


TABLERO DE MEDICIONES DE POTENCIA Y VELOCIDAD
PARA MAQUINAS MECANICAS

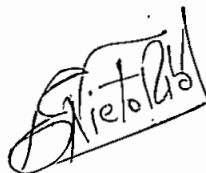
EPN Biblioteca 	
Ingeniería Eléctrica y Electrónica	
Num. Inventario:	S15
Valor:	\$
Fecha:	/ /
Clasificación:	621.381537 / A7678 Tesis

Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Electrónico en la especialización de Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional.

HERNAN ALBERTO AREVALO CUESTA

QUITO, DICIEMBRE DE 1982.

Certifico que el presente-
trabajo ha sido elaborado-
en su totalidad por el se-
ñor Alberto Arévalo Cuesta.



Ing. Edwin Nieto

DIRECTOR DE TESIS

DEDICATORIA

A Telmo y Alejandrina, mis padres

A Mónica, mi esposa

A Verónica, mi hija

A G R A D E . C I M I E N T O

Al Ing. Edwin Nieto, por el valioso tiempo que me dedicó para que con su experiencia y consejo logre culminar este trabajo.

Al Ing. Lenín Ubidia, Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica, por el gran apoyo prestado.

A todas las personas que generosamente han contribuído para la culminación del presente trabajo.

INDICE

	Pág.
INTRODUCCION	1
CAPITULO I: GENERALIDADES.	
1.1. Descripción general de la Tesis	4
1.2. Estudio de sistemas de control de velocidad aplicables al tablero	5
1.2.1. Rectificación Trifásica controlada de media onda	6
1.2.2. Rectificación Trifásica semicontrolada de onda completa	9
1.2.3. Rectificación Trifásica controlada de onda completa	12
1.3. Definición del sistema de control utilizado	16
1.3.1. Circuito de potencia	16
1.3.2. Configuración del sistema de control.	19
CAPITULO II: ESPECIFICACIONES DEL TABLERO DE PRUEBAS	
2.1. Especificaciones del tablero, elementos y motor	23
2.1.1. Especificaciones del tablero y elementos	23
2.1.2. Especificaciones del motor	23
2.1.2.1. Características del motor con voltaje de armadura constante para diferentes cargas	26
2.1.2.2. Características del motor a velocidad constante	29

	Pág.
2.2	Funcionamiento básico de los diferentes bloques del sistema 40
2.2.1.	Bloque N° 1.- Control de arranque y cambio de velocidad 40
2.2.2.	Bloques N° 2 y 4.- Comparadores de velocidad y corriente 41
2.2.3.	Bloques N° 3 y 5.- Rectificador y filtros 42
2.2.4.	Bloque N° 6 .- Generador de pulsos de disparo 43
CAPITULO III: DISEÑO DEL TABLERO DE PRUEBAS.	
3.1.	Diseño de los circuitos 47
3.1.1.	Diseño del circuito de Potencia 47
3.1.1.1.	Diseño del circuito de protección del dV/dt 49
3.1.2.	Diseño del control de arranque y cambio de velocidad 53
3.1.3.	Diseño del circuito de disparos 57
3.1.4.	Diseño del circuito de rectificación y filtraje de la onda del tacómetro.. 71
3.1.5.	Diseño de los circuitos de comparación de velocidad y de corriente 76
3.1.6.	Diseño de la fuente de ± 15 V dc 83
3.1.7.	Diseño de los circuitos de protección y alarmas 85
3.1.7.1.	Diseño del control de sobre-velocidad 85
3.1.7.2.	Diseño del control de falla en la alimentación del campo 89

	Pág.
3.1.7.3. Diseño del control de falla de fuente electrónica	91
3.1.7.4. Diseño de protección de sobre carga - del motor	93
3.1.7.5. Diseño del circuito retardador	93
3.1.8. Diseño del circuito de mando	100
3.2. Rangos de funcionamiento de los circuitos y motor	103
3.3. Instrumentos de medida	105
3.4. Diagramas finales de los circuitos - del equipo	105
3.5. Lista total de elementos usados	111
 CAPITULO IV: PRUEBAS Y CALIBRACIONES.	
4.1. Pruebas y comparación de resultados .	116
4.1.1. Pruebas realizadas	126
4.1.2. Análisis de resultados	134
4.1.2.1. Determinación de potencias de entrada y salida	136
4.2. Calibración de escalas en medidores - acoplados	146
COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	150
APENDICE I: DESCRIPCION DE LAS ECUACIONES DE VOLTAJE MEDIO PARA RECTIFICACION TRIFASICA - CONTROLADA	154
APENDICE II: MANUAL DE USO DEL EQUIPO	164

	Pág.
REFERENCIAS	172
BIBLIOGRAFIA	173

INTRODUCCION

La elaboración de la presente Tesis, se debió a la necesidad que tiene la Facultad de Ingeniería Mecánica de un equipo que permita determinar la potencia a velocidad constante (controlada), más conveniente de motores que necesitan las máquinas que ellos desarrollan o diseñan. Para con ello seleccionar el motor idoneo para tal o cual aplicación.

Este equipo consta de: Un tablero o panel, el cual servirá para controlar la velocidad y poder determinar la potencia del motor que necesita la máquina que se esta probando. Un motor DC de prueba, de características conocidas con el cual se hará funcionar la máquina o máquinas por probarse.

El control de velocidad del motor se lo realiza por medio de rectificación trifásica de onda completamente controlada. Esta variación se obtiene controlando el ángulo eléctrico de disparo de los tiristores. Se utiliza además realimentaciones de velocidad y corriente, para que una vez fijada la velocidad de trabajo ésta permanezca constante.

El equipo está implementado con las protecciones y facilidades necesarias para la buena utilización

de los estudiantes en sus pruebas y aplicaciones. Para esto se elaboró como complemento un "Manual de uso del equipo", con todas las instrucciones y recomendaciones que vienen al caso.

C A P I T U L O P R I M E R O

GENERALIDADES

CAPITULO I

1.1- DESCRIPCION GENERAL DE LA TESIS

El punto de vista principal de este trabajo es el de diseñar e implementar un equipo totalmente práctico y útil para el uso de estudiantes y cualquier persona en general, que desee determinar la potencia y velocidad óptimas de cualquier tipo de máquina, y no restringirse exclusivamente al análisis teórico que muchas veces no es aplicable en la práctica.

El motor de prueba se conectará a la máquina por probarse por medio de poleas y bandas; luego de escoger cualquier velocidad para la medición, se podrá, haciendo uso de los medidores acoplados, determinar la potencia que necesita la máquina para su funcionamiento. Así se puede obtener las potencias para distintas velocidades del motor y de todas estas medidas se podrá escoger la potencia y velocidad más convenientes del motor que necesita la máquina.

El control de velocidad se lo hará variando el voltaje de armadura del motor y manteniendo siempre constante el voltaje de campo de éste.

La variación del voltaje de armadura se lo hará por medio de rectificación trifásica de onda completa

semicontrolada, variando el ángulo de disparo de los SCR's, el cual será función del valor nominal de velocidad escogido, y de las realimentaciones.

Para que el valor real de velocidad del motor se mantenga constante e igual al valor nominal para diferentes cargas, se implementará realimentaciones de velocidad y de corriente.

El equipo tendrá además protecciones y seguridades para casos de sobre-velocidad, sobre-carga, sobre-corriente, falla en la alimentación del campo, disturbio en la fuente del control electrónico.

Al producirse cualquiera de estas fallas, el sistema se desconectará automáticamente.

1.2.- ESTUDIO DE SISTEMAS DE CONTROL DE VELOCIDAD APLICABLES AL TABLERO.

Para alimentar motores DC de 5 Hp. o más se hace uso de sistemas de rectificación trifásica. Estos circuitos dan mayor número de pulsaciones por ciclo de la frecuencia de línea, asegurando así el paso de corriente durante una mayor fracción de tiempo, reduciendo el rizado, el factor de forma y por lo tanto el calentamiento del motor.

En este subcapítulo se hará un breve estudio de los tipos de configuraciones trifásicas más comunes que podrían ser utilizados en el sistema. Para luego escoger entre estos el más conveniente.

Se estudiará específicamente tres configuraciones, las mismas que son:

- Rectificación Trifásica controlada de media onda.
- Rectificación Trifásica Semicontrolada de onda completa.
- Rectificación Trifásica controlada de onda completa.

Todas con carga R - L - E (Resistencia, Inductancia, Fuerza contra electromotriz) que es el circuito equivalente del motor DC.

1.2.1.- Rectificación Trifásica controlada de media onda.

En la figura 1.1 se presenta el circuito para obtener rectificación controlada de media onda. Consta de tres SCR's conectados de tal forma que cuando se dispara el SCR₁ queda aplicada a los bornes del motor una parte de la onda de voltaje V_{an} ; cuando se dispara el SCR₂ queda aplicada una parte-

de la onda V_{bn} ; lo mismo con el SCR_3 , se tiene V_{cn} , como indica la figura 1.2.

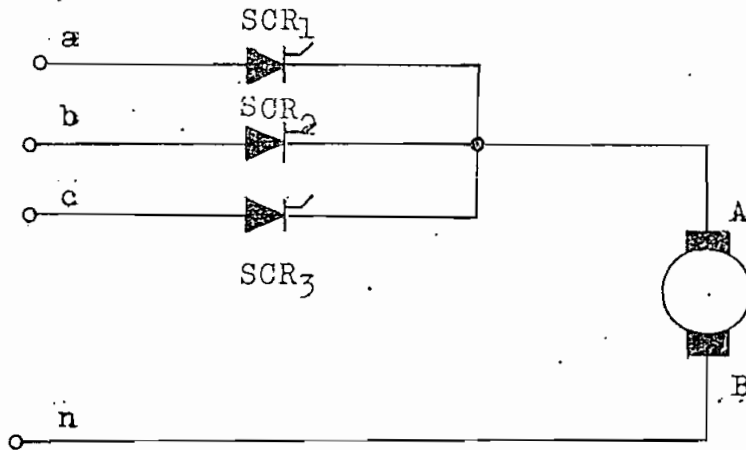


Figura 1.1: Circuito para obtener rectificación controlada de media onda.

No es posible que dos SCR's conduzcan simultáneamente, porque el que está conectado en un momento dado a la fase de mayor voltaje instantáneo crea una polarización inversa en los otros dos SCR's quedando de esta manera en el estado de no conducción (bloqueo inverso).

Por las formas de onda de voltaje que se obtiene en la carga, a esta rectificación también se la conoce como rectificación controlada de tres pulsos.

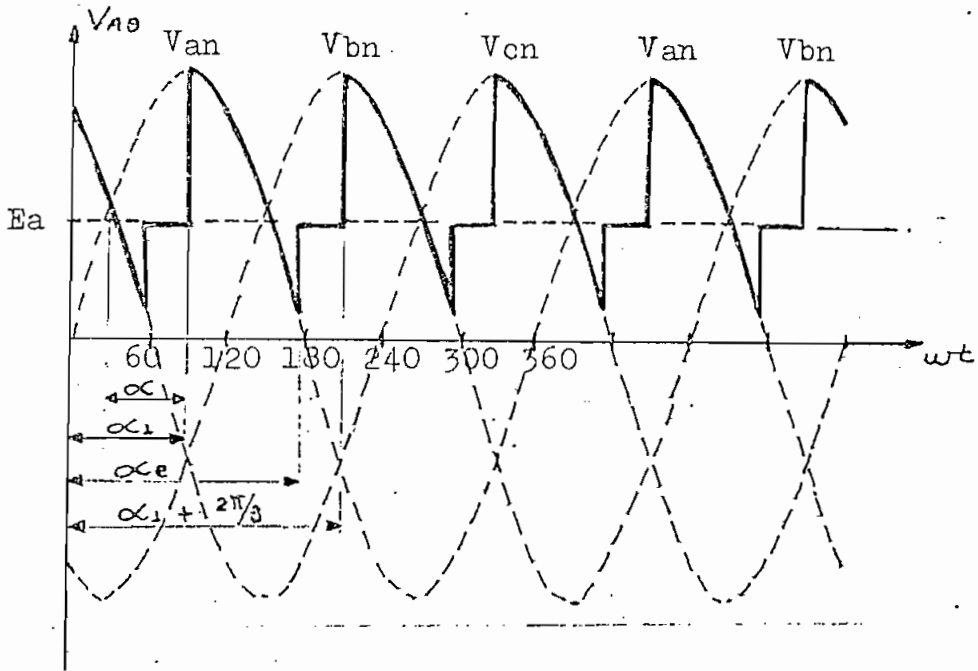


Figura 1.2: Formas de onda para rectificación trifásica controlada de media onda.

El voltaje medio aplicado a la carga, en función del ángulo de disparo, matemáticamente se expresa en la ecuación 1.1.

$$V_o = \frac{3}{2\pi} \left[\sqrt{2} V (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_e) + E_a \left(\alpha_1 + \frac{2\pi}{3} - \alpha_e \right) \right] \quad 1.1$$

En donde: α_1 = ángulo de disparo

α_e = ángulo de extinción

E_a = Fuerza contra electromotriz.

Para mayor información sobre esta ecuación - ver Apéndice I.

1.2.2.- Rectificación Trifásica semicontrolada de onda completa.

Este circuito que está representado en la figura 1.3 es el más comúnmente usado, pues usa sólo tres SCR's y el ángulo de disparo tiene un rango teórico de control de 180° eléctricos, lográndose una variación del voltaje medio de salida desde 0 al 100%. Con ángulos de retardo menores de 60° eléctricos, se puede obtener seis pulsos de voltaje y corriente.

El diodo D_7 (llamado de paso libre (1)), además de proveer un camino para que la energía almacenada en la inductancia se descargue, se lo utiliza cuando se requiere incrementar el ángulo de conducción en condiciones de baja velocidad y alto torque, sin él, la tensión en la armadura sería negativa y la corriente tendería a cero más rápidamente, provocando su discontinuidad.

Para obtener un control completo sobre el voltaje medio sobre la carga se usa tres SCR's y tres diodos, dispuestos de tal forma, que el voltaje aplicado en la armadura es controlado por los ángulos de disparo de los SCR's 1 , 2 , 3.

Los diodos 4 , 5 y 6, solamente proveen un -

camino de retorno para la corriente al terminal de línea más negativo.

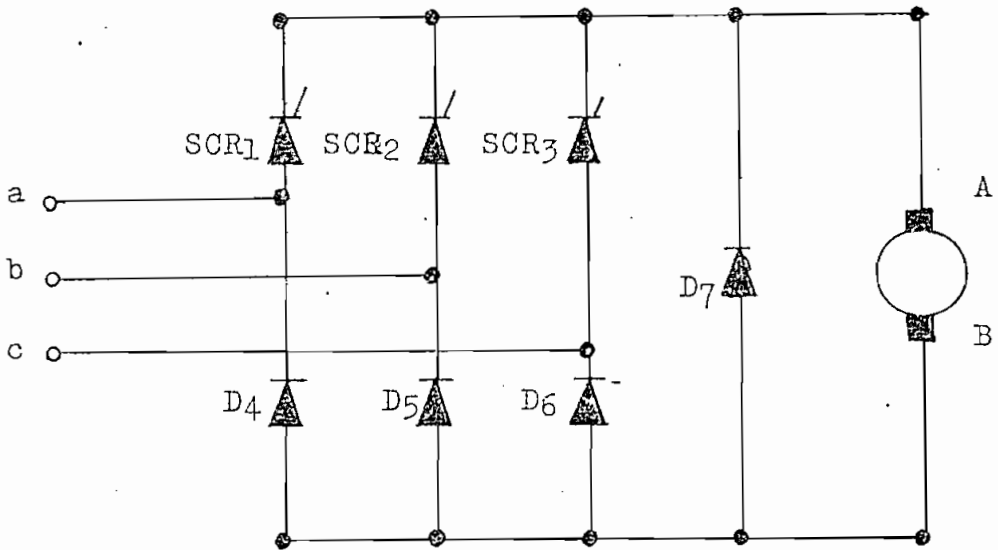


Figura 1.3: Circuito para obtener rectificación Trifásica semicontrolada de onda completa.

Dependiendo del ángulo de retardo, se tendrá dos tipos de configuración como indican las figuras 1.4 a y b.

- a) Para ángulos de retardo menores de 60° , el voltaje y la corriente presentes en la armadura constan de seis pulsos para un ciclo del voltaje de línea.
- b) Para ángulos de retardo mayores de 60° , las magnitudes presentes en la armadura constan de

tres pulsos y básicamente es el mismo caso de la rectificación controlada de media onda vista anteriormente.

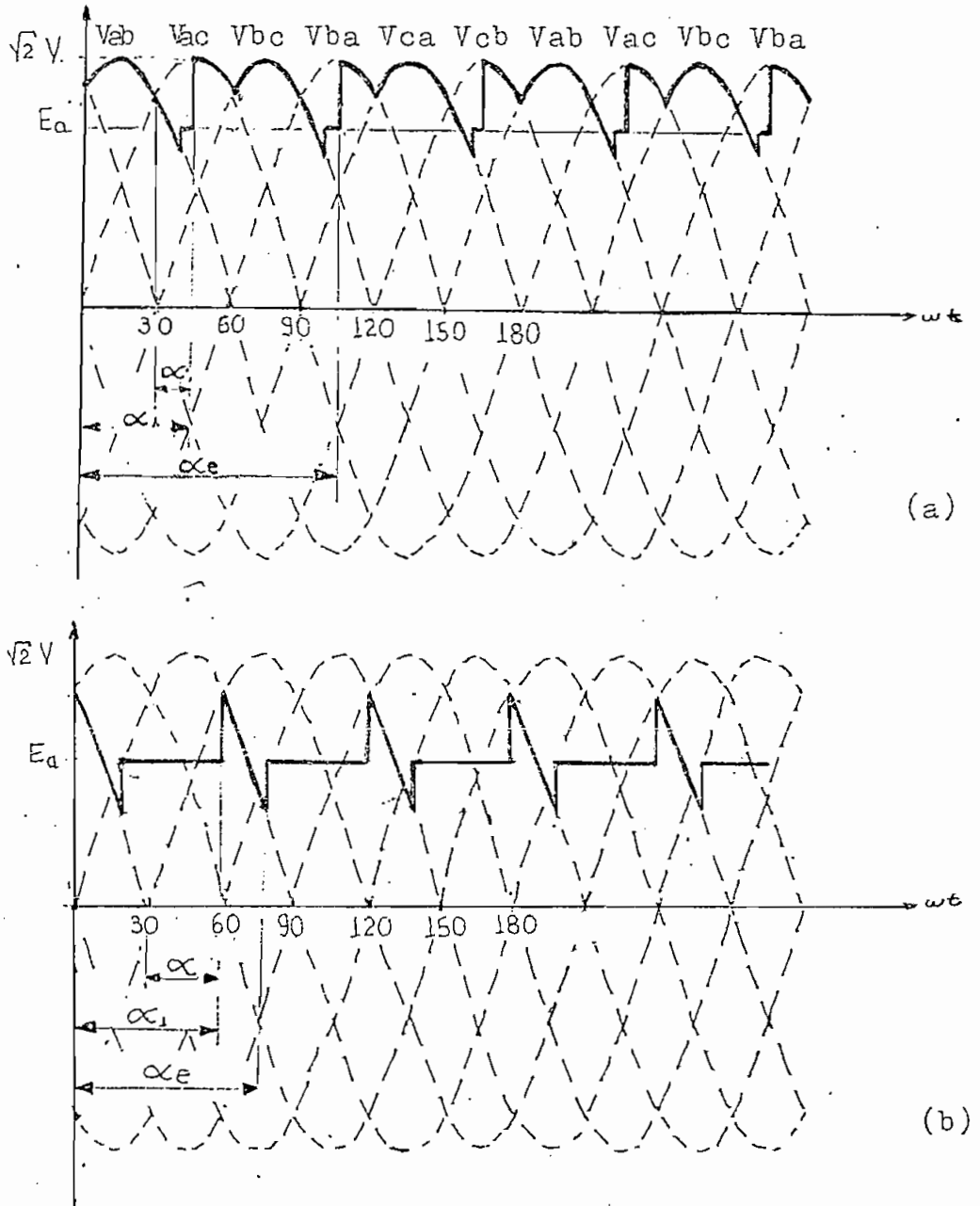


Figura 1.4: Formas de onda para rectificación trifásica de onda completa semicontrolada:

- a) Para ángulos de retardo menores que 60°
 b) Para ángulos de retardo mayores que 60°

El voltaje medio aplicado a la carga, en función del ángulo de disparo, matemáticamente se expresa en la ecuación 1.2.

$$V_o = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} V \left[\cos\alpha_1 - \cos\left(\alpha_e - \frac{\pi}{3}\right) + 1 \right] + \frac{3}{2\pi} E_a \left(\alpha_1 - \alpha_e + \frac{2\pi}{3} \right) \quad 1.2$$

Para mayor información sobre esta ecuación - ver Apéndice I.

1.2.3.- Rectificación Trifásica controlada de onda completa.

Este tipo de configuración es muy similar a la rectificación semicontrolada, presentando como variación, la misma que es el cambio de los diodos 4, 5 y 6 por SCR's como indica la figura 1.5.

El funcionamiento es también parecido al caso anterior, con la ventaja de que por medio de los SCR's 4, 5 y 6 se puede controlar el camino de retorno de la corriente.

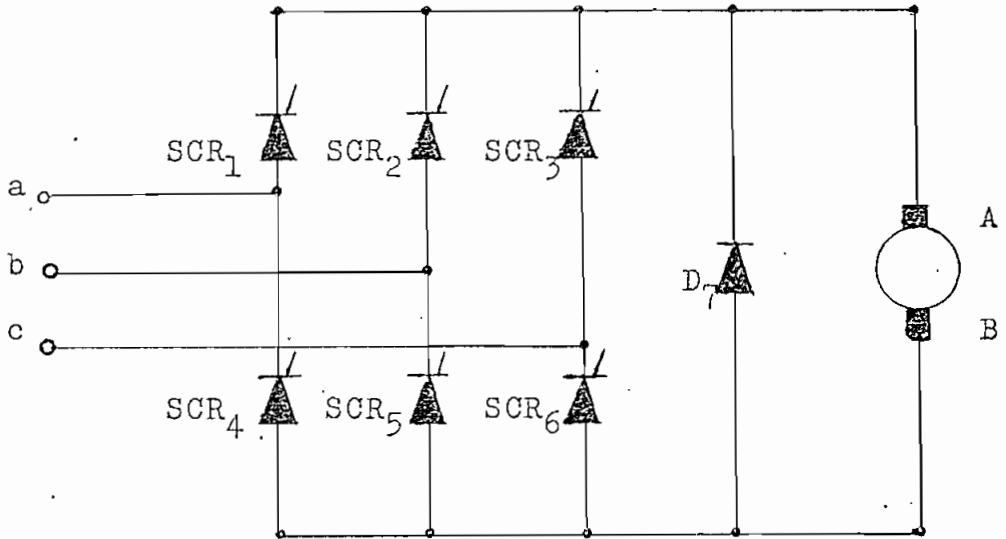


Figura 1.5: Circuito para obtener Rectificación Tri-fásica controlada de onda completa.

La figura 1.6 representa las formas de onda de este tipo de rectificación, como se puede ver siempre se tendrán seis pulsos para cualquier ángulo de disparo, teniéndose así una variación del voltaje en la armadura con mejores características que las del caso anterior.

El voltaje medio aplicado a la carga, en función del ángulo de retardo, matemáticamente se expresa en la ecuación 1.3.

$$V_o = \frac{3}{\pi} \left[\sqrt{2} V (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_e) + E_a \left(\alpha_1 + \frac{\pi}{3} - \alpha_e \right) \right] \quad 1.3$$

Para mayor información sobre esta ecuación -
ver Apéndice I.

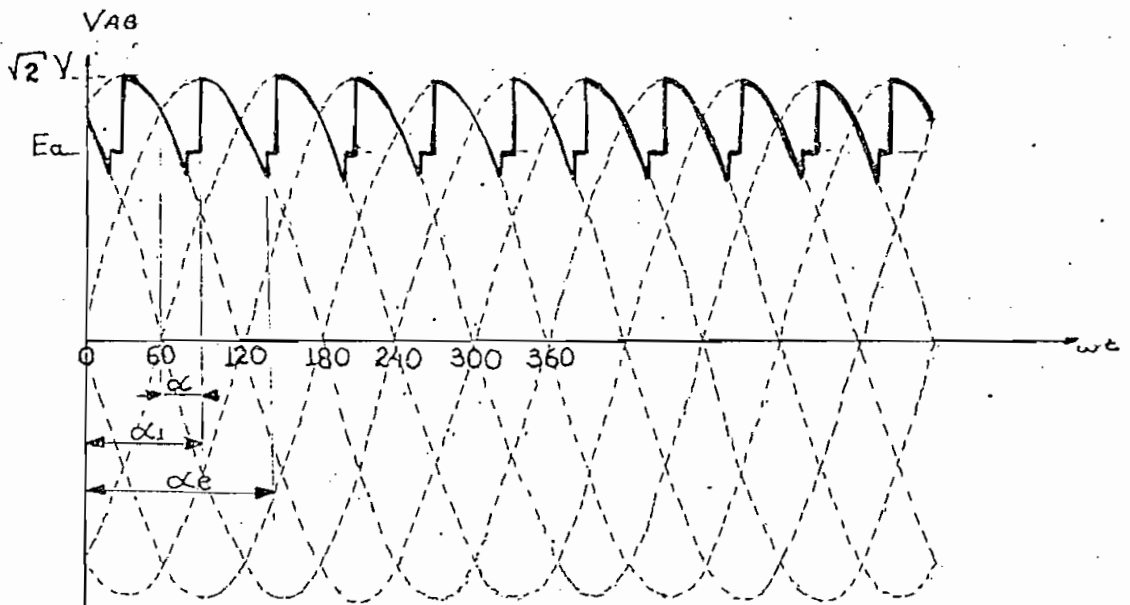


Figura 1.6: Formas de onda para rectificación trifásica controlada de onda completa.

De los tres tipos de configuraciones analizadas anteriormente, se puede observar que los dos tipos de rectificación de onda completa superan el de rectificación de media onda por algunas razones como:

- Estos circuitos dan mayor número de pulsaciones por ciclo de la frecuencia de línea.
- El valor medio de la corriente de línea es cero.
- Aumentan el rango de variaciones del voltaje de salida.

Por lo cual para nuestro caso el circuito de rectificación de media onda es el menos aconsejable.

Los otros dos circuitos, rectificación de onda completa semicontrolada y controlada, funcionan en forma muy similar, siendo este último el de mejores características debido justamente a que permite una mejor variación del voltaje medio con el ángulo de disparo.

El rectificador semicontrolado usa solo tres SCR's y tres diodos, por lo cual se necesitan tres circuitos de disparos iguales y sencillos, en cambio el rectificador controlado usa seis SCR's y los circuitos de disparos son más complejos resultando este último más costoso que el primero y debido a las limitaciones económicas de este prototipo será más conveniente usar el rectificador semicontrolado.

1.3.- DEFINICION DEL SISTEMA DE CONTROL UTILIZADO.

1.3.1.- Circuito de Potencia.

Debido a que el motor tiene una potencia nominal de 5 Hp. lo más aconsejable es que reciba energía de una red trifásica; el circuito, como ya se dijo anteriormente, será el de rectificación trifásica semicontrolada de onda completa, del mismo que se hará a continuación un estudio más detallado.

La figura 1.7 representa la forma de conexión para obtener rectificación trifásica semicontrolada de onda completa.

Para poder comprender el funcionamiento del rectificador, es necesario analizar con las formas de onda de voltaje de las fases, representado en la figura 1.8.

Para cada uno de los SCR's el disparo debe estar sincronizado con la fase a la que está conectado su ánodo, es así que el SCR₁ está sincronizado con la fase R, el SCR₂ con la S y el SCR₃ con la T.

Si los pulsos de disparo se aplican a la compuerta del SCR₁, éste conducirá únicamente cuando -

el voltaje instantáneo de la fase R sea el mayor de todos, así mismo se tendrá con el SCR_2 y SCR_3 y las fases S y T respectivamente.

Por lo que se tiene que cada SCR podrá conducir teóricamente como máximo 120° eléctricos.

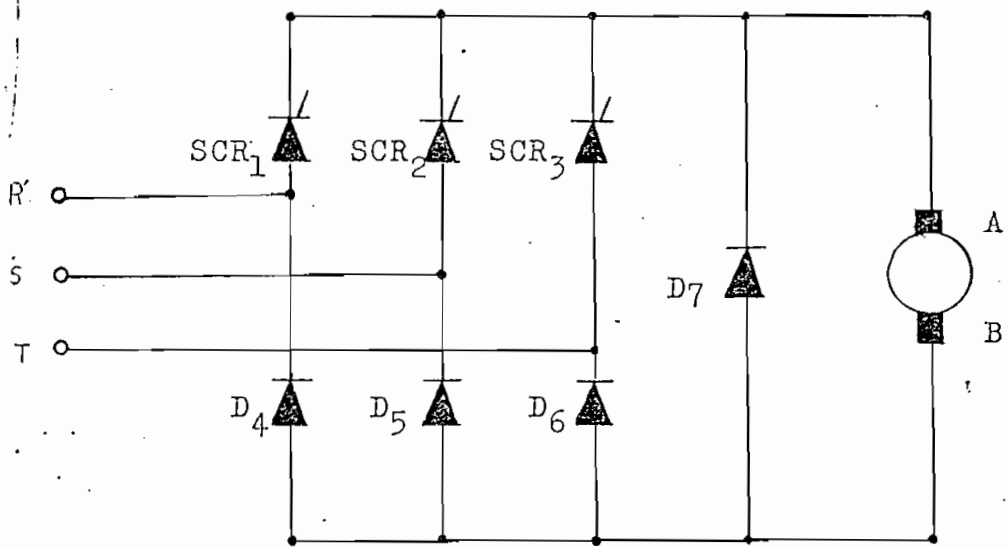


Figura 1.7: Circuito para obtener rectificación trifásica semicontrolada de onda completa.

El circuito funciona de la siguiente manera:

Suponiendo que el voltaje de línea TS es el más alto, la corriente fluirá desde T, y como el SCR_3 si puede conducir, seguirá por éste, pasará a través de la armadura y regresará a S por el diodo D_5 .

Quando el voltaje de línea siguiente, en este caso el RS, es el más alto, el SCR₃ deja de conducir en el momento que entra a conducir el SCR₁, circulando la corriente desde R hasta S, a través del SCR₁, la armadura y el diodo D₅ con el siguiente voltaje de línea el RT, se tiene que conduce el SCR₁ y el diodo D₆ ; para ST, conducen el SCR₂ y D₆ así sucesivamente con todas las fases.

Como se puede observar en la figura 1.8 los diodos tendrán siempre una conducción de 120°.

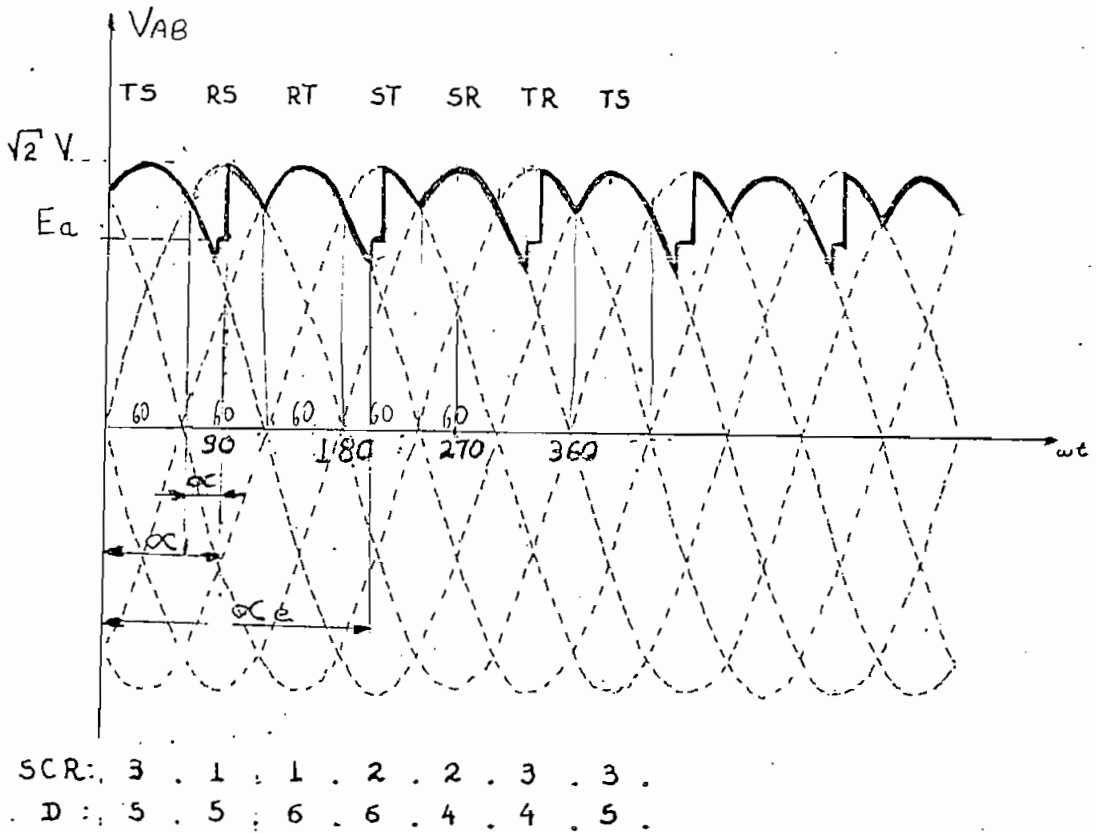


Figura 1.8: Formas de onda para rectificación trifásica semicontrolada de onda completa.

En la figura 1.8 está representado la forma de onda que se tendría en la armadura para un ángulo de retardo de 30° .

1.3.2.- Configuración del Sistema de control.

El diagrama de bloques del circuito de control utilizado se muestra en la figura 1.9; es un control de doble lazo de realimentación, esto es realimentación de velocidad y realimentación de corriente (torque).

Dependiendo del valor del voltaje de referencia, V_r , que se escoja, se tendrá una cierta velocidad que no variará aunque existan variaciones de carga en el motor.

A continuación se pasa a describir el diagrama de bloques.

