla N° (3-2).

TABLA N° (3-2)

VALORES CARACTERISTICOS EN EL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO

T	$w_{m1}^r, \text{max.}$		$w_{m1}^r, \text{estab.}$		$t_{w, \text{max.}}$	$t_{w, \text{estab}}$
	rad	RPM	rad.	RPM		
N-m	seg		seg			
1.85	2.9	28	2.3	22		
3.70	5.9	56	4.6	44	0.0625	0.225
7.00	11.1	106	8.7	83		
8.00	12.8	122	9.9	95		

GRAFICO N° (3-8)
CURVA CARACTERISTICA EN REGIMEN TRANSITORIO PARA TORQUE T1L=1.85 N-m.

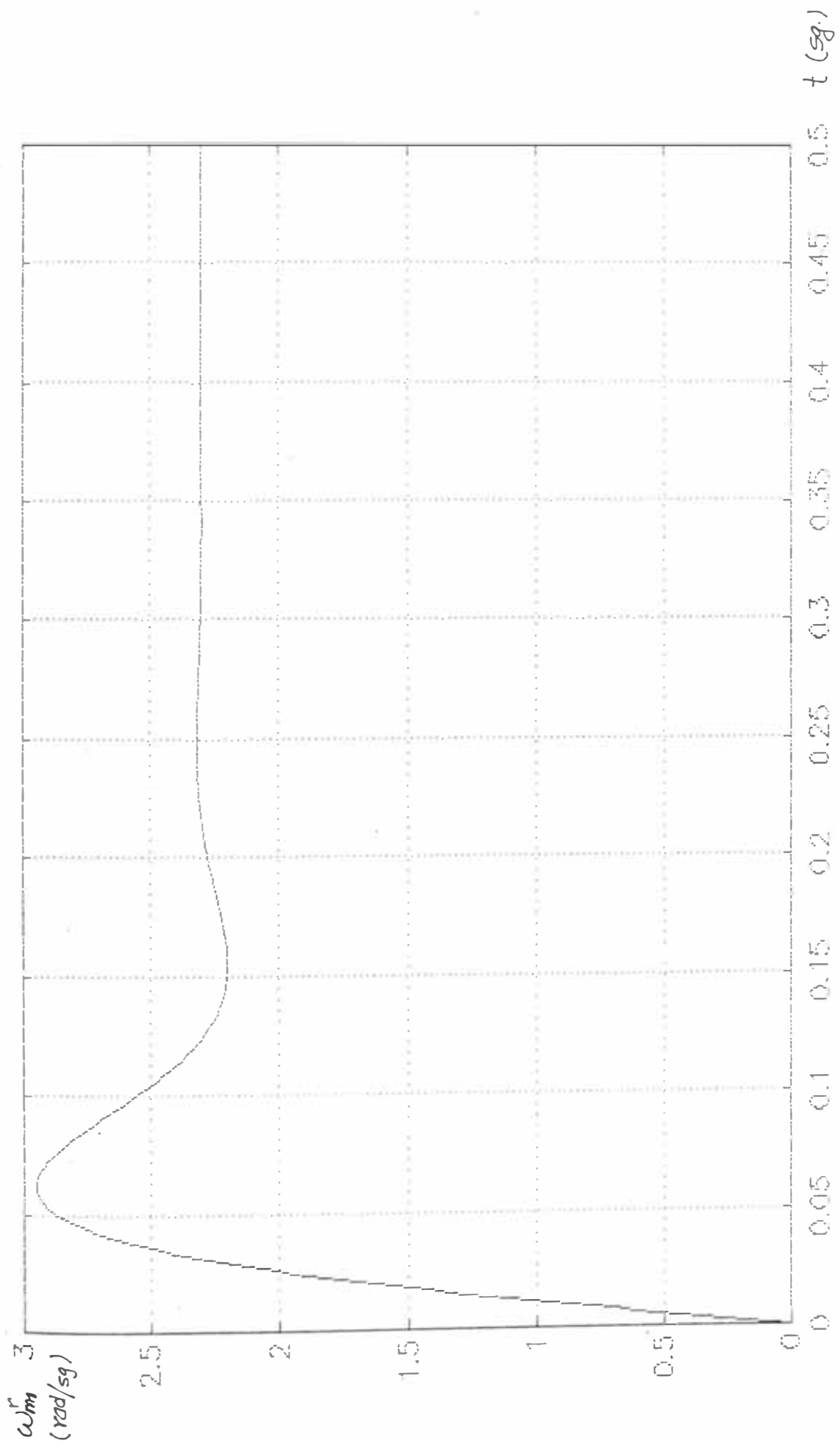


GRAFICO N° (3-9)
CURVA CARACTERISTICA EN REGIMEN TRANSITORIO PARA TORQUE TIL=3.7 N-m.

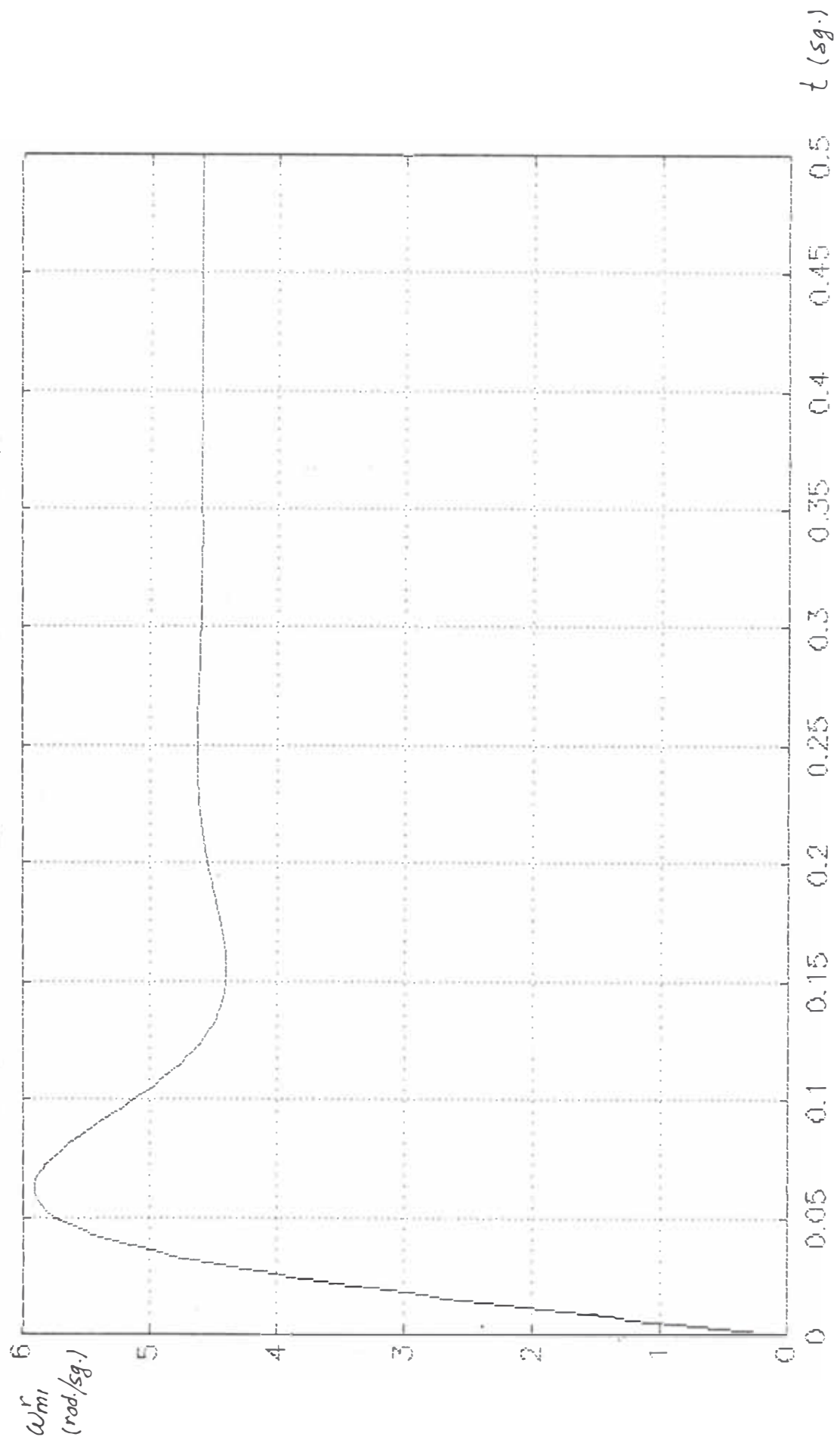


GRAFICO N° (3-10)
CURVA CARACTERISTICA EN REGIMEN TRANSITORIO PARA TORQUE T1L=7.0 N-m.

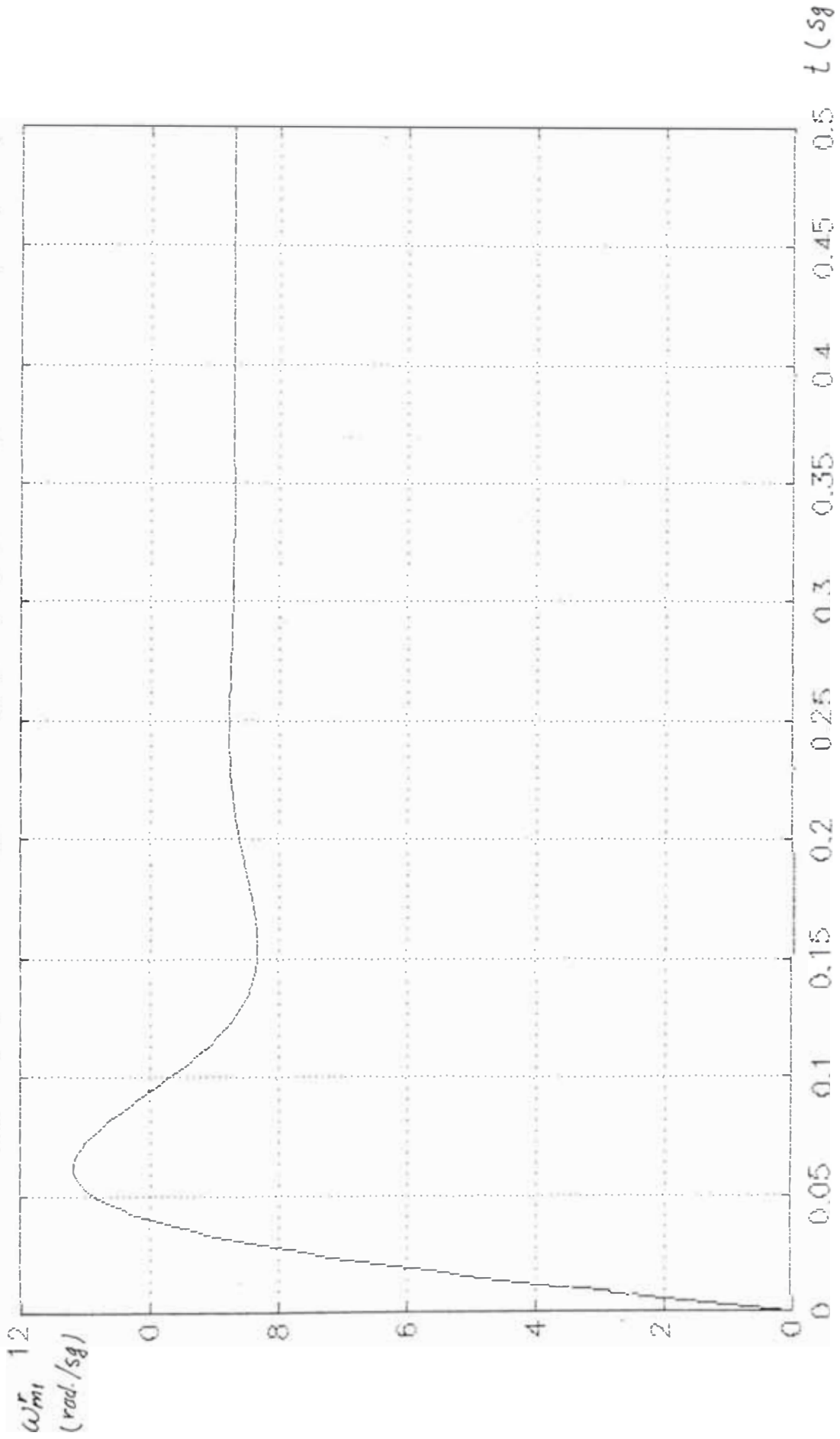
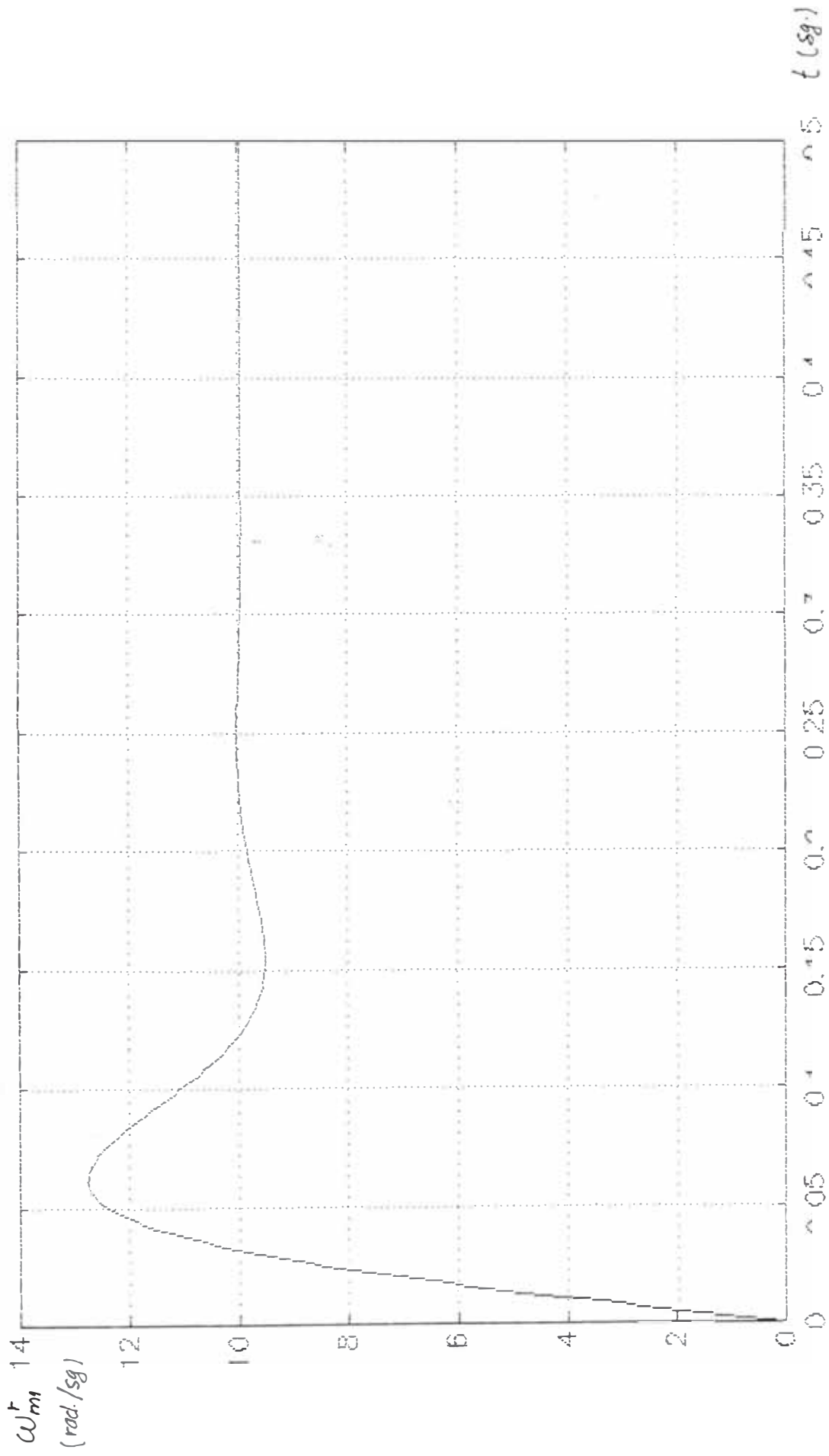


GRAFICO N° (3-II)

CURVA CARACTERISTICA EN REGIMEN TRANSITORIO PARA TORQUE T_{1L} = -8.0 N-m.



CAPITULO IV

ENSAYO EN LABORATORIO DEL SISTEMA DE CONTROL

El presente capítulo trata el desarrollo de la aplicación práctica del sistema analizado en el capítulo II, tanto en funcionamiento en régimen estacionario como el transitorio.

Por considerarse esta parte de carácter práctico, se ha creído conveniente especificar las características -- técnicas generales del equipo utilizado, tales como máquinas eléctricas, instrumentos y dispositivos auxiliares, de tal manera que mediante estos datos es posible estimar la magnitud en cuanto a su potencia se refiere -- del sistema trabajado, así también como la precisión de los resultados. Lo que sí es necesario resaltar de acuerdo al diagrama general del sistema, es que la carga utilizada para frenar el motor cuyo objetivo es el de su regulación de velocidad, es un generador de corriente continua con excitación independiente, que alimentando a un banco de resistencias, logramos frenar el motor de acuerdo a nuestros requerimientos.

Por otro lado, para determinar y analizar el comportamiento teórico, se ha requerido de una serie de parámetros y constantes, lograndose obtener por procedimientos directos e indirectos, como se detallara en la parte -- IV.3. Finalmente la respuesta del sistema en su conjunto fué registrado para ambos regimenes y a diferentes condiciones.

Es importante señalar que los ensayos fueron realizados en el laboratorio de Máquinas Eléctricas del Instituto Tecnológico " TECSUP " con motores y generadores de procedencia Sueco y Hungaro, así también los instrumentos de origen Europeo y Americano.

Para una mejor visión del equipo utilizado en su conjunto, se muestran en las figuras N^os. (4-1),(4-2),(4-3),-(4-4),(4-5) y (4-6) diferentes detalles del sistema.