Después de seleccionar el valor del voltaje de referencia, V_r , éste pasa a través del integrador (1), cuya función es obtener el mismo voltaje de entrada en su salida, pero en forma lenta, es decir, va creciendo o decreciendo, desde un valor inicial en el que se encuentra, hasta un valor final que es el que se ha puesto a la entrada del mis-

mo. Esta señal se compara con el voltaje V_w , que es función directa de la velocidad real del motor (realimentación de velocidad); de estas dos señales (V_r , V_w), se obtiene una señal V_{cl} ; esta nueva señal se compara con el voltaje V_i que constituye la realimentación de corriente de armadura del motor - al comparar las señales V_{cl} y V_i se obtiene la señal V_x , que entra al circuito de disparos; éste circuito, entrega pulsos de disparo, cuya iniciación es función del valor de V_x , por lo que el valor medio de voltaje necesario para mantener siempre la velocidad constante del motor, dependería de V_x .

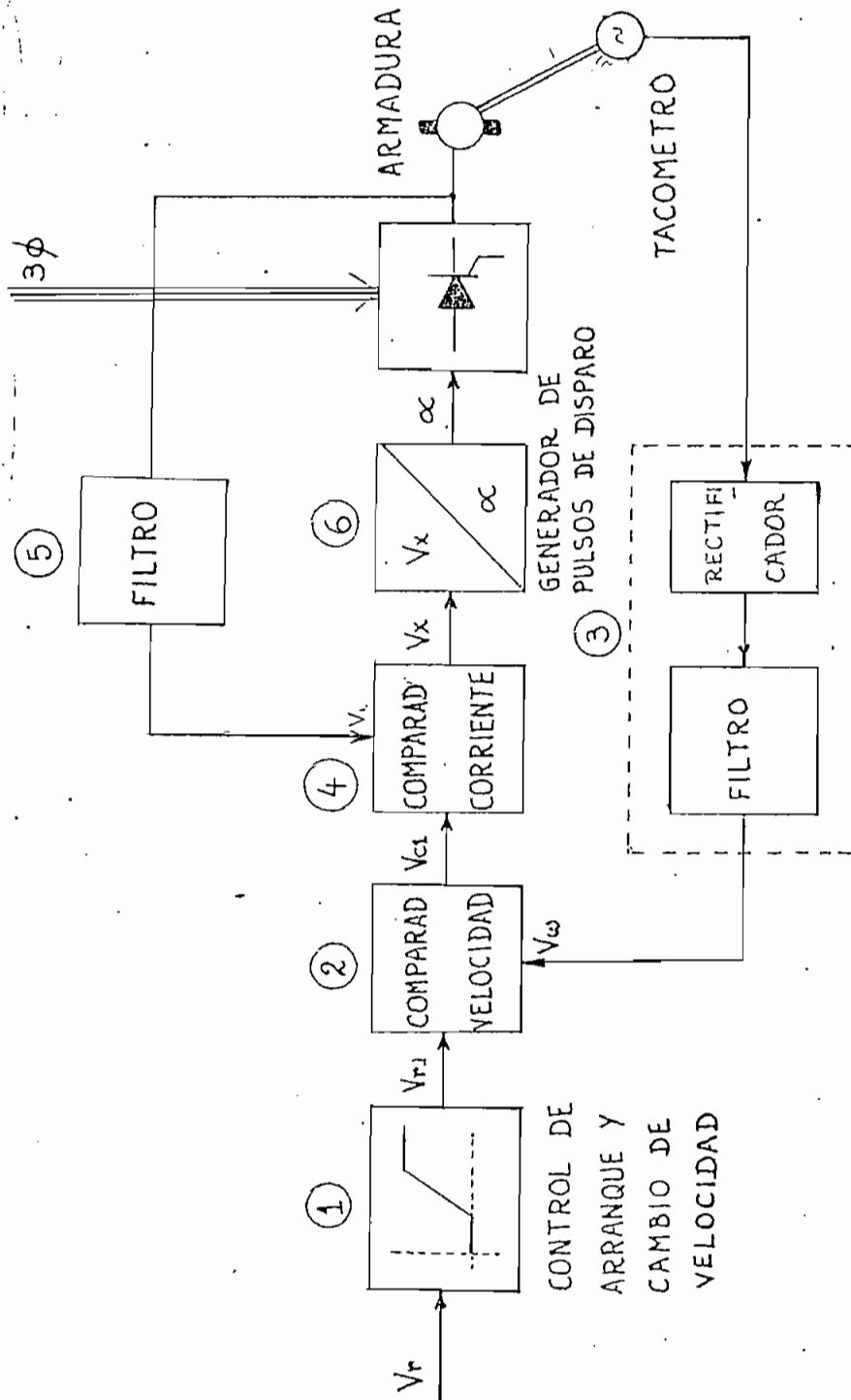


Figura 1.9: Diagrama de bloques del control de velocidad.

C A P I T U L O S E G U N D O

ESPECIFICACIONES DEL TABLERO DE PRUEBAS

CAPITULO II

2.1.- ESPECIFICACIONES DEL TABLERO, ELEMENTOS Y MOTOR.

2.1.1.- Especificaciones del tablero y elementos.

El tablero estará constituido por:

- Un circuito impreso principal que será el núcleo electrónico que comandará a todos los otros elementos.
- El circuito de Potencia, constituido por los SCR's y diodos.
- El grupo de medidores, por medio de los cuales se determinará las características de funcionamiento del motor.
- El sistema de protecciones y alarmas, con los cuales se podrá detectar cualquier anomalía en el sistema.
- Los comandos de conexión y desconexión del equipo.

2.1.2.- Especificaciones del motor.

El motor que se utiliza es un motor de corriente continua de 5Hp de potencia, cuyos datos de

placa son:

Potencia:	5 Hp.
Velocidad:	1750 RPM
Voltaje:	230 Voltios
Intensidad:	20 Amperios
Tipo de campo:	SHUNT
Temp. de servicio máx:	40° C.

El motor tiene además un campo serie débil.

La nominación de los terminales de los campos y de la armadura viene dada de acuerdo a normas americanas, de la siguiente manera:

CAMPO SHUNT:	F_1 - F_2
CAMPO SERIE:	S_1 - S_2
ARMADURA:	A_1 - A_2

El devanado shunt del motor está conectado con excitación independiente. Como indica la figura-2.1.

Los valores de resistencia e impedancia que tienen el campo y la armadura del motor son los dados en el cuadro 2.1.

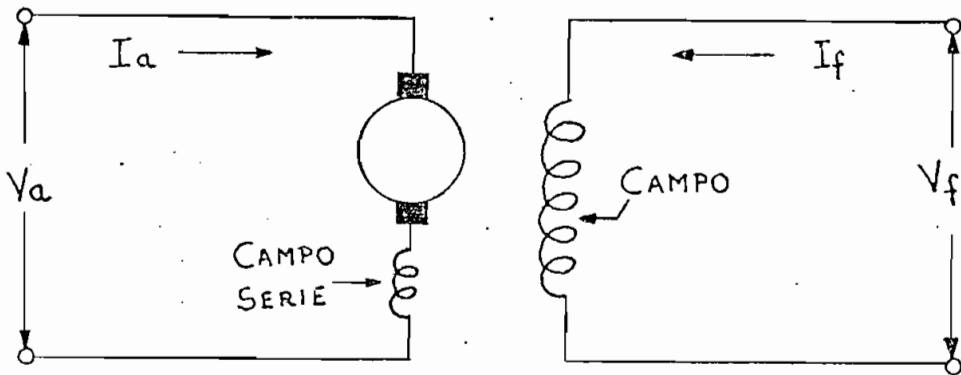


Figura 2.1: Tipo de conexión del motor.

	RESISTENCIA (Ohmios)	INDUCTANCIA (Henrios)
CAMPO SHUNT	432.00	51.31088
ARMADURA	0.8975	0.019494

Cuadro 2.1: Parámetros del motor.

Torque de fricción, $T_f = 0.493 \text{ N.m.}$

Constante de torque, $K_t = 1.094 \text{ N.m/amp.}$

Pérdidas rotacionales, $PR = 0,2218 \text{ Watts/RPM}$

2.1.2.1.- Características del motor con voltaje de armadura constante para diferentes cargas

Los datos presentados en los cuadros 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 indican las características de funcionamiento del motor para diferentes voltajes de armadura.

En los gráficos 2.1, 2.2 y 2.3, se tienen representadas las curvas de velocidad, corriente y potencia de salida del motor en función del torque, para los diferentes voltajes de armadura obtenidos de los cuadros anteriores.

VOLTAJE DE ARMADURA = 87.5 V.			
CAMPO 229 Voltios 0.44 Amp.			
TORQUE (Kgcm)	VELOCIDAD (RPM)	INTENSIDAD (Amperios)	POTENCIA (Hp)
0.0	619.05	0.98	0.00
26.76	604.76	3.60	0.23
56.70	576.19	6.00	0.46
101.94	561.90	9.55	0.80
140.16	542.86	12.55	1.06
172.02	528.57	15.75	1.27
196.23	519.05	18.00	1.42

VOLTAJE DE ARMADURA = 100 V.			
CAMPO 229 Voltios 0.43 Amp.			
TORQUE (kgcm)	VELOCIDAD (RPM)	INTENSIDAD (Amperios)	POTENCIA (Hp)
0.0	714.29	1.00	0.00
20.39	704.76	3.00	0.20
56.07	680.95	5.90	0.53
96.20	661.90	9.10	0.89
124.24	652.38	11.25	1.13
179.66	623.81	16.00	1.56
219.80	609.52	20.25	1.87

Cuadros 2.2 y 2.3: Características del motor a voltaje de armadura constante.

VOLTAJE DE ARMADURA = 175 V.			
CAMPO		227.5 Volt	0.43 Amp.
TORQUE (Kgc \cdot m)	VELOCIDAD (RPM)	INTENSIDAD (Amperios)	POTENCIA (Hp)
0.0	1271.43	1.05	0.00
19.11	1257.14	2.55	0.34
45.87	1242.86	5.45	0.80
71.99	1233.33	7.40	1.24
121.69	1214.29	11.55	2.06
156.73	1204.76	14.50	2.64
183.49	1190.48	17.25	3.05
214.07	1180.95	19.50	3.53
244.65	1166.67	22.90	3.98

Cuadro 2.4: Características del motor a voltaje de armadura constante.

VOLTAJE DE ARMADURA = 230 V.			
CAMPO		226.5 Volt	0.46 Amp.
TORQUE (Kgcm)	VELOCIDAD. (RPM)	INTENSIDAD (Amperios)	POTENCIA (Hp)
0.0	1657.14	1.25	0.00
3.82	1657.14	1.50	0.09
36.95	1628.57	4.75	0.84
70.72	1619.05	7.45	1.60
99.39	1614.29	9.75	2.24
128.70	1609.52	12.45	2.89
150.36	1600.00	14.40	3.36
179.76	1590.48	16.90	3.99
221.71	1580.95	20.00	4.89
242.10	1566.67	22.50	5.30
262.49	1564.29	24.75	5.73

Cuadro 2.5: Características del motor a voltaje de armadura constante.

2.1.2.2.- Características del motor a velocidad constante.

En los cuadros presentados a continuación se indican los parámetros de voltaje e intensidad de la armadura a velocidad constante para diferentes cargas.

VELOCIDAD = 619 RPM		
CAMPO 225.5 Volt 0.438 Amp.		
TORQUE (Kgcm)	INTENSIDAD (Amperios)	VOLTAJE (Voltios)
0.0	1.00	87.5
18.48	2.15	89.0
33.13	4.00	90.0
63.71	6.15	92.5
107.03	9.65	95.0
134.43	12.00	96.0
172.02	15.50	99.0
200.69	17.95	101.0
228.08	21.00	104.0

VELOCIDAD = 960 RPM		
CAMPO 226.0 Volt 0.425 Amp.		
TORQUE (Kgcm)	INTENSIDAD (Amperios)	VOLTAJE (Voltios)
0.0	1.00	131.0
22.94	3.00	133.5
36.95	4.30	135.0
61.80	6.25	136.5
114.04	10.40	139.0
156.73	14.00	141.5
201.96	17.95	144.0
230.63	20.80	145.0
257.39	24.25	147.5

Cuadros 2.6 y 2.7: Características del motor a velocidad constante.

VELOCIDAD = 1190 RPM		
CAMPO	226.0 Volt	0.422 Amp.
TORQUE (Kgcm)	INTENSIDAD (Amperios)	VOLTAJE (Voltios)
0.00.	1.15	162.5
17.84	2.45	164.0
42.69	5.25	166.0
93.65	9.25	170.0
116.59	11.40	170.5
151.63	14.40	171.0
179.66	16.50	173.5
223.62	21.20	177.0
242.74	23.25	177.5
262.49	25.50	178.0

VELOCIDAD = 1600 RPM		
CAMPO	226.0 Volt	0.42 Amp.
TORQUE (Kgcm)	INTENSIDAD (Amperios)	VOLTAJE (Voltios)
0.0	1.30	220.0
22.94	3.50	222.0
62.44	7.00	225.0
93.65	9.60	225.5
138.89	11.50	228.0
178.39	17.35	230.0
232.54	22.35	231.5
262.49	25.50	232.0

Cuadros 2.8 y 2.9: Características del motor a velocidad constante.

VELOCIDAD = 1750 RPM		
CAMPO		225.0 Volt 0.42 Amp.
TORQUE (Kgcm)	INTENSIDAD (Amperios)	VOLTAJE (Voltios)
0.0	1.25	240.0
26.76	4.00	244.0
59.25	6.75	245.5
95.57	9.65	247.5
127.42	12.55	248.5
178.39	16.75	249.0
196.23	18.40	250.0
221.71	21.50	251.5

Cuadro 2.10: Características del motor a velocidad constante.

En el gráfico 2.4 se tiene el voltaje de armadura en función del torque a velocidad constante; obtenidos de los datos de los cuadros 2.6 al 2.10.

En el cuadro 2.11 se encuentran tabulados los datos de torque e intensidad en forma reordenada de los cuadros 2.6 al 2.10; para así poder obtener el gráfico 2.5 y la ecuación de la recta del torque en función de la intensidad.

TORQUE (KgcM)	INTENSIDAD (Amperios)
0.00	1.15
0.00	1.30
0.00	1.00
0.00	1.00
17.84	2.45
18.48	2.15
22.94	3.50
22.94	3.00
33.13	4.00
36.95	4.30
42.69	5.25
61.80	6.25
62.44	7.00
63.71	6.15
93.65	9.25
93.65	9.60
107.03	9.65
114.04	10.40
116.59	11.40
134.43	12.00
138.89	13.50
151.63	14.40
156.73	14.00
172.02	15.50
179.66	16.50
178.39	17.35
200.69	17.95
201.96	17.95
223.92	21.20
228.08	21.00
230.63	20.80
232.54	22.35
242.74	23.25
257.39	24.25
262.49	25.50
262.49	25.50

Cuadro 2.11: Datos de torque e intensidad para diferentes velocidades

De los datos presentados en el cuadro 2.11 y por el método de los mínimos cuadrados se tiene la ecuación de la recta de la corriente en función del torque.

La que viene dada por:

$$I_a = 0.8675 - 0.0895 T_c \quad 2.1$$

I_a = corriente de armadura Amp

T_c = Torque al eje del motor Kg cm

De aquí se obtiene:

$$T_c = \frac{I_a - 0.8675}{0.0895} \quad (\text{Kg cm}) \quad 2.2$$

Cabe denotar que todos estos datos, de las características de funcionamiento del motor, fueron obtenidos de una tesis (2) expresamente dedicada a obtener estas características.

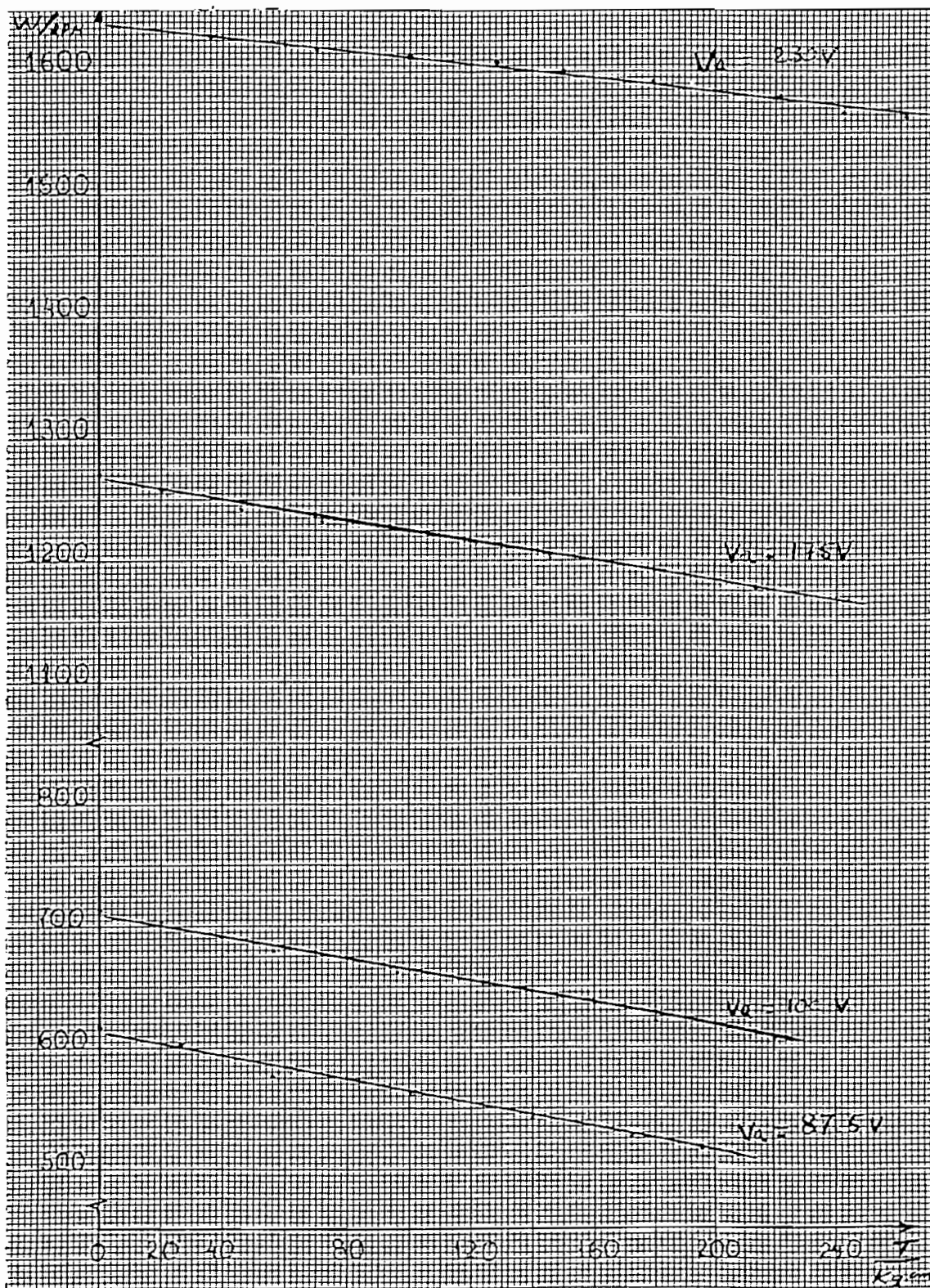


Gráfico 2.1: Velocidad en función del Torque a volta je de armadura constante.

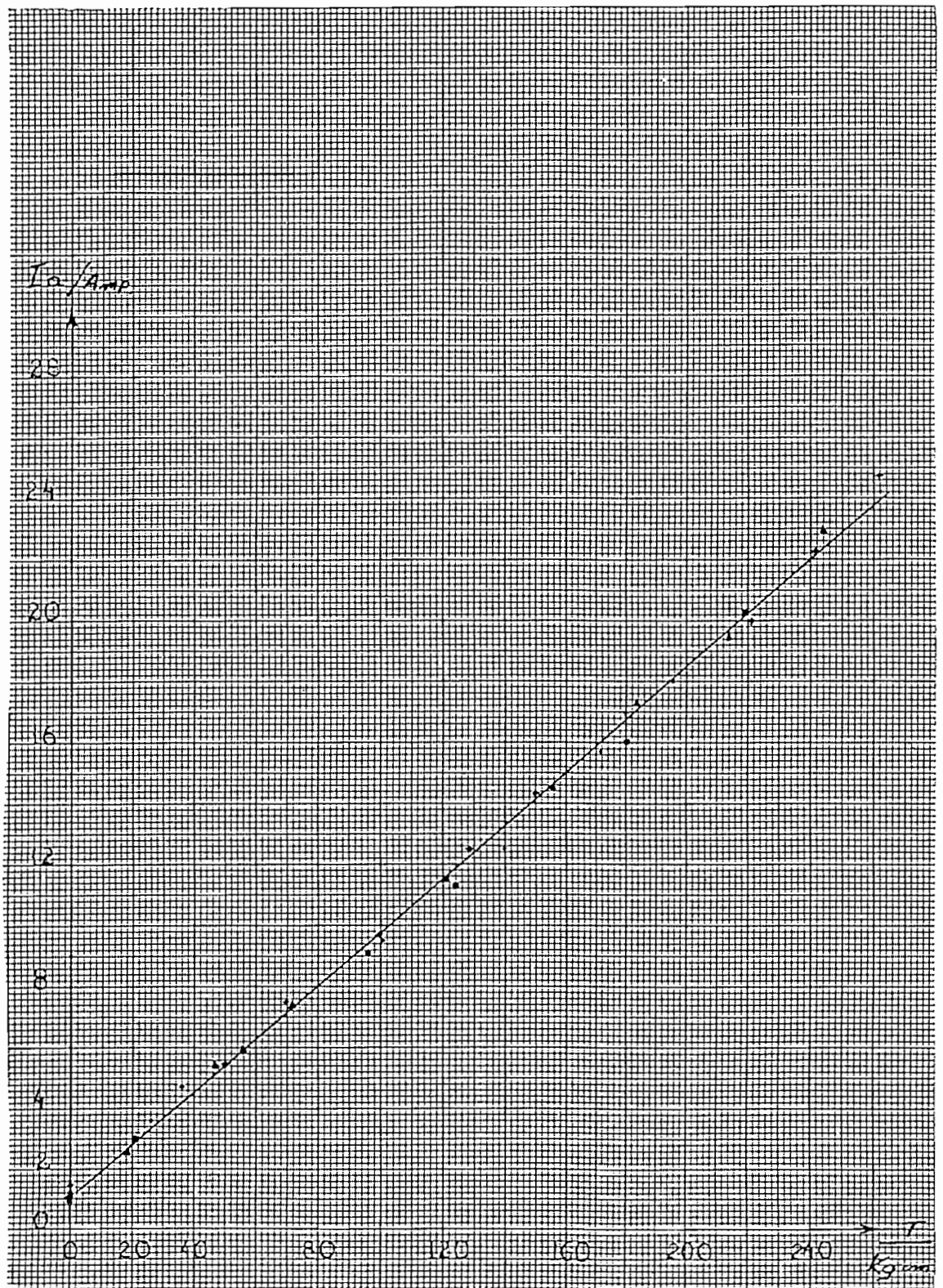


Gráfico 2.2: Corriente en función del Torque a voltaje de armadura constante.

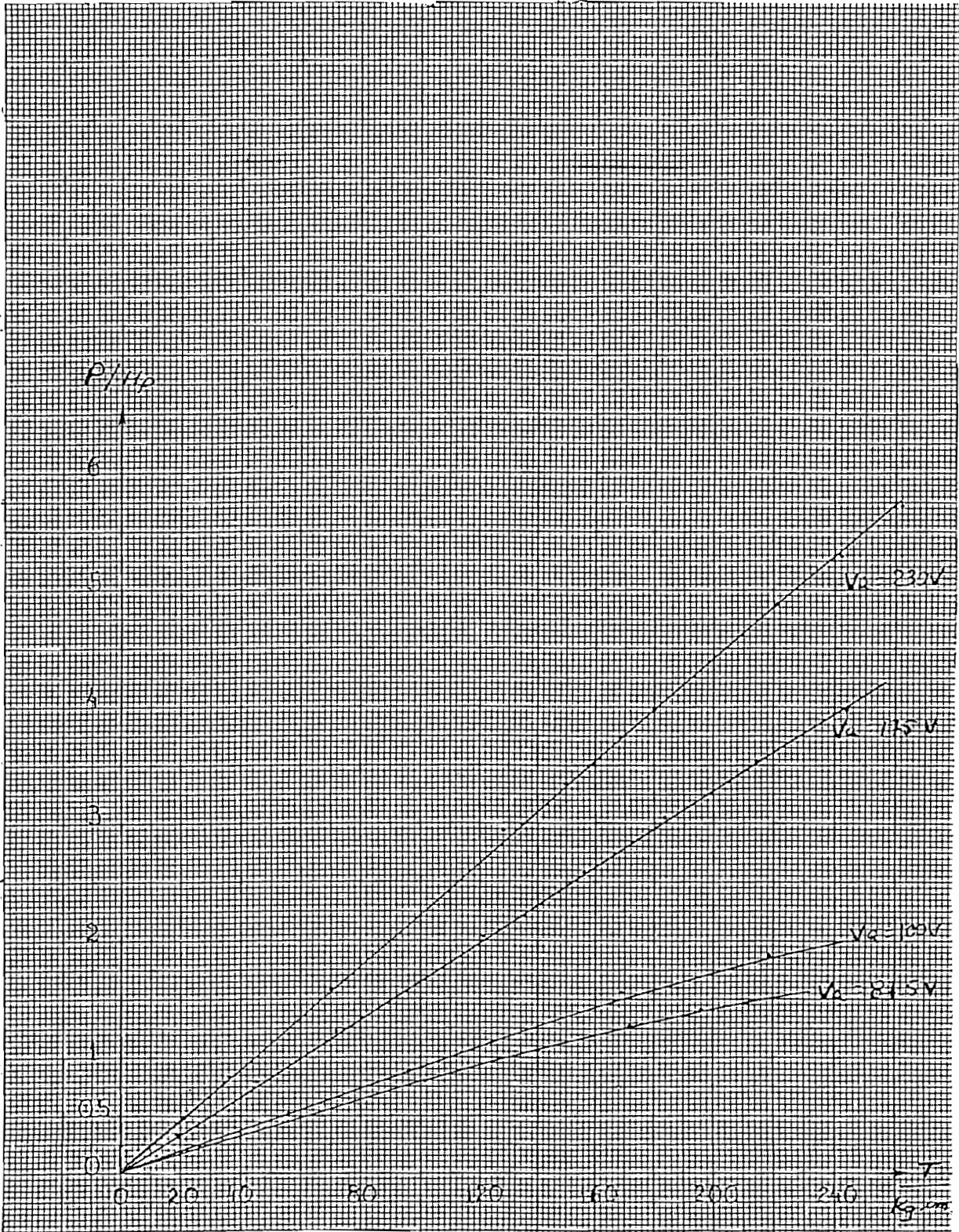


Gráfico 2.3: Potencia en función del Torque a voltaje de armadura constante.

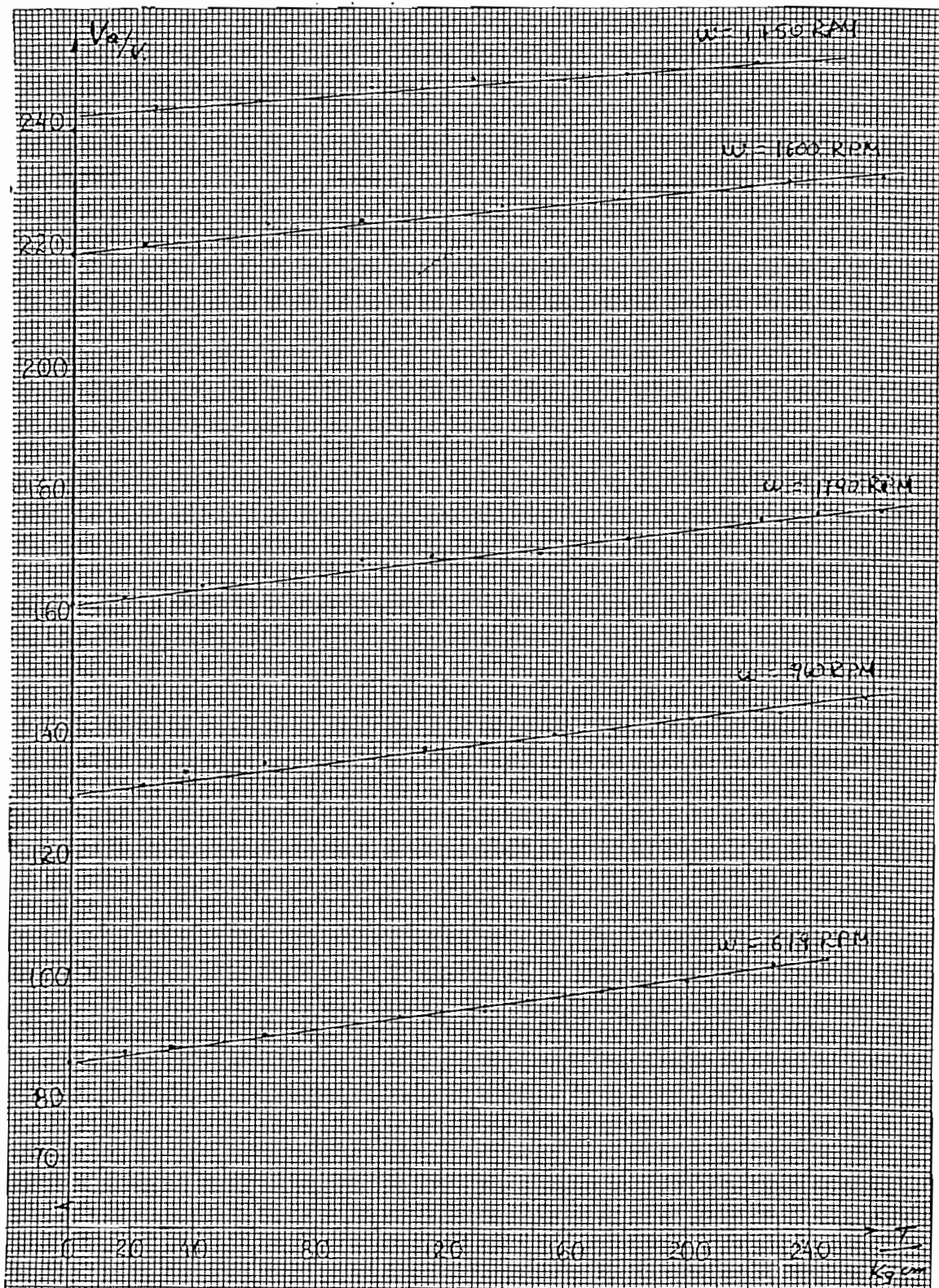


Gráfico 2.4: Voltaje de armadura en función del Torque a velocidad constante.

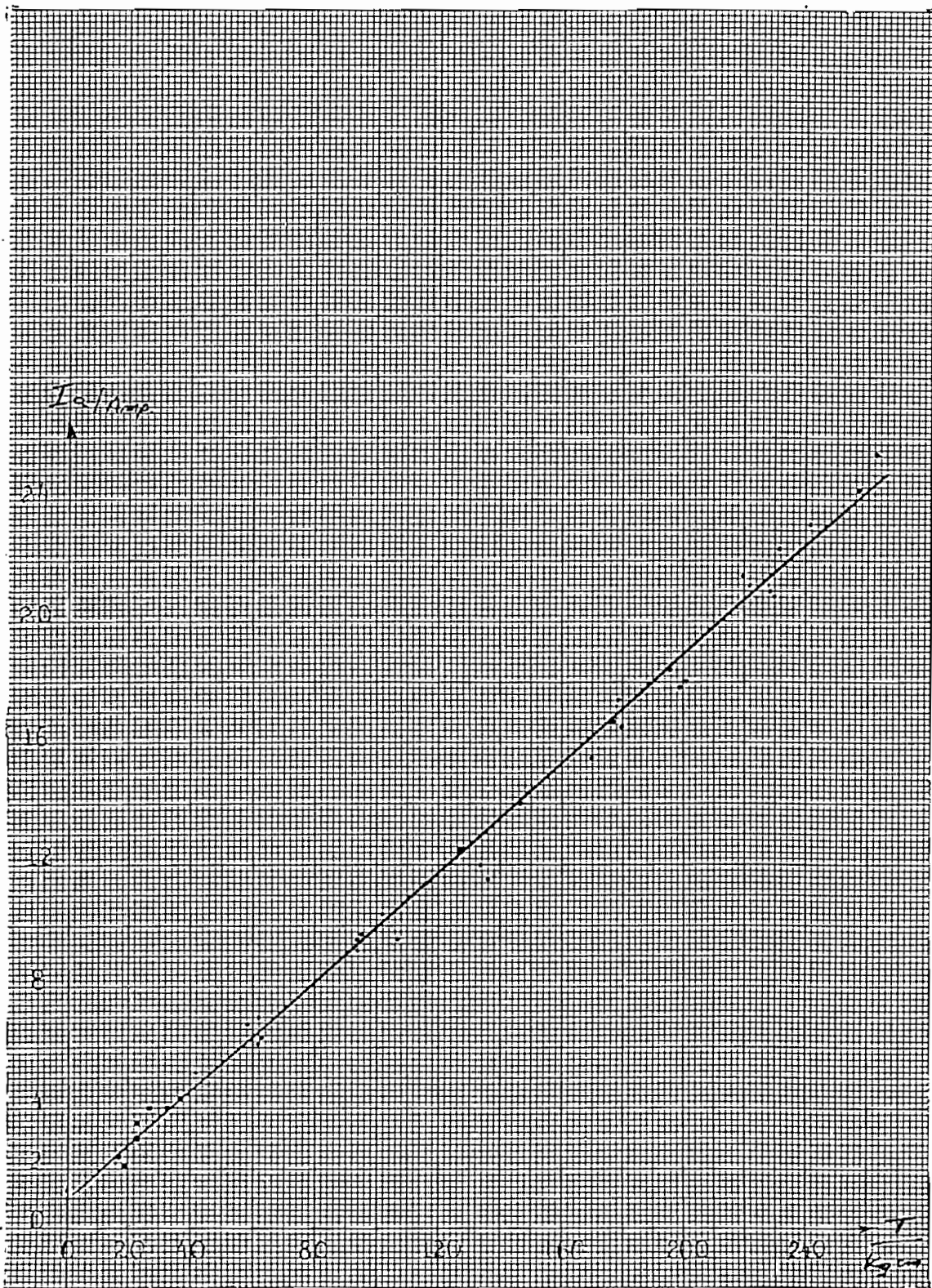


Gráfico 2.5: Corriente de armadura en función del Torque para todas las velocidades.

2.2.- FUNCIONAMIENTO BASICO DE LOS DIFERENTES BLOQUES DEL SISTEMA.

En la figura 1.9 se presentó el diagrama de bloques del circuito total.

2.2.1.- Bloque N° 1.- Control de arranque y cambio de velocidad.

Este bloque como lo dice su nombre sirve para controlar el arranque y el cambio de velocidad del motor.

El funcionamiento es el siguiente: Si a la entrada se pone un valor V_r de referencia, el circuito de arranque sirve para obtener el mismo valor V_r a su salida pero después de un cierto tiempo, lo mismo para variar la velocidad. La ventaja de este circuito es que el motor no arranca en forma violenta sino gradualmente hasta llegar al valor nominal de velocidad seleccionada. Evitándose con ello corrientes de arranque altas.

La figura 2.2 representa la forma del voltaje de salida con respecto al tiempo.

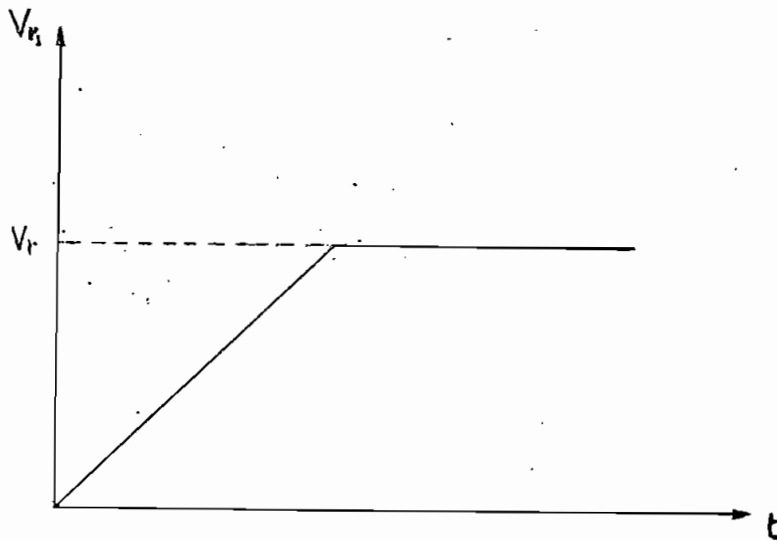


Figura 2.2: Respuesta del control de arranque.

2.2.2.- Bloques N°2 y 4.- Comparadores de velocidad y corriente.

Estos bloques nos sirven para comparar el valor del voltaje de referencia, V_r , que como se dijo depende del valor nominal de velocidad escogido, con los voltajes de realimentaciones de velocidad, V_w , y de corriente, V_i , y así tener un valor de voltaje, V_x , que será el que regula el ángulo de disparo de los SCR's.

Si las condiciones de carga mecánica no varían,

el voltaje de regulación, V_x , permanecerá constante, en caso contrario se producirán variaciones del mismo, que serán funciones directas de las variaciones de carga; lográndose con esto una compensación que tratará de mantener constante la velocidad.

Así por ejemplo si la carga mecánica aumenta el motor tenderá a disminuir la velocidad y por lo tanto V_w ; en cambio V_i tenderá a aumentar; V_x a disminuir y con ello un aumento del ángulo de disparo, compensándose de esta manera la tendencia a disminuir la velocidad que tendría el motor.

2.2.3.- Bloques N° 3 y 5.- Rectificador y filtros.

La función de estos bloques es la de obtener una señal totalmente continua a su salida, proporcional a la de la entrada que es de voltaje alterno variable.

En el caso del bloque (3) se tiene que el tácometro entrega una señal AC, de amplitud variable a variaciones de la velocidad, por lo que es necesario primero rectificarla y luego filtrarla. La figura 2.3 muestra este proceso.

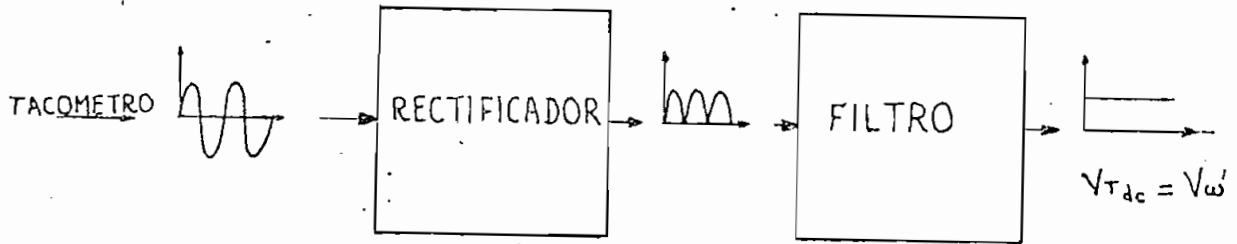


Figura 2.3: Rectificación y filtrado de la señal del taquímetro.

El bloque (5) sólo representa a un filtro, ya que la señal de voltaje que entra es proporcional a la corriente de armadura y esta corriente por el hecho de venir del puente de tiristores y diodos ya está rectificada y sólo necesita ser filtrada.

2.2.4.- Bloque N°6.- Generador de pulsos de disparo.

El generador de pulsos es el bloque principal del circuito, ya que éste según la señal de entrada $V_{X_{c1}}$, proporciona un tren de pulsos de disparo desde -

un cierto ángulo.

Debido a que los pulsos de disparo tienen que estar sincronizados con cada fase, es necesario que existan tres generadores de pulsos exactamente iguales, uno para cada SCR.

El diagrama de bloques del circuito generador de pulsos, sincronizado con la fase R_N , se muestra en la figura 2.4.

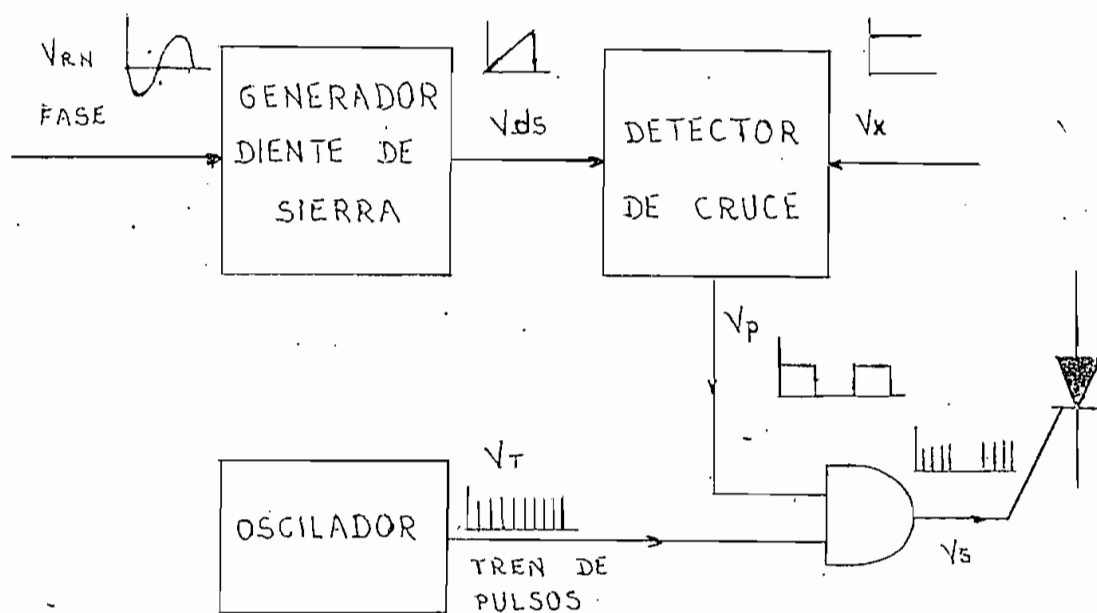


Figura 2.4: Diagrama de bloques del circuito generador de pulsos de disparo.

La onda V_{ds} , obtenida en el generador diente de sierra, está sincronizada con la frecuencia de la línea; esta onda es comparada con el voltaje V_x de control ya antes analizado, de tal manera que cuando $V_{ds} = V_x$ comienza el pulso V_p que permitirá aplicar a la compuerta de los SCR's los trenes de pulsos provenientes del oscilador. Este pulso durará hasta cuando termine la ondadiente de sierra, como se puede ver en la figura 2.5.

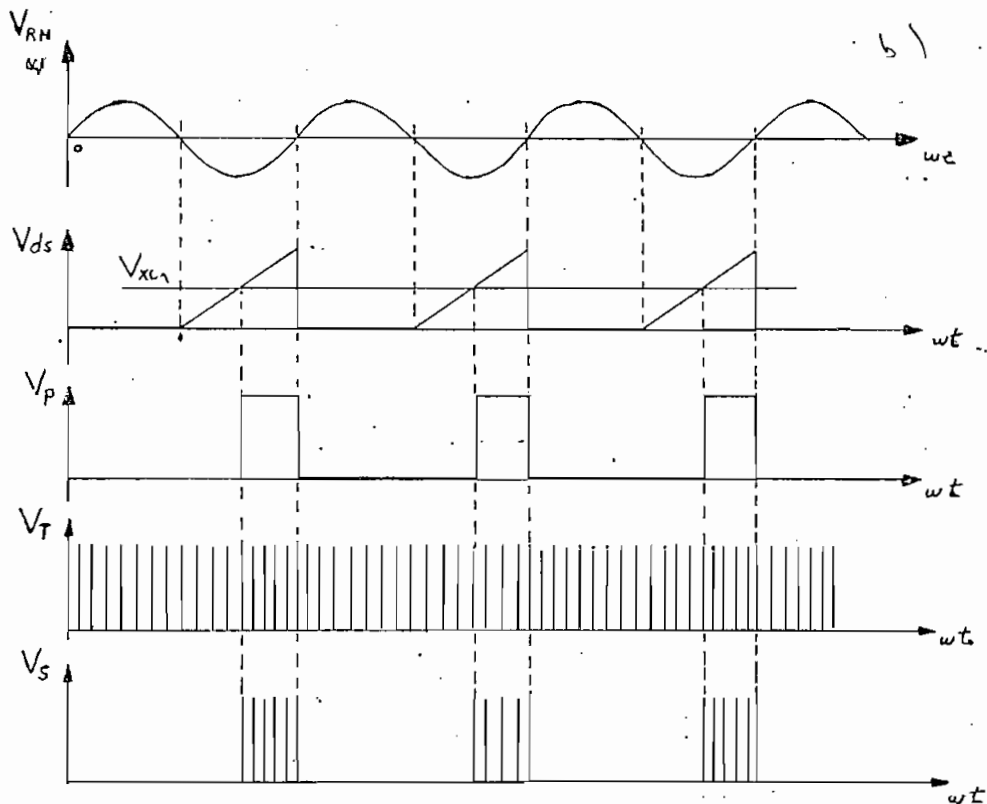


Figura 2.5: Formas de onda del circuito de disparos, para la fase RN.

C A P I T U L O T E R C E R O

DISEÑO DEL TABLERO DE PRUEBAS

CAPITULO III

3.1.- DISEÑO DE LOS CIRCUITOS.

3.1.1.- Diseño del circuito de Potencia.

El circuito utilizado para obtener la rectificación trifásica de onda completa semicontrolada está indicado en la figura 1.7, cuyo funcionamiento y análisis matemático se explica en el capítulo I.

Las características de los SCR's y diodos están dados principalmente por los valores de voltaje pico inverso y directo, la corriente media y máxima que circula por ellos.

Se tiene que el voltaje máximo de la línea está dado por:

$$V_{\text{máx}} = \sqrt{2} V_{\text{rms}} \quad 3.1$$

$$V_{\text{máx}} = \sqrt{2} \cdot 220 \text{ V} = 311 \text{ V.}$$

El peor de los casos se tendrá cuando:

$$V_{\text{AK}} = 2 V_{\text{máx}} \quad 3.2$$

$$V_{\text{AK}} = 622 \text{ V.}$$

Esto quiere decir que los valores de voltaje de dos fases en el mismo instante son máximos inversos.

Es recomendable dar un 20% más de tolerancia por lo que se tendrá:

$$V_{A-K(\min)} = 1.2 \times 622 \text{ V} = 746 \text{ V.}$$

$$V_{A-K(\min)} = 800 \text{ V.}$$

La otra característica que interesa es la de la corriente que circula por los SCR's y diodos.

Se tiene que la corriente media máxima que circula por la carga (el motor), es de 20 Amperios.

Por cada SCR y cada diodo se tendrá:

$$I_{SCR} = \frac{I_{\text{máx}}}{3} \quad 3.3$$

$$I_{SCR} = 6.66 \text{ Amp.}$$

Esto es para funcionamiento normal, pero se pueden tener picos de corriente, por ejemplo en el arranque, que pueden ser de más de 100 Amperios.

Supongamos por ejemplo $I_p = 100 \text{ Amp.}$

$$I_{SCR} = \frac{100}{3} \text{ Amp.} = 33.33 \text{ Amp.}$$

$$I_{SCR} = 33.33 \text{ Amp.} + 20\% (33.33 \text{ Amp.})$$

$$I_{SCR} = 40 \text{ Amp.}$$

El SCR o el diodo no sólo debe soportar la corriente de trabajo normal sino los picos de co -

rriente, por lo cual se escoge, que éstos soporten - una corriente de mínimo 40 Amp.

Los SCR's utilizados son:

$$\text{SCR}_1 = \text{SCR}_2 = \text{SCR}_3 = 50 \text{ RIA } 80$$

Se había dicho que los diodos deben cumplir - con las mismas características de los SCR's, pero - por no encontrar en el mercado diodos que cumplan - las características de voltaje se pusieron, por cada diodo dos diodos en serie.

Los diodos utilizados son los ECG 5994.

3.1.1.1.- Diseño del circuito de protección del dV/dt .

Debido a que un SCR puede ser encendido en - forma accidental por un crecimiento rápido del vol \underline{t} a je A-K que sobrepase el dV/dt especificado por el fa bricante, es necesario poner un circuito que atenúe- este crecimiento.

La protección que normalmente se usa es poni- endo un condensador y una resistencia en serie con - el SCR, como indica la figura 3.1.

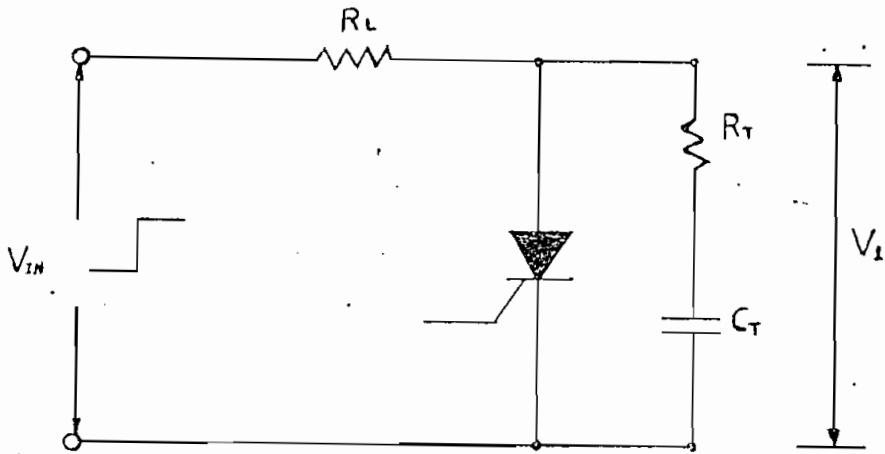


Figura 3.1: Circuito de protección del dV/dt .

El condensador, C_T , produce un aumento de V_1 - en forma amortiguada, a medida que se carga, y la resistencia, R_T , limita la corriente de descarga de C_T .

La figura 3.2 indica la forma de carga del condensador, hasta un tiempo τ se puede considerar que la carga de C_T es lineal, correspondiendo a $0.63 V$ máx.

Se tiene entonces que:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{dV}{dt} = \frac{0.636 V_{DRM}}{\tau}$$

3.4

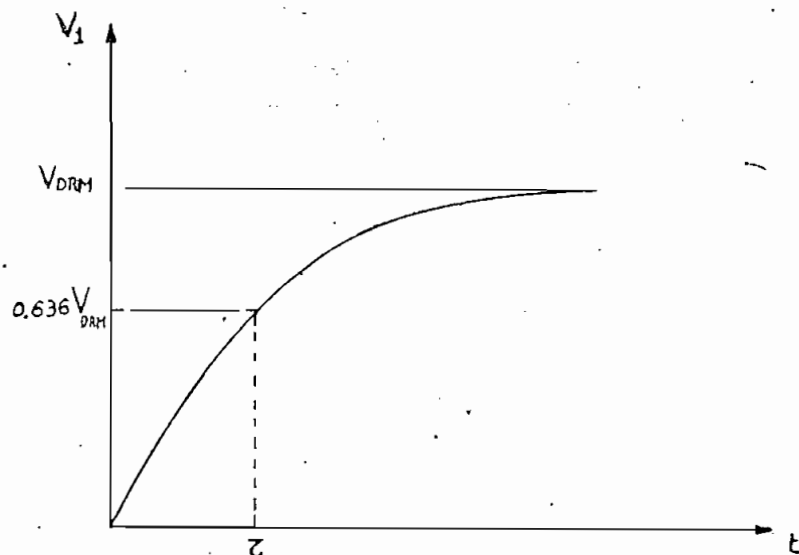


Figura 3.2: Forma de carga del condensador C_T .

Para nuestro caso el dV/dt dado por el fabricante es:

$$\frac{dV}{dt} = 200 \text{ V}/\mu\text{sg.}$$

y $V_{DRM} = 800 \text{ V.}$

Se tendrá entonces:

$$\tau = 2.544 \mu\text{sg.}$$

Para $V_{in} = V_{m\acute{a}x} = 311 \text{ V.}$

Debe cumplirse que:

$$\frac{V_{in}}{V_{DRM}} = 1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}}$$

Teniendose entonces:

$$\tau = -\tau_1 \ln \left(1 - \frac{V_{IN}}{V_{DRM}} \right) \quad 3.6$$

$$\tau = 1.273 \mu\text{sg.}$$

Pero:

$$\tau = (R_T + R_L) C_T \quad 3.7$$

$$\tau = R_T C_T \quad 3.8$$

Si $R_T = 60 \Omega$

$$C_T = 0.021 \mu\text{F} \text{ ó mayor}$$

Para nuestro caso se utilizó:

$$R_T = 60 \Omega; \quad C_T = 0.1 \mu\text{F.} / 630 \text{ V.}$$

Se completará el cálculo obteniendo el valor de la potencia que disipa la resistencia.

Se tiene que:

$$\frac{1}{C_T} \int i dt + R_T \cdot i(t) = V_1 \quad 3.9$$

$$i(t) = \frac{V}{R_T} \cdot e^{-\frac{t}{R_T C_T}} \quad 3.10$$

$$V_R = R_T \cdot i(t) = V \cdot e^{-\frac{t}{R_T C_T}} \quad 3.11$$

$$P_R = V_R \cdot i(t) = \frac{V^2}{R_T} e^{-\frac{2t}{R_T C_T}} \quad 3.12$$

La potencia media será:

$$P_{\text{media}} = \frac{1}{T} \int_0^T P_R \cdot dt \quad 3.13$$

$$P_{\text{media}} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V^2}{R_T} e^{-\frac{2t}{R_T C_T}} dt$$

$$P_{\text{media}} = - \frac{V^2 C_T}{2T} (e^{-\frac{2t}{R_T C_T}} - 1) \quad 3.14$$

Para: $V = 311 \text{ V.}$

$$R_T = 60$$

$$C_T = 0.1 \text{ uF.}$$

$$T = 16.6 \text{ msg.}$$

$$P_{\text{media}} = 0.3 \text{ w.}$$

No es necesario poner protección para el di/dt debido a que el motor ya le proporciona.

3.1.2.- Diseño del control de arranque y cambio de velocidad.

Como se puede ver en la figura 3.3 el circuito está formado por dos amplificadores operacionales los cuales funcionan como un comparador y un integrador con un lazo de realimentación.

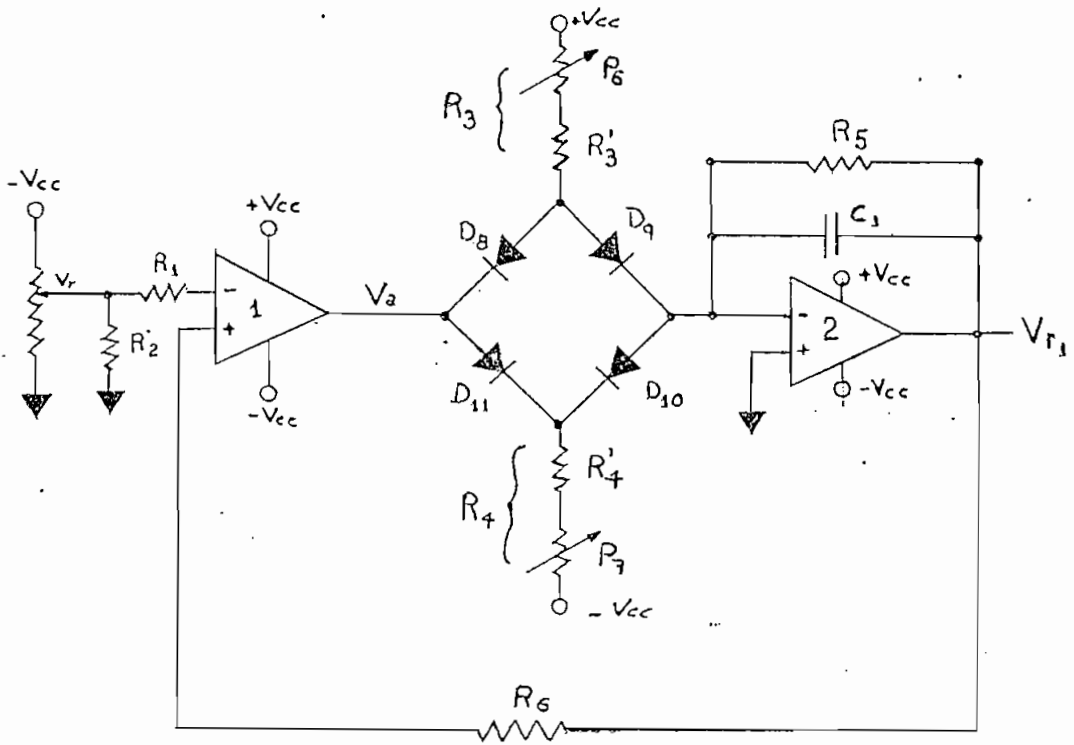


Figura 3.3: Circuito para control de arranque y cambio de velocidad.

Si al inicio el voltaje V_{r1} , está en 0 V y se tiene un voltaje V_r (negativo) de entrada, a la salida del comparador (1) se tendrá $V_a = V_{sat} (+)$ en este caso D_8 y D_{10} se abren y D_9 y D_{11} conducen por lo que el condensador, C_1 , se carga a través de R_3 y D_9 hasta un valor de $V_{r1} = V_r$; en el momento que V_{r1} se hace más negativo que V_r , se tendrá que $V_a = V_{a\ sat} (-)$ entrando a conducir D_8 y D_{10} , abriéndose D_9 y D_{11} , dando paso a que el condensador se descargue por D_{10} y R_4 hasta que V_{r1} sea me-

nos negativo que V_r ; se tendrá que el punto V_a comenzará a oscilar de $V_{sat}(+)$ a $V_{sat}(-)$, ya que el condensador se cargará y descargará al rededor de V_r manteniéndose así el voltaje $V_{r1} = V_r$.

Si se varía V_r a otro valor, el funcionamiento es igual que como al inicio.

La forma de onda del voltaje V_r en función del tiempo está representado en la figura 3.4.

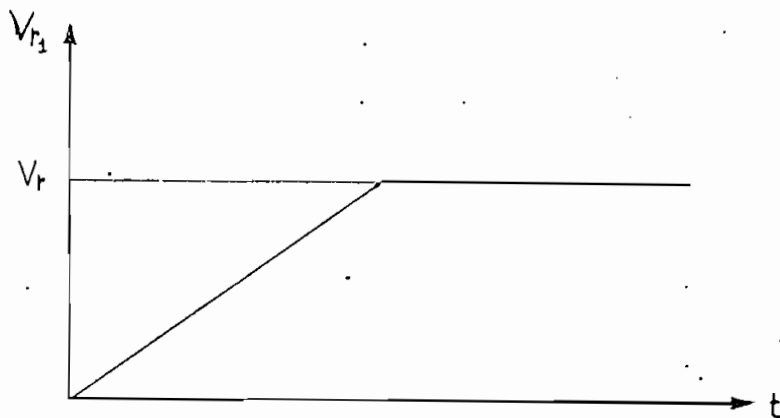


Figura 3.4: Forma de onda de voltaje V_{r1} en función del tiempo (circuito fig. 3.3)

La ecuación que gobierna la carga del condensador C_1 está dada por:

$$\frac{V_{cc}}{R_{3-4}} = - \frac{dV_{r1}}{dt} \cdot C_1 \quad 3.15$$

$$V_{r_1} = - \frac{1}{R_{3-4} C_1} \int_0^t V_{cc} dt + V_0(t=0) \quad 3.16$$

$$V_{r_1} = - \frac{V_{cc}}{R_{3-4} C_1} \cdot t + V_0(t=0) \quad 3.17$$

$$t = - \frac{V_{r_1} - V_0}{V_{cc}} \cdot R_{3-4} \cdot C_1 \quad 3.18$$

Este será el tiempo que se tarda el condensador para cargarse o descargarse desde un valor inicial V_0 hasta $V_{r_1} = V_r$.

Para nuestro caso se tomará un tiempo $t = 20$ sg para que vaya desde $V_0 = 0$ V. hasta $V_{r_1} = 15$ V. Se tendrá entonces:

$$R_{3-4} \cdot C_1 = 20 \text{ sg.}$$

$$\text{Si } C_1 = 25 \mu\text{F.}$$

$$R_{3-4} = 800 \text{ K}\Omega.$$

Para poder calibrar el tiempo, t , de carga o descarga del condensador. Se utilizó una resistencia de $100 \text{ K}\Omega$ en serie con un potenciómetro de $1 \text{ M}\Omega$.

$$R_6 = R_1 = 47 \text{ K}\Omega$$

La resistencia R_2 sirve para, cuando V_r es-
ta desconectado, dar un punto de referencia a la en-
trada negativa del comparador 1.

Esta resistencia debe tener un valor alto pa-
ra no afectar la impedancia de entrada del operacio
nal , 1.

$$R_2 = 1 \text{ M}\Omega$$

3.1.3.- Diseño del circuito de disparos.

Como se dijo anteriormente se necesitan tres-
circuitos de disparos, una para cada SCR, cada uno -
de los cuales está sincronizado con una fase.

Por lo cual será necesario sólo presentar el-
análisis de uno de ellos ya que los demás están -
construidos en forma idéntica.

La figura 3.5 muestra el circuito de disparos
y la figura 3,6 las formas de ondas que se tiene en-
las diferentes etapas del circuito.

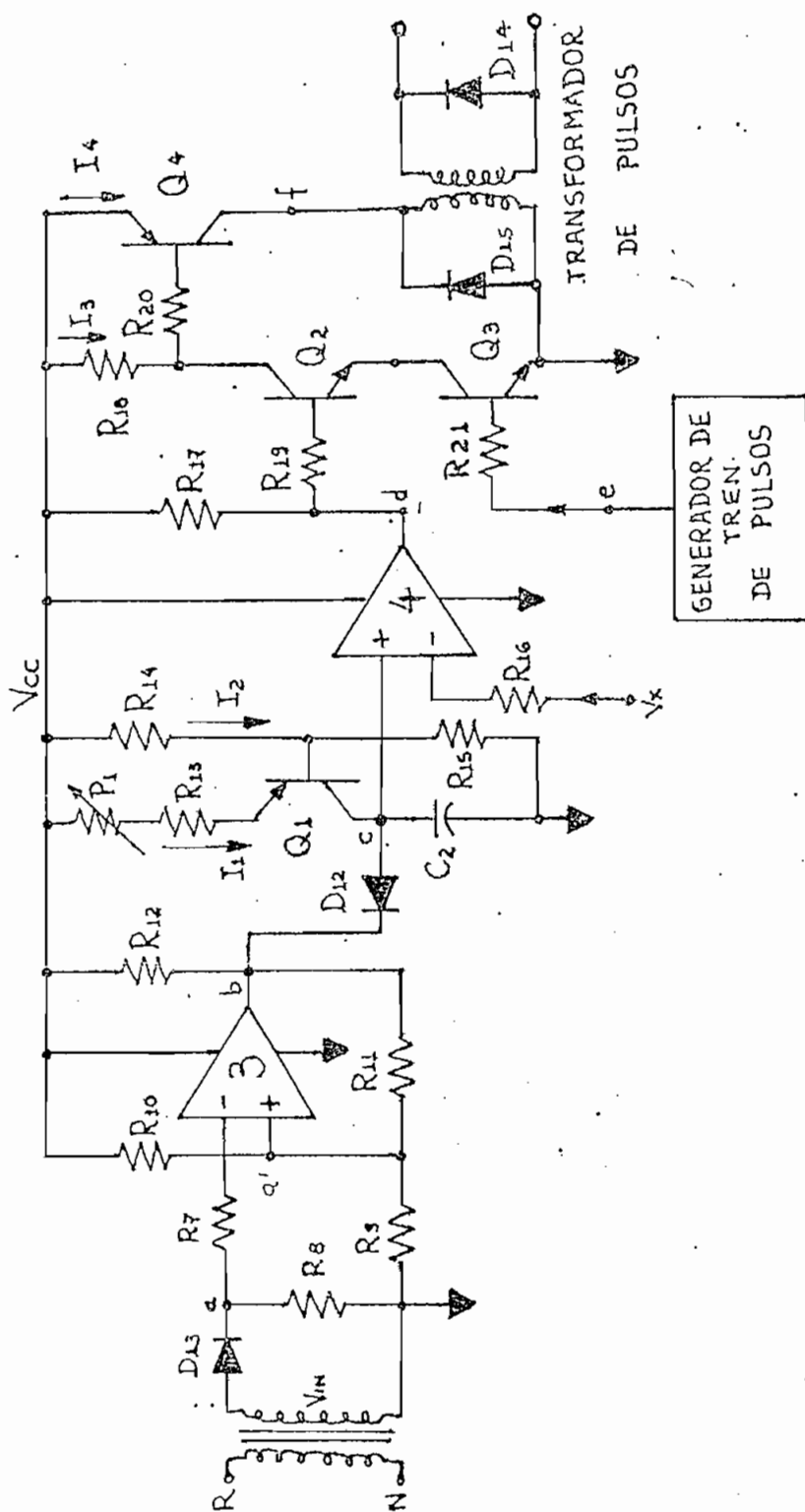


Figura 3.5: Circuito de disparo , sincronizado con la fase R_N .

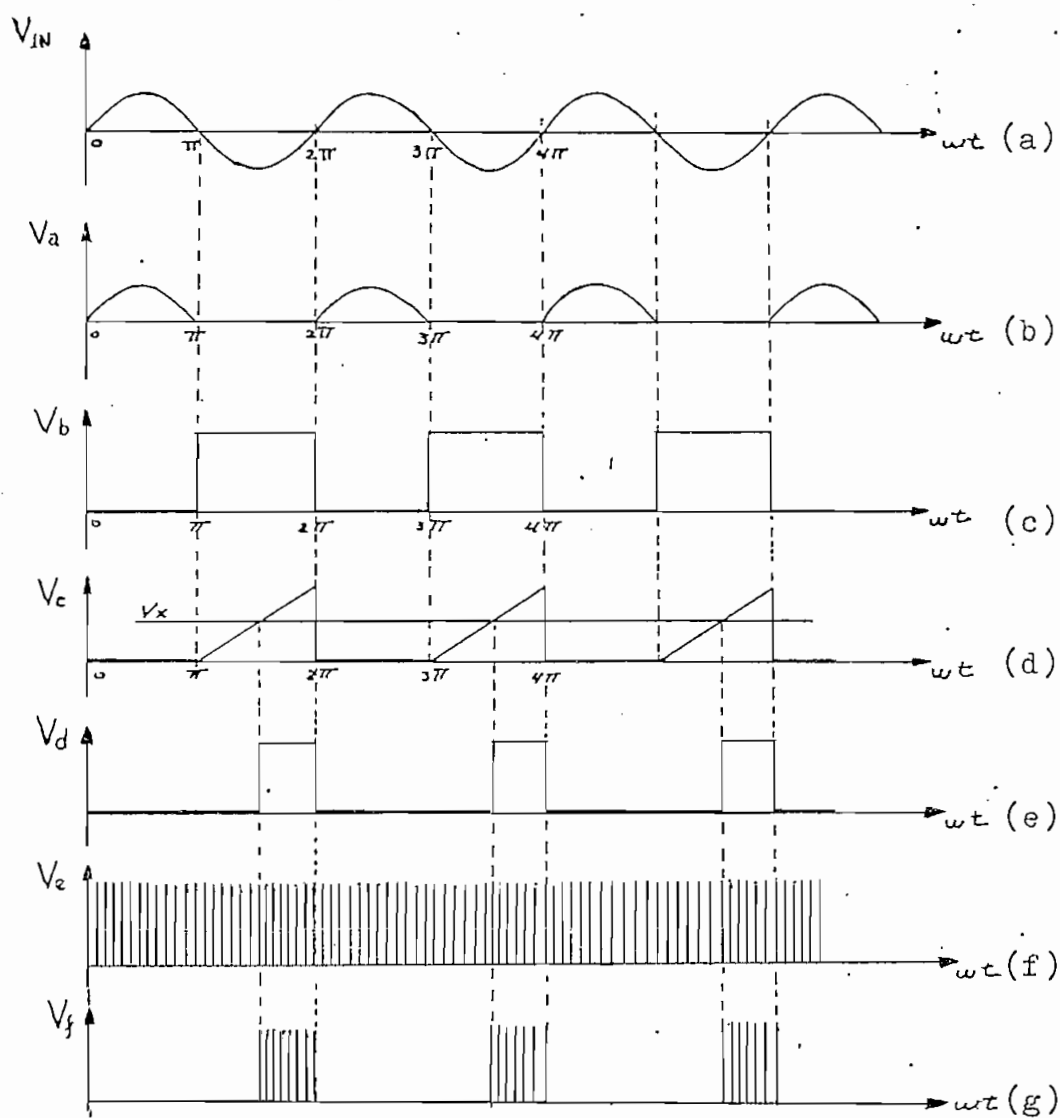


Figura 3.6: Formas de onda de voltaje, en diferentes puntos del circuito de la figura 3.5, a) voltaje de entrada, b) voltaje en el punto (a), c) voltaje de salida del comparador, 3, d) voltajes de entrada del comparador 4, e) voltaje de salida del comparador 4, f) tren de pulsos provenientes del oscilador, g) trenes de pulsos que entran a la compuerta del SCR.