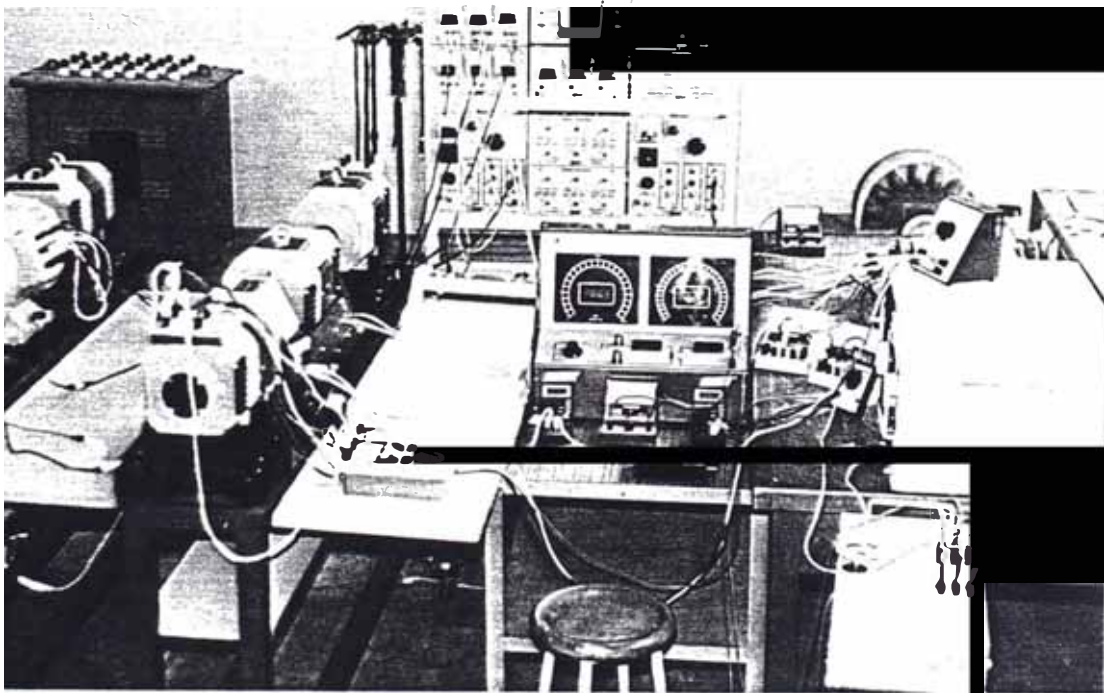


Fig. N^o 4-1 : Vista Frontal del Sistema

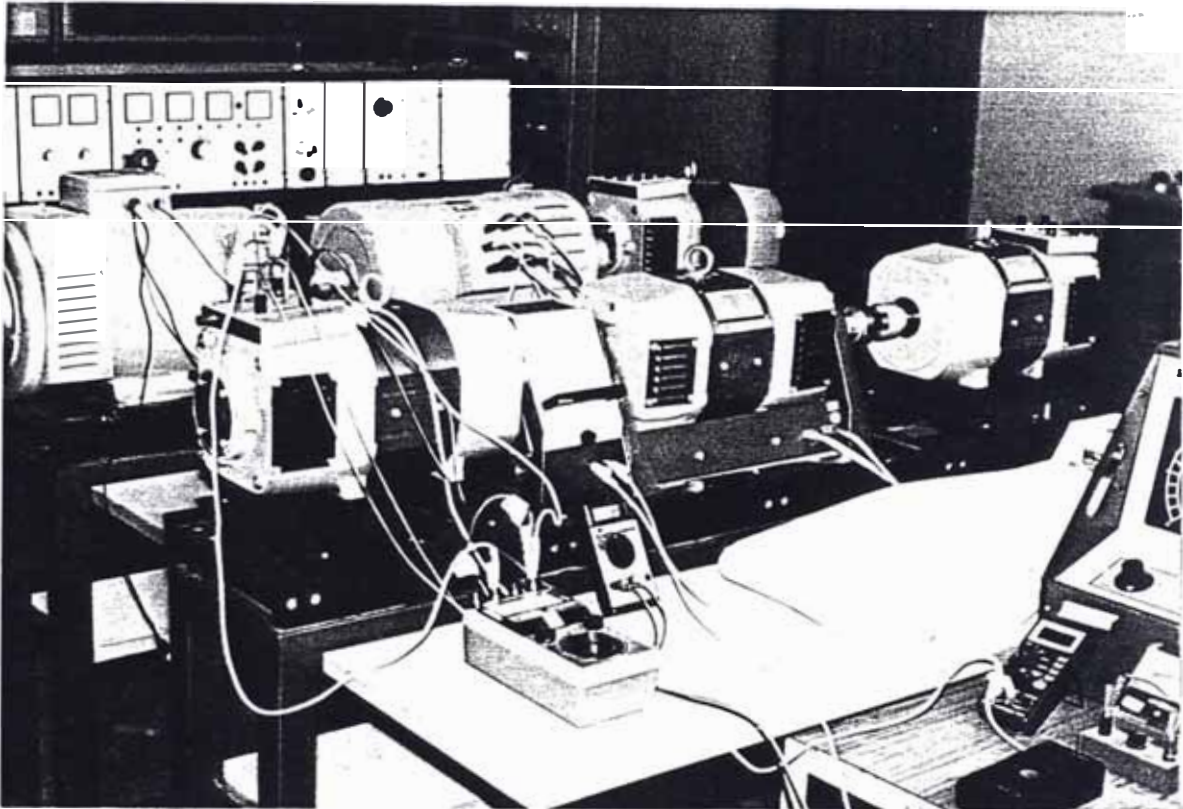


Fig. Nº 4-2: Máquinas del Grupo Ward-Leonard

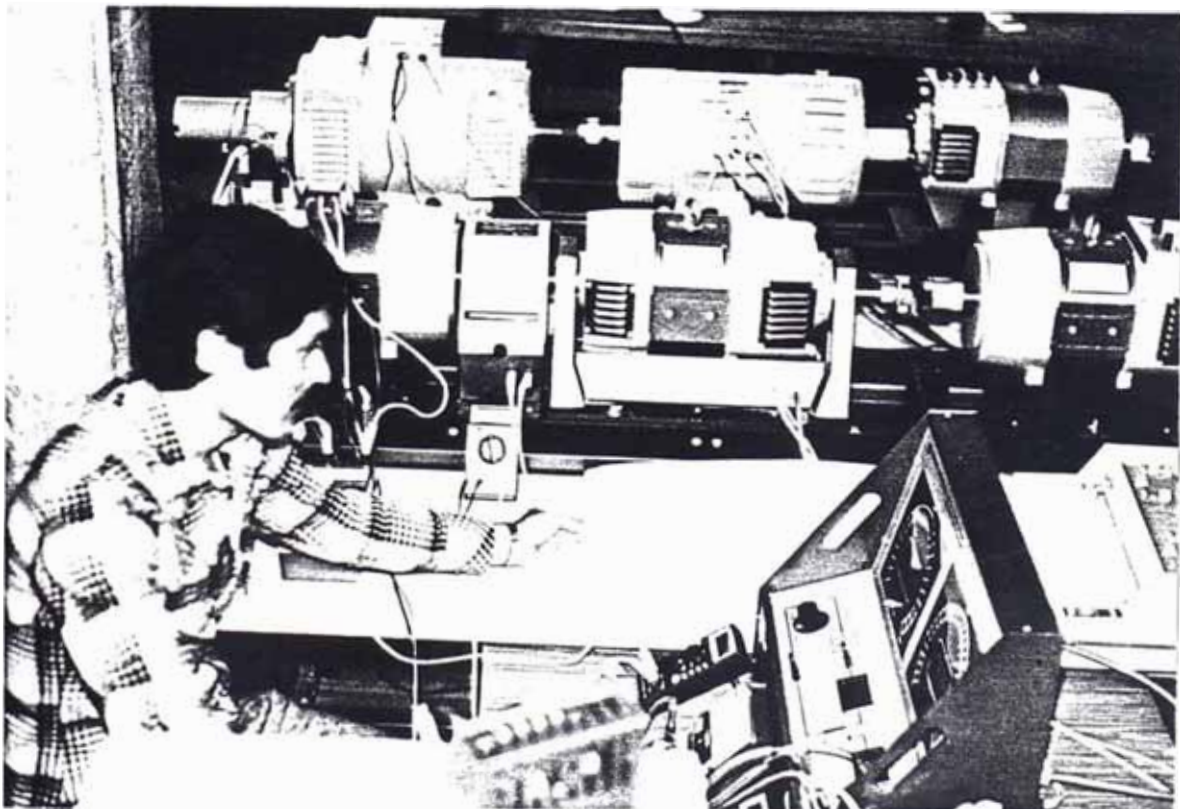


Fig. Nº 4-3: Obteniendo resultados mediante el registrador.

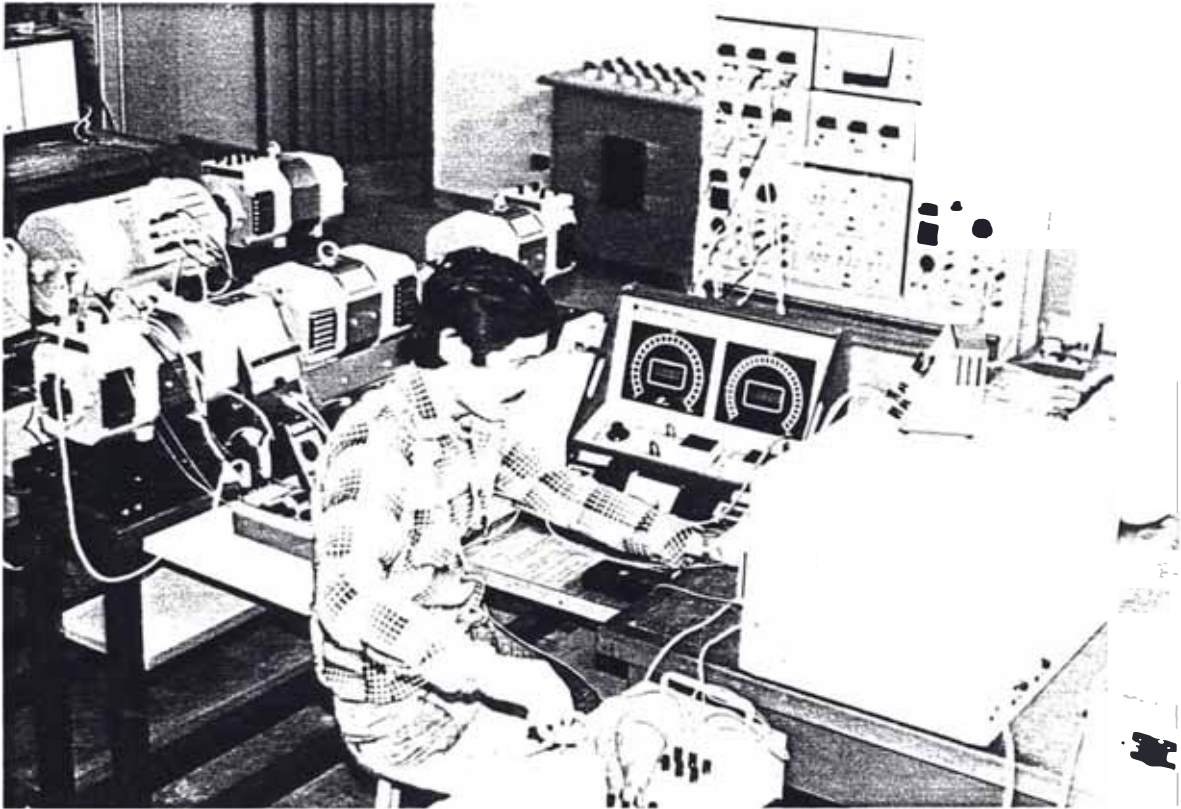


Fig. Nº 4-4 : Vista Lateral del Sistema.

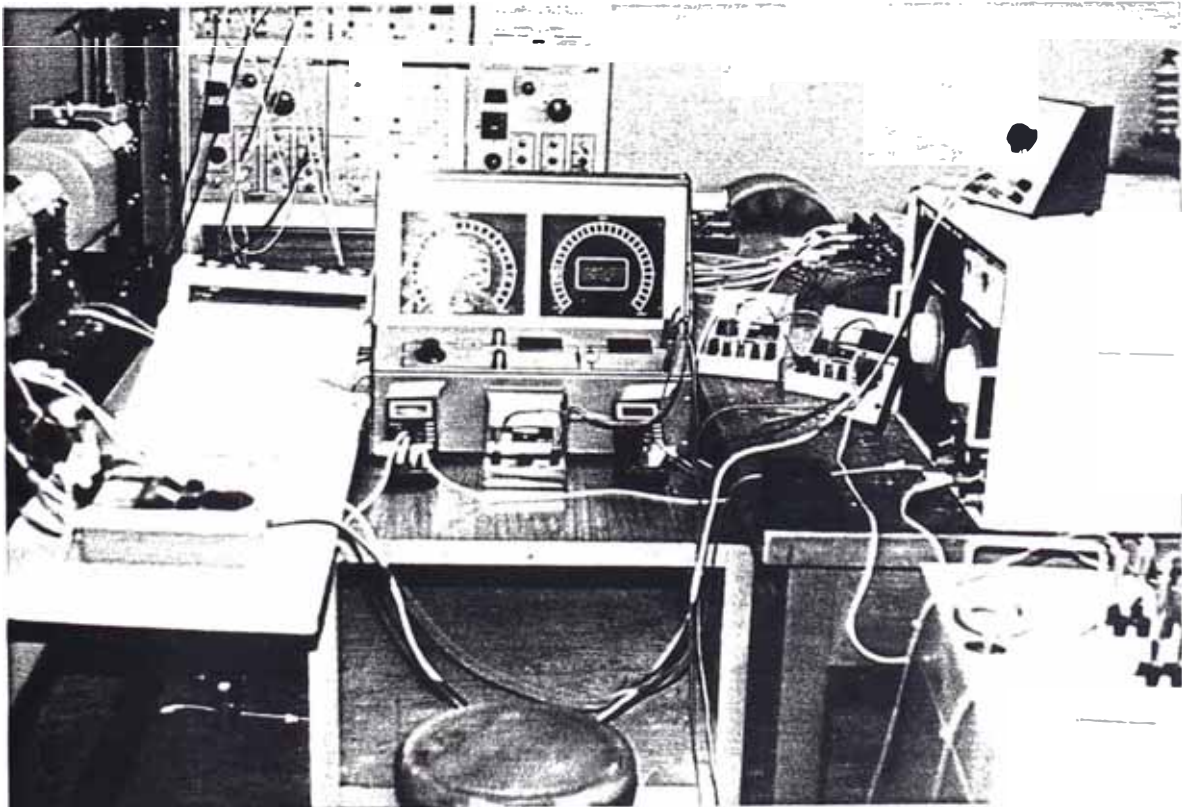


Fig. Nº 4-5 : Fuentes de Corriente Continua y el Banco de resistencias.

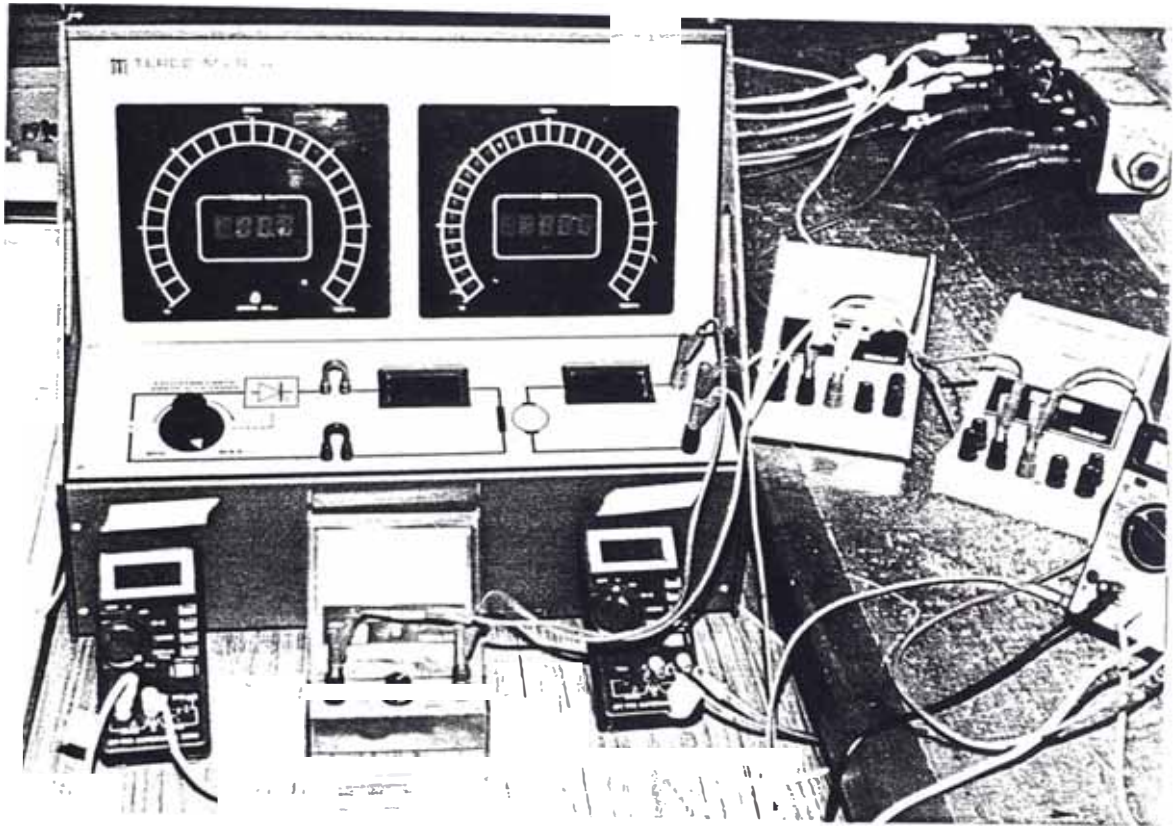


Fig. Nº 4-6 : El Torquímetro digital e instrumentos de medición.

IV.1.- Diagrama general de las máquinas e instrumentos del sistema.

En la Figura Nº 4-7, se ha representado a través de un diagrama general, a la máquinas e instrumentos que configuran al sistema utilizado; las características técnicas se detallarán a continuación.

IV.2.- Características técnicas generales del equipo utilizado.

IV.2.1.- Datos técnicos de las máquinas.

AMPLIDINA

Marca	: EVIG (Hungaro)
Tipo	: YA/1-1
Nº	: 299746 / 73
Tensión	: 220 V.
Corriente	: 4.55 A.
Potencia	: 1.0 Kw.
Revoluciones	: 3450 RPM
Clase de Aislamiento	: B
Otras características	Dos bobinas de control, con resistor que regula la compensación.

MOTOR DE LA AMPLIDINA

Marca	: EVIG (Hungaro)
Tipo	: YA /1-1
Nº	: 299746
Tensión	: 3x220V (Δ) ó 3x380V. (Y)
Corriente	: 6.0A
Potencia	: 1.3 Kw.

Revoluciones : 3450 RPM
Frecuencia : 60 Hz.
Otras características : Motor de inducción tipo Jaula de Ardilla.

GENERADOR DC

Marca : THRIGE - TITAN ELECTRIC A/S
(Made in Denmark)
Tipo : LAK 132 A
No : 2285523 - 8943
Rotor (V/A) : 310V / 13.6A
Campo (V/A) : 340V / 0.5A
Potencia : 3.7 Kw.
Revoluciones : 1800 RPM
Clase de Aislamiento : F
Otras características : Excitación independiente, 2 polos + 2 interpolos, IEC-34-1

MOTOR DEL GENERADOR DC

Marca : ELEKTROTECHNISCHE WERKSTATTEN
HOF (Made in Sweden)
Tipo : DG 2416
No : 122301
Tensión : 127 / 220 / 380V
Corriente : 9.2 / 5.3A
Potencia : 2 KVA
Err : 110V / 50Hz 3.1A
Factor de pot. : 0.8
Revoluciones : 1500 U / min.
Clase de Aislamiento : B
IP : IP23
Otras características : Motor Sincrono de polos salientes. VDE 0530/11.72

MOTOR DC

Marca . TERCO (Stockolm/Sweden)
Modelo . MV 1028 - 226
Nº . 14964
Rotor (V/A) 220V / 12A
Campo (V/A) : 220V / 0.8A
Potencia (GEN.): 2.2 Kw / 1800 RPM
Potencia (I MOT.): 2.0 Kw / 1700 RPM
Clase de Aislamiento . B (130 °c)
Indice de Prot.: IP23
Tipo de Serv. : S2 30 min.
Norma : IEC 34-1
Otras características: Excitación independiente, 2 polos + 2 interpolos.

CARGA (GENERADOR DC)

Marca : TERCO (Stockolm/Sweden)
Modelo : MV 1043 - 226
Nº : 8503
Rotor (V/A) : 220V / 12A
Campo (V/A) : 220V / 0.8A
Potencia (GEN.): 2.2Kw / 1800 RPM
Potencia (MOT.): 2.0Kw / 1700 RPM
Clase de Aislamiento : B (130°c)
Indice de Prot.: IP23
Tipo de Serv. : S2 30 min.
Norma : IEC 34-1
Otras características: Excitación independiente, 2 polos + 2 interpolos.

GENERADOR - TACOMETRICO

Marca : TERCO (Suecia)
Modelo : MV 1024
Tensión de gen.: 20.8V / 1000 RPM
Otras caract. : Dinamo de polos permanentes.

IV.3.- Resultados y curvas características en régimen estacionario y transitorio y su comparación con el análisis teórico.