Por medio del transformador de entrada se obtiene la onda V_{in} , la que va a servir de señal de sincronismo para los pulsos de disparo ; en (a) se tiene rectificación de media onda la cual entra al comparador, 3, obteniéndose a su salida la onda cuadrada V_b .

Por acción de la fuente de corriente constituida por el transistor Q_1 y cuando la onda cuadrada que se tiene en b está en alto, el condensador C_2 , se cargará linealmente para formar la rampa.

En el punto (c), cuando la onda cuadrada está en 0 V. el condensador C_2 se descargará completamente a través del diodo D_{12} .

La rampa formada en (c) y el valor de referencia V_x se alimentan al comparador 4 para tener en el punto, (d), un pulso que comienza en la intersección de V_x con la rampa y finaliza cuando termina la rampa.

Estos pulsos se los multiplica con un tren de pulsos de un oscilador de frecuencia de 10 KHz obteniéndose a la salida, trenes de pulsos que serán los que se aplicarán entre la compuerta y el cátodo del SCR correspondiente.

El circuito generador de onda cuadrada, no es más que un comparador y por existir realimentación positiva, se tendrá que el amplificador operacional tiende a estar en estado de saturación.

$$\text{Cuando } V_a \geq V_{a'} \quad V_b = V_{\text{sat}(\text{min})} = 0\text{V.} \quad 3.19$$

$$\text{Cuando } V_a \leq V_{a'} \quad V_b = V_{\text{sat}(\text{máx})} \quad 3.20$$

El punto a' es fijado a un valor cercano a 0 V. por las resistencias R_{10} y R_9 que forman un divisor de tensión.

$$V_{a'} = \frac{R_9}{R_9 + R_{10}} \cdot V_{\text{cc}} \quad 3.21$$

No se ha puesto directamente a cero voltios el punto a' , ya que podría haber inestabilidad, por el hecho de que la onda rectificada que se tiene en (a) varía de 8.5 V a 0 V. y cuando esta en cero voltios y si a' también estaría en cero voltios la salida del comparador, 3, sería inestable.

Por este motivo si el voltaje de a' es un valor un poco mayor que cero voltios ya no habrá inestabilidad y la salida se pondrá en $V_{\text{sat}(+)}$, que es lo deseado.

Si $V_a = 0.6 \text{ V}$. y si $R_9 = 1 \text{ K}\Omega$

Se tendrá de la ecuación 3.21 que:

$$R_{10} = 24 \text{ K}\Omega$$

∴ La resistencia R_{12} tiene como función formar un divisor de tensión, para que el voltaje que aparece en el punto (b) no sea V_{sat}' (máx) sino un valor es cogido.

Si queremos que $V_{b_{\text{MAX}}} = 12 \text{ V}$.

$$V_{b_{\text{MAX}}} = \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{12}} \cdot V_{\text{CC}} \quad 3.22$$

Si $R_{11} = 100 \text{ K}\Omega$

$$\therefore R_{12} = 25 \text{ K}\Omega$$

Puesto que el comparador, 3, presenta una impedancia de entrada muy alta, es necesario la resistencia R_8 para poder obtener en, a, la rectificación de media-onda de V_{in} .

Para esto se ha tomado $R_8 = 4.7 \text{ K}\Omega$

y $R_7 = 2.2 \text{ K}\Omega$

La fuente de corriente se la va a diseñar para que la rampa alcance un valor máximo de 12 V, fijando con ello la variación máxima del voltaje de referencia, V_r .

La corriente de carga del condensador C_2 está dado por :

$$i = C_2 \frac{dv}{dt} \quad 3.23$$

La misma que es constante.

$$\text{Si } C_2 = 0.1 \mu\text{F} \quad \text{y} \quad \frac{dv}{dt} = \frac{12 \text{ V}}{8.3 \text{ ms}} = 1445.73 \text{ V/sg.}$$

$$I = 14458 \mu\text{A.}$$

$$P_1 \quad R_{13} = \frac{V_{cc} - V_{ce_{Q1}} - 12 \text{ V}}{I} \quad 3.24$$

$$\text{Si: } V_{ce_{Q1}} = 1 \text{ V.}$$

$$P_1 \quad R_{13} = 13.83 \text{ K}\Omega.$$

$$V_{e_{Q1}} = 13 \text{ V.}$$

$$V_{b_{Q1}} = 12.6 \text{ V.}$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} \quad 3.25$$

Para: $\beta_{Q2} = 40$

$$I_{bQ1} = 3.6 \text{ uA}$$

Debe cumplirse que $I_b \ll I_2$ para que el voltaje en la base sea constante.

Si:

$$R_{15} = 40 \text{ K}\Omega$$

$$I_2 = \frac{V_{bQ1}}{R_{15}} \quad 3.26$$

$$\therefore I_2 = 0.3 \text{ mA.}$$

Cumpliendo con esto que $I_b \ll I_2$

$$R_{14} = \frac{V_{cc} - V_{bQ1}}{I_2} \quad 3.27$$

$$R_{14} = \frac{15V - 12.6V}{0.3 \text{ mA.}}$$

$$R_{14} = 7.1 \text{ K}\Omega$$

La pendiente de la rampa puede ser variada o calibrada por medio del potenciómetro P_1 que está en serie con R_{13} .

Para esto se escogió

$$P_1 = 5 \text{ K}\Omega$$

$$\text{y } R_{13} = 10 \text{ K}\Omega$$

A la salida del comparador, 4, se tendrá los pulsos, figura 3.6-e, las cuales van a ser multiplicadas con el tren de pulsos provenientes del oscilador.

Lo que se desea es que Q_2 y Q_3 trabajen en corte y saturación.

$$\text{Para esto si } I_3 = 15 \text{ mA.}$$

y Q_2 y Q_3 saturados.

Se tendrá que:

$$R_{18} = \frac{V_{cc} - V_{ce Q_2} - V_{ce Q_3}}{I_3} \quad 3.28$$

$$R_{18} = \frac{15 \text{ V} - 0.3 \text{ V} - 0.3 \text{ V}}{15 \text{ mA.}}$$

$$R_{18} = 960 \Omega$$

$$I_b > \frac{I_c}{\beta} \quad 3.29$$

$$I_b = .10 \frac{I_c}{\beta} \quad 3.30$$

$$\text{Pero } \beta_{Q_{2,3}} = 200$$

$$I_{b_{Q2}} = I_{b_{Q3}} = 0.75 \text{ mA.} = I_b \quad 3.31$$

$$V_{b_{Q2}} = 0.6 \text{ V.} + V_{ce_{Q3}} \quad 3.32$$

$$V_{b_{Q2}} = 0.9 \text{ V}$$

$$R_{19} = \frac{V_{cc} - V_{b_{Q2}}}{I_b} \quad 3.33$$

$$R_{19} = 18.8 \text{ K}\Omega$$

$$V_{b_{Q3}} = 0.6 \text{ V.}$$

$$R_{21} = \frac{V_{cc} - V_{b_{Q3}}}{I_b} \quad 3.34$$

$$R_{21} = 19.2 \text{ K}\Omega$$

$$R_{17} = \frac{V_{cc}}{0.75 \text{ mA.}} \quad 3.35$$

$$R_{17} = 20 \text{ K}\Omega$$

La corriente que necesitan los pulsos de disparo es de 100mA y el transformador de pulsos tiene una relación de vueltas de 1:1

$$\therefore I_4 = 100 \text{ mA.}$$

$$V_{b_{Q4}} = 14.4 \text{ V.}$$

$$I_b = \frac{I_4}{\beta} \quad 3.36$$

$$\text{Pero } \beta_{Q4} = 80$$

$$I_{b_{Q4}} = 1.44 \text{ mA}$$

$$R_{20} = \frac{.15 \text{ V} - 2 V_{cesat}}{1.44 \text{ mA}}$$

$$R_{20} = 10. \text{ K}\Omega$$

Faltaría diseñar el circuito generador del tren de pulsos, éste está representado en la figura 3.7.

El circuito no es más que un multivibrador a-estable.

Por existir una realimentación positiva, el amplificador operacional, , tiende a estar en estado de saturación.

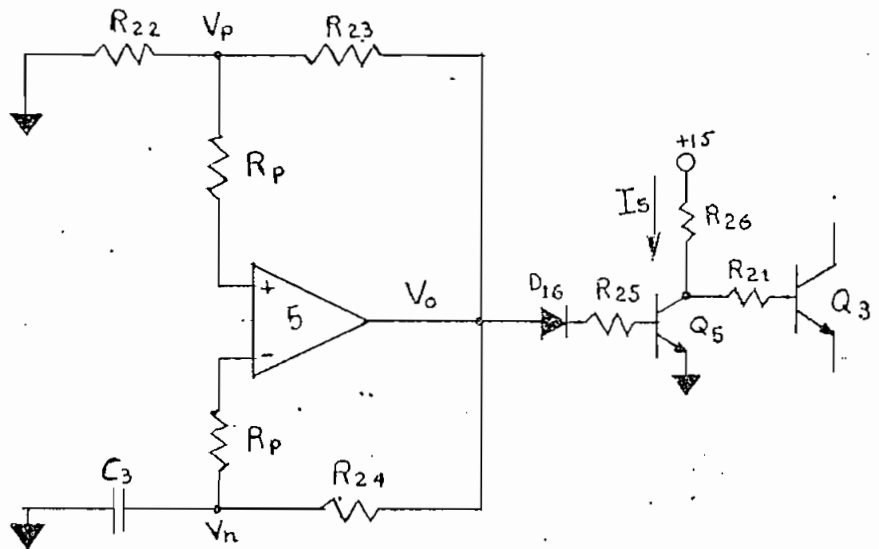


Figura 3.7: Circuito generador del tren de pulsos.

Si por ejemplo, $V_o = V_{o\text{sat}(+)}$, entonces:

$$V_p = \left(\frac{R_{22}}{R_{22} + R_{23}} \right) V_{o\text{sat}(+)} \quad 3.37$$

y el condensador, C_3 , comienza a cargarse, hasta que:

$$V_n \geq V_p$$

momento en el que V_o pasa a ser $V_{o\text{sat}(-)}$ y el condensador, C_3 , comienza a descargarse, hasta que llega un momento en que:

$$V_n \leq \left(\frac{R_{22}}{R_{22} + R_{23}} \right) V_{o\text{sat}(-)} \quad 3.38$$

y V_o se convierte en V_o máx, con lo que el proceso se reinicia.

El período de oscilación está dado por:

$$T = 2 R_{24} C_3 \cdot \ln\left(1 + \frac{2R_{22}}{R_{23}}\right) \quad 3.39$$

Para $R_{22} = R_{23} = 10 \text{ K}\Omega$

$$\therefore T = 2.2 R_{24} C_3 \quad 3.40$$

Si: $f = 10 \text{ KHz} \quad \therefore R_{24} \cdot C_3 = 45.45 \text{ usg.}$

y si $C_3 = 0.1 \text{ uF} \quad \therefore R_{24} = 454.5 \Omega \quad (R_{24} = 200 \Omega + P_4 = 5 \text{ K}\Omega)$

En la salida V_o se tiene el tren de pulsos, - como indica la figura 3.8 los cuales tienen una amplitud de $\pm 15 \text{ V}$.

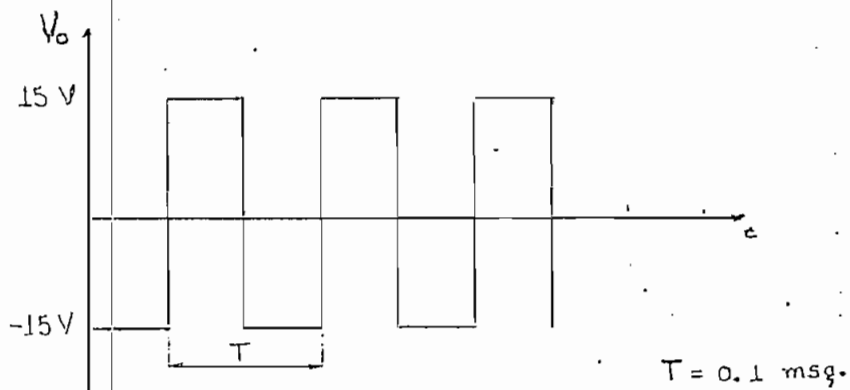


Figura 3.8: Tren de pulsos a la salida del oscilador.

Pero lo que se necesita son pulsos que vayan de 15 a 0 V. y por lo que es necesario poner el transistor Q_5 .

$$\text{Si } I_5 = 75 \text{ mA}$$

$$R_{26} = \frac{V_{cc} - V_{ce_{Q5}}}{I_5} \quad 3.41$$

$$R_{26} = 198.7 \ \Omega.$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} \quad 3.42$$

$$\text{Si } \beta_{Q5} = 100$$

$$I_{b_{Q5}} = 0,75 \text{ mA}$$

$$R_{25} = \frac{15\text{V} - 0.6\text{V}}{I_{b_{Q5}}} \quad R_{25} = 19.2 \text{ K}\Omega \quad 3.43$$

$$R_P = 3 \text{ K}\Omega \quad (\text{especificada por el fabricante})$$

En el colector del transistor Q_5 se tiene el tren de pulsos como indica la figura 3.9.

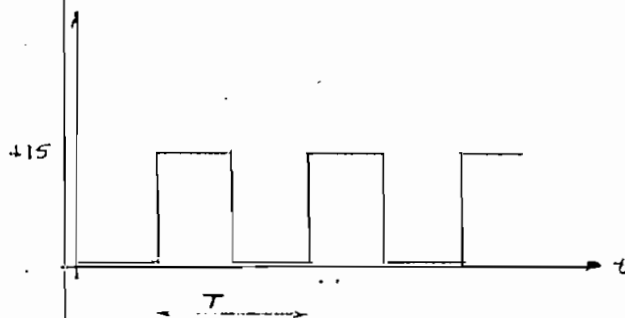


Figura 3.9: Tren de pulsos de 0 a + 15 V.

3.1.4.- Diseño del circuito de rectificación y filtraje de la onda del tacómetro.

Debido a que el voltaje que entrega el tacómetro es alterno, y para los fines de comparación, se necesita voltaje continuo, se tendrá que rectificar y filtrar la señal entregada por éste.

Para diseñar éste circuito, se obtuvo en el laboratorio la respuesta del tacómetro utilizado; los datos se presentan en el cuadro 3.1 y la curva correspondiente, en el gráfico 3.1.

Como se puede observar en el gráfico 3.1 la respuesta de voltaje vs. velocidad del tacómetro es lineal lo cual es una gran ventaja para nuestro propósito.

Bastará entonces sólo rectificar y filtrar esta señal.

El circuito de rectificación utilizado está dado en la figura 3.10 y no es más que un rectificador de onda completa, usando como filtro un condensador.

VELOCIDAD	VOLTAJE TACOMETRO
(RPM)	(Vac)
500	2.00
600	2.40
700	2.75
800	3.00
900	3.35
1000	3.70
1100	4.05
1200	4.38
1300	4.70
1400	5.00
1500	5.30
1600	5.60
1700	5.90
1800	6.25
1900	6.50
2000	6.80
2100	7.10
2200	7.40
2300	7.60
2400	7.90
2500	8.20

Cuadro 3.1 : Respuesta del Tacómetro.

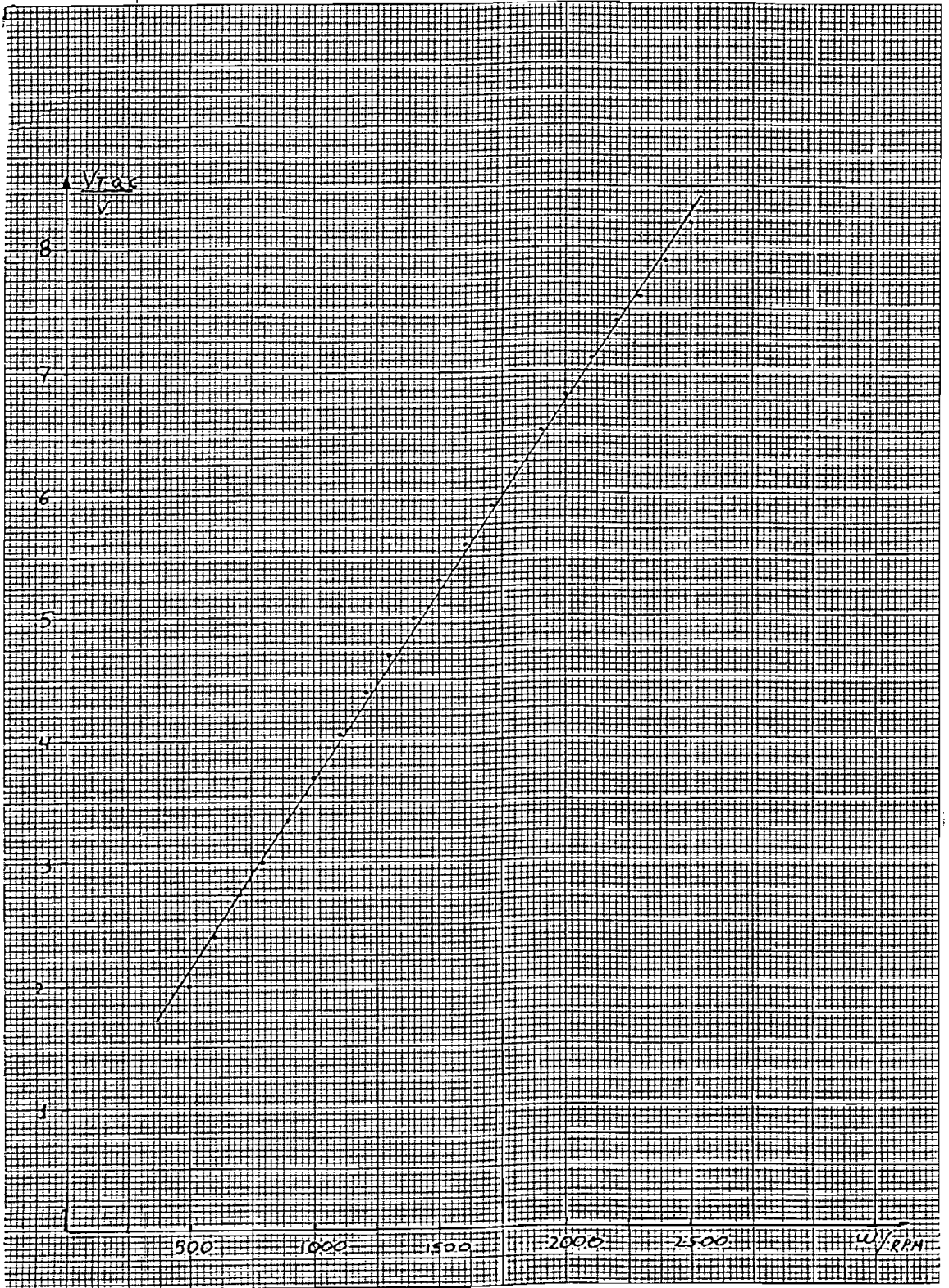


Gráfico 3.1: Respuesta del tacómetro.

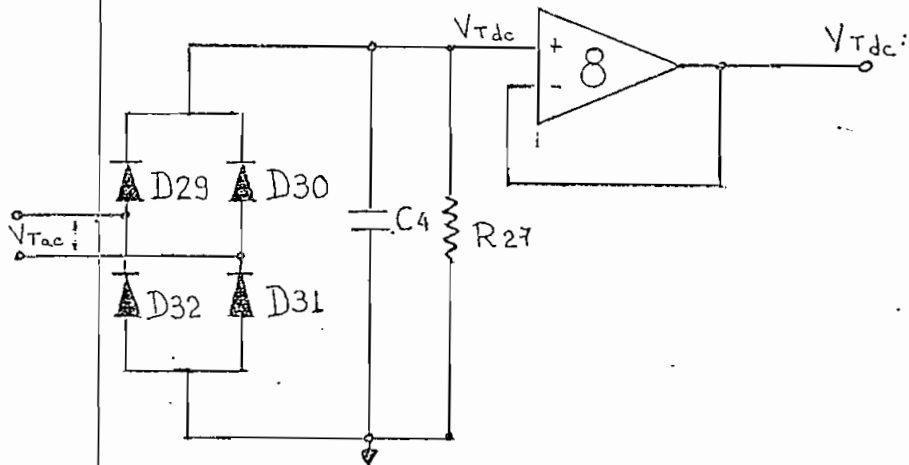


Figura 3.10: Circuito de rectificación y filtraje de la onda AC del tacómetro.

Es conveniente usar el circuito seguidor de emisor, ya que como el voltaje V_{Tdc} que entra al comparador, figura 3.11 para la obtención del voltaje, V_x , tiene que ser totalmente lineal y si estuviera sin el seguidor de emisor, la onda se deformaría, debido a que el condensador, C_4 , se descargaría por la resistencia no muy alta que presenta este circuito, teniéndose una onda DC no muy lineal.

La resistencia R_{27} sirve para que el condensador se descargue por medio de esta al haber variaciones del voltaje de entrada.

Debido a que la respuesta del motor para variaciones de velocidad no es rápida, se tiene - que la respuesta del circuito rectificador no se - necesita que sea muy rápida.

Si el tiempo de carga y/o descarga del condensador.

Es: $\tau = 0.9 \text{ sg.}$

$$\tau = R_{27} \cdot C_4 \quad 3.44$$

Si $C_4 = 2 \text{ uF.}$

$$R_{27} = 450 \text{ K}\Omega$$

Se ha utilizado $R_{27} = 430 \text{ K}\Omega$

y $C_4 = 2 \text{ uF.}$

$$\tau = 0.86 \text{ sg.}$$

3.1.5.- Diseño de los circuitos de comparación de velocidad y de corriente.

Como se dijo en el subcapítulo 2.2.2 estos circuitos sirven para comparar el valor del voltaje de referencia, V_r , que depende de la velocidad nominal escogida, con los voltajes de realimentación de velocidad, dado por el tacómetro, V_T , y de corriente, V_i , y así tener un valor de voltaje V_x que será el que regula el ángulo de disparo de los SCR's

Por la forma como se comparan el voltaje de regulación, V_x , y la rampa, V_{DS} , se tiene que cuando aumenta V_x , aumenta el ángulo de disparo de los SCR's y por lo tanto disminuye el valor medio del voltaje que alimenta a la armadura del motor. En cambio cuando disminuye V_x , aumenta el voltaje de alimentación del motor.

Se tiene entonces que la relación de variación del voltaje de regulación V_x , es inversa a la variación del voltaje de armadura V_a .

Si V_x aumenta V_a disminuye.

Si V_x disminuye V_a aumenta.

Se tendrá entonces que el voltaje de regulación, V_x , es la suma algebraica de 4 señales:

Un voltaje constante, un voltaje de referencia V_r , un voltaje proporcional a la corriente de armadura V_i , y un voltaje que indica el error en la velocidad del motor, E .

El error en la velocidad es detectado por un circuito comparador, el mismo que resta la velocidad de referencia dada por V_r y la velocidad real del motor dada por el tacómetro, V_T .

Teniéndose así que:

$$E = V_r - V_T \quad 3.45$$

$$V_x = V_k - V_i - V_r - E \quad 3.46$$

Como $E = V_r - V_T$

$$\therefore V_x = V_k + V_T - V_i - 2 V_r \quad 3.47$$

Se tiene que para velocidad cero, $V_x \geq 12$ V. que es el valor máximo de voltaje al que llega la rampa.

$$\therefore V_k = 12 \text{ V.} \quad 3.48$$

Para velocidad nominal y máxima carga se obtuvo que :

$$V_x = 2.5 V. = V_c \quad 3.49$$

El circuito para obtener el voltaje referencial V_x se tiene representado en la figura 3.11, el mismo que está compuesto por dos amplificadores operacionales, trabajando como sumadores.

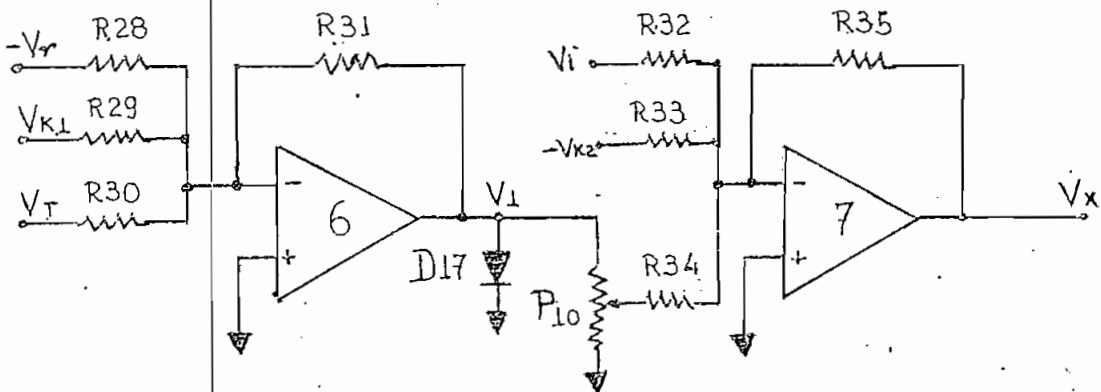


Figura 3.11: Circuito comparador de velocidad y corriente.

Del circuito 3.11 se tiene que:

$$V_1 = R_{31} \left(\frac{V_r}{R_{28}} - \frac{V_{k1}}{R_{29}} - \frac{V_T}{R_{30}} \right) \quad 3.50$$

$$y \quad V_x = R_{35} \left(-\frac{V_i}{R_{32}} + \frac{V_{k2}}{R_{33}} - \frac{V_1}{R_{34}} \right) \quad 3.51$$

$$\therefore V_x = \left(\frac{R_{35} R_{31}}{R_{34} R_{29}} \cdot V_{k1} + \frac{R_{35}}{R_{33}} V_{k2} \right) + \frac{R_{35} R_{31}}{R_{34} R_{30}} V_T$$

$$-\frac{R_{35}}{R_{32}} \cdot V_i - \frac{R_{35} R_{31}}{R_{34} R_{28}} \cdot V_r \quad 3.52$$

De esta ecuación, y de la ecuación 3.47 se tiene que:

$$\frac{R_{35} R_{31}}{R_{34} R_{24}} V_{k1} + \frac{R_{35}}{R_{33}} V_{k2} = V_K = 12 \text{ V.} \quad 3.53$$

$$\frac{R_{35} R_{31}}{R_{34} R_{30}} = 1 \quad 3.54$$

$$\frac{R_{35}}{R_{32}} = 1 \quad 3.55$$

$$\frac{R_{35} R_{31}}{R_{34} R_{28}} = 2 \quad 3.56$$

$$\text{Si } R_{31} = R_{35} = R_{34} = 56 \text{ K}\Omega \quad 3.57$$

$$\text{De: 3.55} \quad R_{32} = R_{35} = 56 \text{ K}\Omega$$

$$\text{De: 3.56} \quad R_{28} = \frac{R_{35}}{2} = 28 \text{ K}\Omega$$

$$\text{De: 3.54} \quad R_{30} = 56 \text{ K}\Omega$$

De: 3.53 se tiene que;

$$\frac{56 \text{ K}\Omega}{R_{29}} V_{k1} + \frac{56 \text{ K}\Omega}{R_{33}} V_{k2} = V_k = 12 \text{ V.} \quad 3.58$$

$$\text{Si } V_d = \frac{56 \text{ K}\Omega}{R_{29}} V_{k1} \quad 3.59$$

$$\text{y } V_c = \frac{56 \text{ K}\Omega}{R_{33}} V_{k2} \quad 3.60$$

$$\therefore V_d + V_c = 12 \text{ V.} \quad 3.61$$

De la ecuación 3.49

$$\therefore V_c = 2.5 \text{ V.}$$

$$\therefore V_d = 9.5 \text{ V.}$$

$$\text{Si: } V_{k2} = 15 \text{ V.}$$

De 3.60 se tiene que:

$$R_{33} = 336 \text{ K}\Omega$$

$$\text{Si } V_{k1} = 6 \text{ V.}$$

De 3.59 se tiene:

$$R_{29} = 35.4 \text{ K}\Omega$$

Quedando de esta manera:

$$V_1 = 2V_r - V_T - 9.5 \text{ V} \quad 3.62$$

$$V_x = V_c - V_i - V_1 \quad 3.63$$

$$\therefore V_x = V_c + V_d + V_T - V_i - 2V_r \quad 3.64$$

$$\text{Como: } V_c + V_d = 12 \text{ V.}$$

$$V_x = 12 + V_T - V_i - 2V_r \quad 3.65$$

Es necesario poner el diodo D_{17} para poder cumplir 3.49.

Para efectos de calibración se puso potenciómetros en vez de resistencias.

$$P_8 = R_{28} , P_7 = R_{29} , P_9 = R_{30} , P_{13} = R_{32} ,$$

$$P_{11} = R_{34}$$

Todos ellos de $100 \text{ K}\Omega$ y P_{10} de $30 \text{ K}\Omega$, $P_{12} = R_{33}$

$$P_{12} = 1 \text{ M}\Omega$$

Para la obtención de la señal de voltaje V_i se utilizó el circuito de la figura 3.12 .

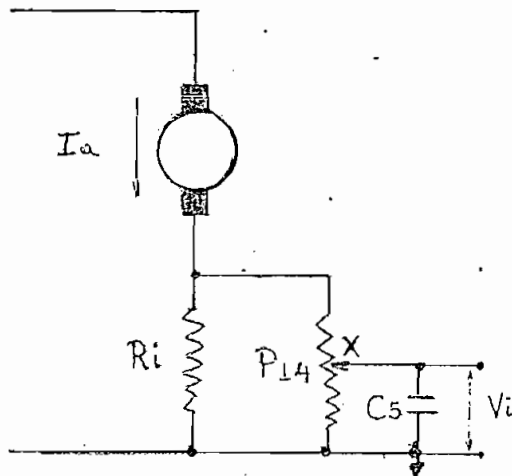


Figura 3.12: Circuito para obtener el voltaje V_i para la realimentación de corriente.

La señal de voltaje que aparece en X es proporcional a la corriente de armadura I_a , el potenciómetro P_{14} sirve para calibrar el valor de V_i máx para la realimentación de corriente.

Como la señal de voltaje que se tiene en X no es lineal, se usa el condensador C_5 como filtro. $C_5 = 100 \text{ u.F.}$

3.1.6.- Diseño de la fuente de $\pm 15 \text{ V dc.}$

El circuito para obtener los voltajes de $\pm 15 \text{ V dc}$ está dado en la figura 3.13.

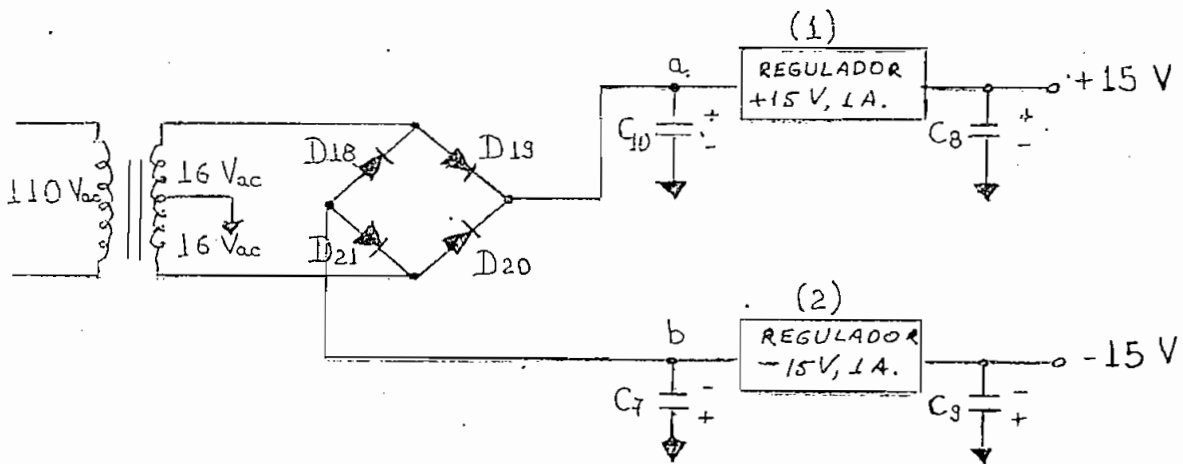


Figura 3.13: Fuente de voltaje $\pm 15 \text{ V.}$

Por medio del rectificador de onda completa y los condensadores C_{10} y C_7 se tiene:

En el punto a + 22 V.

En el punto b - 22 V.

A la salida del regulador 1 se tendrá +15 V.-
y a la salida del regulador 2 se tendrá - 15 V.

El fabricante recomienda que se pongan los condensadores C_8 y C_9 , y que el voltaje mínimo de entrada:

Para el regulador 1 sea de 17 V.

Para el regulador 2 sea de - 17 V.

Y los voltajes máximos de entrada para el regulador 1 sea de + 30 V. Para el regulador 2 sea de - 30 V.

Para este caso se han usado:

Regulador 1 → ECG 968

Regulador 2 → ECG 969

$C_{10} = C_7 = 2200 \text{ uF.}$

$C_8 = C_9 = 10 \text{ uF.}$

3.1.7.- Diseño de los circuitos de protecciones y alarmas.

El equipo además de los circuitos del control de velocidad, está conformado por un sistema de protecciones, el cual fue implementado, debido a que, como se había dicho, va a ser usado por estudiantes y como es natural puede sufrir algún sobredimensionamiento de sus especificaciones.

El equipo tiene protección para:

- Sobre velocidad.
- Sobre carga (sobre corriente).
- Falla en la alimentación del campo.
- Falla en la fuente electrónica.

El momento que se produzca cualquiera de estas fallas el sistema se desconectará, quedando encendido él o los indicadores luminosos respectivos.

3.1.7.1.- Diseño del control de sobre-velocidad.