Antes de presentar los resultados del comportamiento del sistema en ambos regimenes, es importante explicar que los parámetros eléctricos tales como las resistencias e inductancias propias de las máquinas de corriente continua, para la armadura, interpolos y los campos fueron hallados mediante medición directa con los instrumentos de precisión tales como el puente Wheatstone y el puente de inductancias respectivamente; así también, para determinar la inductancia mutua de las máquinas DC, se realizaron mediciones parciales y equivalentes de la armadura tal como se explica en el Apéndice N°(A-5), por otro lado para evaluar el coeficiente de pérdidas totales del motor, se ha procedido a calcularlo a partir de su comportamiento con carga, independientemente del sistema, como se muestra en el Apéndice N°A-6 sin embargo la inercia total del motor más su carga conectada al eje, fue hallada mediante dimensiones geométricas y su masa, de acuerdo a la relación matemática del momento de inercia, ver Apéndice N°(A-7).

Para determinar las constantes de tensión que relaciona a la inductancia rotacional tanto para la amplidina como para el generador, previamente tuvo que graficarse la curva de magnetización según los devanados de acoplamiento magnético tal como muestran las gráficas N°s 4-1 (4-2), (4-3), (4-4), (4-5) y (4-6), es importante tener en cuenta que las características para ambos devanados de control, de la amplidina son las mismas y se ha tomado en consideración que el estudio fué realizado para condiciones lineales de funcionamiento, lo que significa trabajar con la zona lineal de cada curva y por consiguiente su tangente de cada línea recta. A continuación se presenta los parámetros eléctricos de cada máquina.

PARAMETROS ELECTRICOS DE LAS MAQUINAS DC

AMPLIDINA

DEVANADO		RESISTENCIA (Ω)	INDUCT. (mHy)	CONSTANTE DE TENSION
ARMADURA	EJE DIRECTO	$R_a^d = 1.725$	$L_a^d = 41.75$	$G_a^{qd} \cdot w_{ao}^r = 160$
	EJE CUADRATURA	$R_a^q = 1.725$	$L_a^q = 11.75$	
INTERPOLOS		$R_a^I = 0.325$	$L_a^I = 4.83$	$G_a^{qI} \cdot w_{ao}^r = 5.6$
COMPENSACION		$R_a^C = 1.55$	$L_a^C = 10$	$G_a^{qC} \cdot w_{ao}^r = 137$
CAMPOS DE CONTROL	CONTROL 1	$R_a^{c1} = 5600$	$L_a^{c1} = 6500$	$G_a^{c1} \cdot w_{ao}^r = 5833$
	CONTROL 2	$R_a^{c2} = 5600$	$L_a^{c2} = 6500$	$G_a^{c2} \cdot w_{ao}^r = 5833$
carbones		$R_a^{carb.} = 0.5 \Omega$		

GENERADOR DC

DEVANADO	RESIST. (Ω)	INDUCT. PROPIA (mHy)	INDUCT. EQUIV. (mHy)	CONSTANTE DE TENSION
ARMADURA	$R_g^a = 1.00$	$L_g^a = 52$	$L_{eq_{A1/B2}} =$ 38	$G_g^{fa} \cdot w_{go}^r = 769$
INTERPOLOS	$R_g^I = 0.59$	$L_g^I = 26$		
CAMPO	$R_g^f = 550$	$L_g^f = 1500$		
carbones	$R_g^{carb.} = 0.22 \Omega$			

MOTOR DC

DEVANADO	RESIST. (Ω)	INDUCT. PROPIA (mHy)	INDUCT. EQUIV. (mHy)	CONSTANTE ROTACIONAL (Hy)
ARMADURA	$R_m^a = 1.12$	$L_m^a = 22$	$L_{eq_{A1/B2}} =$ 18	$G_m^{fa} = 3.714$
INTERPOLOS	$R_m^I = 0.60$	$L_m^I = 5$		
CAMPO	$R_m^f = 250$	$L_m^f = 9800$		
carbones	$R_m^{carb.} = 0.32 \Omega$			

GENERADOR - TACOMETRICO

CONSTANTE DE
GENERACION

$$K_t = 0.1986 \frac{V \cdot sg}{rad}$$

NOTA: Todas las mediciones se han realizado a una temperatura promedio de 20°C.

IV.3.1.- Comportamiento en régimen estacionario.

Para el análisis de los resultados obtenidos en laboratorio en éste régimen, se ha logrado tomar datos de tensión de campo de control N°1, Torque y revoluciones para las mismas condiciones de funcionamiento ya estudiadas en el Capítulo III, lo cual sencillamente bastara ahora tabular los resultados teóricos y prácticos en forma conjunta, para luego determinar los errores absoluto y relativo basicamente en lo que concierne -- a las revoluciones, y ello se puede apreciar en la tabla N° (4-1), donde como se puede observar los errores estan dentro del margen aceptable, ya que es lógico la existencia de divergencia de resultados en el análisis teórico y práctico. Como demostramos en el Capítulo III para el régimen estacionario, que la curva característica de regulación de velocidad tiene un comportamiento lineal, fué entonces necesario demostrar ello en laboratorio; por tanto se tuvo que registrar simplemente para una de las condiciones, esto es para un Torque de 4.0 Nw tensión de campo al motor 90 volt.y corriente de campo de control N°1 variable, tal como muestra el gráfico N° (4-7), demostrando una vez más la compatibilidad de resultados teórico-práctico para este régimen.

Finalmente fué importante conocer, los resultados -- que se obtiene con el sistema para dos condiciones estacionarias ante el efecto perturbador de la carga, y ello fué logrado con ayuda de la curva característica externa (velocidad-par) conocido también como "Curva Mecánica" para el motor DC, cuando trabaja dentro del sistema y en forma independiente como una sola unidad. Estos valores estan graficados para diferentes condiciones de corriente de excitación al motor según Gráfica N° (4-8) donde como puede apreciarse el motor trabajando dentro del sistema, experimenta una mejor regulación de velocidad que sí funcionara en forma independiente, lo que -- quiere decir que el sistema en lazo cerrado le propor -

ciones características óptimas de regulación; así por ejemplo para la condición de (400)mA de corriente de excitación al motor, la regulación de velocidad del motor en forma independiente es (33%) mientras que con el sistema Ward-Leonard se obtiene (4%), notando así una gran divergencia; por lo tanto es evidente la manera como el sistema le proporciona al motor DC notables características de funcionamiento. Esta comparación fue realizada para un Torque de carga de 8 N-m, ver Graf.(4-8).

TABLA N° (4-1)

COMPARACION TEORICO-PRACTICO DEL COMPORTAMIENTO EN REGIMEN ESTACIONARIO.

V_{a1}^{c1}	T_{OL}		n_p	$e_{abs.}$		OBSERV.
volt.	Nw.	RPM	RPM	RPM	%	
0		0	188	188		reman.
5		197	254	57	28.9	
10		395	453	58	14.7	
15		592	670	78	13.2	
20		789	886	97	12.3	
25	0	986	1094	108	11.0	
30		1183	1294	111	9.4	
35		1381	1484	103	7.5	
40		1578	1657	79	5.0	
45		1775	1810	35	2.0	
5		190	224	34	17.9	
10		387	438	51	13.2	
15		584	650	66	11.3	
20		781	860	79	10.1	
25	2	979	1050	71	7.3	
30		1176	1260	84	7.1	
35		1373	1460	87	6.3	
40		1570	1646	76	4.8	
45		1767	1800	33	1.9	

TABLA N°(4-1) CONTINUACION

v_{a1}^{c1}	T_{OL}	n_p	e_{abs}	e_r	OBSERV.
volt.	Nw.	RPM	RPM	RPM	%
5		182	215	33	18.1
10		379	408	29	7.7
15		577	620	43	7.5
20		774	830	56	7.2
25	4	971	1030	59	6.1
30		1168	1240	72	6.2
35		1365	1425	60	4.4
40		1563	1622	59	3.8
45		1760	1780	20	1.1
<hr/>					
5		174	180	- 6	-3.4
10		372	375	3	0.8
15		569	580	11	1.9
20		766	794	28	3.7
25	6	963	995	32	3.3
30		1161	1200	39	3.4
35		1358	1400	42	3.1
40		1555	1575	20	1.3
45		1752	1748	- 4	0.2
<hr/>					
5		167	168	1	0.6
10		364	363	1	-0.3
15		561	557	- 4	-0.7
20		758	761	3	0.4
25	8	956	967	11	1.2
30		1153	1167	14	1.2
35		1350	1350	0	0.0
40		1547	1540	- 7	-0.5
45		1745	1697	-48	-2.7

TABLA N°(4-1) CONTINUACION

V_{a1}^{c1}	T_{OL}	n_t	n_p	$e_{abs.}$	e_r	OBSERV
volt.	Nw.	RPM	RPM	RPM	%	
5		165	180	15	9.1	
10		362	343	-19	-5.2	
15		559	558	- 1	-0.2	
20		757	756	- 1	-0.1	
25	8.5	954	962	8	0.8	
30		1151	1163	12	1.0	
35		1348	1350	2	0.1	
40		1545	1534	-11	-0.7	
45		1743	1696	-47	-2.7	

FUENTE: Análisis teórico y ensayo de Laboratorio del régimen estacionario.

- NOTAS: 1) $e_{abs.} = n_p - n_t$ (RPM)
- 2) $e_r = (e_{abs.}/n_t) \cdot 100 \%$
- 3) n_t : Velocidad angular teórica (RPM)
 n_p : Velocidad angular práctica (RPM)
- 4) $i_m^f = 560$ mA.

IV.3.2.- Comportamiento en régimen transitorio.

Según el análisis teórico en régimen transitorio indicaba, que la duración del transitorio para cualquier nivel de carga no era mayor a los 0.25 seg., lo cual significa que superado este tiempo el sistema alcanza su nuevo régimen estacionario. Pues bien, como el instrumento registrador utilizado tiene una sensibilidad de 20 mm/sg., y un tiempo de respuesta menor a los 0.5 sg., fué imposible registrar exactamente la trayectoria que sigue en régimen transitorio; sin embargo pudo obtenerse a través del Gráfico N°(4-9) el proceso que experimenta el motor-DC, más por efecto de inercia ante dos condiciones estacionarias diferentes, que por sus mismas condiciones instantáneas de funcionamiento. No obstante esta gráfica muestra, que para cualquier condición de carga el período de duración para alcanzar la nueva velocidad estacionaria es aproximadamente de 2.5 sg. Lo que es resaltante destacar es la velocidad en que se establece el nuevo régimen estacionario, siendo siempre para el tipo de ensayo, un valor inferior a la velocidad de referencia; por consiguiente fué posible realizar su comparación con el resultado teórico y ello se muestra en la Tabla N°(4-2).

TABLA N° (4-2)

COMPARACION DE LA NUEVA VELOCIDAD ESTACIONARIA EN EL ANALISIS TRANSITORIO.

T	$w_{mo}^r(i)$	$w_{mo}^r(f)/teór.$	$w_{mo}^r(f)/exp.$	$e_{abs.}$	e_r
N-m	RPM	RPM	RPM	RPM	%
1.85	1743	1673	1672	-1	0.06
3.70	1725	1653	1671	18	1.09
7.00	1697	1642	1659	17	1.04
8.00	1695	1648	1647	1	0.06

(i) : inicial

(f) : final

CAPITULO V

APLICACIONES PRACTICAS COMO ALTERNATIVA DE SOLUCION EN EL CAMPO DE LA INDUSTRIA

Aunque, en principio, el sistema de control de velocidad con el uso del Ward-Leonar, constituye una gran inversión, sumado a lo complejo y voluminoso, es una alternativa hacia un problema en la cual, se necesita importantes y frecuentes variaciones de velocidad-par motor muy estables. Además de estas ventajas, debe advertirse algunas otras cualidades, tales como la gran flexibilidad que se puede obtener respecto a la finura de regulación ya que ello solamente depende de la corriente de excitación ó tensión de armadura; la gran simplicidad del equipo de mando, así como la posibilidad de frenado con recuperación de energía. Efectivamente, si se reduce la excitación del generador, su fuerza electromotriz resulta inferior a la del motor y es este último el que se convierte en generador y acciona el grupo de alimentación a una velocidad superior a la velocidad de sincronismo del motor de accionamiento, que devuelve a la red la energía de frenado.

Dentro del gran número de accionamientos industriales construidos, en los que la corriente continua representó una solución ventajosa y acreditada, a continuación van a describirse algunos ejemplos.

A.- REGULACION DE LA VELOCIDAD EN MAQUINAS HERRAMIENTAS.

Para las exigencias cada vez más duras que se solicitan a los accionamientos de máquinas herramientas se ha impuesto ampliamente el motor de corriente continua en contra de otro tipo de máquinas eléctricas. Su superioridad está fundamentada en las siguientes cualidades mayor margen de revoluciones de variación paulatina

cambio sencillo del sentido de giro, buenas posibilidades de regulación dinámica y con ello buena adaptabilidad del par, aceleración y desaceleración a las condiciones de trabajo de cada caso.

La regulación de revoluciones en el margen de tensión variable de inducido a par constante se emplean preferentemente para accionamientos de avance, y para arranque y frenados controlados, mientras que el margen de debilitamiento de campo a potencia constante, correspondiente a la capacidad productiva de viruta, se utiliza en accionamientos principales.

Actualmente se emplean procedimientos de regulación de velocidad que pueden considerarse como perfeccionamiento del sistema Ward-Leonard y que se utilizan muy frecuentemente en el accionamiento de las máquinas herramientas modernas; con estos sistemas modernos pueden alcanzarse gamas de velocidad de hasta 1:100.

Las máquinas herramientas funcionan a distintos regímenes de velocidad, siendo este parámetro un factor muy importante en el trabajo eficiente de las máquinas.

Las características de regulación de la velocidad de una máquina herramienta están destinadas por dos factores principales:

a.- Gama de regulación y

b.- Escalonamiento de la regulación.

La gama de regulación (B), es la relación entre la máxima velocidad del órgano fundamental N_g y la velocidad mínima N_1 es decir:

$$B = \frac{N_g}{N_1} \quad (5-1)$$

la gama de regulación varía considerablemente para los distintos tipos de máquinas.

El escalonamiento de la regulación (ϱ), es el segundo factor que determina las condiciones de regulación de la velocidad en una máquina herramienta, esta se define como la relación entre dos valores adyacentes de la velocidad de operación.

Según el método normalizado de distribución de las velocidades en las máquinas herramientas, el escalón de regulación debe mantenerse constante en toda la gama de regulación, es decir que las velocidades parciales del organo de trabajo están distribuidas según una progresión geométrica de razón constante.

$$\varphi = \frac{N_g}{N_{g-1}} = \frac{N_{g-1}}{N_{g-2}} = \frac{N_{g-2}}{N_{g-3}} = \dots \dots \dots \frac{N_3}{N_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (5-2)$$

siendo: g = número de marchas o velocidades impulsadas, se demuestra que:

$$N_g = N_1 \varphi^{g-1} \quad (5-3)$$

$$B = \frac{N_g}{N_1} = \varphi^{g-1} \quad (5-4)$$

luego el escalón de regulación:

$$\varphi = \sqrt[g-1]{\frac{N_g}{N_1}} = \sqrt[g-1]{B} \quad (5-5)$$

Cuanto menor es el escalón de regulación más suave es la marcha, lo que influye decisivamente sobre el rendimiento de la máquina herramienta.

Dentro de las alternativas utilizadas para efectuar la regulación de velocidad en las máquinas herramientas se tiene:

- 1.- Regulación mecánica de la velocidad.
- 2.- Regulación electromecánica de la velocidad.
- 3.- Regulación eléctrica de la velocidad y
- 4.- Regulación electrónica de la velocidad.

Analizando cada una de ellas llegamos a las siguientes conclusiones:

1.- Regulación mecánica de la velocidad

- El motor eléctrico no tiene regulación de velocidad y solamente se utiliza para el accionamiento del eje principal; generalmente se emplean los motores trifásicos asincronos jaula de ardilla.

- El mecanismo más utilizado es el cambio de engranajes. Mediante ruedas dentadas cambiables, con el número de dientes Z_1, Z_2, \dots debe conseguirse cierta relación entre el número de revoluciones impulsoras y el número de revoluciones impulsadas. Esto constituye un bloque llamado caja de cambios de velocidades.
- El aumento de marchas amplía la gama de regulación en la práctica se considera razonable un límite máximo de 18 a 20 marchas. Las cajas de cambio de velocidades con mayor número de marchas son demasiado complejas y voluminosas, además de que las operaciones de cambio de marcha resultan dificultosas.
- Finalmente, debe tenerse en cuenta las crecientes pérdidas de energía por rozamiento en los engranajes y el elevado desgaste de las superficies rozantes.

2.- Regulación electromecánica de la velocidad

- El accionamiento de una máquina herramienta mediante un motor eléctrico de velocidad regulable, permite ampliar notablemente la regulación de la velocidad de dicha máquina o, en otro caso, para la misma gama de regulación, es posible suprimir cambios de engranajes.
- Se puede utilizar dos alternativas, en el primero de ellos el accionamiento se realiza por medio de un motor trifásico asíncrono de dos velocidades - en el segundo, el accionamiento se efectúa mediante un motor shunt de corriente continua.
- Mayor flexibilidad en la elección de las velocidades correspondientes tanto en el número de éstas - como en los valores más apropiados para cada una de ellas.
- Caja de cambios de velocidades más sencillas y menos voluminosas (por lo tanto, menores rozamientos mayor rendimiento del conjunto y menor espacio.)

3.- Regulación eléctrica de la velocidad

Las primeras máquinas herramientas disponían de una regulación totalmente mecánica de la velocidad con voluminosas cajas de cambios de velocidad y gran -- número de transmisiones por engranajes.

Hemos visto que la aplicación de motores de corriente alterna con varias velocidades ó de motores de corriente continua, con amplia gama de regulación de velocidad, permitía reducir el volumen de las cajas de cambio, aumentar el rendimiento mecánico de la máquina herramienta y lograr una mejor flexibilidad -- en la elección de las velocidades más convenientes.

El siguiente paso es conseguir una regulación -- completamente eléctrica, es decir, sin etapas mecánicas con lo que las ventajas anteriormente mencionadas se hacían más patentes. Para ello se requiere -- dispositivos eléctricos de accionamiento con una gama de velocidad lo suficientemente amplia para cubrir el número de velocidades necesario en la máquina herramienta.

Para ello podemos contar con los siguientes dispositivos eléctricos y electromagnéticos, donde se dan las gamas de velocidad que pueden alcanzar:

- Motor Shunt de corriente continua	4:1
- Grupo Ward-Leonard sencillo	20:1
- Grupo Ward-Leonard con Amplidina	100:1
- Grupo Ward-Leonard con Rototrol	100:1
- Grupo Ward-Leonard con Amplificador magnético	100:1

Como ejemplo de aplicación, vamos a determinar -- las etapas de regulación de velocidad de una máquina herramienta utilizando como accionamiento, un -- grupo Ward-Leonard con amplificador rotativo de campo transversal (Amplidina):

-Accionamiento: Grupo Ward-Leonard con una amplidina como excitatriz.

- Gama de regulación del grupo: $B_w = 100$

- Gama total de regulación : $B = 50$

- Velocidad mínima del husillo: $N_1 = 10$ rpm.

- Escalón de regulación : $Q = \sqrt[10]{10} = 1.26$

La regulación será totalmente eléctrica. El número total de etapas de velocidad será, por lo tanto:

$$g = \frac{\text{Log } B}{\text{Log } Q} + 1 = \frac{\text{Log } 50}{\text{Log } 1.26} + 1 = 17.9$$

redondeando al número entero inmediato superior : $g = 18$. Como la gama de velocidades del grupo Ward-Leonard es 100:1, por lo tanto, muy superior a la gama de velocidades deseada, podemos elegir libremente, dentro de cierto margen, la velocidad mínima del grupo, supongamos que esta velocidad mínima es de 20 rpm. que corresponde a la velocidad mínima del husillo $N_1 = 10$ rpm. De acuerdo con estas condiciones, las 18 velocidades restantes, son las especificadas en la Tabla N^o (5-1)

En la Figura N^o 5-1, se ha representado el correspondiente diagrama de velocidades. Las líneas representan las velocidades obtenidas; en toda la zona sombreada, la regulación de velocidad es gradual, lo que quiere decir que podría haberse elegido libremente otros números de velocidades y otros valores para éstas; en ambos casos bastará con ajustar las correspondientes posiciones del reostato de regulación de velocidad.

Tal como puede apreciarse en la Figura N^o 5-2, la caja de cambio de velocidades se ha reducido a la mínima expresión: un eje impulsor (A), accionado por el motor del grupo Ward-Leonard, un grupo de engranajes para reducir las velocidades y un eje (B) para el accionamiento del husillo de la máquina.

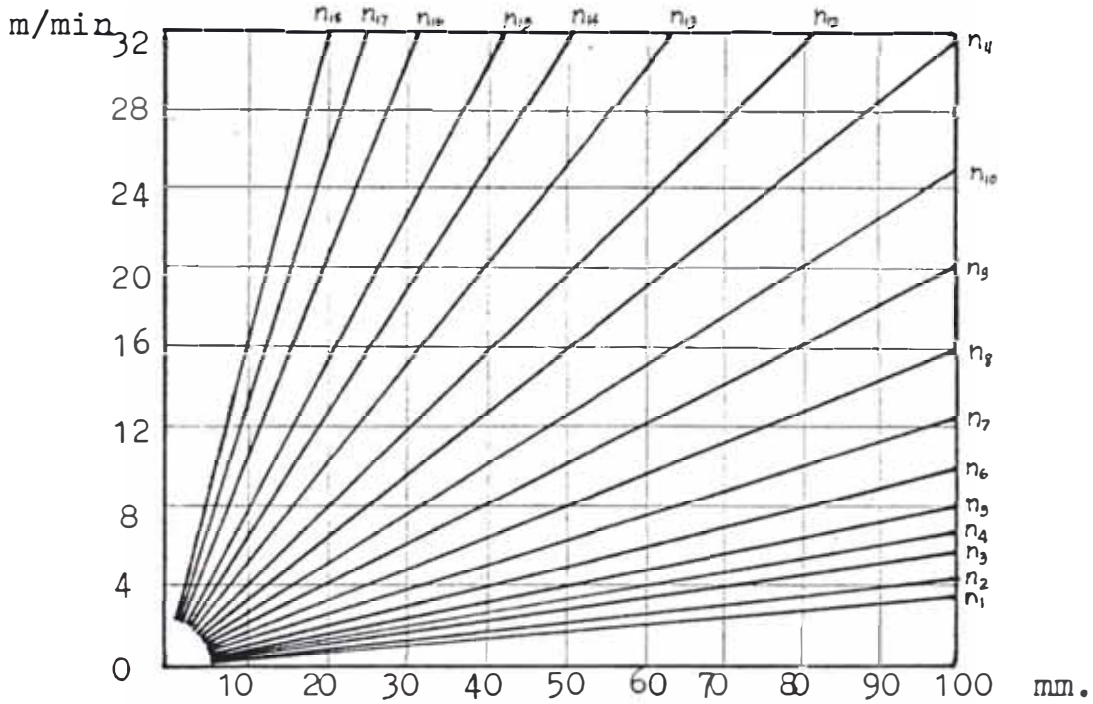


Fig. N° 5-1: Diagrama para una caja de cambios de 18 velocidades, de una máquina herramienta, con regulación totalmente eléctrica de la velocidad (accionamiento por grupo Ward-Leonard con amplidina, con gama de regulación de velocidad 50:1)

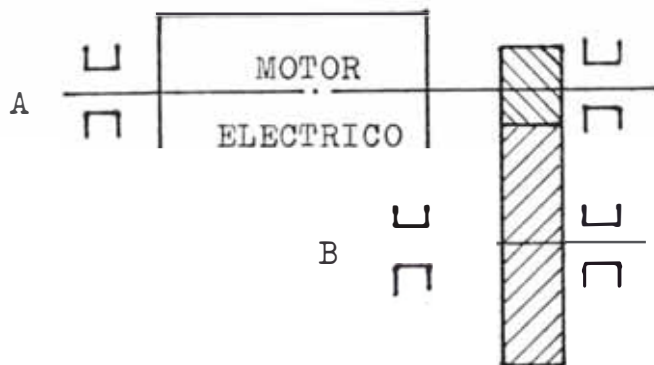


Fig. N° 5-2: Esquema de la caja de cambio de marchas para el diagrama de velocidades de la figura anterior.

TABLA N° 5-1

Etapa N.	Velocidad del husillo (rpm)	Velocidad grupo Ward-Leonard(rpm)
N ₁	10.0	20
N ₂	12.6	25
N ₃	15.9	30
N ₄	20.0	40
N ₅	25.2	50
N ₆	31.8	65
N ₇	40.0	80
N ₈	50.4	100
N ₉	63.6	125
N ₁₀	80.0	155
N ₁₁	100.8	200
N ₁₂	127.2	250
N ₁₃	160.0	315
N ₁₄	201.6	400
N ₁₅	254.4	500
N ₁₆	320.0	640
N ₁₇	403.2	810
N ₁₈	508.8	1100

4.- Regulación electrónica de la velocidad

Si bien es cierto esta alternativa es actualmente muy difundida por sus múltiples ventajas en el campo de las máquinas herramientas, esto será tema -- del próximo capítulo.

B.- EN SIDERURGIA PARA EQUIPOS TALES COMO TRENES LAMINADORAS DE TODA CLASE, REVERSIBLES NO REVERSIBLES LAMINACION DE CHAPAS EN CALIENTE Y EN FRIO, CIZALLAS EN TRENES DE LAMINACION EN CALIENTE ETC.

Los motores de accionamiento de corriente continua para trenes de laminación reversibles deben poder sopor

tar una alta carga de choque. Como magnitud característica de estos motores se tienen muy en cuenta el par de desconexión, que corresponde a la máxima intensidad admisible de inducido y por lo regular es 1.75 veces superior al par nominal, es decir, 2.75 veces este par nominal. Los motores sueltos pueden construirse con un par de desconexión hasta unos 4 MNm a velocidades entre 40 hasta 60 rpm. Para la protección contra sollicitaciones que pueden aparecer por bloqueo de los motores al romperse el laminado, entre otras circunstancias, éstos se dimensionan mecánicamente para diez veces el par nominal.

Dentro de los trenes de laminación de trabajo más duros tenemos los trenes de tochos, desbastadores y de chapa gruesa. La potencia de accionamiento de trenes especialmente difíciles se distribuye entre dos o más motores individuales, que se acoplan en grupos de a dos o más motores.

El tiempo de inversión necesario para el cambio del sentido de giro tiene una participación apreciable en el tiempo total de laminación y por ello es preciso acortarlo. En dependencia de los equipos mecánicos del bastidor de laminación y de los accionamientos auxiliares, así ---

como de las corrientes de aceleración de los motores de laminación, se ha considerado como suficientemente corto un tiempo de inversión de aproximadamente 1.5 seg. referido

a la reversión de revoluciones básicas a revoluciones básicas.

Entre la parada y las revoluciones básicas se trabaja con tensión variable de inducido y campo constante no debilitado del motor, a fin de poder trabajar en las primeras pasadas difíciles con el máximo par. Por debilitamiento del campo a la plena tensión del inducido se alcanza mayores revoluciones para las pasadas con menor esfuerzo necesario. La relación entre el margen entre tensión de inducido y de debilitamiento de campo viene a estar entre 1:1 y 1:1.6.

C.- EN MAQUINAS BOBINADORAS, ENROLLADORAS, EXTRUSIONADORAS, ETC.

Estas máquinas se encuentran en industrias donde el proceso consiste en enrollar en un tambor un producto en forma de hoja continua, sea metálica, de tejido, de papel u otra, así como enrollar alambre en una devanadora, y en todos estos casos conviene que la tensión de enrollado se mantenga constante, independientemente de la velocidad con que se entrega la hoja o alambre.

Los motores de bobinadoras tienen a menudo una potencia similar a la de los motores de laminación. En el proceso de bobinado su potencia permanece constante. Cuando la potencia instalada del motor ha de mantenerse lo más reducida posible, los motores tendrán que llevar un amplio margen de debilitamiento de campo (1:4 y más), ya que el diámetro creciente de la bobina en su devanado sólo puede tenerse en cuenta a velocidad máxima de laminación mediante variación de flujo. La corriente de inducido queda aquí como una medida de referencia del tiro del flujo, con independencia del diámetro de la bobina. En la aceleración del motor de la bobinadora vacía deberá trabajar con campo fuertemente debilitado y, por tanto, con corriente elevada. Por esta razón, los motores de bobinadoras tienen por lo general un diámetro de inducido relativamente pequeño y una gran longitud de yugo, para mantener reducido el momento de inercia. Esto exige un cálculo esmerado de estas máquinas, en relación con el amplio margen de debilitamiento de campo.

En el caso de que por condiciones desfavorables de la red haya que emplearse convertidores Leonard, cada accionamiento llevará su propio generador de mando; sin embargo, los campos de todas las máquinas se alimentarán por equipos de tiristores, reguladores.

D.- EN LA INDUSTRIA DEL PAPEL.

Además de un gran número de máquinas que trabajan a velocidad constante y por tanto hay que equiparlas con

motores de corriente trifásica, hay accionamientos especiales que exigen un par constante en un amplio margen de revoluciones.

Este problema se resuelve con motores de corriente continua. Un débil devanado adicional de corriente principal se encarga de la estabilidad de los motores que trabajan en conexión de excitación en derivación. El amplio margen de revoluciones exige una ventilación independiente de la velocidad.

En la industria del papel es necesario ajustar la velocidad básica de la máquina en el margen de 1:3 hasta 1:7, ocasionalmente incluso hasta 1:20. Además, cada uno de los grupos de máquinas, como partida de filtros, de prensado y de secado, equipo de alisado, aparato de rodillos y otros, deben poderse variar entre sí en + 50% de revoluciones sin que se modifique la velocidad básica.

Una máquina de acabados que impone exigencias especialmente duras en la técnica de accionamientos es la de impregnado. Dado que el papel al aplicar la masa de acabado queda sometido de repente a variaciones de estado por humedecimiento, la regulación del tiro del papel debe ser muy eficaz.

Por ello se emplean generalmente regulaciones de tiro, cuyos sensores miden directamente el tiro de la banda de papel.

El papel se introduce en la máquina de impregnación a velocidad reducida. La regulación de cada uno de los motores de accionamiento de corriente continua de los distintos grupos de la máquina impregnadora habrá de actuar muy rápidamente, ya que la máquina pasa muy de prisa a la velocidad de producción. En máquinas de gran potencia que trabajan con velocidades máximas de 1500 rpm. son normales aceleraciones de 15 hasta 20 $\text{m-min}^{-1}\text{-seg}^{-1}$

E.- GRANDES TRANSPORTADORES.

Las dragas y descargadores son dispositivos de múltiples elementos y sometidos a oscilaciones; por ello hay que

cuidar, especialmente en grandes máquinas, que la aceleración y desaceleración en el arranque y basculación, así como la elevación y descenso de la pluma sean sin tirones. Deberán respetarse determinados valores límites. En las paradas normales de servicio no se podrá frenar mecánicamente hasta que el correspondiente accionamiento haya sido frenado eléctricamente hasta poco antes de la parada. Aquí se ha acreditado desde hace decenios el accionamiento Leonard. La máquina de amortiguación permite de una forma simple la necesaria variación elástica de la velocidad con aceleración o desaceleración suave independientemente de la atenuación que preste el operario. Puesto que la variación de la velocidad toma siempre el mismo curso, la solicitud mecánica de la construcción de acero no sobrepasa valor límite. El freno eléctrico es incluso eficaz cuando falla la tensión de la red; en este caso la energía de frenado recuperada por los motores de tracción es aplicada a las masas de inercia del convertidor alimentándolas con ello.

Las posibilidades de control sin escalones del accionamiento Leonard y de controlar la excitación del generador mediante elementos de acoplamiento con varias entradas se aprovechan cuando partes giratorias del transportador se apoyan unas en otras pero deben girar con plena independencia. Así, por ejemplo, una pluma de descarga situada sobre la torreta giratoria puede mantenerse eléctricamente en su posición inferior por medio de una regulación de posición, y además girarla a mano con independencia del giro de la torreta.

En rotopalas y explanadoras a traíllas, sobre orugas se emplean grupos Ward-Leonard, que son regulables y mandadas mediante amplidinas o aplicadores estáticos a tiristores.

F.- MAQUINAS EXTRACTORAS.

Los motores extractores para instalaciones de pozos de minas principales se acoplan directamente al portacable (polea o tambor), alcanzan potencias hasta 6000 KW y tra

bajan a una velocidad de 25 hasta 100 rpm. con pares nominales hasta 1 MNm.

Los motores extractores se alimentan mediante grupos Leonard o convertidores estáticos en servicio de cuatro cuadrantes. En el caso de conexión a redes débiles se aprovechan aún hoy día las ventajas de la alimentación Leonard. En la alimentación por convertidor estático empleada hoy de forma preferente se utiliza básicamente la conexión de inversión de campo. Esta solución ofrece ventajas económicas y satisface también dinámicamente las exigencias del accionamiento de máquinas extractoras con -- sus grandes masas susceptibles de vibrar. Por medio de -- una excitación quíntuple brusca se asegura una inversión de campo en un tiempo suficientemente breve.

Al suspender la carga predominan los momentos negativos en el motor, que a través del convertidor Leonard o estático llevan a la recuperación de energía en la red de corriente trifásica, una ventaja adicional que ofrece el empleo del motor de corriente continua, además de su buena adaptación y posibilidad de control. Estas buenas características se complementan, en una instalación automática con la regulación automática de la velocidad, aceleración y desaceleración, la limitación de la intensidad de inducido y la exacta regulación de la posición de la jaula-extractora.

G.- ELEVADORES.

En el campo de elevadores gana cada vez mayor importancia el empleo de motores de continua hasta potencias de unos 750 KW por unidad, debido a la elevada automatización.

En accionamientos para:

- 1.- Instalaciones de transbordo para productos a granel y piezas, por ejemplo, grúas de descarga de barcos y puentes-grúa para contenedores, potencia de accionamiento hasta 750 KW.
- 2.- Grúas para siderurgia, por ejemplo, grúas de fundicio-

nes, grúas de carga y descarga, grúas para sacar lingotes potencia de accionamiento hasta 400 KW.

3.- Grúas para gradas de astilleros y grúas de caballete para astilleros; potencia de accionamiento hasta 150 KW.

4.- Grúas para la construcción y especiales para apilado en almacenes; potencia de accionamiento hasta 150KW.

5.- Plataformas desplazables para elementos de combustión en reactores nucleares; potencia de accionamiento hasta 30 KW.

los motores de corriente continua son económicos en su aplicación debido sobre todo a que con ellos pueden satisfacer con facilidad las dos exigencias más importantes, a saber, amplio margen de ajuste de revoluciones y limitación del par motor. Además, por medio del accionamiento Ward-Leonard o el accionamiento con mando por tiristores para la alimentación del inducido se logran tiempos de aceleración muy reducidos. Estas ventajas proporcionan tiempos muy cortos de transbordo y una gran protección a engranajes, frenos y construcción metálica.

H.- EN APLICACIONES MILITARES.

Dentro de la tecnología para servicios de acciones militares, el grupo Ward-Leonard representó una gran evolución, tales como por ejemplo: En la marina, motores que regulan el ángulo azimutal o elevación de los cañones antiaéreos, o de los grandes cañones de los buques de guerra, cabrestantes, grúas, etc. En la aviación, el gobierno del movimiento de las torretas de las ametralladoras de los aviones; etc.

CAPITULO VI

COMPARACION CON OTROS SISTEMAS DE CONTROL DE VELOCIDAD EN AC UTILIZANDO DISPOSITIVOS ESTATICOS

El presente capítulo intenta describir de manera superficial, otros métodos y técnicas de regulación de velocidad en los motores DC y AC, a partir de una fuente de alimentación en AC con el empleo de la electrónica de potencia como otra alternativa de solución al problema de la regulación de velocidad. Todo ello con el propósito de poder comparar y diferenciar desde el punto de vista técnico-económico, con la alternativa que es objeto en este estudio.

El análisis que se hará incide principalmente en los principios y no sobre los detalles que pueden variar de una a otra versión particular, pues no es objetivo conocer en toda su amplitud, los diversos tipos que en la actualidad podríamos decir que existen una gran variedad de ellos, donde lógicamente depende de las características de la máquina y también el que impone la carga existiendo aún otras que el diseñador tomará en cuenta en su debido momento.

Cualquier tipo de motor puede regularse para adoptar su velocidad y par a las necesidades de su carga mecánica. La diferencia entre unos motores y otros radica en el volumen y costo del equipo de regulación necesario. Los motores DC son de fácil regulación, estando bien determinado su campo de velocidades, mientras que la regulación de los de alterna es más compleja, y se utiliza cuando se pretende aprovechar las ventajas que supone la ausencia del colector, escobillas y otros detalles -- más que a la larga tienen que ver con costos y períodos de mantenimiento preventivo y correctivo con regularidad.

En lo que respecta a los motores de continua, su principio de funcionamiento y equipo requerido para el sistema de regulación de velocidad electrónico, podríamos decir que esta ya definido, variando en pequeños detalles de un sistema a otro. Donde para una mejor comprensión y por tratarse de los motores de corriente continua de pocas variedades, se estudiará la influencia de la regulación de velocidad en el par y la potencia, siendo este comportamiento general para todos los tipos de motores que existen; luego veremos las características de funcionamiento de los motores en los cuatro cuadrantes, tomando como referencia el de excitación independiente como ejemplo para todos los casos, estos criterios es base fundamental para el análisis siguiente.

Cuando desarrollemos los sistemas de regulación de velocidad de los motores de corriente alterna, la referencia será aún más explícita que el de los motores DC por dos motivos importantes, uno de ellos es debido a que su análisis como principio de funcionamiento de la máquina no es tan simple como los DC, y lo segundo, por la mayor cantidad de sistemas de regulación de velocidad producto de la existencia de más tipos de motores - AC, tanto los asincronos como la familia de los sincronos, pero al final resumiremos por medio de un cuadro los sistemas más importantes mostrando para cada uno de ellos diferentes temas de comparación.

VI.1.- Control de Velocidad de Motores DC con el uso de Tiristores a partir de una fuente AC.

Por las características de funcionamiento que le son propias, el motor de corriente continua es utilizado en todos los dominios de la industria que necesitan velocidades variables y regulables en una amplia gama, con precisión y rapidez.

Además, de todos los motores eléctricos conocidos es el que satisface mejor la condición de reversibilidad. Efectivamente, permite suministrar y absorber elevados pares mecánicos en una amplia gama de velocidades y en los dos sentidos de giro.

Antiguamente el primer sistema de control que tuvo gran acogida y representación, fué el sistema Ward-Leonard patentado por H. Ward-Leonard en 1890 y en que a través de muchas décadas ha sido superado paulatinamente hasta llegar al control mediante tiristores por variación de la tensión de armadura y de campo. Este sistema ha funcionado y seguirá funcionando por algunos años más; pero también desde hace varios años con la acelerada evolución de la tecnología, se han diseñado los convertidores de alterna para regular velocidad en los motores de corriente alterna, existiendo una limitación económica y por su puesto, el mantenimiento requiere mayor preparación técnica para manejar potencias considerables. Por otro lado se sabe que el motor DC es mucho más caro que el AC, pero en cambio el convertidor y los elementos que lo constituyen el mando electrónico del motor AC es definitivamente más caro.

Este mayor costo se acentúa cuando se manejan grandes potencias. Una manera lógica de poder comparar ambos sistemas es, referirnos a equipos que suministran igualdad de características sobre la carga a actuar.

En esta parte vamos a hablar de manera general los sistemas controlados por tiristores para los motores de

corriente continua de excitación independiente, por ser el más rígido en comportamiento, obteniéndose la versatilidad de los demás tipos de motores DC existentes y por ende los más difundidos en la industria.

Un sistema de regulación de velocidad electrónico para motores DC, es un dispositivo que convierte la tensión alterna de la red, en tensión continua de valor medio regulable que, aplicada al motor, permite hacer variar su velocidad.