En tanto que la velocidad nominal del motor es de 1750 RPM, se puede hablar de sobre-velocidad cuando éste llegue a las 2000 RPM y para éste valor de velocidad se tiene un valor de voltaje continuo del tacómetro de 9 V, dato que se usará para el con

trol de sobre-velocidad.

El circuito utilizado se lo representa en la figura 3.14, el cual tiene un amplificador operacional que funciona como comparador poniendo a la salida $V_{sat(+)}$ ó $V_{sat(-)}$ según cual de las entradas sea mayor.

El transistor, Q_6 , puesto a la salida, trabaja en corte o saturación, activando o desactivando el relé R_w

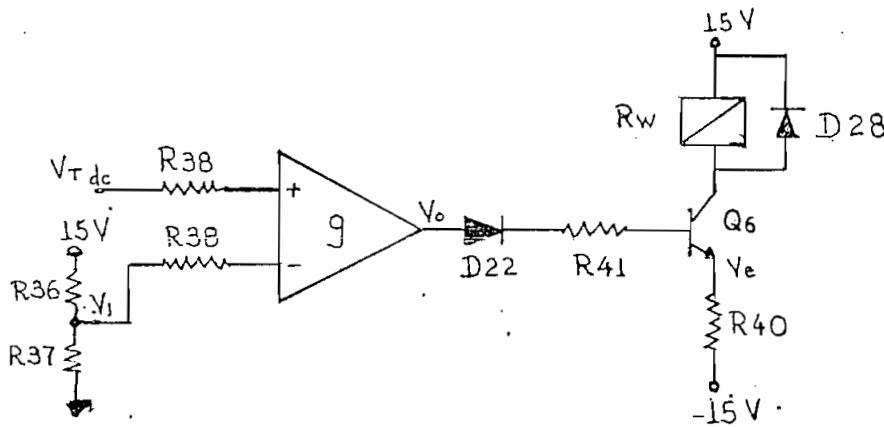


Figura 3.14: Circuito para protección de sobre-velocidad.

El divisor de voltaje dado por R_{36} y R_{37} sirve para establecer el voltaje de referencia el cual debe cambiar el valor del voltaje de salida del comparador 9.

Entonces:

$$V_1 = V_T \text{ sobre-velocidad} = 9 \text{ V.}$$

$$\frac{15}{R_{36} + R_{37}} = \frac{9}{R_{37}} \quad 3.66$$

$$R_{36} = \frac{2}{3} R_{37} \quad 3.67$$

$$\text{Si: } R_{36} = 10 \text{ K}\Omega$$

$$\therefore R_{37} = 6.7 \text{ K}\Omega$$

Las resistencias R_{38} son recomendadas por el fabricante del operacional las cuales tienen un valor de $R_{38} = 3 \text{ K}\Omega$.

Se tendrá que para:

$$V_T > V_1 \longrightarrow V_o = V_{\text{sat}(+)}$$

$$V_T < V_1 \longrightarrow V_o = V_{\text{sat}(-)}$$

Para que el transistor Q_6 trabaje en corte y saturación se tiene que:

$$V_{act} R_W = 24 \text{ V.}$$

$$I_{act} R_W = 24 \text{ mA.}$$

$$I_b \geq \frac{I_c}{\beta} \quad 3.68$$

$$I_b = \frac{10 I_c}{\beta} \quad \text{Para garantizar que el transistor se sature.} \quad 3.69$$

$$\text{Si: } \beta_{Q6} = 100$$

$$I_{b Q6} = 2.4 \text{ mA.} \quad 3.70$$

$$V_{e Q6} = 15V - V_{act} R_W - V_{CE, SAT} \quad 3.71$$

$$V_{e Q6} = -9.1 \text{ V.} \quad 3.72$$

$$R_{40} = \frac{V_{e Q6} - (-15)V}{I_{c Q6}} \quad 3.73$$

$$R_{40} = 246 \Omega$$

$$R_{41} = \frac{15 \text{ V} - 0.6V - (-9.1V.)}{2.4 \text{ mA.}} \quad 3.74$$

$$R_{41} = 9.8 \text{ K}\Omega$$

3.1.7.2.- Diseño del control de falla en la alimentación del campo.

Puesto que en ninguna otra parte del diseño se ha puesto la forma de como se obtiene la alimentación para el campo, es pertinente hacerlo en este subcapítulo.

Como el campo tiene excitación independiente ésta se la hace como indica la figura 3.15

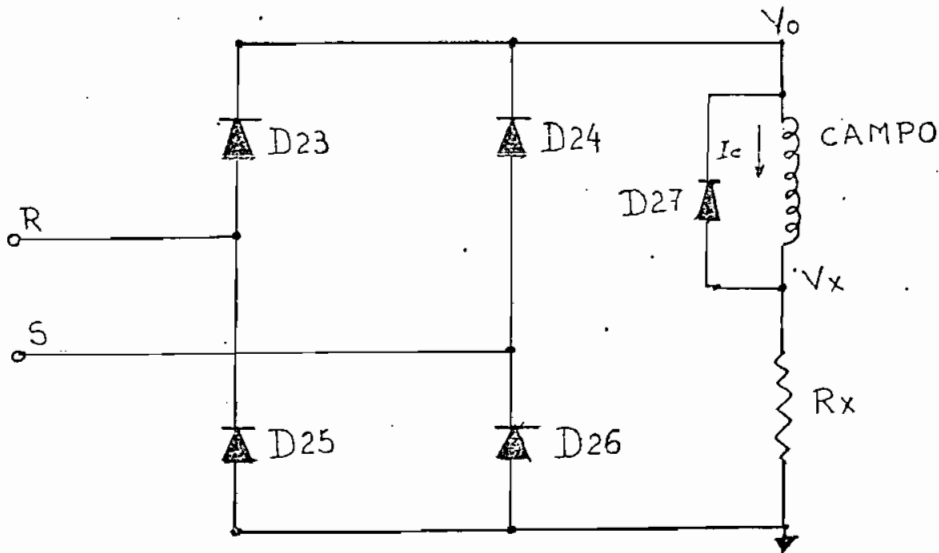


Figura 3.15: Circuito para obtener el voltaje de campo.

Se tiene que el circuito no es más que un -
rectificador de onda completa.

$$\text{En donde: } V_o(\text{med}) = \frac{.2 V_{\text{máx}}}{\pi} = 198 \text{ V} \quad 3.75$$

La resistencia R_x puesta en serie con el de-
vanado de campo nos servirá para poder obtener la -
información de si circula corriente o no por el cam-
po para así determinar si existe o no falla en éste.

$$\text{La corriente de campo es } I_c = 0.45 \text{ A.}$$

Como el valor de la resistencia de campo es-
de $R_c = 432 \Omega$ se tendrá que el valor de R_x no debe-
influir a éste.

$$\text{Se ha tomado } R_x = 5 \Omega$$

Por lo tanto :

$$V_x = \frac{R_x}{I_c} \quad 3.76$$

$$V_x = 5 \Omega \cdot 0.45 \text{ A.}$$

$$V_x = 2.25 \text{ V}$$

En este caso al igual que en el de sobre-velocidad se utiliza el circuito de la figura 3.14, con la variante de que en la entrada positiva del comparador se tendrá V_x en vez de V_T y en la negativa V_1 será:

$$V_1 < V_x$$

$$\text{Si } V_1 = 1V.$$

$$\frac{15}{R'_{36}} - \frac{1}{R'_{37}} \quad 3.77$$

$$R'_{36} = 14 \cdot R'_{37} \quad 3.78$$

$$\text{Si: } R'_{36} = 1 \text{ K}\Omega \quad R_{42} = R'_{36}$$

$$R'_{37} = 14 \text{ K}\Omega \quad R_{43} = R'_{37}$$

El nombre en este caso del relé ya no será R_W sino R_C .

3.1.7.3.- Diseño del control de falla de fuente electrónica.

El circuito de la figura 3.16 nos indica la-

forma de conexión para detectar esta falla.

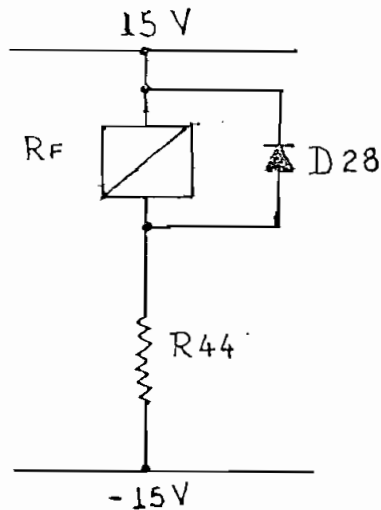


Figura 3.16: Circuito detector de falla en fuente electrónica.

Se tendrá que si falla algunas de las fuentes, el relé R_F se desactivará.

Se tenía que:

$$V_{act} R_F = 24 \text{ V.}$$

$$I_{act} R_F = 24 \text{ mA.}$$

$$R_{44} = \frac{15\text{V} - V_{ac} R_F - (-15)\text{V}}{24 \text{ mA.}} \quad 3.79$$

$$R_{44} = 250 \Omega$$

3.1.7.4.- Diseño de protección de sobre carga del motor.

Al hablar de sobre carga se está hablando de sobre corriente ya que su relación es lineal.

Se tiene que la corriente nominal de la armadura, I_a , es de 20 A., entonces si se sobrepasa ésta ya se puede hablar de sobre corriente.

Para poder detectar si se está sobrepasando la corriente nominal de armadura se utilizó un térmico el mismo que abre o cierra sus contactos auxiliares al sobrepasar el valor fijado en éste, lo cual servirá para desconectar el sistema, y encender el indicador luminoso correspondiente.

El térmico que se usó es el:

Relé HRD 35/ 18 - 26, el cual tiene un rango de variación de 18 a 26 Amp, el mismo que sirve para calibrar al valor de corriente que se desea que actúe.

3.1.7.5.- Diseño del circuito retardador.

Este circuito que está representado en la figura 3.17 , sirve expresamente para retardar el activado del relé R_R .

Su funcionamiento es el siguiente:

El momento que se conecta el interruptor S , o sea el momento que se polariza con ± 15 V al circuito: comienza a cargarse el condensador C_6 , el cual cuando llega a un valor V_1 , hace que el transistor Q_7 comience a conducir, ya que por la resistencia R_{47} circulará la corriente necesaria para este efecto.

Si el interruptor S se abre, el relé al no tener polarización se desactivará, volviendo a su estado inicial.

Mas adelante se indicará en que parte de los circuitos entra la acción de éste retardador.

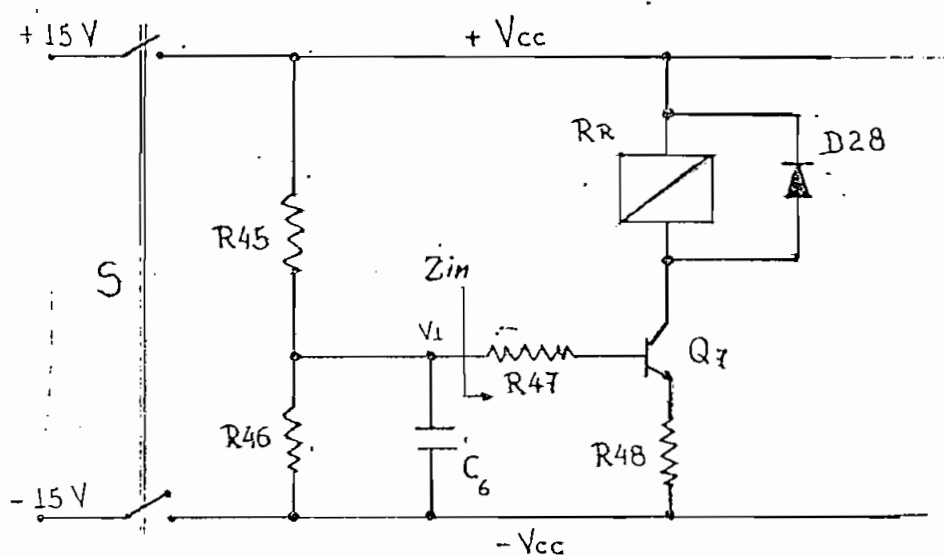


Figura 3.17: Circuito retardador.

Se tenía que:

$$I_{ac} = 24 \text{ mA}$$

$$V_{ac} = 24 \text{ V}$$

$$V_b = -8.5 \text{ V} \quad \text{de (3.72)}$$

$$I_b = 2.4 \text{ mA.} \quad \text{de (3.70)}$$

$$V_1 - V_{b_{Q7}} = I_{b_{Q7}} \cdot R_{47} \quad 3.80$$

$$V_1 = I_{b_{Q7}} R_{47} + V_{b_{Q7}} \quad 3.81$$

V_1 va a ser el voltaje al que tiene que llegar la carga del condensador, C_6 , para que se tenga una corriente de base $I_b = 2.4 \text{ mA}$ y se sature el transistor.

Se tratará de que el valor de V_1 sea lo más alto posible, para tener así mayor tiempo de carga del condensador, para lograr esto se tendrá que bajar el valor de R_{47} .

$$\text{Si } R_{47} = 1 \text{ K}\Omega$$

$$V_1 = 2.4 \text{ mA} \cdot 1 \text{ K}\Omega - 8.5 \text{ V} \quad 3.82$$

$$V_1 = -6.5 \text{ V}$$

El divisor de voltaje formado por R_{45} y R_{46} será el que fije el valor de V_1 .

Asumiendo Z_{in} alta comparada con $R_{45} \parallel R_{46}$
Se tendrá entonces:

$$\frac{V_{cc} - (-V_{cc})}{R_{45} + R_{46}} = \frac{V_1 - (-V_{cc})}{R_{46}} \quad 3.83$$

$$\frac{R_{46}}{R_{45} + R_{46}} = \frac{V_1 + V_{cc}}{2 V_{cc}} \quad 3.84$$

$$\frac{R_{46}}{R_{45} + R_{46}} = \frac{15V - 6.5V}{30V} = 0.2833$$

$$\frac{R_{46}}{R_{45} + R_{46}} = 0.2833 \quad 3.85$$

La ecuación de la carga del condensador C_6 - se obtendrá de la siguiente manera:

$$\frac{V_{cc} - (-V_{cc})}{R_{45} + Z} = \frac{V_1 - (-V_{cc})}{Z} \quad 3.86$$

En donde :

$$Z = \frac{R_{46}}{R_{46} C_6 s + 1} \quad 3.87$$

$$\frac{2 V_{cc}}{R_{45} + Z} = \frac{V_{cc} + V_1}{Z} \quad 3.88$$

$$\text{Si : } 2 V_{cc} = V_p \rightarrow V_p = 30V. \quad 3.89$$

$$\text{y } V_{cc} + V_1 = V_{1r} \rightarrow V_{1r} = 8.5 \quad 3.90$$

Se tendrá entonces:

$$\frac{V_p}{R_{45} + z} = \frac{V_{1'}}{z} \quad 3.91$$

$$\frac{V_p}{s} \cdot \frac{1}{R_{45} + \frac{R_{46}}{R_{46}C_6s+1}} = \frac{V_{1'}(s)}{\frac{R_{46}}{R_{46}C_6s+1}} \quad 3.92$$

$$V_{1'}(s) = \frac{V_p}{R_{45}C_6s} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{R_pC_6}} \quad 3.93$$

$$\text{En donde: } R_p = \frac{R_{45} \cdot R_{46}}{R_{45} + R_{46}} \quad 3.94$$

Se tendrá entonces que:

$$V_{1'}(t) = \frac{R_p}{R_{45}} \cdot V_p \left(1 - e^{-\frac{t}{R_pC_6}} \right) \quad 3.95$$

Y el tiempo de carga estará dado por:

$$t = -R_p \cdot C_6 \ln \left(1 - \frac{V_{1'}}{V_p} \cdot \frac{R_{45}}{R_p} \right) \quad 3.96$$

Se puede observar que depende directamente - de los valores de R_p , C_6 y $V_{1'}$.

Si se desea que el tiempo de carga del condensador sea de $t = 4$ sg o sea el tiempo que se tarda desde que se cierra el interruptor S, hasta que se active el relé R_R .

Se tiene que para conseguir este tiempo, se necesitará que las resistencias R_{45} y R_{46} y el condensador C_6 sean altos.

De la ecuación 3.85 se tendrá que:

$$\frac{R_{46}}{R_{45} + R_{46}} = 0.2833$$

Si ; $R_{46} = 430 \text{ K}\Omega$

Se tiene que: $R_{45} = 1.087 \text{ M}\Omega$

Con lo cual se obtiene que como:

$$R_p = \frac{R_{45} \cdot R_{46}}{R_{45} + R_{46}}$$

$\therefore R_p = 308.2 \text{ K}\Omega$

La ecuación 3.96 quedaría:

$$t = 308.2 \times 10^3 C_6 \ln(0.604) \text{ s/uF.} \quad 3.97$$

$$t = 1.55 \times 10^5 C_6 \text{ s/uF.} \quad 3.98$$

Como: $t = 4 \text{ sg}$

$$C_6 = 25.8 \text{ uF}$$

3.1.8.- Diseño del circuito de mando.

El circuito de mando debe estar diseñado para que cumpla los siguientes requisitos;

- Energizar primero al circuito electrónico.
- Luego de un corto tiempo energizar el circuito de potencia.
- Desconectar el circuito de potencia cuando se presenten cualquiera de las fallas analizadas en el punto 3.1.7.
- Por medio de indicadores luminosos, señalar cual falla existe.

El circuito utilizado se representa en el "Diagrama de Mando". (ver pág)

El contactor C_2 será el que comanda el circuito de potencia; por lo cual deberá tener tres

contactos principales, éstos contactos deben soportar la circulación de como mínimo 20 Amperios.

El contactor C_1 sirve para energizar la placa electrónica, por sus contactos, a diferencia del contactor C_2 , circula poca corriente.

Haciendo uso de los contactos de los relés - (vistos en 3.1.7) se efectivizan las protecciones, los cuales son:

- Los contactos d_{11} y d_{12} son del relé R_F
- Los contactos d_{31} y d_{32} son del relé R_W
- Los contactos d_{41} y d_{42} son del relé R_C
- Los contactos d_2 son del relé R_R .

Funcionamiento del circuito:

El instante en que se acciona el pulsante de "encendido", se activa al contactor C_1 .

Luego de un tiempo de 4sg, que es el tiempo dado por el retardador, se activa el contactor C_2 , quedando de esta forma, hasta que se presione el pulsante de "apagado", o exista alguna falla, de las ya mencionadas.

El instante que se activa el contactor C_2 , el circuito completo queda conectado, y listo para operar.

El equipo se desconectará si se suscitan los siguientes problemas.

Si por causa de sobre-carga del motor, el térmico T se acciona, el equipo se desconectará totalmente, quedándose encendida la lámpara h_1 .

Si existe sobre-velocidad en el motor, se activará el relé R_W y el contactor C_2 se desconectará, quedándose encendida la lámpara h_3 .

Si hay alguna falla en el campo (por ejemplo desconexión de éste por rotura de un cable), el relé R_C se desactivará, desconectándose el contactor C_2 , y se queda prendida la lámpara h_4 .

Si la fuente de 15 voltios, sufre algún daño, el relé R_F se desactivará, y por lo tanto el contactor C_2 , quedando encendida la lámpara h_2 .

Para cuando se presentan cualquiera de éstas anomalías, y se queda prendida alguna de las lámparas indicadoras, habrá que presionar el pulsante-

de "apagado (desbloqueo), quedando , el tablero en la posición inicial de desconectado.

Luego de determinar y solucionar el problema, se podrá reiniciar la prueba.

Cuando se haya terminado de hacer las pruebas y se desee apagar el equipo, bastará con presionar el pulsante de "apagado", desconectando con ello todo el equipo.

3.2.- Rangos de funcionamiento de los circuitos y motor.

Alimentación principal

3 ϕ 220V + Neutro

Fuente de voltaje dc

- Voltaje de entrada 110 Vac 50/60 Hz \pm 10%
- Voltaje de salida \pm 15 Vdc \pm 2%
- Corriente de salida máxima:

Para fuente + 15 V \rightarrow 1 A.dc

Para fuente -15 V \rightarrow 1 A.dc

- Consumo de corriente

Fuente + 15 V 300 mA.dc

Fuente - 15 V 120 mA.dc

Motor:

Voltaje de armadura: 0 - 230 V dc

Corriente de armadura: 0 - 20 A

Velocidad: 0 - 1350 RPM

Voltaje campo: 190 V dc

Corriente de campo: 0.45 A.

Protecciones

Voltaje sobre velocidad 9 V.

Térmico (rango de corriente) 18 - 276 A (calibración a escoger)

Breakers 30 A.

Contactores y lámparas

Voltaje alimentación 220 V.ac

Contactor C_2 I máx 35 A.Contactor C_1 I máx 2 A.

3.3.- Instrumentos de medida.

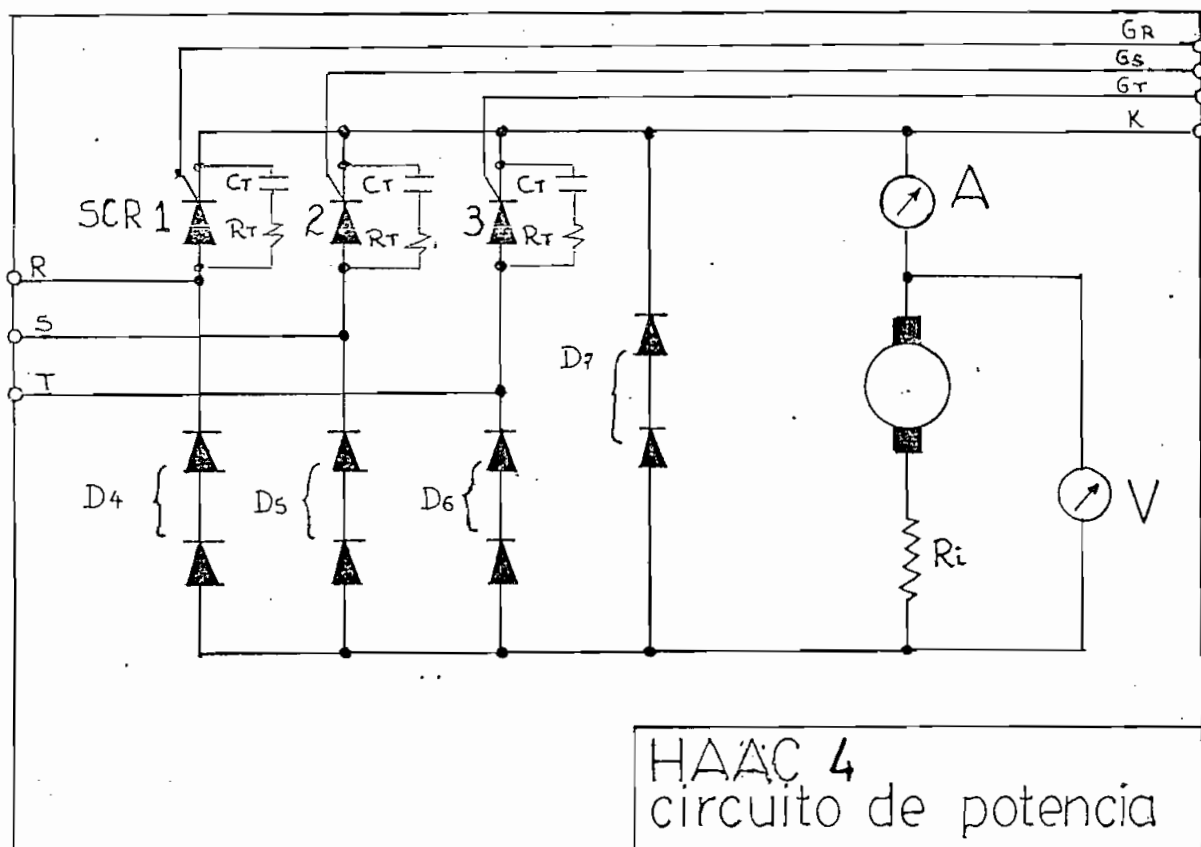
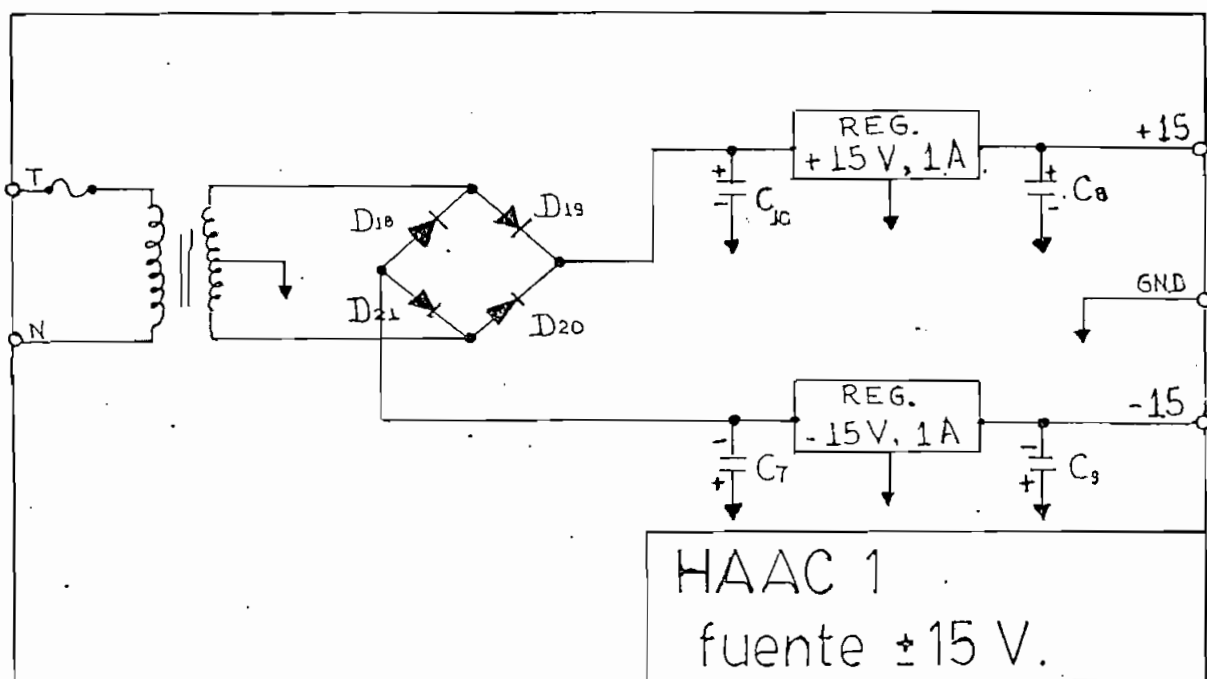
El equipo tiene tres instrumentos de medida, por medio de los cuales se podrá determinar los parámetros de funcionamiento del motor, para determinada velocidad y carga.

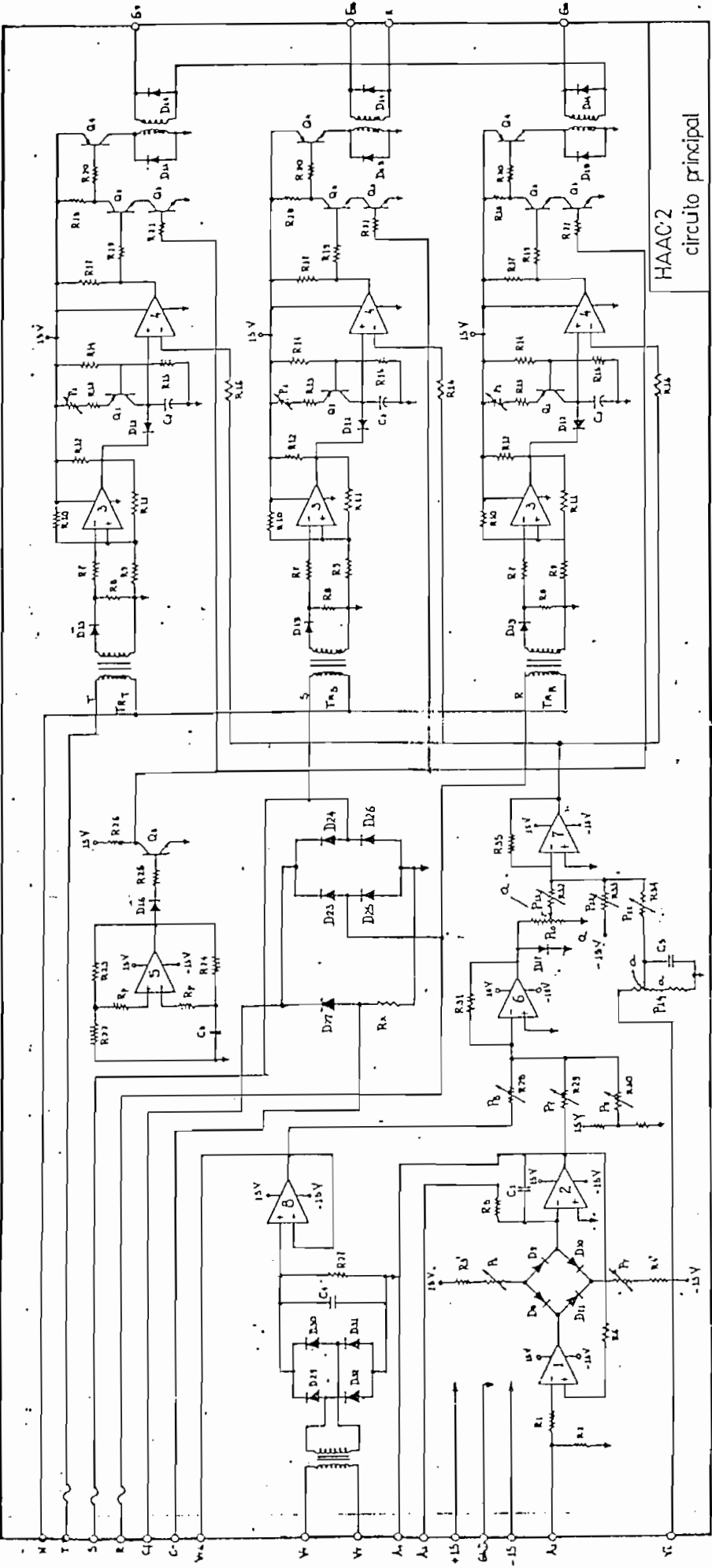
Consta de:

- Un voltímetro DC (0 - 300 V), el cual mide el voltaje de la armadura del motor.
- Un Amperímetro DC (0 - 25 A.), el cual mide la corriente de armadura del motor.
- Un voltímetro AC (0 - 15 V.), el cual mide la velocidad del motor, (calibrado en RPM).

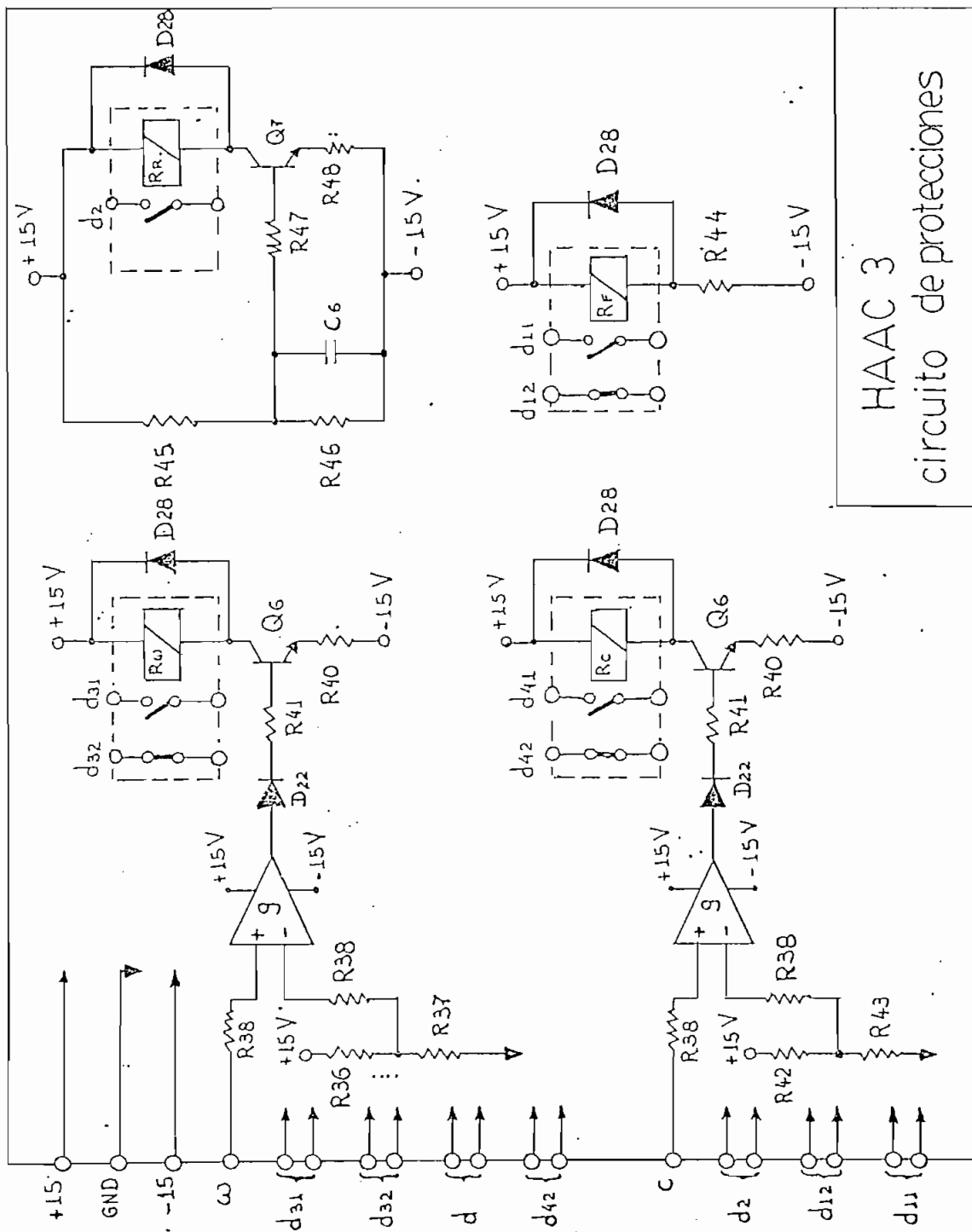
3.4.- Diagramas finales de los circuitos del equipo.

A continuación se encuentran recopilados en forma de bloques, todos los circuitos que conforman el equipo.





HAAC2
circuito principal



HAAC 3
circuito de protecciones

3.5.- Lista total de elementos usados.