Por consiguiente, y como ya se ha dicho en el capítulo anterior, el control de la velocidad en estos motores puede realizarse de dos maneras, mediante la variación de la tensión de armadura ó mediante la variación de la corriente de excitación del campo, ello determina las características par-velocidad de un motor DC, los reguladores estáticos pueden utilizar cualquiera de los procedimientos, según sea el caso particular o en su defecto ambos simultáneamente.

Antes de proceder a explicar las variaciones y características entre uno u otro método, es importante siempre que se elige un sistema para regular velocidad, conocer las características de la máquina que este puede ofrecer para satisfacer un determinado requerimiento, y sobre todo su comportamiento cuando uno actúa sobre sus parámetros que lo gobiernan.

VI.1.1.- Influencia de la Regulación de Velocidad en el Par y la Potencia.

La variación de la velocidad de un motor de corriente continua, puede realizarse de dos formas:

- **Primera forma:** Con campo inductor constante por variación de la tensión de armadura; se hace variar la velocidad desde cero hasta la velocidad nominal ó base de la máquina. Es el funcionamiento a par constante, es decir que con una corriente de armadura dada, el mo

tor desarrolla el mismo par a todas las velocidades.

- Segunda forma : Con tensión de armadura constante, y reducción de la corriente de excitación, se hace variar la velocidad, mas allá de la velocidad nominal; en este caso, con una corriente de armadura dada, el producto de la tensión de armadura y su respectiva corriente (es decir potencia) es constante, pero el par motor disminuye cuando crece la velocidad. Es el funcionamiento a potencia constante, porque en las condiciones expuestas, el motor desarrolla la misma potencia a todas las velocidades.

Frecuentemente, para conseguir un campo de velocidades--lo más amplio posible, la regulación de la tensión de armadura se combina con la regulación del campo del motor con esta doble regulación, se define como velocidad nominal del motor la que correspondería con su tensión nominal en la armadura y con pleno campo inductor.

Las velocidades mayores a la nominal se consigue regulando el campo inductor, y las inferiores regulando--la tensión de alimentación a la armadura, tal como se aprecia en la Figura Nº(6-1), la velocidad máxima no acostumbra ser superior a cuatro veces la velocidad nominal y es preferible no sobre pasar de 2.5 veces dicho valor porque más allá de esta velocidad, el efecto de reacción de armadura es muy fuerte si se le compara con el ya débil flujo de campo. Haci también las limitaciones de potencia y velocidad son determinadas por los motores DC--y no por los dispositivos semiconductores. Cabe mencionar que los tiristores se pueden conectar en serie y en paralelo para conseguir grandes tensiones y corrientes. El torque y la corriente de armadura están limitados---por el crecimiento de la temperatura del motor. En otro párrafo se estudiará los diferentes casos de control de velocidad bajo los siguientes encabezados:

- Control de tensión de la armadura.
- Control del campo

- Control combinado con Armadura y Campo.

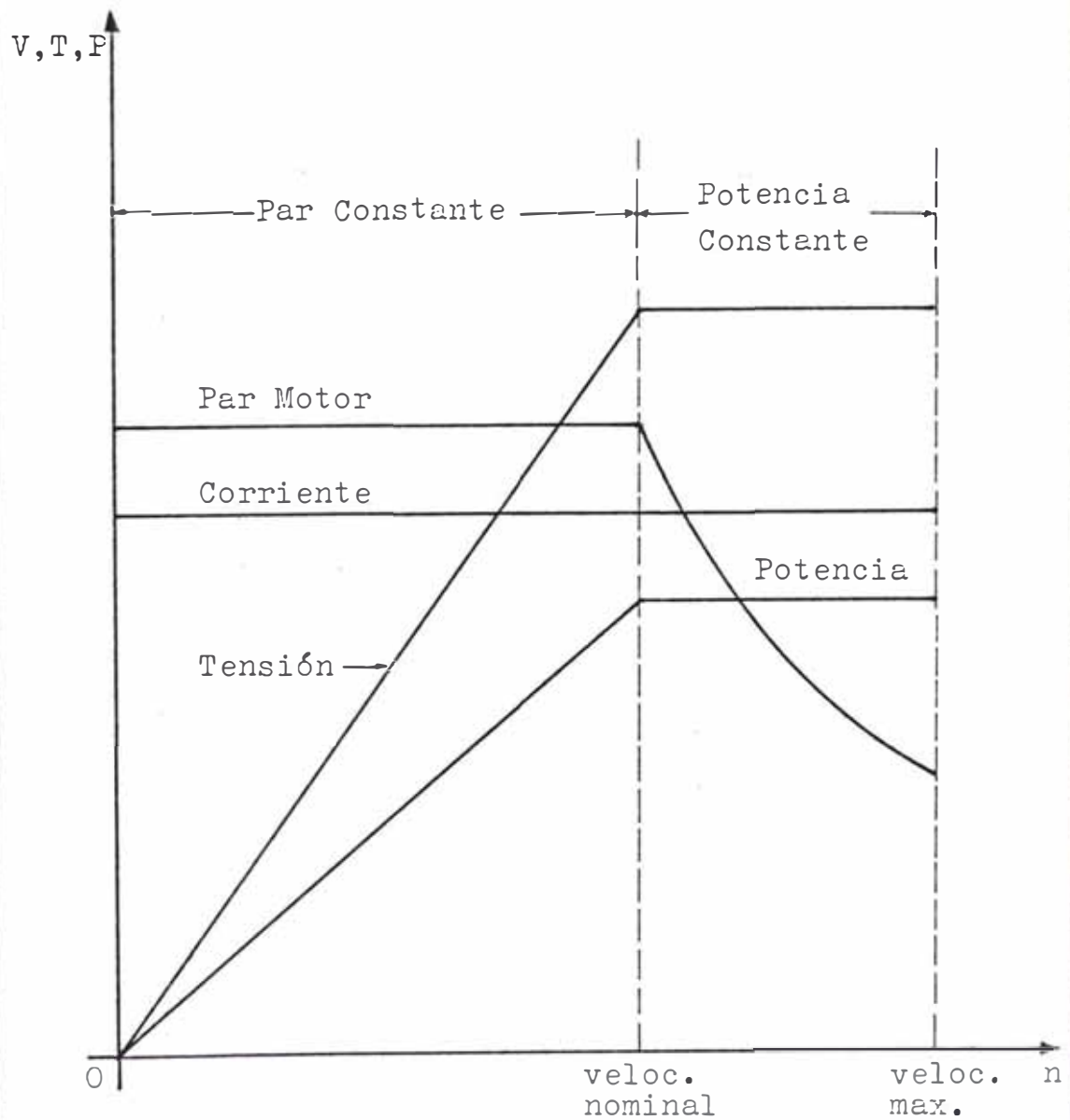


Fig. Nº6-1: CARACTERISTICAS DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA.

VI.1.2.- Características de Funcionamiento de los Motores DC en los cuatro Cuadrantes.

Cuando se requiere que un motor aporte par en uno y otro sentido de giro y además pueda tener opción al-frenado con recuperación de energía a la red, es preciso trabajar en los cuatro cuadrantes, es decir tener posibilidad de invertir la tensión de armadura, la corriente de excitación de acuerdo sea el caso. Para ello se cuenta con diversos montajes atendiendo a la forma en que se realiza la inversión.

En la Figura N°6-2, se ha representado los cuatro casos posibles, y para una mejor explicación se ha utilizado un interruptor inversor ó también conocido como conmutador, tanto para la armadura como para el campo. Hay que tener presente que esta solución ocasiona gran desgaste de este elemento de conmutación, además de ser un sistema lento de actuación.

Entonces con un puente completo existirá recuperación y frenado si invertimos la conexión del conmutador en el momento que el motor estaba aportando par en un -

sentido de giro determinado y ordenamos un ángulo $\alpha > 90^\circ$ en el primer y segundo cuadrante; evidentemente esta operación se hará en paulatino aumento del ángulo y tratando de efectuar la inversión en un momento de corriente cero.

En el tercer cuadrante el puente se comportará como generador de la red hacia el motor, existiendo un giro y par negativos respecto a la del primer cuadrante. Al pasar al cuarto cuadrante recuperamos energía del motor a la red y por consiguiente se produce un frenado con recuperación, que vendrá determinado en tiempo por la magnitud del ángulo α .

Se puede conseguir el mismo efecto por inversión de la corriente de excitación, tal como muestra la figura anterior, en su parte inferior de cada cuadrante. Este método quizás sea el más fácil, puesto que hacemos la in

versión de un devanado de menor potencia e incluso lo podemos efectuar por medio de tiristores como se indica en la figura; pero por otro lado hay que tener en cuenta que si por algún motivo se perdiera la excitación a este devanado, resultaría sumamente peligroso para el motor, porque este se embalaría con posibilidades de su deterioro y daños al personal, en caso de no desconectarlo de la red en forma inmediata.

El comportamiento es similar al caso de la manipulación por la armadura. Para ángulos pequeños, y para un determinado sentido de corriente de excitación le corresponde un giro del motor en un sentido. Si se invierte la excitación obtenemos recuperación de energía hacia la red -- con el control de ángulos mayores de 90°.

Por otro lado existen dos tipos importantes de convertidores dobles que explicaremos a continuación.

Uno de ellos es conocido como modo libre de corriente -- circulante tal como se muestra en la figura N°6-3; en este modo de operación, solamente un convertidor o puente de diodos opera y el otro convertidor permanece en situación de bloqueo. Como la corriente circulante no puede fluir entre los dos circuitos convertidores, es que se ha denominado como modo de operación libre de corriente circulante.

Durante una dirección de la operación, el convertidor -- "1" opera como rectificador, mientras se bloquea los pulsos hacia el segundo convertidor. Siempre que el sistema -- deba frenar o guiarse en otra dirección, el convertidor "1" se bloquea primero y la corriente de carga se reduce a cero. Se liberan entonces los pulsos hacia el segundo -- convertidor después de un intervalo de seguridad libre de corriente por 4 a 6 mseg.; se debe evitar los saltos irregulares durante el cambio.

Así, tal modo de operación requiere un complicado sistema de regulación que tiene no solamente que percibir -- la dirección del momento de torsión deseada, sino también que bloquear y desbloquear ambos convertidores en forma

adecuada con un intervalo de seguridad. Además, durante esta operación, la corriente tiene que pasar por cero. Algunas de las aplicaciones ni siquiera permiten que se pierda el control durante el intervalo de seguridad de 4 a 6 mseg.

Con motivo de estas dificultades y debido a la necesidad de un sistema regulador extremadamente complejo, esta forma de convertidores dobles casi no se utilizaba-- hace unos años. Pero ahora, gracias al rápido avance de la electrónica digital, el modo de operación libre de corriente circulante se utiliza prácticamente en todos -- los convertidores dobles actuales.

El otro tipo existente es el llamado modo de operación de corriente circulante de los convertidores reversibles tal como se muestra en la Figura N°6-4, cuya característica es eliminar la mayor parte de las dificultades del modo libre de corriente circulante. A diferencia del caso anterior, aquí ambos convertidores se encuentran en posición de no bloqueo, uno opera en el modo rectificación y el otro como inversor. Así el sistema de regulación no requiere de "módulo de comando" ya que los dos convertidores se encuentran en operación. Una corriente circulante fluye del convertidor de rectificación hacia el convertidor de inversión. Este flujo de corriente circulante produce dos efectos benéficos:

- 1) Como siempre hay corriente fluyendo a través de los convertidores, cuya magnitud es independiente de la corriente de carga, el problema de la discontinuidad-- se elimina definitivamente.
- 2) La conmutación de un cuadrante de operación a otro-- es muy ligera y el ángulo de disparo se ajusta en -- forma automática por la tensión de control. Así los convertidores no tienen que pasar a través del bloqueo ni por el intervalo de seguridad de 5 mseg. En consecuencia, el control nunca se pierde en este modo.

Pero por obtener estas dos ventajas, existe el inconveniente al cual hay que aceptar es el de conectar dos grandes reactancias para limitar la corriente circulante. La corriente circulante en la práctica debe limitarse al 10% de la corriente de carga. Ya que esta corriente circulante fluye a través de ambos convertidores, éstos tienen que sobredimensionarse en un 10% más de su valor. En forma similar, todos los otros componentes eléctricos tienen que ser de mayor capacidad.

Finalmente, como puede observarse ambos sistemas obedecen a un circuito de potencia llamado puente doble de tiristores en montaje antiparalelo tal como muestra la Figura N°6-5; que consiste en dos puentes trifásicos---controlados, donde las tres llegadas de alterna son comunes, y las salidas de corriente continua de polaridades opuestas, están conectadas en paralelo.

Hay un puente por sentido de marcha de la máquina como motor; este puente sirve también para sentido de frenado en sentido opuesto del precedente. Este sistema --permite hacer variar la tensión de salida de forma continua, desde su valor máximo positivo a su valor máximo negativo. Es decir, que este montaje puede funcionar en los cuatro cuadrantes. En la figura N°6-6 se representan las cuatro secuencias de marcha, correspondientes a los cuatro cuadrantes utilizando puentes dobles de tiristores en montaje antiparalelo.

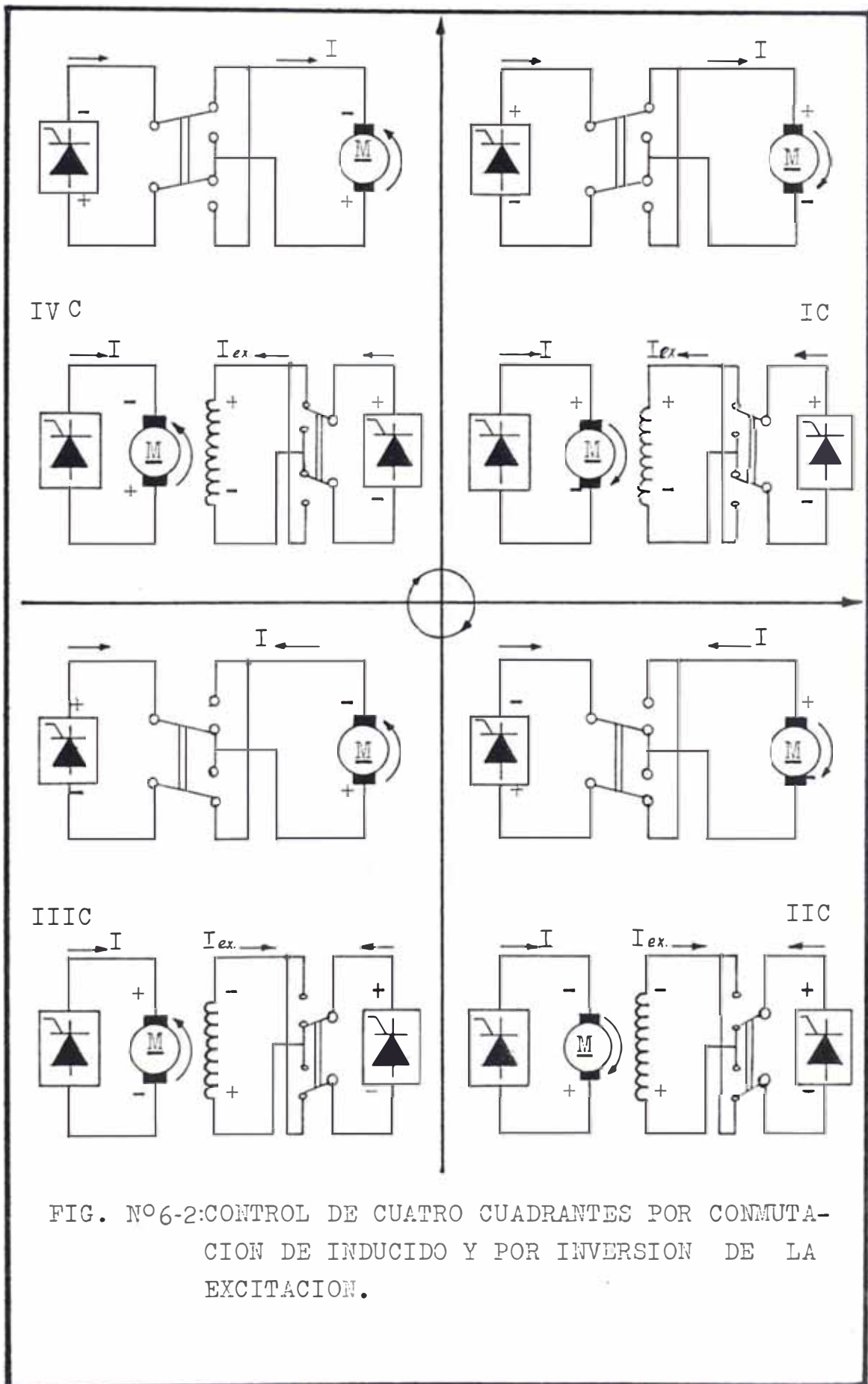


FIG. N°6-2:CONTROL DE CUATRO CUADRANTES POR CONMUTACION DE INDUCIDO Y POR INVERSION DE LA EXCITACION.

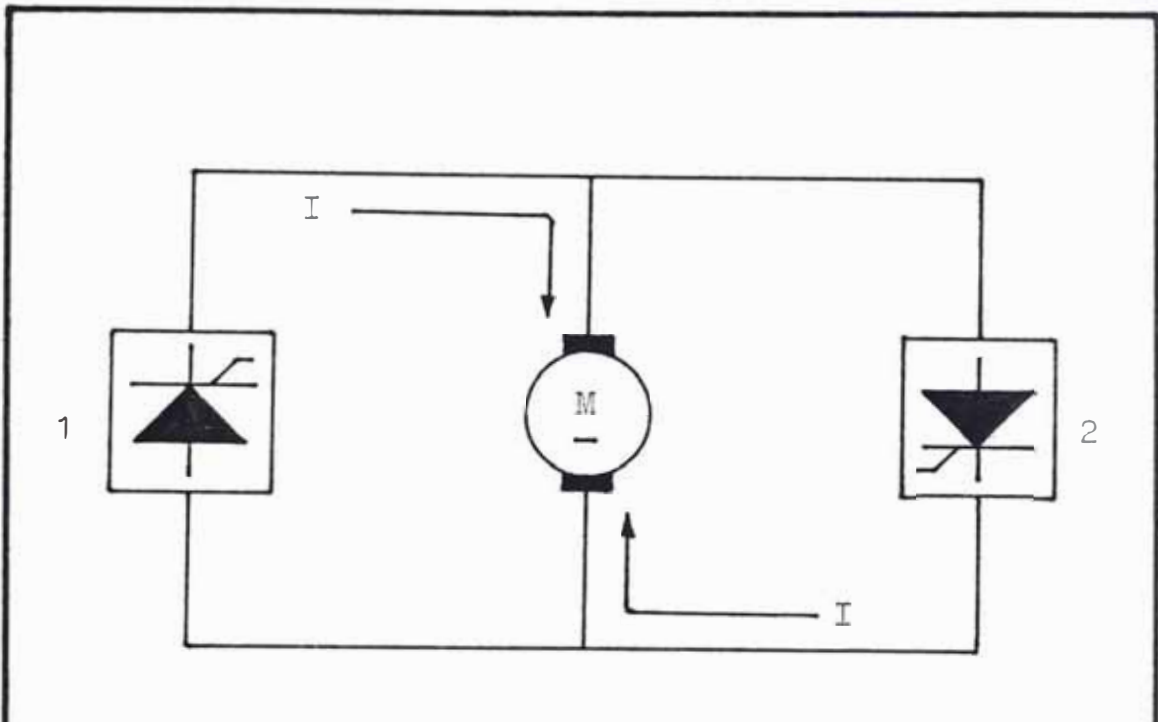


FIG. Nº 6-3: CONTROL DE CUATRO CUADRANTES CON SERVICIO INTERRUMPIDO DE LOS PUENTES. MODO DE OPERACION LIBRE DE CORRIENTE CIRCULANTE.

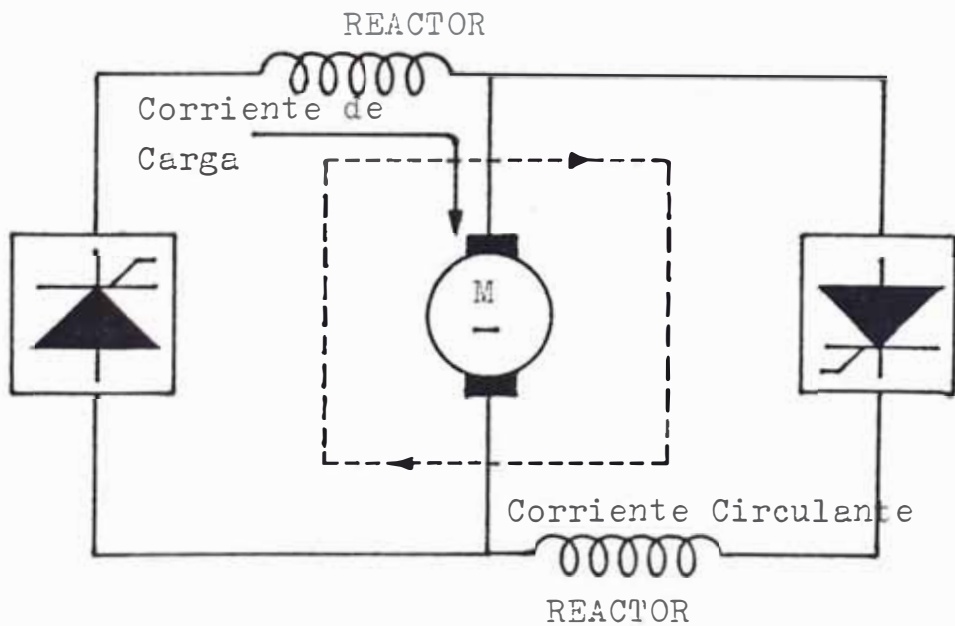


FIG. Nº 6-4: CONTROL DE CUATRO CUADRANTES POR CORRIENTE CIRCULANTE.

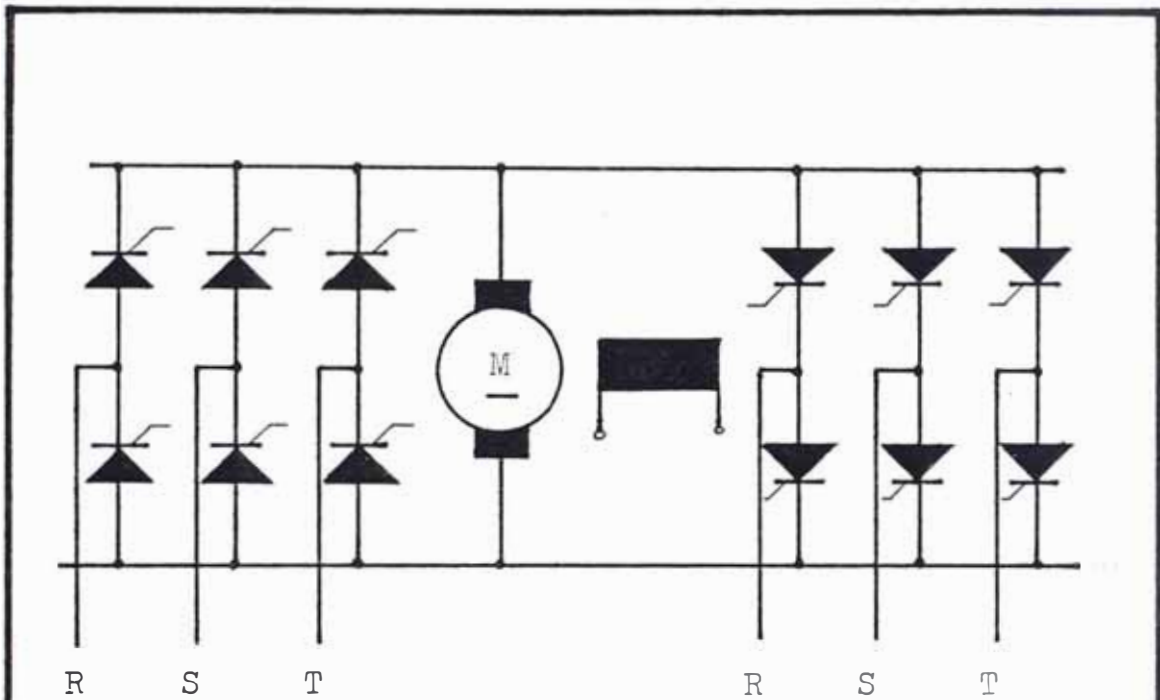


FIG. N°6-5: PUNTE DOBLE TRIFASICO DE TIRISTORES EN MONTAJE ANTIPARALELO.

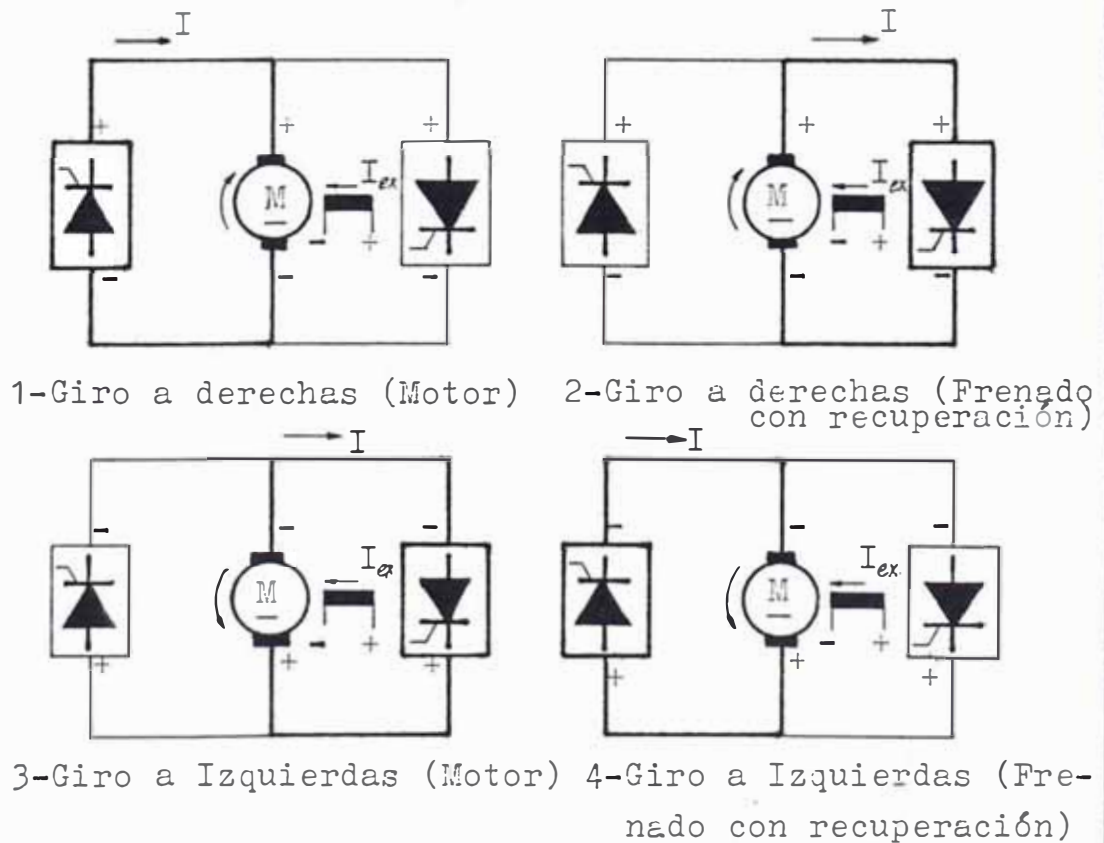


FIG. N°6-6: SECUENCIAS DE MARCHA DE UN VARIADOR REVERSIBLE DE PUNTE TRIFASICO DOBLE, EN MONTAJE ANTIPARALELO.

VI.1.3.- Regulación con Control de Tensión de la Armadura.

Como se sabe, la velocidad en los motores DC es proporcional a la fuerza contraelectromotriz, y por otro lado también, a la diferencia entre la tensión aplicada a los bornes de la armadura y la caída de tensión en devanados de la armadura.

Como los variadores de velocidad pueden suministrar una tensión regulable desde cero hasta el valor máximo, se deduce una gran flexibilidad de funcionamiento; la velocidad del motor varía continuamente desde la parada hasta su valor nominal, sin ninguna discontinuidad.

Como el campo magnético inductor es constante, el par motor es directamente proporcional a la corriente del inducido. Si el motor está convenientemente ventilado, resulta posible su funcionamiento a corriente nominal y por lo tanto a par motor nominal, a todas las velocidades. Se trata, por lo tanto, de un funcionamiento a par constante, definido anteriormente.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la tensión de salida del regulador electrónico de velocidad, no es perfectamente continua ya que se trata de una tensión rectificadora, que lleva armónicos; según que se trate de una rectificación monofásica o trifásica, con puente mixto o completo, estos armónicos tienen mayor o menor importancia y, algunas veces, es necesario insertar una inductancia de alisamiento en el circuito de continua, para evitar un sobredimensionado del motor debido a las pérdidas en el cobre, producidas por los armónicos.

En la Figura N°6-7 se ha representado el esquema de bloques de un variador de velocidad no reversible, es decir, que permite la marcha del motor solamente en un sentido de giro (variador en un solo cuadrante). Esencialmente, este variador está constituido por un montaje rectificador de tiristores, intercalado entre la red alterna de alimentación y la armadura de la máquina.

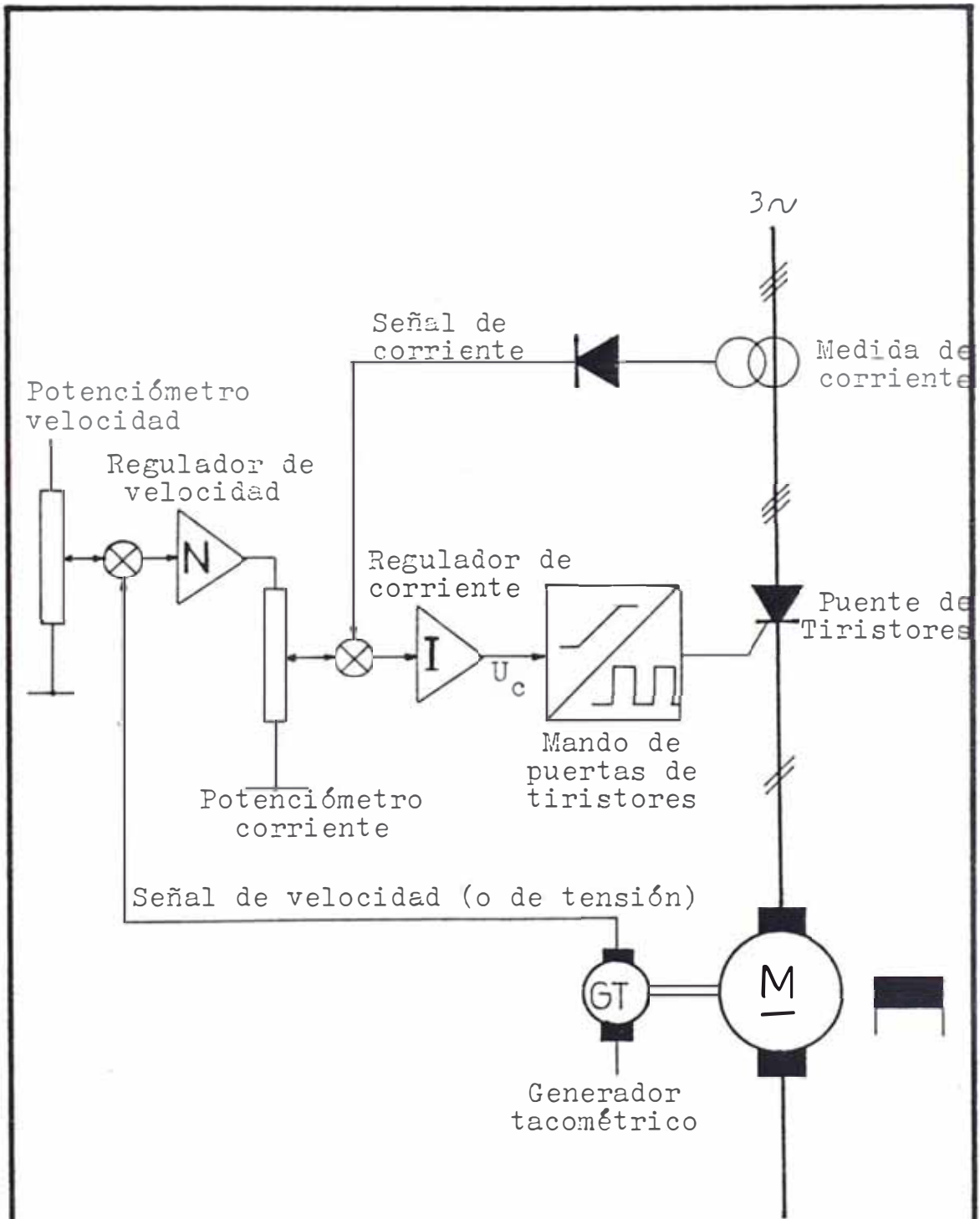


FIG. Nº6-7:ESQUEMA DE BLOQUES DE UN VARIADOR DE VELOCIDAD DE TIRISTORES, NO REVERSIBLE.

La variación de la tensión de armadura, se obtiene por regulación del retardo del ángulo de disparo " α ", de los tiristores; algunos conocen a este sistema como control de fase, donde el tiristor conecta la alimentación al motor durante ciertos períodos en cada medio ciclo y lo desconecta por el resto de cada medio ciclo.

La operación de lazo abierto de un motor DC no es -- conveniente en muchas aplicaciones, ya que si se mantiene el ángulo de disparo constante y se incrementa el -- torque aplicado, la velocidad disminuye. Sin embargo si se quiere una operación a velocidad constante, el ángulo de disparo debe cambiar para mantener la velocidad -- constante. Esto se logra con un sistema de control de lazo cerrado, tal como se muestra en la figura N° 6-7.

En la mayoría de los casos, se impone al accionamiento exigencias particulares y el sistema de lazo cerrado generalmente ofrece las ventajas de mayor exactitud en la velocidad, una respuesta dinámica, y reduce los efectos de las perturbaciones de la carga o de alimentación. Cuando los requerimientos del gobernador, incluye una rápida aceleración y deceleración es necesario el uso -- de un sistema de lazo cerrado. En un sistema de lazo cerrado, las características del gobernador pueden ser modificados, operándose a torque constante, potencia constante o a velocidad constante. Así mismo la protección del sistema es más fácil de implementarla con los lazos cerrados de control. La operación con estas características obliga disponer de un transductor que transforme las revoluciones del eje del motor en una tensión proporcional a éste. Puede presentarse el caso de que interese el control de corriente de armadura, motivo por el cual debemos disponer de un transductor que convierta -- las grandes corrientes de armadura en tensiones proporcionales, a fin de mantener constante dicha corriente.

Es posible complicar el sistema si interesa hacer -- controles combinados y operar con las variaciones de

los parámetros que intervienen en el control del sistema. Por ejemplo, mediante la regulación de la tensión de la armadura en el que se desee conseguir una variación de velocidad para un torque dado sin variación de revoluciones cualquiera que sea el torque aplicado, será necesario medir sus parámetros; en primer lugar se medirá la velocidad del motor a fin de mantenerla constante y en segundo lugar se trabajará con la corriente de armadura con el fin de que no sea sobrepasado de su valor nominal, como consecuencia de requerir un par motor elevado en un tiempo corto o permanentemente.

En consecuencia se desea conseguir con el sistema un mejoramiento de las características del motor en la medida que se le protege.

En cualquier caso la velocidad se mantiene constante excepto cuando se sobrepasa la corriente nominal, momento en que si hay más demanda de par, se disminuye la velocidad, o lo que es lo mismo, se deberá disminuir la tensión de armadura, con lo que queda protegido el motor ya que automáticamente se consigue una reducción de potencia.

Por consiguiente un sistema de estas características es ta constituido, esencialmente por los siguientes elementos:

- Potenciómetro de " Referencia de velocidad "
- Potenciómetro de " Referencia de Corriente "
- Generador Tacométrico, para medir la velocidad real de la máquina.
- Regulador de velocidad, destinado a reducir todo lo posible la desviación entre los valores de la velocidad de referencia (presente en el potenciómetro) y la velocidad obtenida. Este regulador se realiza a base de amplificadores transistorizados de corriente continua y, a su vez, está constituido por dos lazos de control en cascada:

- Un lazo cerrado de control de velocidad, que compara ambas velocidades.
- Un lazo de control de corriente, que controla-- en todo instante la corriente de la armadura -- por comparación con un valor de referencia, proporcionado por el potenciómetro de "referencia-de corriente".
- Dispositivo de mando de encendido de los tiristores, por medio de impulsos que son función de la tensión de mando, proporcionada por el regulador-de velocidad.

Finalmente en la figura N° 6-8, se ha representado el esquema de bloques de un variador de velocidad reversible (variador de cuatro cuadrantes), donde además de los -- elementos del regulador de un solo cuadrante, este regulador dispone de los siguientes dispositivos:

- Un dispositivo lógico para la inversión de la corriente.
- Un inversor de la polaridad del motor, para el cambio del sentido de giro.
- Un dispositivo para dirigir los impulsos de encendido hacia los montajes de tiristores correspondientes a uno u otro sentido de giro del motor.

Como puede apreciarse, un variador de velocidad electrónico está constituido, esencialmente, por dos partes; un circuito de potencia que incluye los montajes de tiristtores y los circuitos de mando, para el ajuste de la velocidad, detección de velocidad real, comparación de magnitudes (velocidad, corriente), amplificación, encendido-de tiristores, limitación de la intensidad de corriente lógica de inversión de corriente, etc.

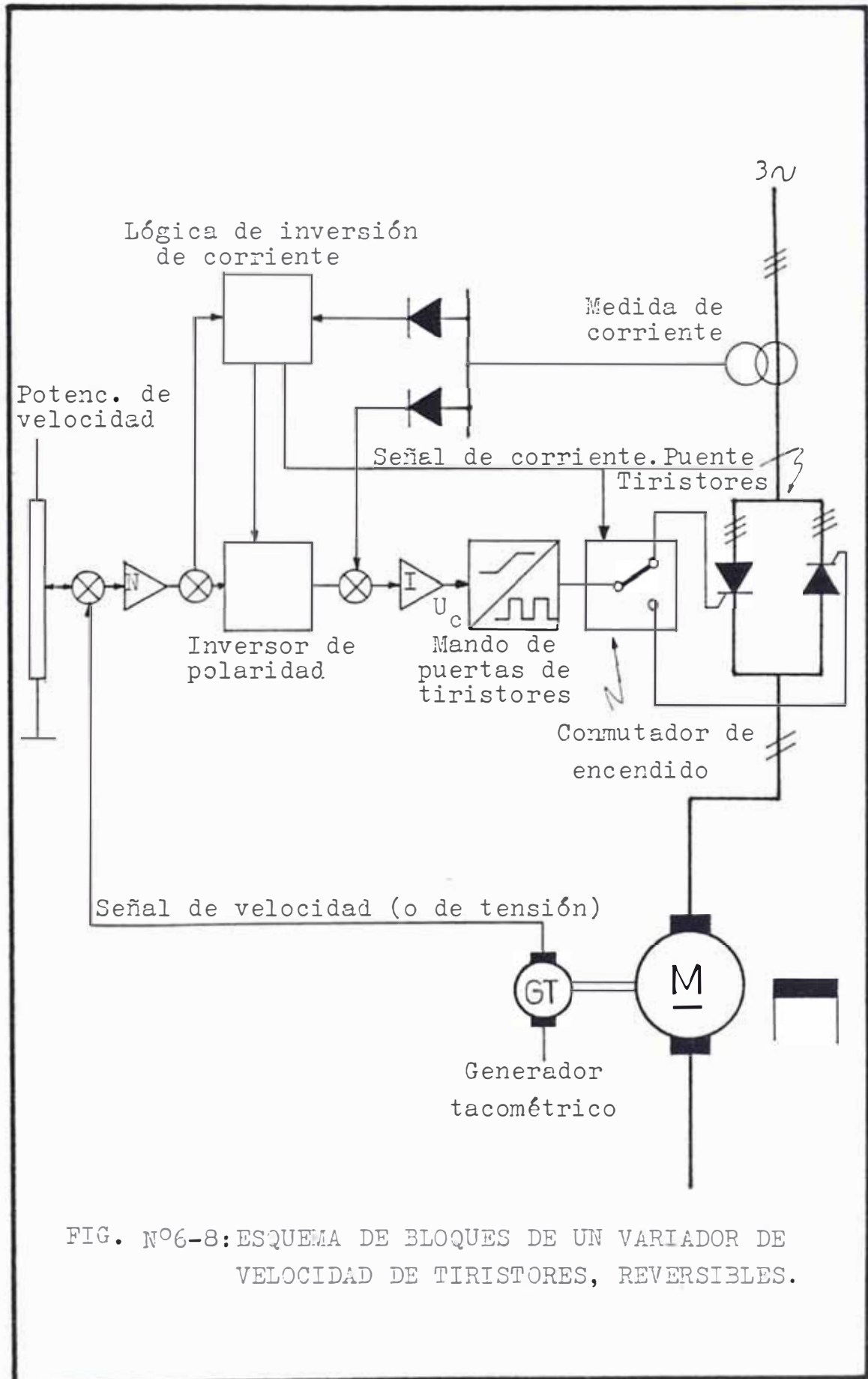


FIG. N°6-8: ESQUEMA DE BLOQUES DE UN VARIADOR DE VELOCIDAD DE TIRISTORES, REVERSIBLES.