ELEMENTO	NOMBRE	TIPO
SCR 1	SCR	50 RIA 80
SCR 2	SCR	50 RIA 80
SCR 3	SCR	50 RIA 80
D 4	diodo	ECG 5994
D 5	diodo	ECG 5994
D 6	diodo	ECG 5994
D 7	diodo	ECG 6040
REG.+15	regulador	ECG 968
REG.-15	regulador	ECG 969
D8, D9, D10		
D11, D12,		
D13, D14,		
D15, D16,		
D17, D22,	diodo	ECG 112.
D29, D30,		
D28, D31,		
D32.		

D23, D24,		
D25, D26,		
D27, D18,	diodo	1000V/1A.
D19, D20,		
D21.		

1, 2, 6, 7, 5	amp. ope	ECG 778A.
8, 9	racional	

ELEMENTO	NOMBRE	TIPO
3, 4 $TR_T, TR_S,$ TR_R	comparador transforma dor.	ECG 834 110/6 V
TR_W	transform.	1:1.5
C_T	condensador	.1uF/630V
C_1	condensador	25 uF.
C_2	condensador	.1 uF.
C_3	condensador	.1 uF.
C_4	condensador	2 uF.
C_5	condensador	100 uF.
C_{10}, C_7	condensador	2200 uF.
C_8, C_9	condensador	10 uF.
C_6	condensador	25 uF.
C_2	contactor	SC 35
C_1	contactor	2A/5a/3b
T	térmico	HRD 35
Q_2	transistor	TCG 123A
Q_1	transistor	TCG 288
Q_3	transistor	TCG 123A
Q_4	transistor	TCG 187
Q_5	transistor	2N 3704
Q_6	transistor	2N 3391
$R_F, R_W,$ R_C, R_R	relé	24V

RESISTENCIA (K Ω)		
SIMBOLO	CALCULADA	UTILIZADA
R ₁	47.00	47.00
R ₂	1000.00	1000.00
R ₃	800.00	100+1000*
R ₄	800.00	100+1000*
R ₅		0.22
R ₆	47.00	47.00
R ₇	2.20	2.20
R ₈	4.70	4.70
R ₉	1.00	1.00
R ₁₀	24.00	22.00
R ₁₁	100.00	100.00
R ₁₂	25.00	20.00
R ₁₃	13.83	10+5*
R ₁₄	7.1	6.60
R ₁₅	40.00	43.00
R ₁₆		1.00
R ₁₇	20.00	20.00
R ₁₈	0.96	1.00
R ₁₉	18.80	22.00
R ₂₀	10.00	10.00
R ₂₁	19.20	22.00
R ₂₂	10.00	10.00
R ₂₃	10.00	10.00
R ₂₄	0.45	0.2+5*
R ₂₅	19.20	19.00

RESISTENCIA (K Ω)		
SIMBOLO	CALCULADA	UTILIZADA
R ₂₆	0.19	0.20
R ₂₇		430.00
R ₂₈	28.00	100.00 *
R ₂₉	35.40	100.00 *
R ₃₀	56.00	100.00 *
R ₃₁	56.00	56.00
R ₃₂	56.00	100.00 *
R ₃₃	336.00	1000.00 *
R ₃₄	56.00	100.00 *
R ₃₅	56.00	56.00
R ₃₆	10.00	10.00
R ₃₇	6.70	6.70
R ₃₈		3.00
R ₄₀	0.25	0.30
R ₄₁	9.80	10.00
R ₄₂	1.00	1.00
R ₄₃	14.00	15.00
R ₄₄	0.25	0.30
R ₄₆	430.00	430.00
R ₄₅	1087.00	1200.00
R ₄₇	1.00	1.00
R ₄₈	0.25	0.30
R _T	60.00	60/10w
R _i	0.2 Ω	.2 Ω /100w
R _x	5 Ω	5 Ω /5w

* Potenciómetros

C A P I T U L O C U A R T O

PRUEBAS Y CALIBRACIONES

CAPITULO IV4.1.- PRUEBAS Y COMPARACION DE RESULTADOS.

Puesto que el equipo quedó calibrado para que el motor funcione en un rango desde 200 a 1300 RPM - todas las pruebas que se realizaron están dentro de este rango; y con el objeto de demostrar el funcionamiento del circuito de control, se han tomado fotos de las formas de onda de las principales etapas del control.

En la foto 4.1 se tiene la esencia de la comparación del voltaje de referencia, V_x , y una de las rampas; pudiéndose notar en la parte inferior la posición del inicio de los pulsos, estos son los que entran en una de las compuertas de los SCR's. Como se dijo en el análisis teórico el tren de pulsos inicia en el instante en que $V_x = V$ rampa y finaliza cuando termina la rampa, esto se observa claramente.

En la foto 4.2 se tiene el voltaje de armadura del motor a una cierta velocidad constante, en la parte inferior se tiene el voltaje para el motor sin carga, y en la parte superior se tiene el voltaje para el motor con cierta carga. Se puede notar la va-

riación del inicio de la conducción.

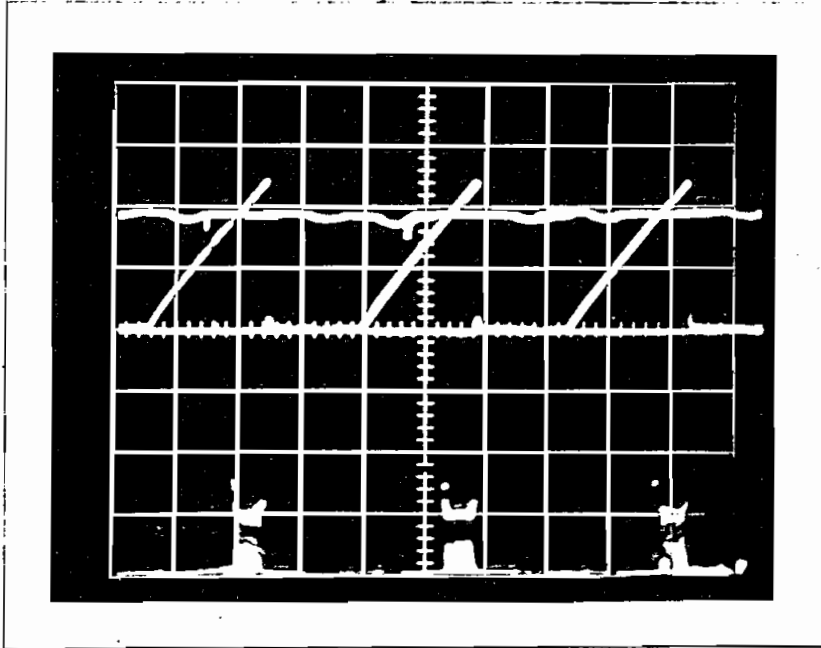


Foto 4.1: Obtención de los trenes de pulsos de disparo.

Arriba: Comparación de la señal de referencia V_x con la rampa.

Abajo: Trenes de pulsos.

Vertical (arriba): 5 V/div.

Vertical (abajo): 0.5 V/div.

Horizontal: 5 msg/div.

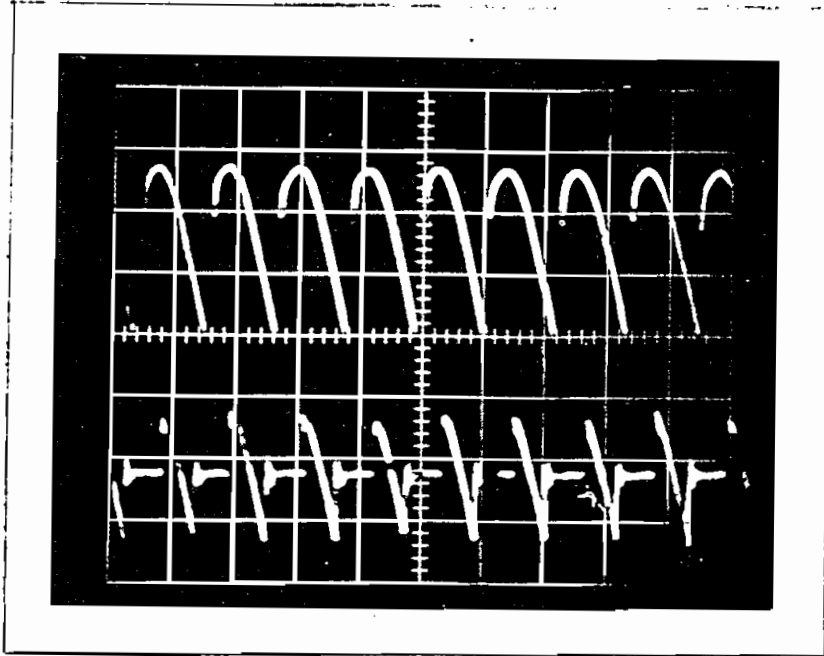


Foto 4.2: Voltaje de armadura del motor.

Arriba: Motor con cierta carga.

Abajo: Motor sin carga.

Vertical: 100 V/div.

Horizontal: 5 msg/div.

En las fotos 4.3 y 4.4 se tienen el crecimiento de la velocidad en el arranque, y el decrecimiento de ésta en la parada del motor, en la parte superior se tiene con el motor a plena carga y en la de abajo sin carga.

Como se puede observar el motor arranca o para en casi el mismo tiempo, independientemente de la carga a la que se le ponga.

Esto es una gran ventaja ya que siempre funcionará igual para cualquier carga .

Se tiene que el tiempo de arranque desde $W=0$ a $W=W_{max}$ es de aproximadamente 11 sg.

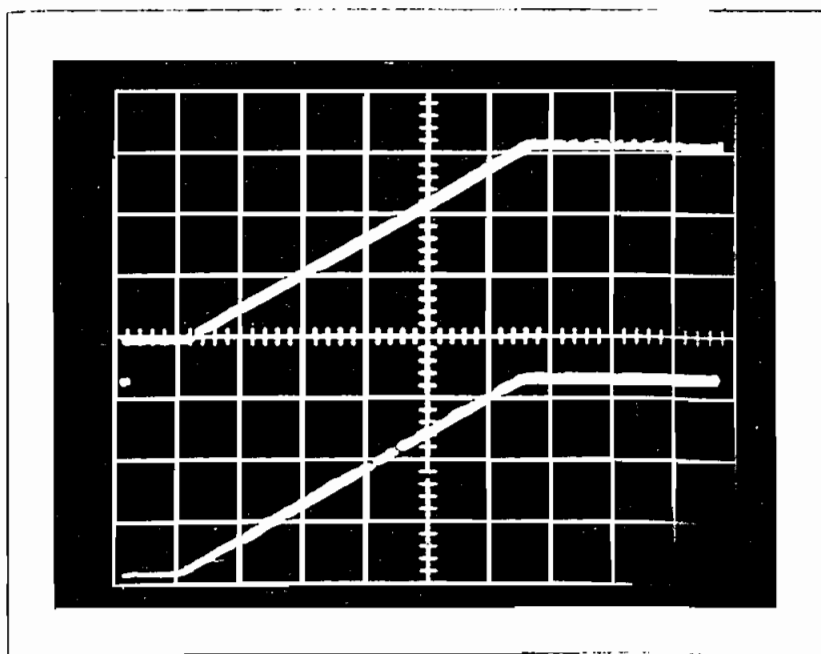


Foto 4.3: Variación de la velocidad en el arranque - hasta llegar a la velocidad máxima.

Arriba: Con máxima carga.

Abajo: Sin carga.

Vertical: 2 V/div.

Horizontal: 2 sg/div.

El tiempo de parada desde velocidad máxima a velocidad cero es también de aproximadamente 11 sg. .

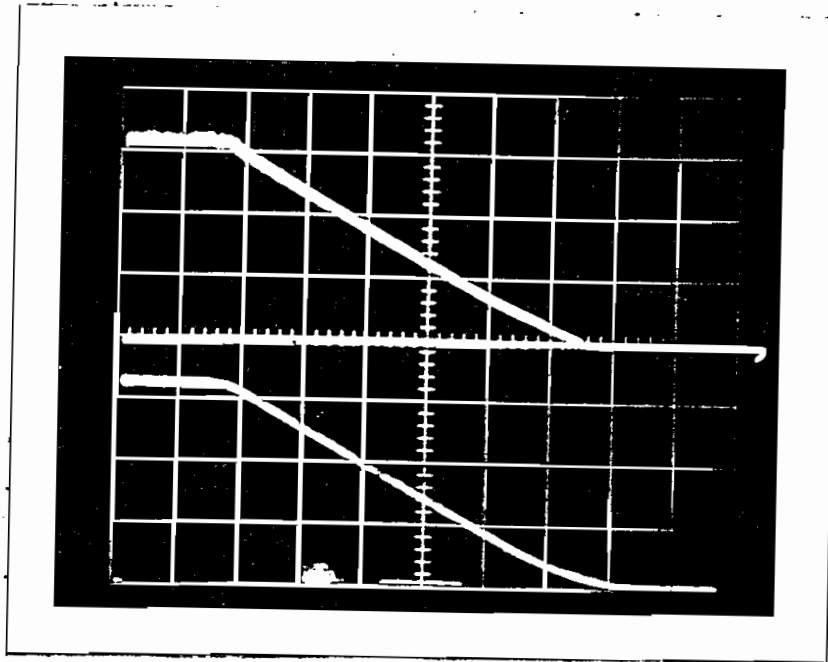


Foto 4.4: Variación de la velocidad en la parada del motor, desde máxima velocidad.

Arriba: Con máxima carga.

Abajo: Sin carga.

Vertical: 2 V/div.

Horizontal: 2 sg/div.

En las fotos 4.5 y 4.6 se tiene la forma de la corriente de arranque, hasta llegar a velocidad máxima. La foto 4.5 es tomada en el punto de realimentación, es decir ya filtrada. La foto 4.6 es tomada desde la resistencia puesta en serie con la armadura del motor.

En la parte superior de las dos fotos se tiene el motor con máxima carga y en la parte de abajo sin carga.

Para poder obtener el valor de la corriente de arranque se deberá usar la foto 4.6, que es la que se la tomó desde la resistencia, el valor de ésta es 0.2 ohmios.

Para el valor de la corriente de arranque sin carga se tiene que $V_p = 1.5 \text{ V}$ entonces: $I \text{ arranque (sin carga)} = 7.5 \text{ Amp.}$

El valor de la corriente de arranque con carga se lo calculará tomando sólo el pico inicial ya que es obvio que la corriente siga subiendo conforme aumenta la velocidad para cuando el motor está con carga. $V_p = 0.7 \text{ V}$ entonces: $I \text{ arranque (con carga)} = 3.5 \text{ Amp.}$

En la foto 4.7 se tiene la respuesta del sistema a cambios abruptos de carga, teniéndose el inicio sin carga, luego plena carga y luego sin carga; se tomó para distintas velocidades.

Como se puede notar la velocidad permanece casi constante para cuando hay cambios bruscos de

carga, teniéndose que en forma general para casi todos los casos el tiempo de estabilización es de mas o menos 1sg.

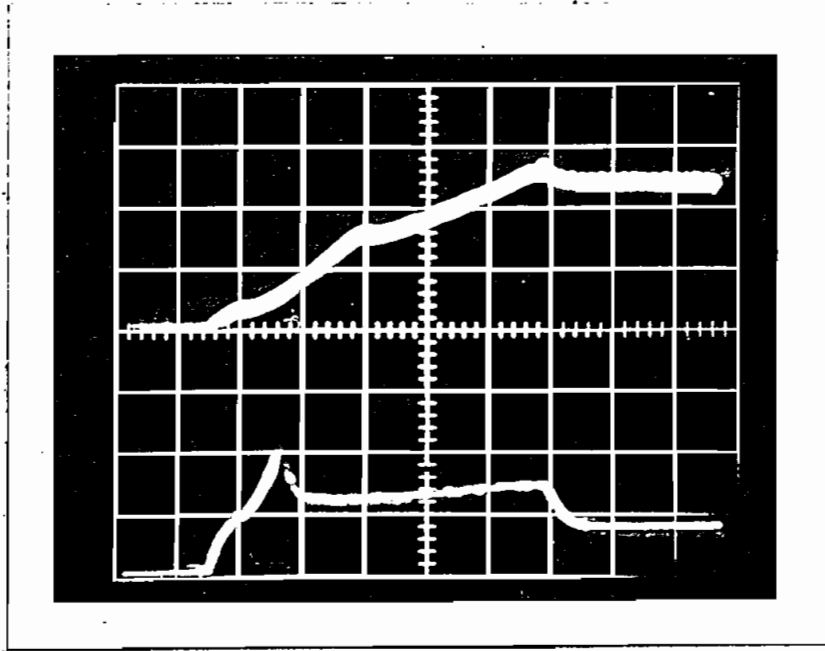


Foto '4.5: Corriente de arranque (después del filtro)

Arriba: Con máxima carga.

Abajo: Sin carga.

Vertical (arriba): 0.5 V/div.

Vertical (abajo): 0.2 V/div.

Horizontal: 2 sg/div.

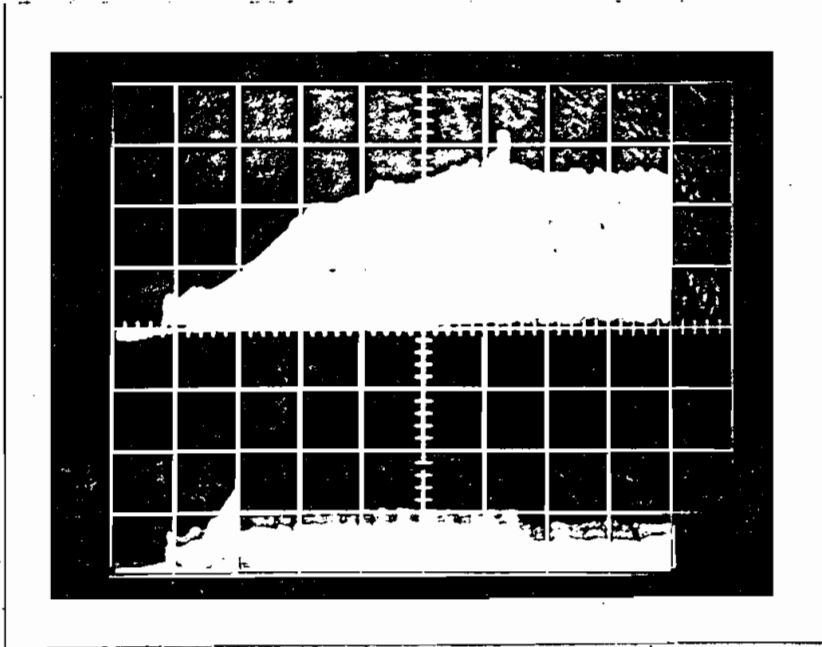


Foto 4.6: Corriente de arranque hasta llegar a la velocidad máxima.

Arriba: Con máxima carga.

Abajo: Sin carga.

Vertical: 1 V/div.

Horizontal: 2 sg/div.

Resistencia: 0.2 ohmios.

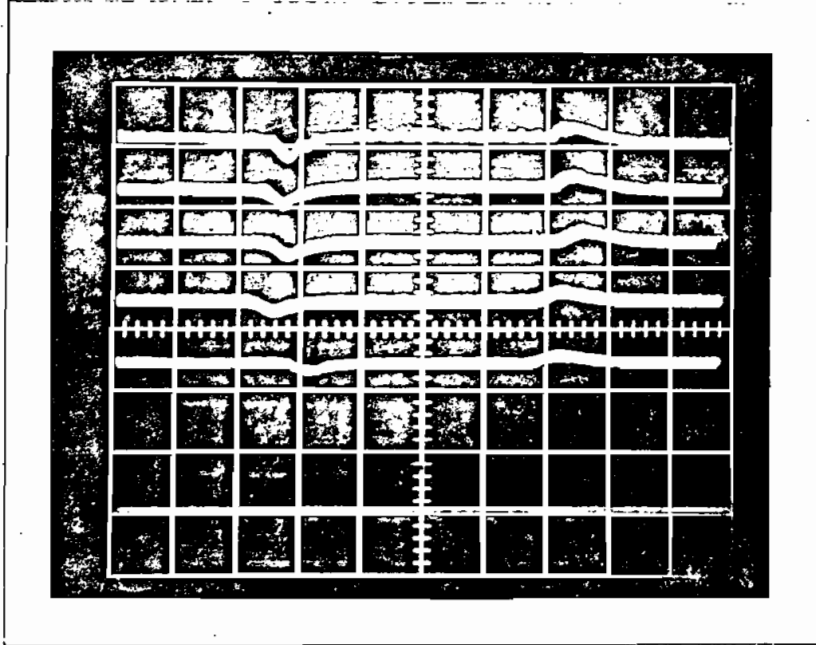


Foto 4.7: Respuesta de velocidad a cambios abruptos de carga (minima - máxima - minima).

Vertical: 1 V/div = 210 RPM/div.

Horizontal: 1 sg/div.

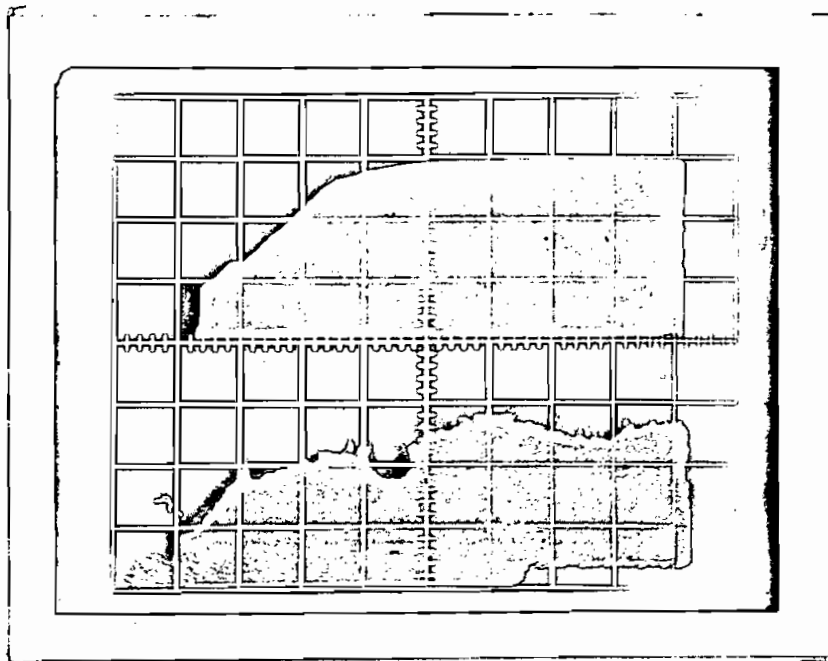


Foto 4.8: Voltaje de armadura en el arranque hasta velocidad máxima.

Arriba: Con máxima carga.

Abajo : Sin carga.

Vertical: 100 V/div.

Horizontal: 2 sg/V.

La foto 4.8 indica la forma de variación del voltaje de armadura con carga y sin ella desde el arranque hasta alcanzar la velocidad máxima.

4.1.1.- Pruebas realizadas.

En los cuadros 4.1 a 4.6 se tienen tabulados los datos de voltaje de armadura, corriente de armadura y velocidad para distintas cargas al eje del motor, teniéndose que, para cada caso se escogió, por medio del potenciómetro " Regulador de velocidad", un valor de velocidad inicial.

En el cuadro 4.7 se tiene, para diferentes velocidades, los datos de las lecturas del voltímetro que mide la velocidad del motor.

Estos datos servirán para obtener las curvas de velocidad, voltaje de armadura y corriente de armadura, todos en función del torque al eje del motor; para que por medio de éstas y los datos de los cuadros, se pueda determinar:

- Las variaciones de la velocidad inicial cuando la carga al eje del motor varía.

- La potencia de entrada y salida del motor para diferentes velocidades y cargas, y la forma de como obtenerla.

VELOCIDAD	TORQUE	VOLTAJE ARMADURA	CORRIENTE ARMADURA
(ω) RPM	(T) Kg·cm	(V_a) VOLTIOS	(I_a) AMPERIOS
1300	3.83	160.5	1.8
1293	21.68	161.0	3.6
1290	36.99	162.0	4.9
1290	61.22	162.5	7.0
1290	86.73	164.7	9.3
1298	110.97	165.3	11.5
1298	132.65	166.0	13.8
1300	136.48	166.2	14.4
1302	166.25	168.0	16.6
1310	203.21	172.0	20.0

Cuadro 4.1; Características de funcionamiento del motor para diferentes cargas; con velocidad inicial $\omega_0 = 1300$ RPM.

VELOCIDAD	TORQUE	VOLTAJE ARMADURA	CORRIENTE ARMADURA
(W) RPM	(T) Kg cm	(Va) VOLTIOS	(Ia) AMPERIOS
1200	3.83	145.5	1.8
1192	16.84	145.5	3.2
1190	42.60	147.3	5.4
1194	68.37	149.9	7.6
1195	95.15	152.0	10.0
1199	132.64	153.0	13.8
1199	151.79	154.0	15.3
1200	176.28	155.0	17.5
1205	200.77	157.5	19.8
1203	210.71	158.0	20.7

Cuadro 4.2; Características de funcionamiento del motor para diferentes cargas; con velocidad inicial $W_0 = 1200$ RPM.

VELOCIDAD	TORQUE	VOLTAJE ARMADURA	CORRIENTE ARMADURA
(W) RPM	(T) Kg cm	(Va) VOLTIOS	(Ia) AMPERIOS
1000	3.83	124.9	1.6
998	16.58	124.9	3.0
990	44.90	125.2	5.4
990	69.90	127.5	7.4
995	88.78	129.8	9.2
998	106.38	130.2	10.8
998	121.17	131.0	12.4
995	126.53	131.0	13.3
996	161.91	133.2	16.2
999	217.35	136.4	21.3

Cuadro 4.3: Características de funcionamiento del motor para diferentes cargas; con velocidad inicial $W_0 = 1000$ RPM.

VELOCIDAD	TORQUE	VOLTAJE ARMADURA	CORRIENTE ARMADURA
(ω) RPM	(T) Kg cm	(V_a) VOLTIOS	(I_a) AMPERIOS
900	3.83	110.0	1.6
893	19.13	110.2	3.2
891	38.78	111.5	4.9
895	69.90	114.9	7.6
898	94.13	116.0	9.8
899	116.33	118.0	11.9
899	131.51	119.1	13.4
900	156.76	121.0	15.7
902	174.49	122.3	17.4
905	202.30	124.6	19.9

Cuadro 4.4: Características de funcionamiento del motor para diferentes cargas; con velocidad inicial $\omega_0 = 900$ RPM.

VELOCIDAD	TORQUE	VOLTAJE ARMADURA	CORRIENTE ARMADURA
(W) RPM	(T) Kg cm	(Va) VOLTIOS	(Ia) AMPERIOS
800	3.83	100.0	1.6
792	21.43	100.5	3.4
790	39.54	100.7	4.9
790	66.96	103.0	7.3
791	94.39	105.2	9.7
792	110.97	106.0	11.3
795	143.42	108.1	14.5
799	162.50	109.4	16.3
802	190.82	108.8	18.7
804	209.74	112.2	20.6

Cuadro 4.5: Características de funcionamiento del motor para diferentes cargas; con velocidad inicial $W_0 = 800$ RPM.

VELOCIDAD	TORQUE	VOLTAJE ARMADURA	CORRIENTE ARMADURA
(ω) RPM	(T) Kg cm	(V_a) VOLTIOS	(I_a) AMPERIOS
600	3.83	74.9	1.5
592	15.94	75.0	2.8
587	38.27	75.3	4.8
582	66.07	77.0	7.1
580	85.71	79.0	8.8
582	101.02	79.3	10.6
585	130.87	80.8	13.4
589	150.77	81.9	15.2
602	193.62	83.7	18.9
603	200.64	84.2	19.8

Cuadro 4.6; Características de funcionamiento del motor para diferentes cargas; con velocidad inicial $\omega_0 = 600$ RPM.

VELOCIDAD	VOLTAJE TACOMETRO	REGULADOR VELOCIDAD
(W)	(Vt)	
1300	7.00	9.425
1200	6.50	8.685
1100	5.99	7.860
1000	5.50	7.200
900	4.90	6.400
800	4.30	5.550
700	3.70	4.893
600	3.18	3.920
500	2.50	3.409
0	0.00	0.000

Cuadro 4.7: Lecturas del voltímetro_{ac} y del potenciómetro regulador de velocidad para distintas velocidades del motor.

- La calibración del voltímetro ac que mide la velocidad del motor.

- La calibración del potenciómetro "Regulador de velocidad."

4.1.2.- Análisis de resultados.

Como se puede observar en los cuadros 4.1 a 4.6 y en el gráfico 4.1, la velocidad para todos los casos varía muy poco al poner carga al eje del motor.

En el cuadro 4.8 se tiene para cada velocidad inicial, W_0 , la velocidad mínima y el porcentaje de variación máxima de la velocidad que se presenta para cuando el motor esté con carga.

En general el motor tiene un pequeño porcentaje de variación en la velocidad al haber variaciones de la carga.

Si se comparan los gráficos 2.1 y 4.1, se puede notar la diferencia de respuesta de la velocidad del motor a variaciones de carga.

VELOCIDAD INICIAL	VELOCIDAD MINIMA	ERROR
W_0 (RPM)	$W(\text{min})$ (RPM)	(máx) %
1300	1290	0.77
1200	1190	0.83
1000	990	1.01
900	891	1.01
800	790	1.27
600	580	3.45

Cuadro 4.8: Porcentaje de variación máxima de la velocidad.

Como se puede observar en el gráfico 4.2 la variación del voltaje de armadura para variaciones de carga es muy lineal para todas las velocidades y se podría decir que tienen la misma pendiente.

Si comparamos los gráficos 4.2 y 2.4, se tiene que las variaciones del voltaje de armadura para compensar las variaciones de torque y mantener la velocidad constante, son muy similares.

En los gráficos 4.3 al 4.8 se observa que la

variación de corriente a variaciones de torque es lineal e igual para todas las velocidades , lo cual es una gran ventaja ya que por medio de estos datos se puede obtener una ecuación de la corriente en función del torque lo que servirá para obtener la potencia de salida del motor para cualquier velocidad y carga con sólo saber el valor de corriente de armadura y la velocidad del motor.

4.1.2.1.- Determinación de potencias de entrada y salida.

Tomando todos los datos de corriente y torque de los cuadros 4.1 al 4.6 se tiene que la recta de aproximación que se obtiene, por el método de mínimos cuadrados está dada por:

$$I_a = 1.3721 + 0.0915T \quad 4.1$$

En donde:

I_a = corriente de armadura (Amperios)

T = Torque al eje del motor (Kg cm).

Para poder determinar la potencia de salida del motor, P_s , se tiene que:

$$P_s = T \cdot W \quad 4.2$$

$$P_s \text{ (Hp)} = \frac{T \text{ (Kg cm)} \cdot W \text{ (RPM)}}{72662.35} \quad 4.3$$

De las ecuaciones 4.1 y 4.3 se tiene que:

$$P_s \text{ (Hp)} = \frac{W \text{ (RPM)}}{72662.35} (10.9259 I_a \text{ (A)} - 14.9913) \quad 4.4$$

La potencia eléctrica, P_E , que se entrega al motor está dada por:

$$P_E = V_a \cdot I_a + V_c \cdot I_c \quad 4.5$$

En donde $V_c \cdot I_c$ es constante e igual a:

$$K = V_c \cdot I_c = 190 \text{ V} \cdot 0.45 \text{ A} = 85.5 \text{ W} = 0.11 \text{ Hp} \quad 4.6$$

Quedando así:

$$P_E \text{ (Hp)} = \frac{V_a \text{ (V)} \cdot I_a \text{ (A)}}{745.7} + K \quad 4.7$$

Se tiene entonces que para determinar la potencia eléctrica y la potencia mecánica de salida del motor, basta con tomar las medidas de voltaje de armadura, corriente de armadura y velocidad del motor, (haciendo uso de los medidores acoplados), y aplicar las ecuaciones 4.4 y 4.7.

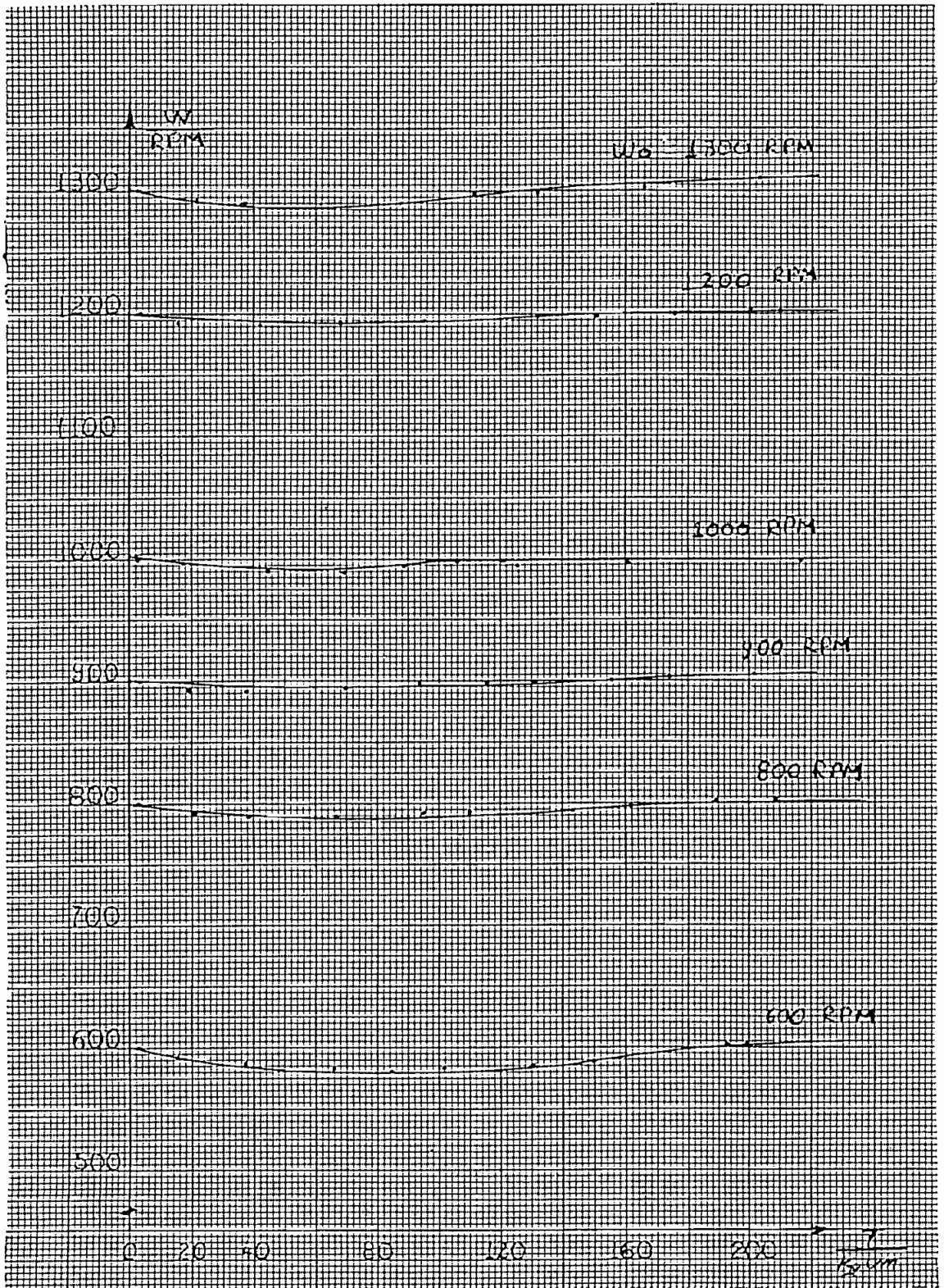


Gráfico 4.1: Variación de la velocidad para distintas - cargas al eje del motor.