VI.1.4.- Regulación con Control del Campo.

En estos, motores, la variación de la tensión del inductor, es decir, en el circuito de excitación, implica una variación del campo inductor, lo que permite modificar la velocidad del motor por encima de su velocidad nominal.

Es claro que este procedimiento permite actuar sobre una potencia de regulación relativamente pequeña; por consiguiente, es posible reducir de forma considerable el dimensionamiento del variador de velocidad electrónico.

Pero este procedimiento presenta inconvenientes:

- Por una parte la limitación de la gama de velocidades de 1:2.5, (excepcionalmente 1:6)
- Por otra parte, la reducción del par motor disponible a medida que aumenta la velocidad.
- Finalmente, hay que mantener un sistema clásico de arranque (por ejemplo, un arrancador), para limitar la corriente de la armadura durante el proceso de puesta en marcha.

En la figura N°6-9, se muestra el diagrama esquemático para realizar el control de la velocidad por este método. Como la velocidad del motor va a incrementarse, la referencia del campo se reduce. Esto hace variar el ángulo de disparo del conversor de tiristores en tal forma que la corriente del campo también se reduce. La condición de estabilidad se alcanza cuando la referencia del campo es igual al valor de la retroalimentación.

El potenciómetro de corriente del campo se puede calibrar directamente en RPM.

En la práctica, el mando en el inductor generalmente se emplea como complemento al mando por armadura, más allá de la velocidad nominal.

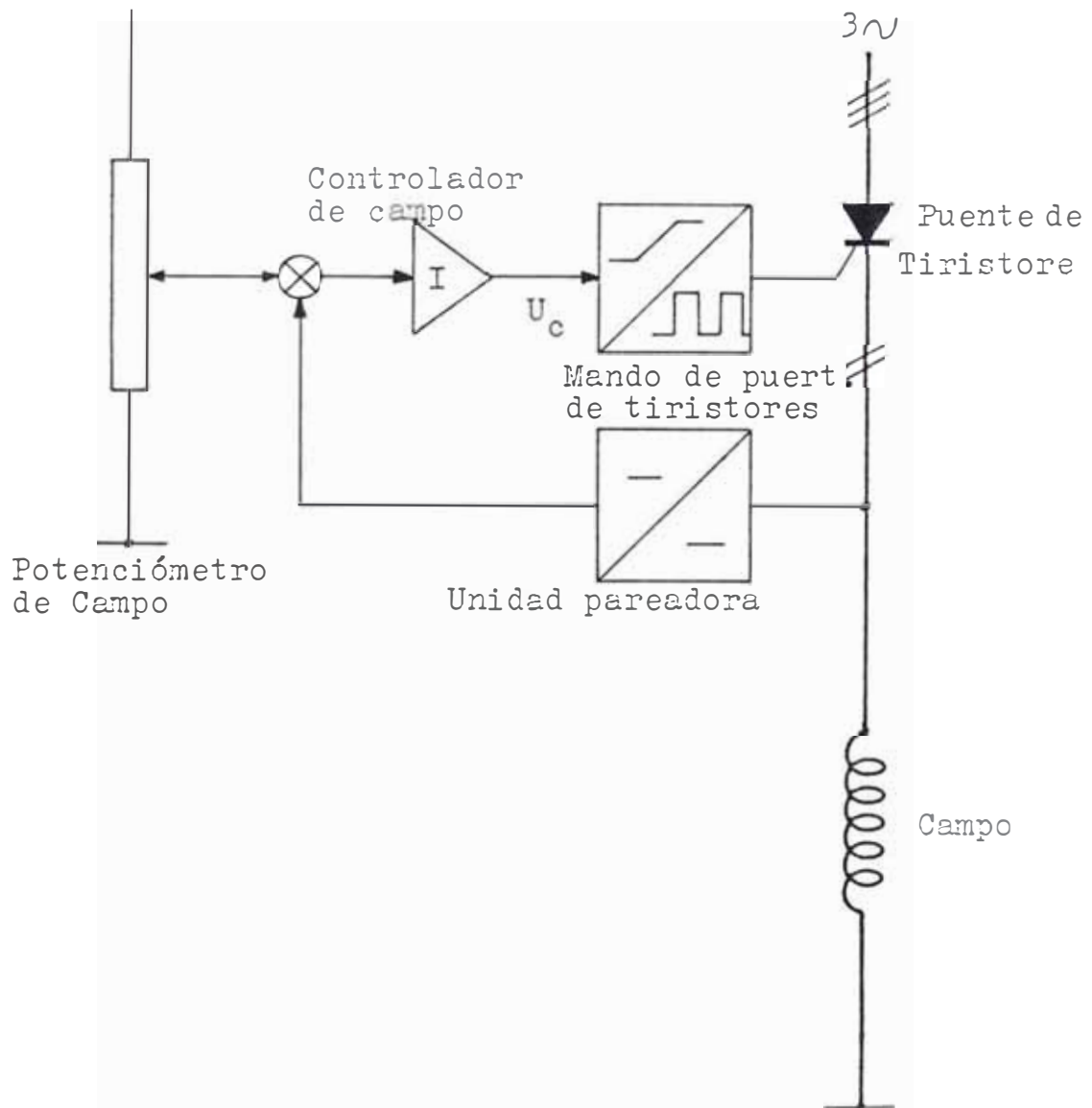


FIG. N°6-9:ESQUEMA DE BLOQUES DE UN VARIADOR DE VELOCIDAD POR CONTROL DE LA CORRIENTE DE CAMPO.

VI.1.5.- Regulación con Control Combinado de Armadura y de Campo.

La figura NO6-10, muestra el esquema de control combinado de armadura y de campo. Con este circuito, puede controlarse la velocidad desde cero hasta el valor máximo con el cambio automático del control de armadura al control del campo y viceversa. La velocidad de cero al valor nominal se obtiene en la forma usual por control de tensión en la armadura. Si se hacen ahora intentos-- para aumentar la velocidad más allá del valor nominal,-- la fuerza contraelectromotriz del motor tenderá a aumentar más allá de su valor nominal, ya que el circuito de campo es lento en su respuesta debido a su gran constante de tiempo.

En el circuito del campo se aplican dos señales a un controlador del campo, una es la referencia de campo -- pleno y la otra es lo máximo del valor normalizado del índice real de la corriente del campo y de la f_{cem} .

El valor normalizado hasta la velocidad nominal de f_{cem} es menor que la unidad y en consecuencia, la retroalimentación al controlador del campo se mantiene en correspondencia a la corriente plena del campo. Pero tan pronto como se hacen intentos para aumentar la velocidad más allá del valor nominal, el valor normalizado de la f_{cem} tiende a aumentar más allá de la unidad y el valor de la retroalimentación que se aplica al regulador del campo es mayor que la unidad. Esto obliga al regulador del campo a variar el ángulo de disparo con el fin de reducir la corriente del campo a un valor tal-- que limite la f_{cem} a su valor normalizado de uno. En consecuencia, para obtener una velocidad más allá del valor nominal, el campo se debilita en forma automática.

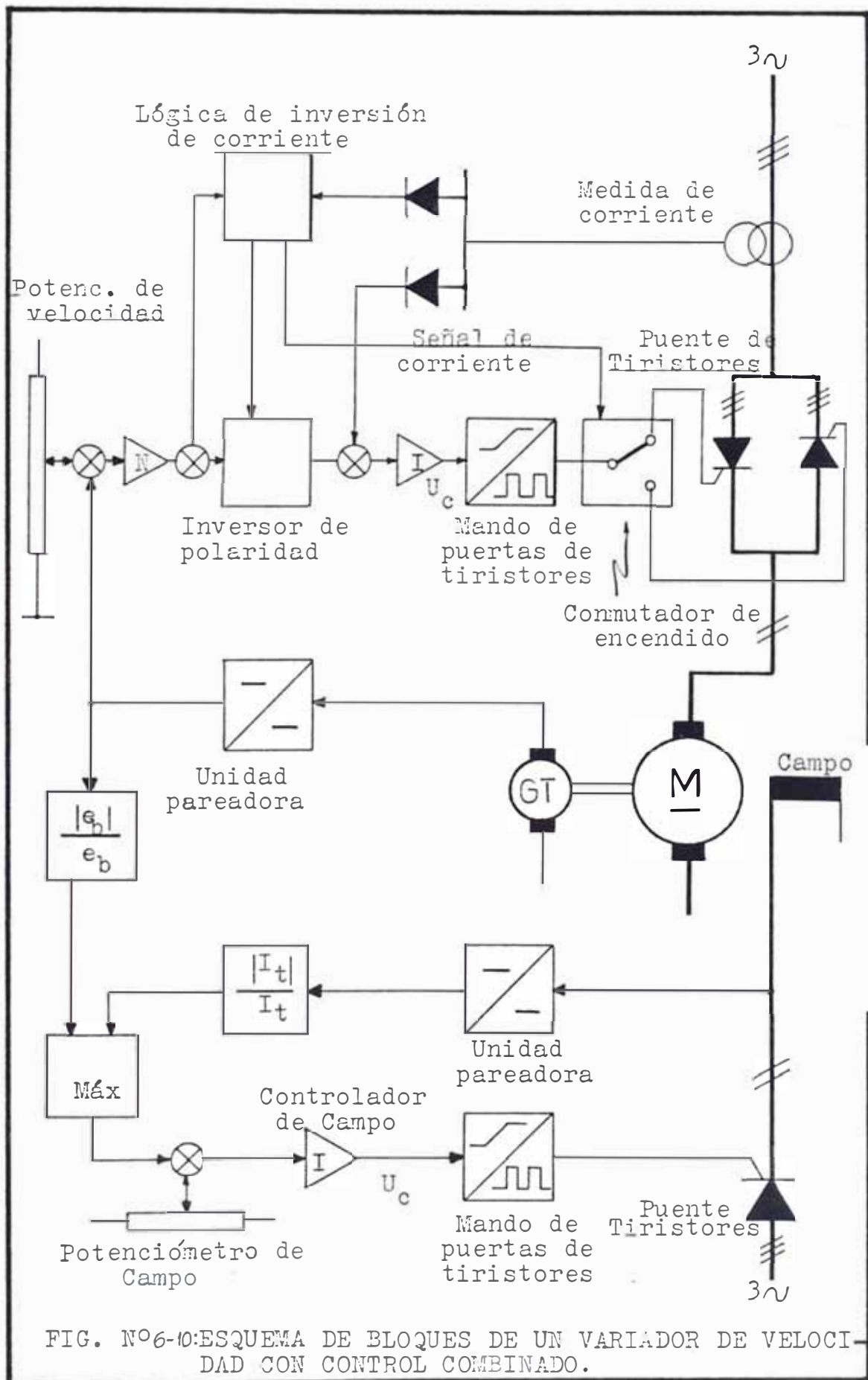


FIG. N°6-10:ESQUEMA DE BLOQUES DE UN VARIADOR DE VELOCIDAD CON CONTROL COMBINADO.

VI.2.- Control de Velocidad de Motores AC a partir de una fuente AC.

Como se menciona en el Capítulo V, antes la mayor parte de los problemas de regulación de velocidad en máquinas eléctricas fueron solucionados mediante el empleo del motor de corriente continua. Sin embargo, si lo comparamos con el motor de corriente alterna, este presenta las desventajas de mayor tamaño, precio, mantenimiento, complicación constructiva del colector, y el requerimiento de una fuente de corriente continua de gran potencia. Por todo ello es que desde hace muchos años se ha estudiado la alternativa de emplear el motor de AC - mas simple en su diseño, especialmente el de jaula de ardilla para efectuar la regulación de velocidad.

En los inicios, se logro conseguir la regulación de velocidad en los motores de inducción de rotor bobinado mediante el control de la tensión de entrada al estator por reactancias saturables ó autotransformador variable así también mediante el control de la corriente rotórica por inserción de resistencias al rotor; y en grandes potencias por el sistema Scherbius.

Los motores de inducción con rotor bobinado y anillos rozantes no son tan simples y baratos como los de jaula de ardilla, pero evidentemente el colector de anillos deslizantes no presenta la complicación del colector de delgas de un motor DC. Con la aparición del tioristor se han mejorado en rendimiento y tamaño los equipos que funcionan por los procedimientos citados, y se ha conseguido la regulación de cualquier motor de CA mediante la alimentación con frecuencia y tensión variable.

Los objetivos básicos de un gobernador de CA son los mismos que la de CC, esto es la de proporcionar un control de posición, torque o velocidad. Como se sabe, la velocidad es función de la frecuencia y el torque es -- función de la tensión, por lo tanto el control de estos dos parámetros deberán producir una respuesta correcta-

en un motor de corriente alterna. Sin embargo, para lograr tal objetivo, el control de la tensión y la frecuencia debe ser cuidadosamente coordinados, esto es, acoplados convenientemente con la no linealidad en su característica del motor. Esto hace el problema de control considerablemente más complejo comparado al del motor de corriente continua.

En la actualidad se han desarrollado muchos sistemas de control de velocidad mediante el uso de la electrónica de potencia, y como no es objetivo del presente trabajo detallar cada uno de ellos tanto para los motores DC como AC, presentamos a continuación mediante la Tabla N^o 6.1 un cuadro comparativo de los diferentes tipos de reguladores de velocidad para los motores de corriente alterna. Finalmente se evaluará las ventajas y desventajas del uso de los reguladores tratados en el presente capítulo.

VI.3.- Ventajas y Desventajas de los Tiristores.

Las VENTAJAS que presentan los tiristores son efectivamente muy numerosas entre las que se puede citar:

- Las pérdidas de potencia son muy pequeñas, lo que significa un rendimiento muy elevado, especialmente cuando trabajan a cargas parciales.
- El mantenimiento es casi nulo, debido a su condición--estática.
- Están disponibles en poco tiempo sin necesidad de complicados procesos de arranque.
- La rapidez de respuesta de los tiristores al variar--el flujo de energía es muy grande.
- Los tiristores presentan una notable rigidez mecánica gracias a lo cual son pocos sensibles a los choques y vibraciones y montados correctamente son prácticamente indestructibles.
- Poner en servicio una instalación con rectificadores controlados es muy simple, ya que solo basta hacer circular la corriente por medio de un interruptor, y no--necesita ningún dispositivo auxiliar de estructura---complicada para evitar las destrucciones de sus pro--piedades emisivas. Los tiristores pueden resistir sobrecargas eléctricas transitorias, y los límites admisibles vienen dados en las características técnicas. A pesar de su débil inercia térmica, los SCR pueden soportar sin daño aparente, intensidades de sobrecarga que pueden alcanzar 10 veces la intensidad nominal durante cortos instantes. Así, fusibles suficientemente--rápidos pueden generalmente asegurar la protección de instalaciones contra cortocircuitos o cargas excesivas.
- Otro factor muy importante se refiere a la disponibi--lidad de espacio para su instalación, en comparación--al espacio ocupado por varias máquinas para cumplir--

el mismo objetivo. Debe tomarse en cuenta que los rectificadores controlados deben estar montados siempre sobre un disipador de calor (Aluminio), que puede ser el propio chasis del aparato o una placa especial aislada, que ayude a su funcionamiento en muy altas corrientes. Aún así, el volumen total de una instalación con rectificadores es mínimo.

- La duración de vida de los tiristores es tal, que pueden funcionar muchos miles de horas sin el menor deterioro en sus características, ya que no existen piezas que estén sujetas a desgaste.
- Con los tiristores pueden obtenerse cualquier característica de velocidad lo que quiere decir que pueden emplearse motores más económicos.

Entre los INCONVENIENTES de los equipos de regulación de velocidad a base de tiristores, se puede citar:

- EFECTO SOBRE LA CONMUTACION.- Es importante informar al fabricante del motor, de que éste va a ir conectado a un grupo de tiristores pues existen diferencias en la alimentación del inducido, según provenga ésta de un grupo rotativo o de un grupo de tiristores. El primero genera una corriente y una tensión de forma de ondas continuas, mientras que el segundo imprimirá formas de ondas de impulsos, la frecuencia de estos impulsos varía según sea, un sistema monofásico, trifásico-hexafásico, etc. Las bobinas en la conmutación están acopladas inductivamente con el campo principal, si este campo está sometido a una tensión pulsatoria como es el segundo caso resulta que el flujo producido es también pulsatorio, este inducirá una tensión en las bobinas que intervienen en la conmutación. Por consiguiente, el funcionamiento con potencia de corriente rectificadas dará lugar a una conmutación peor y a una producción de chispas en las escobillas. Esto significa que el motor debe estar preparado para aguantar los transitorios en la conmutación de los SCR.

Se construirá el colector del motor de manera que la tensión entre delgas sea pequeña; de esta manera se eliminan las sobretensiones en la conmutación, que producen un arco destructor del colector.

- EFECTO DE UN MAL CALADO DE ESCOBILLAS.- En un motor en buen estado y concebido para ser controlado por un grupo estático, no debe apreciarse chisporroteo en el colector si éste trabaja dentro de las características de placa. De no ser así, la producción del arco ó chisporroteo puede ser provocada, por un deficiente calado de las escobillas, debiendo proceder inmediatamente a su ajuste, operación que no tiene ninguna com

plicación pues los tornillos del portaescobillas son totalmente accesibles y girándolos lentamente a uno u otro lado de la posición inicial se puede conseguir la extinción por completo de la chispa; o siendo el caso mas crítico al haberse pérdido por completo la zona neutra se puede proceder a efectuar una sencilla prueba para su correcta ubicación.

- EFECTO DE LA PRODUCCION DE ARMONICAS.- Normalmente es éste un aspecto que no se trata demasiado, pero que cada vez tiene más importancia ante su uso masivo de componentes a semiconductores en el control de potencia-- se refiere a los armónicos como interferencias en el sistema de distribución y en el equipo de conversión,-- así como en los aparatos de medida, radio, telefonía, iluminación y sistemas de compensación.

Cuando un tiristor comienza a conducir, la velocidad de subida de la intensidad de corriente (di/dt) puede alcanzar valores de 100 A/usg en circuitos resistivos o capacitivos. Esta subida tan rápida de corriente induce tensiones en los circuitos próximos y puede causar variaciones en la forma de onda de la fuente de alimentación. Estas ondas repentinas pueden generar oscilaciones en las reactancias de los circuitos de distribución a frecuencias del orden de los megaciclos y, causar problemas de interferencias en radio frecuencias. Las interferencias de alta frecuencia de este tipo pueden transmitirse tanto por conducción como por radiación e ir acompañadas por ruido audible o armónico de la frecuencia de operación del circuito del tiristor. La solución más inmediata a los problemas de interferencia consiste en la limitación de la velocidad de subida de corriente a través del tiristor.