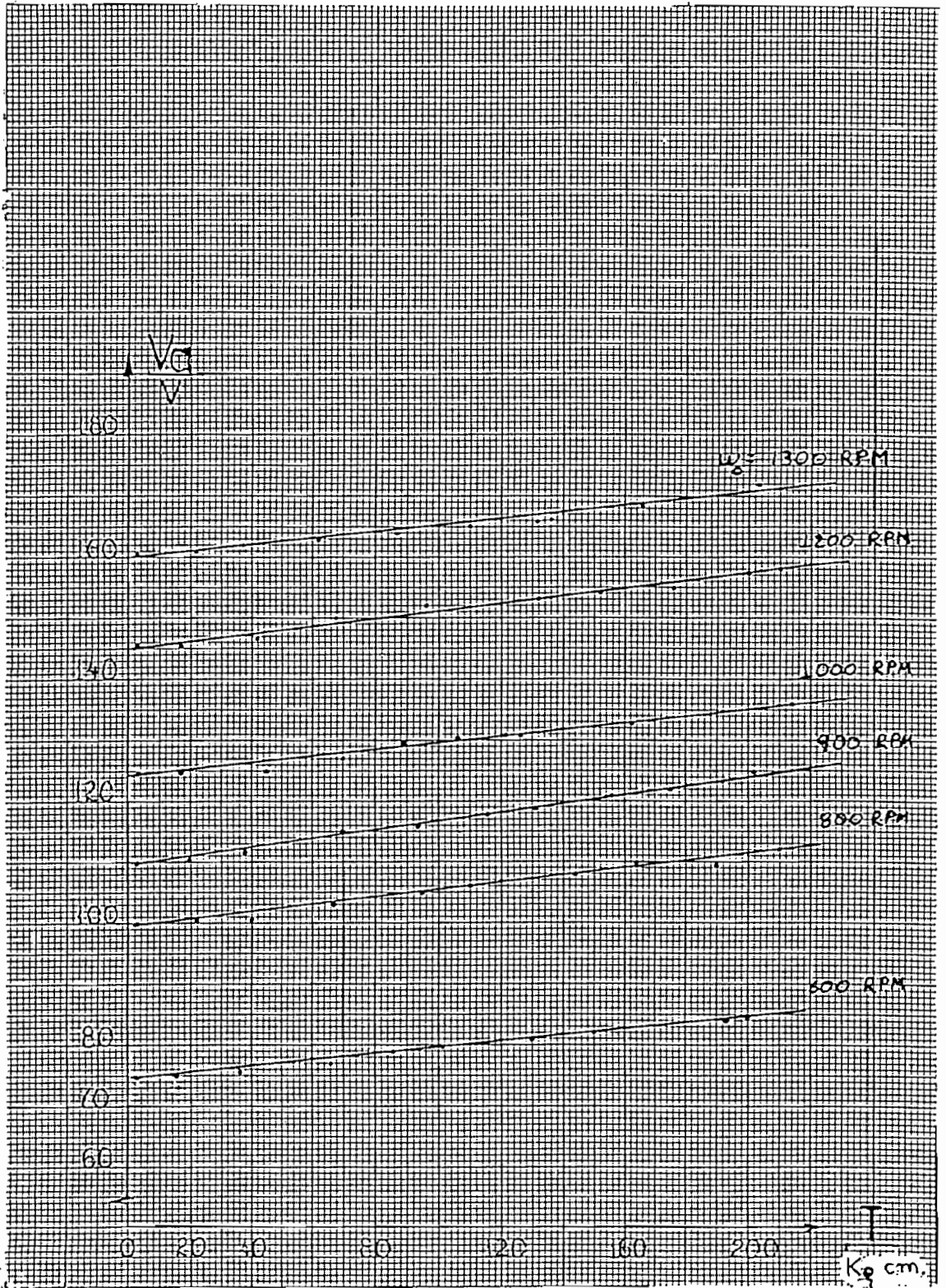


Gráfico 4.2: Voltaje de armadura en función del torque a velocidad constante.

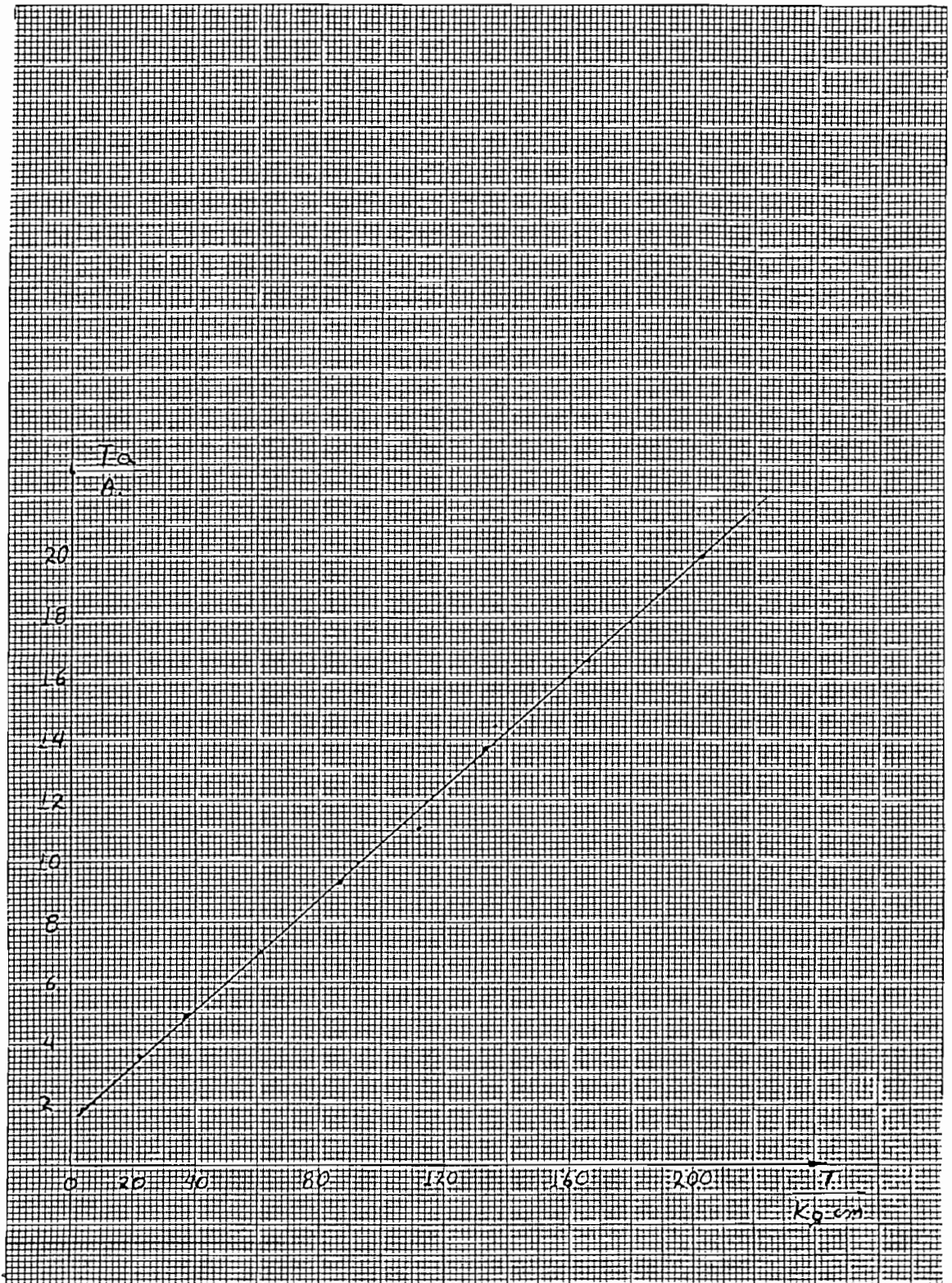


Gráfico 4.3: Corriente de armadura en función del torque a velocidad constante $\omega_0 = 1300$ RPM.

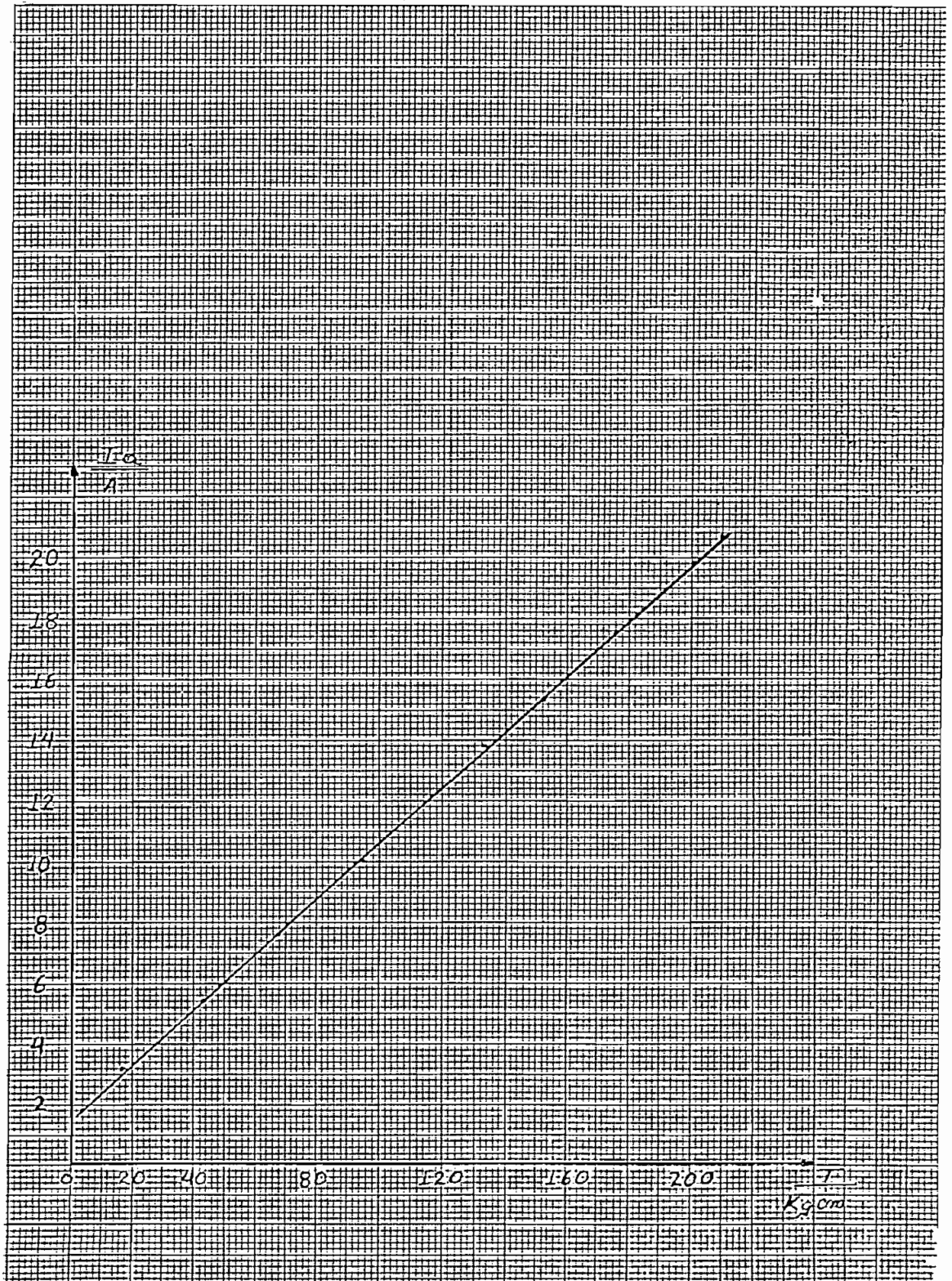


Gráfico 4.4: Corriente de armadura en función del torque a velocidad constante $\omega_0 = 1200$ RPM.

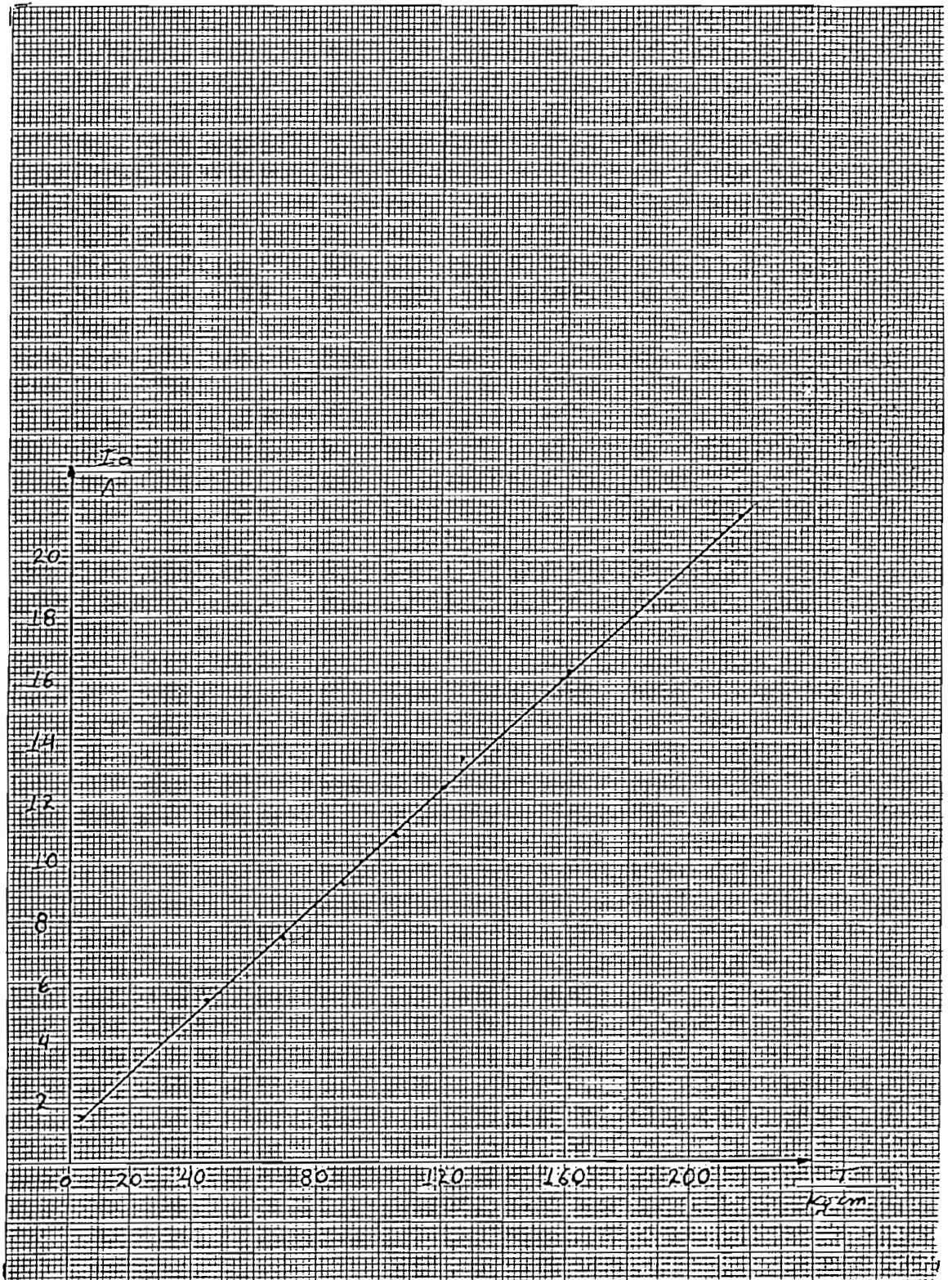


Gráfico 4.5: Corriente de armadura en función del torque a velocidad constante $\omega_0 = 1000$ RPM.

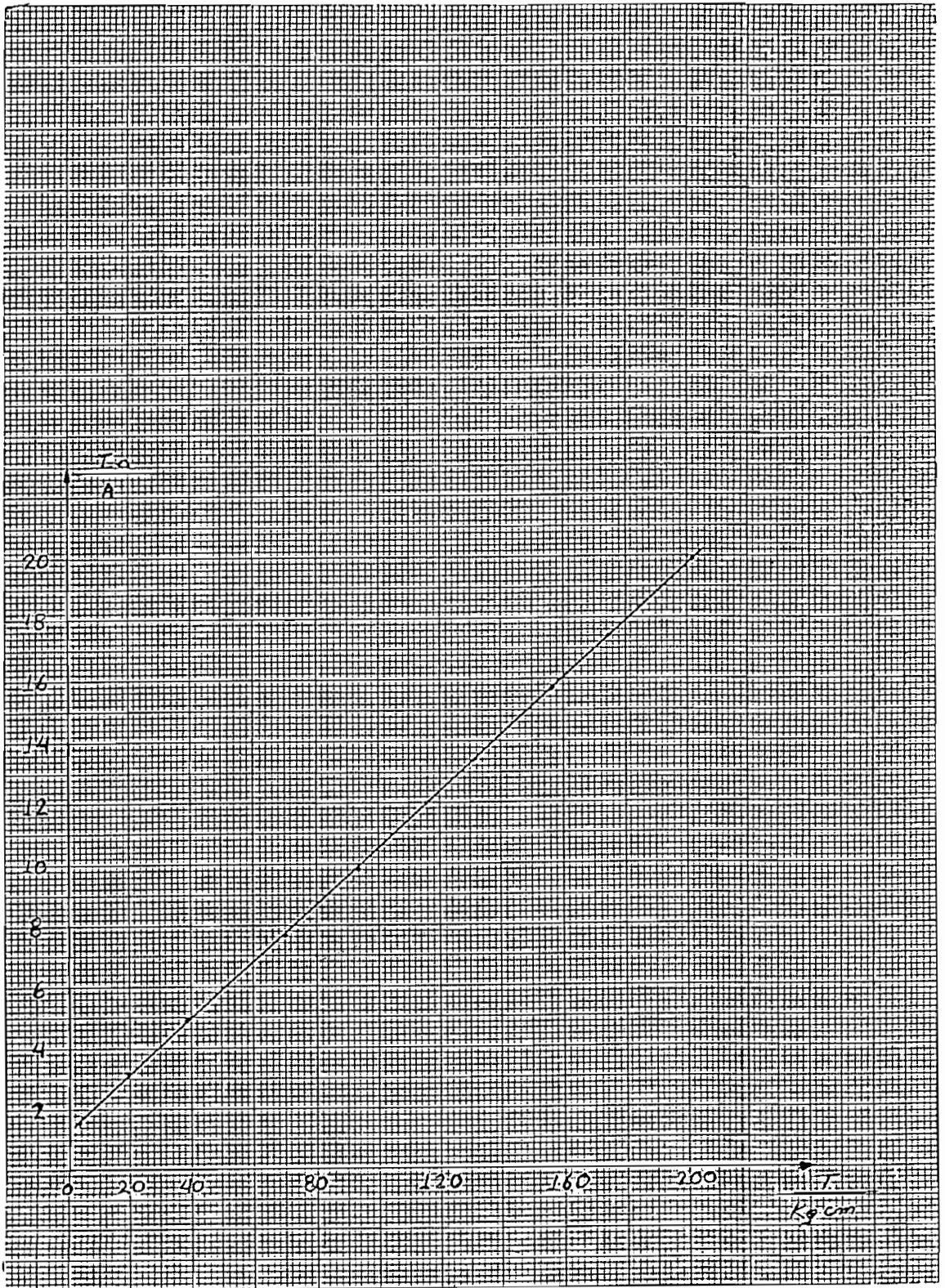


Gráfico 4.6: Corriente de armadura en función del torque a velocidad constante $\omega_0 = 900$ RPM.

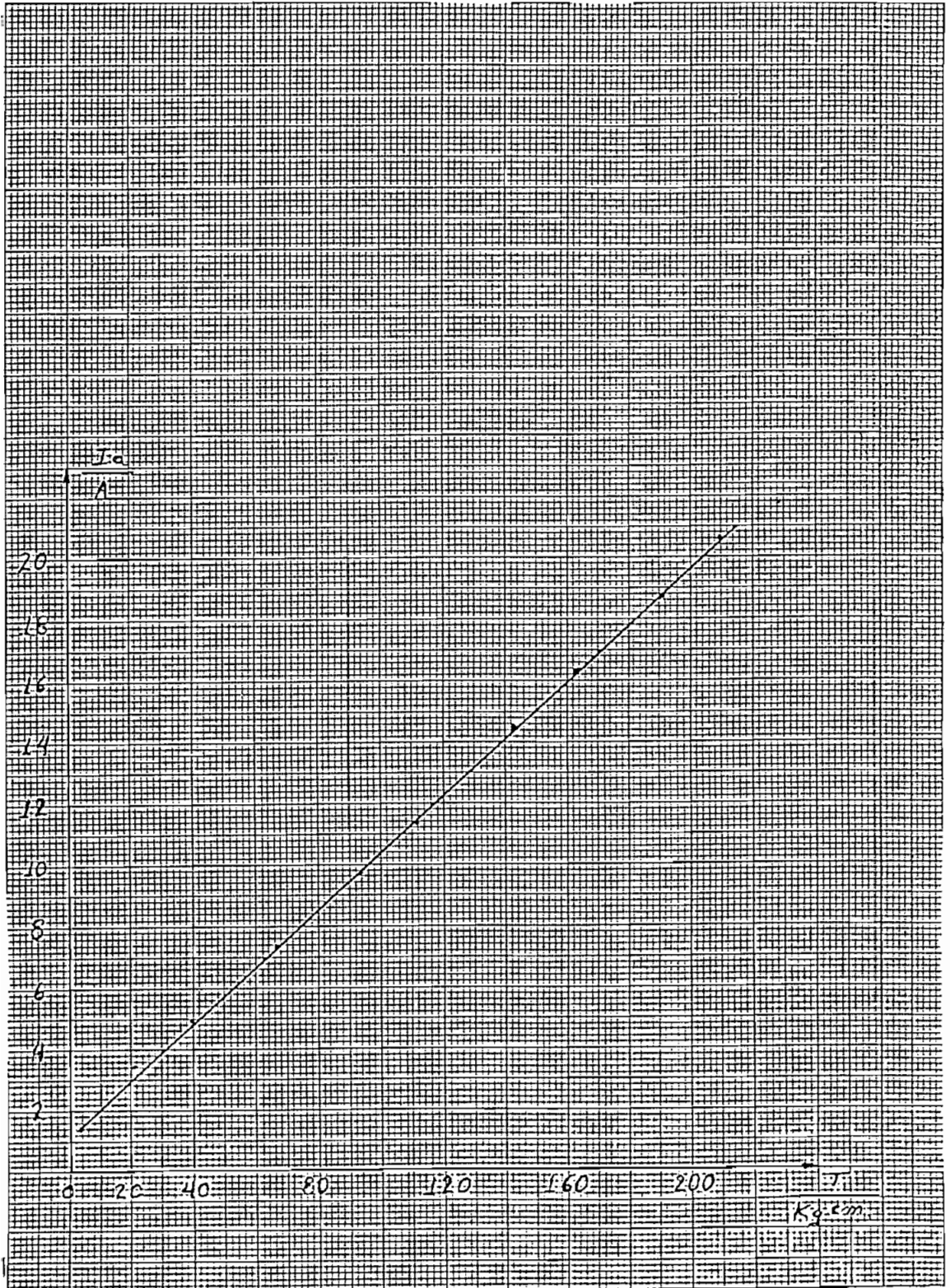


Gráfico 4.7: Corriente de armadura en función del torque a velocidad constante $\omega_0 = 800$ RPM.

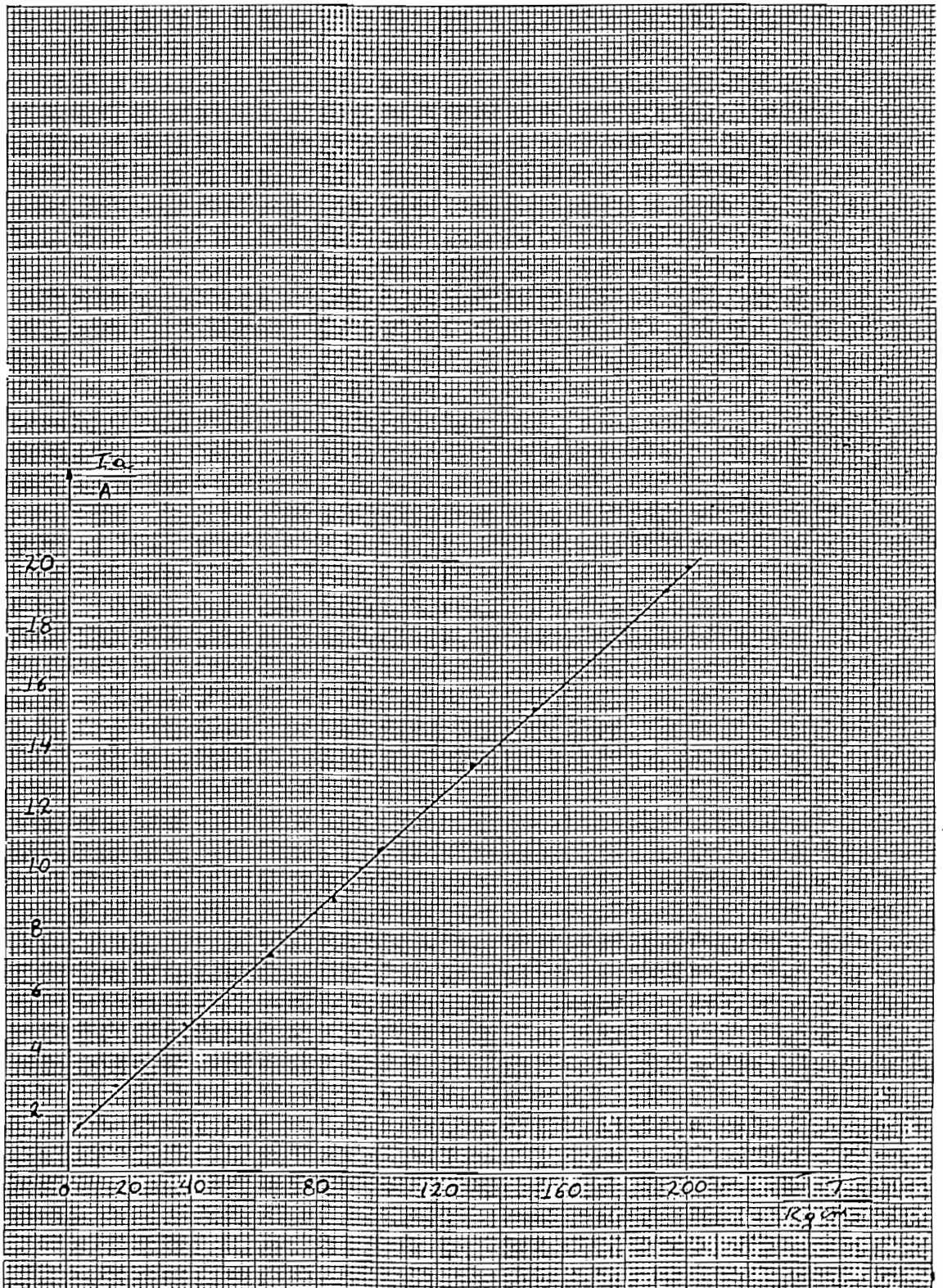


Gráfico 4.8: Corriente de armadura en función del torque a velocidad constante $\omega_0 = 600$ RPM.

4.2.- Calibración de escalas en medidores acoplados.

Se tiene que los medidores acoplados son, como se dijo en el subcapítulo 3.2:

- Un voltímetro DC (Que mide el voltaje de armadura)
- Un amperímetro DC (Que mide la corriente de armadura).
- Un voltímetro AC (Que mide la velocidad del motor)

Las escalas del voltímetro DC y del amperímetro DC no necesitan calibración.

En cambio la escala del voltímetro AC debe ser calibrada para que su indicación de en RPM, y que represente la velocidad del motor.

Por otro lado también se vió conveniente calibrar el potenciómetro de regulación de velocidad para que la lectura del número de vueltas que marca represente en forma directa la velocidad del motor.

Para esto, haciendo uso de los datos del cuadro 4.7, se obtienen los gráficos 4.9 y 4.10, y las ecuaciones 4.8 y 4.9:

$$V_{ac} = 0.005 W - 0.035 \quad 4.8$$

$$P_r = 0.00734 W - 0.2113 \quad 4.9$$

En donde:

V_{ac} = Lectura del voltímetro AC en [voltios:]

W = Velocidad del motor en [RPM]

P_r = Número de vueltas del potenciómetro de referencia.

y de 4.8 y 4.9 se tiene:

$$W = 183.636 V_{ac} - 6.451 \quad 4.10$$

$$W = 136.2367 P_r - 28.79146 \quad 4.11$$

De lo cual se concluye, sin cometer mucho error; que a la escala del voltímetro AC hay que multiplicarla por 183.6 para así tener la velocidad en RPM.

Para la obtención de las medidas exactas, se tendrá que usar las ecuaciones 4.8 y 4.9 ó 4.10 y 4.11 o los gráficos 4.9 y 4.10.

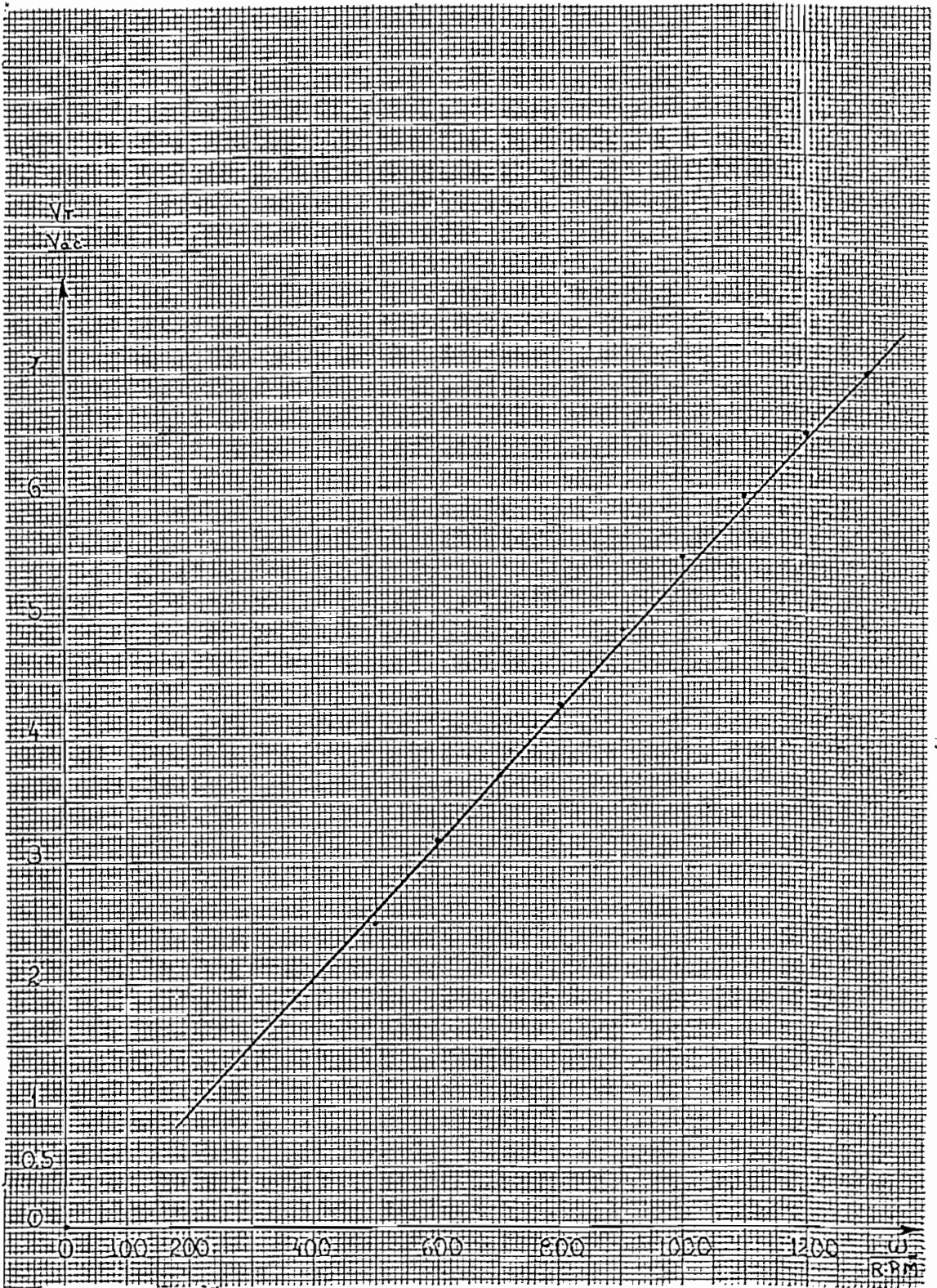


Gráfico 4.9: Voltaje AC en función de la velocidad del motor. Para calibración de la escala del voltímetro AC.