La utilización de inductancias de amortiguamiento en serie con la fuente de alimentación ó con la carga, según el circuito, es una primera solución al problema. En el proceso de rectificación, inversión o ambas en un

sistema conversor a tiristores, las armónicas se producen tanto en el extremo de AC como en el de DC del conversor.

Las armónicas en el extremo de DC de un rectificador son del orden par y su magnitud se afecta por la naturaleza de la carga. Las armónicas presentes en un sistema conversor originan también las siguientes desventajas:

- Las corrientes de las armónicas llevan hacia un calentamiento excesivo en los motores conectados con el sistema de tiristores, esto reducirá la capacidad de producción de carga del motor.
- Si los circuitos de regulación y de control no se protegen en forma apropiada, las armónicas que provienen del extremo de potencia puede afectar su operación y puede resultar con un funcionamiento indeseado para el sistema.
- Las armónicas causan pérdidas en el sistema de AC y algunas veces producen resonancias dentro del sistema. Bajo tales condiciones de resonancia, se pueden ver afectados tanto la medición como la instrumentación debido a la distorsión.
- En cargas críticas, la pulsación del par motor producida por la corriente de las armónicas, pueden perjudicar el proceso, porque como se sabe el par depende directamente de la corriente de armadura.
- Las armónicas reducen en forma apreciable el factor de potencia de una planta convertora, sí la componente de la onda fundamental es sustancialmente menor que la unidad.
- EFECTO SOBRE LAS PERDIDAS POR EFECTO JOULE.- Dado que el par es producido por la corriente media, y el calentamiento por la corriente eficaz, puede deducirse que las pérdidas por efecto Joule vendrán incrementadas por el uso de corriente rectificada en una canti-

dad igual a $(I_e/I_m)^2$, o sea, en una cantidad igual al cuadrado del valor del factor de forma. Este incremento puede ser considerable; por ejemplo, según se observa en la tabla N°6-2 el factor de forma para un rectificador sin filtrado de onda completa es 1.111, este valor incrementará las pérdidas por efecto Joule (Ri^2) según un factor dado por $(1.111)^2 = 1.23$. Para un rectificador de semionda el factor de forma es 1.571 y el incremento en las pérdidas vendrá dado por el factor $(1.571)^2$ ó su equivalente 2.47. Con rectificadores regulables, el incremento en estas pérdidas pueden ser aún mayor, según puede apreciarse en la tabla. Un filtrado adecuado puede reducir, pero no eliminar, estas pérdidas extras, las cuales puede ser considerables.

TABLA N° 6-2

CORRIENTES Y FACTORES DE FORMA DE RECTIFICADORES REGULABLES MONOFASICOS.

Angulo de disparo	ONDA COMPLETA			SEMIONDA		
	$I_{med.}$	$I_{ef.}$	factor de forma	$I_{med.}$	$I_{ef.}$	factor de forma
0	0.637	0.707	1.111	0.318	0.500	1.571
30	0.594	0.697	1.173	0.298	0.493	1.659
60	0.478	0.634	1.328	0.239	0.449	1.879
90	0.318	0.500	1.571	0.159	0.359	2.222
120	0.159	0.313	1.964	0.080	0.221	2.778
150	0.043	0.120	2.815	0.021	0.085	3.982

Nota: Las corrientes están expresadas como fracción del valor máximo.

- EFECTO SOBRE LA REFRIGERACION DEL TIRISTOR.- Para que un tiristor funcione con plena garantía de no producirse fallos es fundamental que la temperatura de la tableta de Silicio no sobrepase los límites máximos especificados, ya que se pueden producir los siguientes problemas:
 - Aumento de las corrientes de bloqueo, que pueden dar lugar al embalamiento térmico.
Pérdida de la estabilidad superficial con el consiguiente empeoramiento de las posibilidades de bloqueo de tensión.
 - Fusión de las aleaciones empleadas en la soldadura de la tableta de Silicio.
 - Fatiga térmica, si es que el tiristor no está especialmente diseñado para evitarla.
 - Variación de las características de disparo.
 - Aumento del tiempo de recuperación.
 - Reducción del factor de seguridad a las sobrecorrientes.

Estas son algunas de las razones que imponen la necesidad, de tener la refrigeración adecuada en cada caso para poder disipar las pérdidas de potencia del interior del tiristor. Estas pérdidas que están generadas por las corrientes de bloqueo, la caída de tensión durante la conducción, la señal de disparo y la disipación producida durante los tiempos de encendido y apagado, se miden generalmente en vatios y son la causa de la elevación de la temperatura de la unión en las tabletas de Silicio en función de cómo fluya el calor hacia el exterior.

Para disipar este calor con una subida mínima de la temperatura de la unión, se emplean distintos diseños en el encapsulado del tiristor, así como en los cuerpos de refrigeración.

- EFECTO SOBRE LOS DEVANADOS AUXILIARES.- Es necesario e importante anular la reacción del inducido y conseguir una buena línea neutra. Para ello es necesario que los núcleos de los devanados auxiliares sean contruidos para trabajar en régimen de impulsos.
- COSTOS DE LOS CIRCUITOS RECTIFICADORES.- El circuito-rectificador más conveniente se selecciona de acuerdo con las necesidades propias de la aplicación que se le pretende dar y de su mayor economía de costos. El precio de diodos y tiristores aumenta con su tensión- e intensidad nominales, por lo que para obtener la me jor solución debe estudiarse el empleo de pocos ele mentos muy costosos ó un mayor número de elementos- más económicos.
- INCOMPETENCIA EN EL MANEJO CON ESTOS EQUIPOS.- El te- mor de los usuarios de las máquinas es que, en caso- de averías, no se disponga de personal especializado. Naturalmente este inconveniente puede subsanarse:
 - a.- Con la preparación de técnicos especialistas en- el campo, donde actualmente ya se ve la preocupa- ción para preparar personal idóneo en la materia, especialmente en electrónica de potencia.
 - b.- Mediante la disposición constructiva de módulos; que en el caso de perturbación del servicio y una vez localizado el defecto, bastará casi siempre-- con sustituir el módulo averiado, por otro módulo de repuesto de igual características al anterior.
- OTROS EFECTOS.- Las pérdidas extras por efecto Joule- producen como ya lo dijimos un calentamiento adicio- nal. Las pulsaciones en el flujo inductor dan lugar a unas pérdidas adicionales por corrientes parásitas en el hierro. Las corrientes fluctuantes pueden originar- en los cojinetes que, aún cuando débiles en magnitud pequeños esfuerzos adicionales que se manifiestan en perjuicio para los mismos.

La onda de tensión de salida de los circuitos rectificadores contienen componentes alternas así como la componente DC. La componente AC daría un aumento de la corriente alterna en el motor, cuya magnitud depende principalmente de la inductancia de los bobinados. El rizado de corriente debería también producir pérdidas adicionales en el circuito magnético del motor y influir en otros aspectos de la performance del motor que como ya lo dijimos en la conmutación. Los motores diseñados para la operación con convertidores, deberían por consiguiente tener incrementado la inductancia de armadura para reducir la corriente de rizado.

Otros problemas de diseño es el efecto de las corrientes de eddy, impidiendo los rápidos cambios en el flujo principal, los cuales son necesarios para algunos modos de control. Cualquier motor diseñado para una respuesta rápida en el sistema de control debería tener sus circuitos magnéticos completamente contruidos de laminación.

VI.4.- Comparación Final.

Después de revisar brevemente y de manera general, las dos formas actuales de control de velocidad por medio -- electrónico, tanto para los motores DC como para los AC donde se señala las ventajas y desventajas que ambos sistemas presentan, estamos en condiciones de comparar el sistema que tiene objeto el siguiente estudio con los -- sistemas de regulación electrónico.

En primer lugar, cabe señalar que los motores DC son máquinas que por excelencia, se caracterizan por su perfecta regulación de velocidad a comparación de los motores AC; adicionalmente a esta ventaja podemos agregar la sencillez de instalación, protección y la comprensión de su principio de funcionamiento, así como también la manera de conseguir el gobierno de sus parámetros tales como velocidad y torque, siendo este último un parámetro muy importante en muchas instalaciones.

Por otro lado, como sabemos, el factor económico juega en la mayoría de los casos un papel preponderante para la decisión de una alternativa técnica y como ya es - de nuestro conocimiento el costo de las máquinas DC respecto a las AC es superior comparando lógicamente máquinas de igual potencia; esta diferencia es función de su complejidad en cuanto a su diseño y construcción y si sumamos los costos de mantenimiento que también supera a los de alterna, llegamos a una primera conclusión, que las máquinas DC respecto al costo inicial de inversión y mantenimiento son superiores a las máquinas AC; es por ello que en muchos países como en el nuestro no existen fabricas de motores DC, porque en la actualidad la mayoría de proyectistas están al margen de su utilización y, en aquellas instalaciones donde se requiera de máquinas DC - no queda más que importarla lo que resulta aún más el encarecimiento de la máquina.

Sin embargo los motores AC por ser más económicos desde el punto de vista de su costo inicial y su manteni --

miento, son los más difundidos en su empleo para resolver problemas donde se requiere la transformación de energía eléctrica en mecánica, pero el inconveniente al problema de la regulación de velocidad mediante el uso de motores AC no solamente es su única desventaja, ya que se suma también a ello el precio y complicación del convertidor electrónico por ser más elevado que para un regulador de motor DC. Por lo tanto como una segunda conclusión podemos decir, que aunque el motor DC tiene mayor precio que el de AC, el conjunto convertidor - motor es más caro en el caso de corriente alterna. La reducción del precio relativo de los semiconductores respecto al cobre electrolítico y la chapa magnética, así como la evolución de los circuitos convertidores hace que esta diferencia de precio se vaya reduciendo paulatinamente - pero de todas maneras la alternativa de usar motores DC ó AC en cuanto a su costo es muy inferior a la alternativa de usar, una cadena de motores en AC, DC y generadores DC como es el caso del sistema Ward-Leonard con amplidina; sin embargo desde el punto de vista técnico, se ha comprobado que la respuesta al problema de la regulación de velocidad por tratarse de máquinas DC y el efecto de la retroalimentación, es una muy buena alternativa de solución para aquellos sistemas donde el factor técnico es más preponderante frente al factor económico, así

por ejemplo para el gobierno de motores de gran potencia donde el costo de la amplidina es insignificante frente al motor a regular, y lo que tal vez algunos considerarán - como lo más importante, con el sistema Ward-Leonard se obtiene un rango de velocidad no superable por cualquier sistema electrónico, con márgenes de regulación muy finos. Además con el sistema Ward-Leonard nos olvidamos de --- otros problemas colaterales que conllevan con el uso de la electrónica, tales como el efecto tan perjudicial de las armónicas, el bajo factor de potencia para la mayoría de los casos de regulación en motores AC, que si lo en

focamos con un criterio económico, ingresamos al campo de lo que para algunos ingenieros llaman " AHORRO DE ENERGIA ", de tal forma que se presentan dos alternativas primero, el de instalar un sistema de compensación a la red a través de condensadores estáticos ó rotativos, y segundo, limitarnos a pagar altos consumos de energía reactiva producto del bajo factor de potencia; finalmente existen otros problemas de menor envergadura que ya se han detallado en la parte de ventajas y-desventajas de los tiristores.

CONCLUSIONES

- 1.- Como ya se había indicado en la comparación final en tre la alternativa que tiene objeto el presente estu dio, versus lo que actualmente esta muy difundido y crece aceleradamente, nos referimos a los convertidores Electrónicos ya sea para motores DC ó AC.

Se concluyó que desde el punto de vista económico, especialmente cuando la magnitud de la potencia del sistema no es relevante, lo que quiere decir aproximadamente menor a 60 hp, no justificaba el uso del sistema por la cantidad de máquinas adicionales al motor que se necesitan, tres sin contar con la máquina asincrona de la amplidina que generalmente viene mon tada en el mismo eje, ya que el costo de dichas má quinas adicionales respecto al costo del motor es re presentativo, más aún sabiendo que las máquinas DC tienen mayor costo que las de AC, salvo si el crí te - rrio técnico pesa más sobre el económico; sin embargo para un sistema de gran potencia, donde el costo de la Amplidina no es significativo frente al del motor DC a controlar, lógicamente bajo la premisa del uso del sistema Ward-Leonard en su configuración simple se puede decir que el sistema es muy favorable, por lo tanto es recomendable su empleo.

Analizando desde el punto de vista técnico, confor - me a los resultados obtenidos se puede concluir que el sistema tiene muy buenas características de regu lación, pudiendo conseguir rangos de velocidad no su perables por cualquier sistema electrónico y con mar genes de regulación muy fino; lo que quiere decir fi nalmente que los atributos técnicos del sistema pueden satisfacer cualquier problema de regu lación de - velocidad en los motores DC.

- 2.- Como conclusión final al análisis teórico-práctico - para el régimen estacionario, demostramos que la manera de regular la velocidad del motor a un valor requerido ó pre-establecido, se realiza mediante la corriente de excitación al campo de control N°1 de la Amplidina a través de la tensión aplicado a bornes, y como se observó ésta variación es directamente proporcional, lo que significa que para aumentar ó disminuir la velocidad del motor, tenemos que aumentar ó disminuir también la tensión en el campo de control- N°1 respectivamente, para cualquier condición de carga. Como algo adicional e importante cabe señalar -- también, que el efecto de regulación a través de la curva de proporcionalidad cae como consecuencia del incremento de la carga, lo que significa que para -- una misma corriente de excitación en la Amplidina, se consigue mayor velocidad a menor carga conectada en el eje.
- 3.- De acuerdo a los resultados experimentales, se observa que cuando el motor se acerca al funcionamiento - de su plena carga y aún superior a ella, empeora el efecto de regulación automática de velocidad, todo - ello es como consecuencia de los efectos de saturación, reacción de armadura y la no linealidad en esos límites, lo que no ocurre sin embargo en las condiciones inferiores de los 3/4 de carga. Efectuando algunos cálculos la plena carga para el motor DC de 2.0 KW a 1800 RPM corresponde a 10.5 N-m.
- 4.- Demostramos experimentalmente, que cuando la tensión en el campo de control N°1 en la Amplidina es cero, - la velocidad en el motor no es también cero, ver gráfico N°(4-7), tal como se demuestra en el análisis teórico, ello es debido a la existencia de la tensión- de remanencia que se presenta en la Amplidina, originando así una corriente de excitación al campo del ge

nerador y por lo tanto una tensión generada en bor - nes, que es suficiente para proporcionarle al motor una pequeña energía eléctrica capaz de mover al motor, sobre todo cuando se ha vencido el efecto de la inercia.

- 5.- Velocidades negativas obtenidas en el análisis teórico en régimen estacionario, no significa cambio del sentido de giro, simplemente quiere decir, que el motor esta estático, de modo tal que a mayor magnitud de esta cantidad, le corresponde mayor torque de carga aplicada al motor, así como también mayor tensión en bornes al campo de control N°1 en la Amplidina -- que hace que el motor se encuentre sin movimiento.
- 6.- Respecto al régimen transitorio es evidente el proceso que sigue el sistema para mantener la velocidad de referencia, ocurriendo un transitorio Subamortiguado, que para nuestro caso en especial tiene un efecto preponderante los parámetros eléctricos del -- grupo Ward-Leonard, y por su puesto la inercia del motor más su carga, para la respuesta transitoria;-- sin embargo el presente estudio es general, para cualquier máquina, ya que es necesario solamente reemplazar los valores experimentales de sus constantes y parámetros para luego obtener la respuesta según como varíe estos valores.
- 7.- Es común generalmente, considerar como temperatura de funcionamiento de un motor ó generador que trabaja con carga 75°C , lo cual es necesario que dichas máquinas deberán tener un trabajo permanente superior a los 30 min. aproximadamente; luego para nuestro caso en la parte experimental debido a que los ensayos se realizaron en forma intermitente, lo que quiere decir sin un funcionamiento permanente y prolongado, es que se ha considerado como temperatura de funcionamiento solamente 50°C .

8.- Los motores DC forman un equipo eléctrico indiscutible en cualquier aplicación. Su utilización resulta principalmente del hecho que la velocidad de los motores DC, pueden controlarse con facilidad en amplios rangos y regulación muy fina.

Antes que se desarrollen los tiristores, se usarón otros métodos para controlar la velocidad de estos motores, entre ellos fue el sistema Ward-Leonard, - más aún si se complementaba con la amplidina para un control automático; con la introducción del Tiristor ha cambiado el panorama y ahora los motores-DC de potencia razonable controlados por tiristores dominan el campo, pero de acuerdo a este estudio concluimos, que las características técnicas son tan buenas y tal vez superiores que cualquier sistema por medio netamente electrónico.

9.- Para manejar sistemas de regulación de velocidad es generalmente importante que el motor a maniobrar -- tenga una baja inercia, de modo que la velocidad -- del motor tenga una rápida respuesta de restitución cuando se generan cambios en el torque; para ello -- debería cumplirse:

El diámetro de la armadura tiene que ser el más pequeño posible, y su longitud podría ser incrementado lo suficientemente según lo permita las limitaciones mecánicas. Estas dos condiciones adicionales sobre limitaciones de diseño son impuestas por el proceso de conmutación, la máxima tensión entre segmentos en el conmutador no debería ser demasiado elevado (y si su tensión incrementara con el diámetro este se reducirá), y la tensión producida por la reactancia de la bobina de armadura también no debería de ser demasiado elevada (ya que este incrementa con la longitud de la armadura).

BIBLIOGRAFIA

- 1.- MEISSEL, Jerome, Principio de conversión de energía-electromecánica. Madrid, Mc Graw-Hill, 1969.
- 2.- C.V., Jones, The Unifield theory of electrical Machine. London, Butterworths, 1967.
- 3.- KOSOW, I.L., Máquinas eléctricas y transformadores.- España, editorial Reverté S.A., Barcelona, 1982. 726p.
- 4.- RAMIREZ V., José, Equipos electro-mecánicos industriales. España, ediciones CEAC S.A. 1985. 927p.
- 5.- ---- Pilas y acumuladores, Máquinas de corriente continua. España, ediciones CEAC S.A. 1973. 939p.
- 6.- FITZGERALD, A.E., Teoría y análisis de las máquinas eléctricas. España, editorial Hispano Europea, 1975. 587p.
- 7.- MOMPIN P., Jose (otros), Electrónica y Automática Industriales. España, Marcombo, 1976. 653p.
- 8.- AEG-TELEFUNKEN, Máquinas de corriente continua. España, editorial Paraninfo S.A. 1980.
- 9.- KOSTENKO, M.P.; PIOTROVSKI, L.M., Máquinas eléctricas I. Rusia, editorial Mir., Moscu.
- 10.- GRAY, Alberto R., Máquinas eléctricas. tercera edic. Argentina, editorial Universitaria de Buenos Aires, 1977. 403p.
- 11.- THALER, J. George y WILCOX L. Milton, Máquinas eléctricas. USA. Limusa, 1966. 675p.
- 12.- VEINOTT, Cyril G. Motores eléctricos de potencia - fraccionaria y subfraccionaria. España, editorial Marcombo S.A. 1978. 532p.
- 13.- DONALD V. Richardson, Rotating electric machinery and transformer technology. USA, by Reston-Publishing company Inc. 1982. 623p.
- 14.- C. KUO, Benjamin, Sistemas automáticos de control. España, Compañía editora continental S.A.-- CECSA, 1973. 592p.

- 15.- OGATA, Katsuhiko, Ingeniería de control moderna. México, Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. 1970. 902p.
- 16.- DORF, Richard C. Sistemas automáticos de control. - California USA, Fondo educativo Iberoamericano S.A. 1978. 404p.
- 17.- M.KARCZ, Andres, Fundamentos de metrología eléctrica. (tomo II), España, ediciones técnicas - Marcombo S.A. 1976, 3v. 208p.
- 18.- SUGANDHI, Rajendra Kumar, y SUGANDHI Krishna Kumar Tiristores: Conceptos y aplicaciones. México D.F. Ed. Limusa S.A., 1985. 316p.