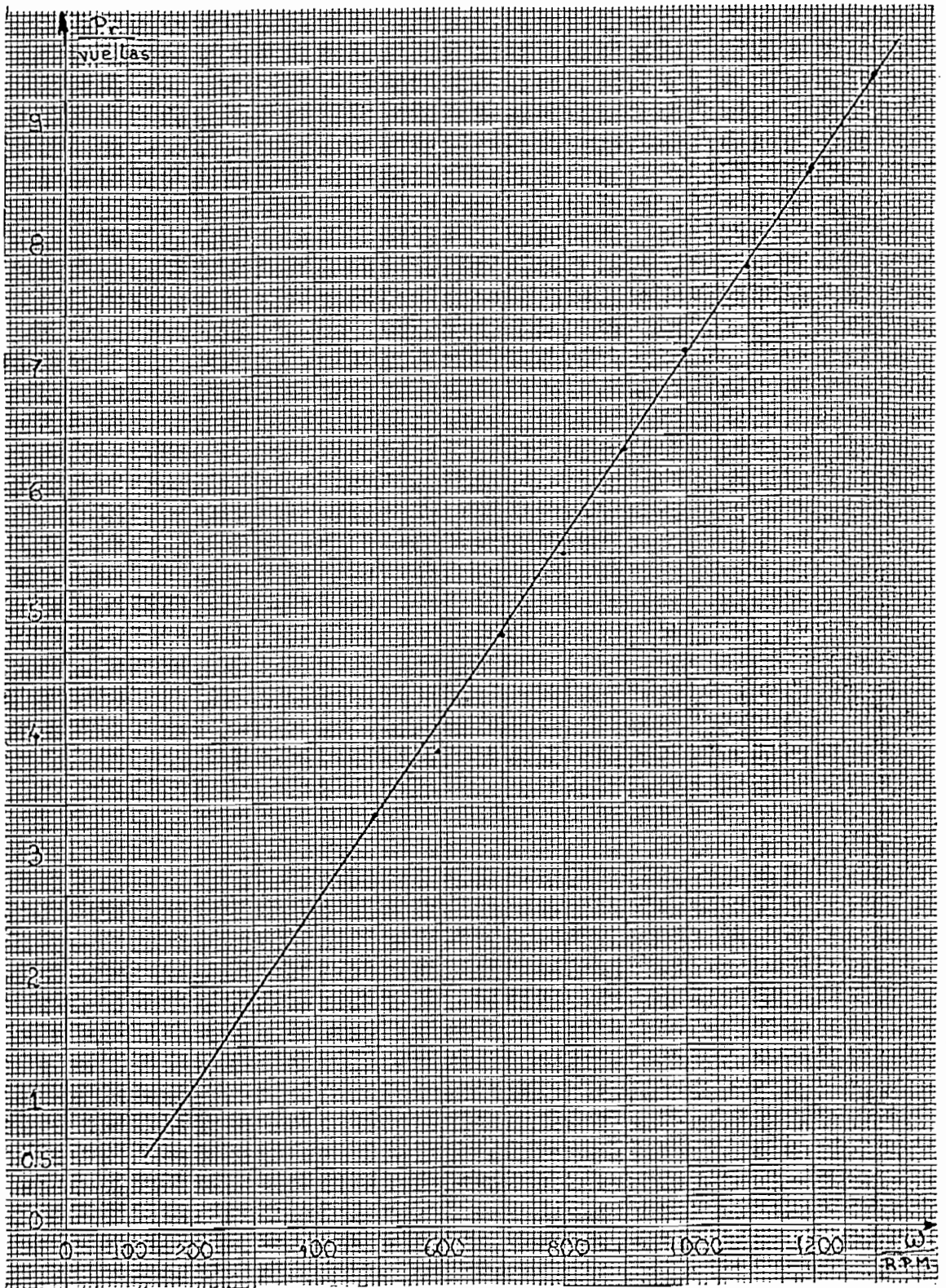


Gráfico 4.10: Lectura del potenciómetro regulador de velocidad en función de la velocidad del motor.

COMENTARIOS Y CONCLUSIONESConclusiones:

El objetivo principal que se planteó al iniciar este trabajo fue el de diseñar e implementar un equipo que pueda determinar la potencia a velocidad constante, controlada, de motores que necesitarían cualquier tipo de máquinas.

Y luego de haberlo finalizado, se puede decir que se lo ha cumplido, puesto que el equipo se diseñó e implementó en forma total, cumpliendo con todos los requerimientos de precisión y estabilidad que se necesitaban.

Es así como lo demuestran las pruebas que se realizaron; teniendo que para los rangos de velocidad recomendados se tuvo una gran exactitud en cuanto a mantener la velocidad escogida, constante, para variaciones de carga, ya que su error máximo de variación oscila alrededor del 1% .

El sistema responde a cambios bruscos de carga, desde la mínima a la máxima y viceversa en cualquier velocidad (dentro del rango establecido) sien

do su tiempo de estabilización de 1 segundo.

El control de arranque elimina completamente el pico de corriente existente en los motores al ser encendidos.

Las protecciones funcionan en buena forma evitando daños en el equipo cuando se sobrepasan las recomendaciones o existe alguna falla.

Por último se establecieron ecuaciones precisas con las cuales se pueden determinar las potencias eléctrica y mecánica del motor, haciendo uso de las lecturas obtenidas de los medidores acoplados; cumpliéndose con esto el requerimiento de poder determinar la potencia más óptima del motor que necesita cualquier máquina.

Comentarios:

El equipo no sólo sirve para medir la potencia de motores, también tiene aplicación en cualquier sistema en donde se desee mantener la velocidad de un motor constante a variaciones de carga, así por ejemplo:

- Vehículos eléctricos, como automóviles, ferrocarriles, etc , el torque es variable pues depende del peso que se ha puesto sobre el vehículo, en este caso el control de arranque y velocidad se justifican completamente, ya que no sería conveniente que el motor arranque bruscamente.
- En ascensores, en donde al igual que en el ejemplo anterior, la carga es variable, debiendo funcionar siempre a una misma velocidad, independientemente de ésta, en este caso se puede aplicar el control de velocidad realizado en el presente trabajo, etc.

En la ejecución del trabajo se tuvieron algunas limitaciones en cuanto a la consecución de algunos elementos, es así que por ejemplo no se pudo conseguir ningún tipo de tacómetro apto para acoplar al equipo, en vista de éste problema, se utilizó un dínamo de bicicleta, el cual luego de analizar su respuesta, resultó muy apropiado para los fines que tenía.

El tiempo que se ocupó para la realización de éste trabajo fue de más o menos unas 1600 horas.

El costo aproximado del equipo, sin tomar en cuenta el motor, es de unos 35000 sucres.

Este trabajo por el hecho de que se implemento con todos los acabados pertinentes me ha servido de mucho ya que no sólo gané experiencia en cuanto a lo teórico sino también en la forma de construcción e implementación.

APENDICE IDESCRIPCION DE LAS ECUACIONES DE VOLTAJE MEDIO PARA
RECTIFICACION TRIFASICA CONTROLADA.

El análisis que se presenta a continuación se centrará expresamente a encontrar el voltaje medio en la carga, que para nuestro caso es un motor, es decir carga R - L - E.

El estudio se hará para P pulsos, en donde -
si:

$P = 3 \rightarrow 3$ pulsos \rightarrow Rectificación de media onda

$P = 6 \rightarrow 6$ pulsos \rightarrow Rectificación de onda completa.

El caso de la rectificación de onda completa semi controlada, tiene como particularidad de que - se la puede analizar como un sistema de tres pulsos o seis pulsos según cual fuera el ángulo de retardo.

En la figura I₁ se tiene el circuito para -
rectificador controlado de P pulsos con carga R-L-E

En donde:

$$V_{AN_{MAX}} = V_{BN_{MAX}} = \dots = V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2} V \quad \text{I.1}$$

$$V_{AN} = \sqrt{2} V \text{ sen } \omega t \quad \text{I.2}$$

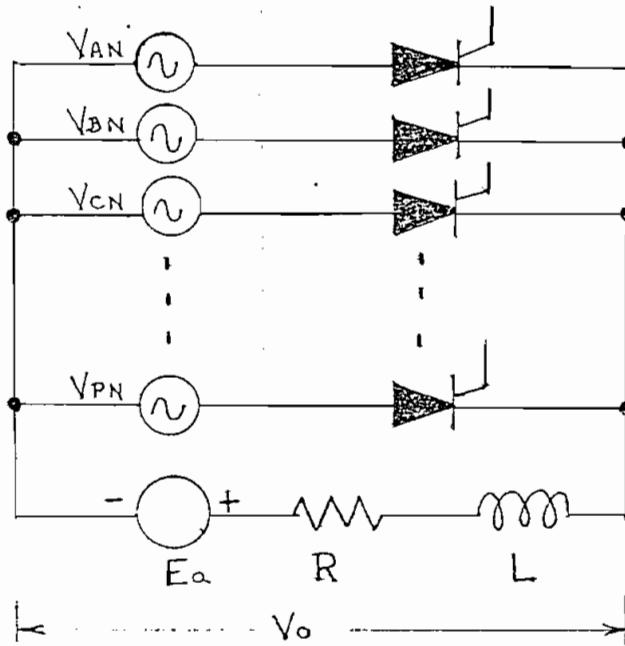


Figura I₁: Rectificador controlado de P pulsos.

En la figura I₂ se tiene las formas de onda del voltaje de salida en función del ángulo de disparo, α_1 ; ángulo de extinción, α_e , y de la FEM, E_a .

En donde:

$$\alpha_0 = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{P} = \text{mínimo ángulo de disparo.} \quad \text{I.3}$$

$\alpha =$ ángulo de retardo.

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \alpha \quad \text{Desde el cero} \quad \text{I.4}$$

El valor del voltaje medio de salida está dado por:

$$V_o = \frac{1}{T} \int V(wt) \, dwt \quad \text{I.5}$$

$$V_o = \frac{P}{2\pi} \left[\int_{\alpha_1}^{\alpha_e} \sqrt{2} V \, \text{sen } wt \, dwt + \int_{\alpha_e}^{\alpha_1 + \frac{2\pi}{P}} E_a \, dwt \right] \quad \text{I.6}$$

$$V_o = \frac{P}{2\pi} \left[\sqrt{2}V (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_e) + E_a \left(\alpha_1 + \frac{2\pi}{P} - \alpha_e \right) \right] \quad \text{I.7}$$

Lo que faltaría es saber que valor tiene α_e , el cual viene dado por la siguiente ecuación trascendental:

$$\frac{\sqrt{2} V}{Z} \operatorname{sen}(\alpha_e - \phi) + \left[\frac{E_a}{R} - \frac{\sqrt{2} V}{Z} \operatorname{sen}(\alpha_1 - \phi) \right] e^{-\frac{R}{\omega L}(\alpha_1 - \alpha_e)} = \frac{E_a}{R}$$

I.8

En donde:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad \text{y} \quad R = \text{resistencia armadura}$$

$$\phi = \operatorname{arc.tg} \frac{\omega L}{R} \quad L = \text{inductancia armadura}$$

E_a = fuerza contra electromotriz del motor

V = voltaje de entrada

Se podrán presentar casos particulares, en los que, dependiendo de los valores de α_1 , E_a , α_e se tendrá conducción continua o discontinua.

Así por ejemplo:

$$\text{Si } E_a < V_x$$

Se tendrá que E_a no influye a la forma de conducción.

$$\text{Si } \alpha_1 \leq \pi - \frac{2\pi}{P} \quad \text{se tendrá conducción continua.}$$

Teniéndose que:

$$\alpha_e = \alpha_1 + \frac{2\pi}{P} \quad \text{I.9}$$

Quedando:

$$V_o = \frac{P}{2\pi} \left[\sqrt{2} V (\cos \alpha_1 - \cos(\alpha_1 + \frac{2\pi}{P})) \right] \quad \text{I.10}$$

$$\text{Pero: } \alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{P} + \alpha \quad \text{I.11}$$

$$\therefore V_o = \frac{P}{2\pi} \left[\sqrt{2} V \left(\cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{P} + \alpha\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{P} + \alpha + \frac{2\pi}{P}\right) \right) \right] \quad \text{I.12}$$

$$V_o = \frac{P}{2\pi} \sqrt{2} V \left[\text{sen}\left(\alpha - \frac{\pi}{P}\right) - \text{sen}\left(\alpha + \frac{\pi}{P}\right) \right]$$

$$\therefore V_o = \frac{P \sqrt{2} V}{\pi} \text{sen} \frac{\pi}{P} \cos \alpha \quad \text{I.13}$$

$$\text{Para } \alpha_1 < \pi - \frac{2}{P} \quad \text{y } E_a < V_x$$

(conducción continua).

Para rectificación controlada de media onda
(P) = 3 se tendrá :

$$\alpha_o = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{P} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3} = \frac{\pi}{6} \quad (\text{mínimo-})$$

ángulo de disparo)

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{6} + \alpha \quad \text{I.14}$$

$$V_o = \frac{3}{2\pi} \left[\sqrt{2} V (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_e) + E_a \left(\alpha_1 + \frac{2\pi}{3} - \alpha_e \right) \right] \quad \text{I.15}$$

y para el ejemplo analizado:

$$V_o = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V \cdot \sin \frac{\pi}{3} \cos \alpha$$

$$V_o = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} V \cos \alpha \quad (\text{conducción continua}) \quad \text{I.16}$$

para: $\alpha \leq \frac{\pi}{3}$

Para rectificación controlada de onda completa: (P) = 6 se tendrá entonces:

$$\alpha_o = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{P} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{6} = \frac{\pi}{3} \quad (\text{mínimo ángulo de disparo})$$

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{3} + \alpha \quad \text{I.17}$$

$$V_o = \frac{3}{\pi} \left[\sqrt{2} V (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_e) + E_a \left(\alpha_1 + \frac{\pi}{3} - \alpha_e \right) \right] \quad \text{I.18}$$

Y para el ejemplo

$$V_o = \frac{6\sqrt{2}V}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \cos \alpha$$

$$V_o = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} V \cos \alpha \quad (\text{conducción continua}) \quad \text{I.19}$$

$$\text{Para:} \quad \alpha \leq \frac{2\pi}{3}$$

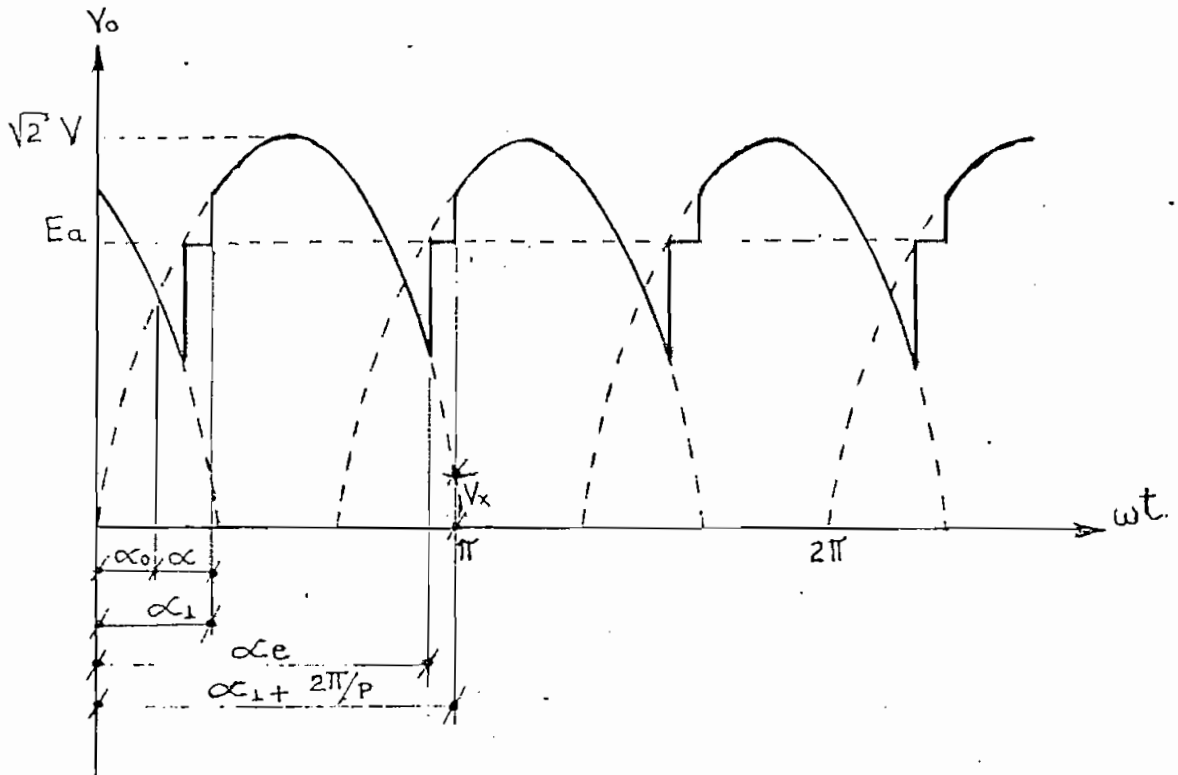


Figura I₂ ; Formas de onda para rectificación con -
trollada de P pulsos.

Para rectificación semicontrolada de onda -
completa como se dijo en el punto 1.2.2 para ángu -
los de retardo menores de 60° se tiene seis pulsos -
y para ángulos de retardo mayores de 60° se tiene -
tres pulsos.

Para ángulos de retardo mayores de 60° las ecuaciones del funcionamiento son las mismas que para el rectificador controlado de media onda (tres-pulsos) ya analizado anteriormente.

Para ángulos de retardo menores de 60° se tiene que el valor del voltaje medio a la salida y de la ecuación trascendental varían un poco de los ya estudiados.

En la figura I₃ se tiene representadas las formas de onda para rectificación trifásica semicon-trolada de onda completa; con $\alpha < 60^\circ$.

El voltaje medio a la salida está dado por:

$$V_o = \frac{3}{2\pi} \left[\int_{\alpha_1}^{2\pi/3} \sqrt{2}V \sin \omega t . d\omega t + \int_{2\pi/3}^{\pi} \sqrt{2}V \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{3} \right) . d\omega t + \int_{\pi}^{\alpha_e} \sqrt{2}V \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{3} \right) . d\omega t + \int_{\alpha_e}^{\alpha_1 + 2\pi/3} E_a . d\omega t \right] \quad \text{I.20}$$

De lo cual se obtiene:

$$V_o = \frac{3\sqrt{2}V}{2\pi} \left\{ \cos \alpha_1 - \cos \left(\alpha_e - \frac{\pi}{3} \right) + 1 \right\} + \frac{3}{2\pi} E_a \left(\alpha_1 - \alpha_e + \frac{2\pi}{3} \right) \quad \text{I.21}$$

La ecuación trascendental, para obtener el ángulo de extinción, α_e , está dada por:

$$\left\{ \frac{E_a}{R} - \frac{\sqrt{2}V}{Z} \sin(\alpha_e - \phi) \right\} . e^{-\frac{R}{\omega L} \left(\frac{2\pi}{3} - \alpha_e \right)} = \left\{ \frac{E_a}{R} - \frac{\sqrt{2}V}{Z} \sin(\alpha_1 - \phi) \right\} . e^{-\frac{R}{\omega L} \left(\frac{2\pi}{3} - \alpha_1 \right)}$$

Como ejemplo de un caso particular se tendrá que:

$$\text{Si } E_a < V_x$$

Se tendrá que E_a no influye en la forma de conducción.

y para $\alpha \leq \frac{\pi}{3}$ se tendrá conducción continua.

$$\text{Con: } \alpha_1 = \frac{\pi}{3} + \alpha \quad \text{I.23}$$

$$\text{Y: } \alpha_e = \alpha_1 + \frac{2\pi}{3} \quad \text{I.24}$$

La ecuación I.21 quedaría entonces;

$$V_o = \frac{3}{2\pi} \sqrt{2} V \left\{ \cos \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right) - \cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right) + 1 \right\} \quad \text{I.25}$$

$$\therefore V_o = \frac{3}{2\pi} \sqrt{2} V (\cos \alpha + 1) \quad \text{Para conducción continua.} \quad \text{I.26}$$

$$\left(\alpha \leq \frac{\pi}{3} \text{ y } E_a < V_x \right)$$

Se tiene entonces que para cualquiera de los casos analizados, se podrá determinar el voltaje medio de salida, pudiendo ser la conducción continua o discontinua, esto dependerá de los valores de α_1 y α_e .

Y el ángulo de extinción, α_e , dependerá de E_a , R , L , V y α_1 .

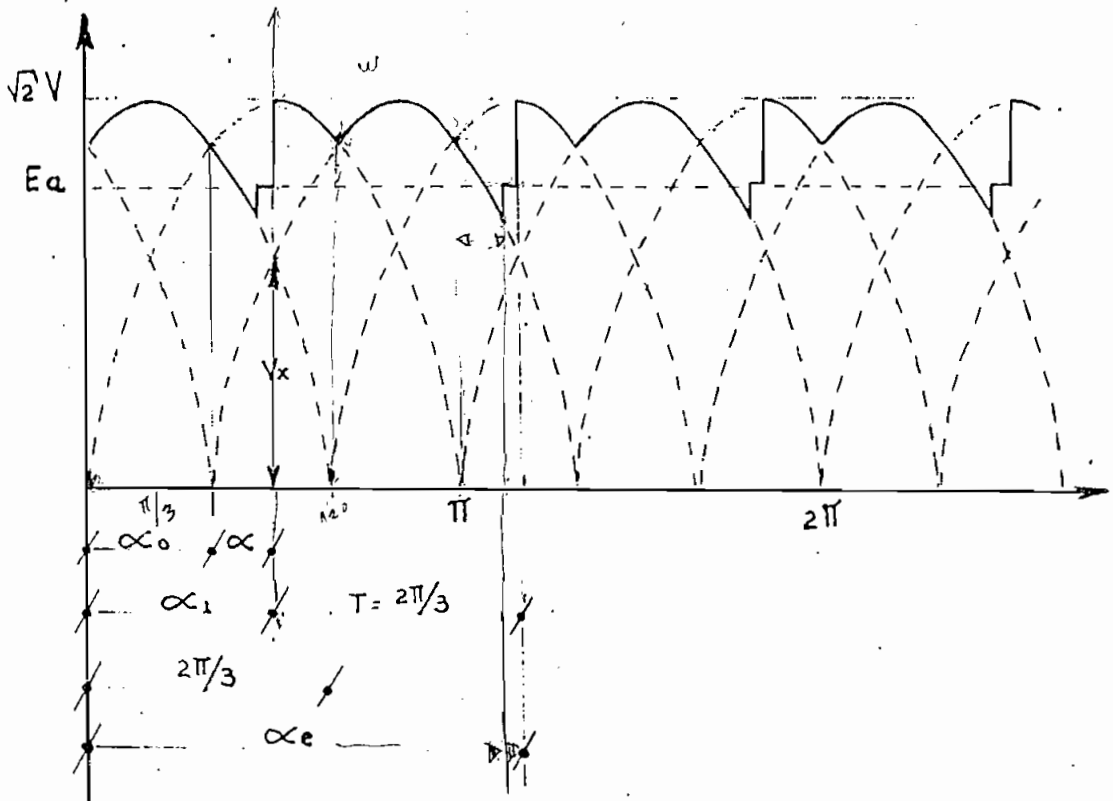


Figura I₃: Formas de onda para rectificación trifásica semicontrolada con $\alpha < 60^\circ$.

APENDICE II

MANUAL DE USO DEL EQUIPO.

1.- Descripción del sistema.

El equipo consta de:

- Un tablero por medio del cual se realizará el control de velocidad y se determinará la potencia y velocidad del motor DC patrón.
- Un motor DC patrón, de 5 Hp, el cual se acoplará a la máquina por probarse.

El tablero está compuesto por:

- Circuito electrónico.
- Circuito de potencia.
- Circuito de protecciones.
- Circuito de mando.
- Medidores y lámparas indicadoras.

1.2.- Distribución de circuitos.

En la figura II.1 se tiene la distribución física de los diferentes circuitos con los respectivos nombres.

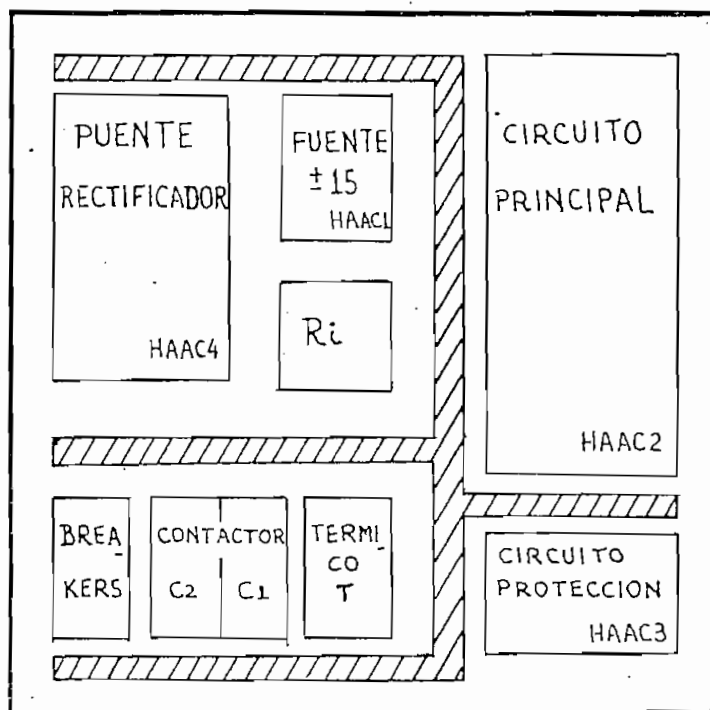


Figura II.1 : Distribución interior de circuitos.

En la figura II.2 se tiene la distribución de lámparas, pulsantes e indicadores que posee el tablero.

En donde:

- h_0 = Mando conectado
- h_1 = Sobre-carga motor
- h_2 = Falla fuente electrónica
- h_3 = Sobre-velocidad motor
- h_4 = Falla campo motor
- h_5 = Motor conectado .

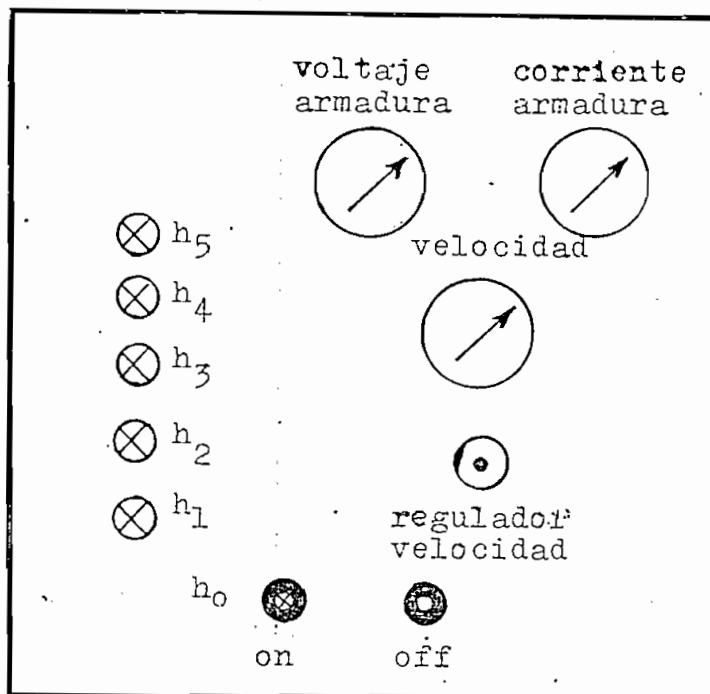


Figura II-2: Vista exterior del Tablero

2.- Modo de Operación.

Se tienen que seguir los siguientes pasos para el buen funcionamiento del equipo.

- 1.- Acoplar el motor por medio de las bandas a la máquina por probarse.
- 2.- Comprobar que todos los cables del motor y de las líneas de fuerza estén conectados.
- 3.- Encender los breakers (si están en la posición de OFF).

- 4.- Si se desea:
 - a) Posicionar en cero el botón "Regulador de - velocidad", con lo cual el motor no arrancará.
 - b) Caso contrario posicionar este botón en la indicación de velocidad deseada(Gráfico 4.10 o ecuación 4.11).
- 5.- Oprimir el pulsante de "Encendido", (éste se en - cenderá) y luego de más o menos 4 sg se encende - rá la lámpara de "Motor conectado"; por lo cual - el motor estará listo para arrancar caso (4.a) , arrancará caso (4.b).
- 6.- Luego de obtener la velocidad deseada (determina da en el medidor " velocidad motor") tomar las - medidas de voltaje de armadura, corriente de ar - madura y velocidad del motor de los medidores - respectivos para la obtención de la potencia que entrega el motor.
- 7.- Para otras velocidades repetir los pasos 4.b,5,6
- 8.- Luego de finalizar las pruebas presionar el pul - sante de " Apagado".
- 9.- Haciendo uso de las ecuaciones 4.4 y 4.7 determi nar la potencia eléctrica y mecánica del motor, - que se necesitó para esta prueba.

3.- Protecciones y alarmas.

Si cuando se está realizando alguna prueba, el equipo se desconecta y se queda encendida alguna lámpara, se tiene que seguir los siguientes pasos.

3.1. Si se enciende la lámpara de "Sobre carga motor", esto indica que se ha sobrepasado la carga que puede soportar el motor.

Pasos a seguir.

- Presionar el pulsante de "Apagado" (desbloqueo)
- Esperar unos 10 minutos para efectos de enfriamiento
- Quitar el exceso de carga de la máquina o del motor.
- Reiniciar la prueba.

3.2. Si se enciende la lámpara de "Falla campo motor", esto indica que no hay alimentación en el campo.

Pasos a seguir.

- Presionar el pulsante de "Apagado" (desbloqueo)
- Comprobar los cables que unen desde el equipo a los terminales del campo del motor, si están averiados, reparar.
- Revisar los fusibles de la plaqueta principal.
- Reiniciar la prueba.

- 3.3. Si se enciende la lámpara de "Sobre velocidad" indica que se ha llegado a una velocidad crítica (es poco probable que esto suceda), pero puede ser por causa de falla en la alimentación del campo, el motor trata de embalsarse, se tendrá entonces que seguir los pasos de 3.2
- 3.4. Si se enciende la lámpara de "Falla en la fuente electrónica", en este caso también se encenderá la lámpara de "Falla campo motor", es posible que se hayan quemado él o los fusibles de la fuente ± 15 V.

Pasos a seguir.

- Presionar el botón de "Apagado" (desbloqueo)
- Comprobar los fusibles de la fuente ± 15 V .
- Repetir el numeral 3.2
- Reiniciar la prueba.

4.- Calibraciones

El equipo, por causa del uso, del tiempo o cualquier otra circunstancia, puede descalibrarse, acarrearé algunos problemas como:

- Oscilación
- No regulación de la velocidad
- No parada cuando se pone el regulador de veloci-

dad en cero (0), entre otros.

Para esto, se vió necesario adjuntar la forma de cómo calibrarlo, aunque ésta sea en forma aproximada.

Todas las calibraciones se las hará en el circuito principal (HAAC 2).

Los pasos que se tienen que seguir son:

- a) Prender el equipo, presionando el pulsante " encendido".
- b) Posicionar el regulador de velocidad en cero (0)
- c) Con un osciloscopio (aislado de tierra), medir - en los colectores de los transistore Q_1 de cada circuito de disparos, el voltaje máximo al que - llegan las rampas, teniendo que obtenerse las siguientes lecturas:

$$V_{C(MAX)} \text{ (fase R) } = 10.8 \text{ V.}$$

$$V_{C(MAX)} \text{ (fase S) } = 10.8 \text{ V.}$$

$$V_{C(MAX)} \text{ (fase T) } = 11 \text{ V.}$$

- d) Si no se obtiene estos voltajes, se debe reajustar los potenciómetros P_1 , hasta obtener los valores de voltaje indicados.
- e) Apagar el equipo y usando un ohmetro medir y -

ajustar a los potenciómetros, los cuales deberán dar las siguientes lecturas:

$$P_8 = 11.3 \text{ K}\Omega$$

$$P_7 = 24.1 \text{ K}\Omega$$

$$P_9 = 16.5 \text{ K}\Omega$$

$$P_{11} = 2.4 \text{ K}\Omega$$

$$P_{12} = 18.1 \text{ K}\Omega$$

$$P_{13} = 18.2 \text{ K}\Omega$$

$$P_{14} \text{ (entre a/a)} = 5.8 \text{ K}\Omega$$

$$P_{10} \text{ (entre a/a)} = 22.6 \text{ K}\Omega$$

f) Si con estos valores no se obtiene una calibración buena, se tiene que reajustar los valores de P_8 , P_9 y P_{10} , con movimientos muy lentos hacia uno u otro lado del marcado, hasta que se logre una buena respuesta del sistema, para cuando hay cambios bruscos de carga.

g) Con los potenciómetros P_6 y P_7 se puede variar la velocidad de arranque y/o cambio de velocidad del motor.

REFERENCIAS

- (1) CHUTE, G. and CHUTE, R., Electronics in industry, Mc Graw-Hill, Inc., Fifth Edition, United States of America, 1979, p. 427
- (2) RUEDA, I. y CAICEDO, M., Estudio de un medidor de potencia con control automático de velocidad. Diseño y construcción de su sensor de velocidad, Tesis de Grado, Octubre 1981, p. 5, p.8, p.25, p. 38-50.

BIBLIOGRAFIA

- CHUTE, G. and CHUTE, R., Electronics in industry, Mc Graw-Hill, Inc., Fifth Edition, United States of America, 1979.
- RUEDA, I. y CAICEDO, M., Estudio de un medidor de potencia con control automático de velocidad. Diseño y construcción de su sensor de velocidad, Tesis de Grado, Octubre 1981.
- GENERAL ELECTRIC, SCR Manual, Sexta Edición, Auburn, Nueva York, 1979.
- DAVIS, Ch., Industrial Electronics Design and Application, Merrill, Ohio, 1973.
- KRISHNAN, T. and RAMASWAMI, B., A Fast-Response DC Motor Speed Control System, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol IA-10, No 5, September/October 1974.
- PELLY, B., Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters, Wiley, New York, 1971.
- PAREDES, E., Factor de Potencia en Circuitos con Control no Lineal, Tesis de Grado, Marzo 1982.
- ASTUDILLO, J., Estudio Teórico - Experimental de la Velocidad y Torque en un Motor DC Alimentado con Corriente Alterna Rectificada y Controlada en Fase, Tesis de Grado, Julio 1981.