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

CONTROL DE MAQUINAS ELECTRICAS POR CONTACTORES Y ELEMENTOS ESTATICOS.

Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero en la Especialidad de Ingeniería Eléctrica.

CARLOS MODESTO CELLERI PESANTEZ

Quito, julio de 1.975.

D E D I C A T O R I A:

Para mis Padres, con mi profundo agradecimiento y cariño.

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

Al Sr. Ing. Alfredo Hema P., Director de Tesis y a todos aquellos que con su ayuda y colaboración hicieron posible la realización del presente trabajo.

CERTIFICACION:

CERTIFICO QUE LA PRESENTE TESIS HA SIDO REALIZADA EN SU TOTALIDAD POR EL SEÑOR CARLOS CELLERI PESANTEZ.

ING. ALFREDO MENA P.

Director de Tesis.

I N D I C E:

CAPITULO I.

TEORIA DE LOS CONTACTORES Y RELES. Introducción. . . . . Pág. 1

Contactores. . . . . " 3

Circuito electromagnético. . . . . " 5

Materiales magnéticos. . . . . " 7

Valores de puesta en Trabajo y Reposición. . . . . " 14

Tiempos de operación. . . . . " 21

Características de los Contactos. . . . . " 22

Vida de los Contactos. . . . . " 25

Extinción del arco. . . . . " 26

Características de los Contactores. . . . . " 30

Relés de tiempo. . . . . " 32

CAPITULO II.

CIRCUITOS BASICOS DE CONTROL. . . . . " 45

Diagramas. . . . . " 45

Excitación de contactores. . . . . " 50

Circuitos con memoria y de enclavamiento . . . . . " 51

Circuitos Serie, Paralelo de Contactos . . . . . " 54

CAPITULO III.

REPRESENTACION DE FUNCIONES LOGICAS MEDIANTE EL ALGEBRA DE - BOOLE . . . . . " 60

Símbolos y Teoremas. . . . . " 61

Representación de Funciones Binarias con Relés. . . . . " 66

Funciones Binarias Inversas. . . . . " 68

Criterios de simplificación de contactos y aplicaciones . . " 73

CAPITULO IV.

INTRODUCCION AL CONTROL CON CIRCUITOS LOGICOS ESTATICOS . . " 83

Módulos lógicos y su representación. . . . . " 84

Función lógica NAND. . . . . " 88

Función lógica NOR. . . . . " 89

Fuente de alimentación. . . . . " 90

Convertidos de señal. . . . . " 92

Amplificador. . . . . " 93

Elementos de Memoria. . . . . " 95

Módulo de tiempo (Time Delay) . . . . . " 97

Unidad de Reposición (Unit Reset) . . . . . " 100

Equivalente entre circuitos lógicos de contactos y las funciones lógicas estáticas. . . . . " 101

Función NOR. . . . . " 103

Función de Memoria con regreso a Cero . . . . . " 103

Función de Memoria Retentiva. . . . . " 104

Función Y con Memoria de sello (autoalimentación) . . . . . " 104

Función de Tiempo. (Retardo a la excitación). . . . . " 105

Función de Tiempo. (Retardo a la desexcitación) . . . . . " 105

Cambio de circuitos de control con contactos a circuitos con Funciones lógicas. . . . . " 106

Representación de funciones binarias con elementos lógicos. " 109

Aplicaciones en diseño. . . . . " 114

Mando de un motor trifásico con dos pulsantes . . . . . " 114

Circuito de mando de una caja fuerte. . . . . " 115

Representación con circuitos de contactos. . . . . " 117

Representación con circuitos estáticos. . . . . " 118

Diseño de un circuito de mando para la operación automática-
de dos motores A y B. . . . . " 119

CAPITULO V.

CONTROL DE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA. Generalidades. . . " 123

Arranque de motores. . . . . " 124

Protección contra fallas o sobrecargas . . . . . " 125

Programación de funcionamiento. . . . . " 126

Análisis de los motores de corriente continua. . . . . " 127

Tipos de motores. . . . . " 127

Operación y características . . . . . " 130

Arranque de motores de Corriente Continua . . . . . " 133

Cálculo de un arrancador con "n pasos de resistencia" . . .. " 134

Arrancadores automáticos para Motores de c.c. . . . . " 141

Arranque de un motor Shunt mediante relés de mínima corriente " 141

Arranque de un motor Shunt mediante relés de fuerza contra-e-
lectromotriz. . . . . " 145

Arranque de un motor Compound mediante relés de tiempo. . ... " 146

Control de velocidad y frenado. . . . . " 149

Inversión de giro. . . . . " 150

Frenado de motores de c.c. . . . . " 152

CAPITULO VI.

CONTROL DE MOTORES TRIFASICOS DE INDUCCION. . . . . " 157

Análisis de los motores de inducción .. . . . " 157

Diseño clase A . . . . . " 158

Diseño clase B . . . . . " 159

Diseño clase C y D . . . . . " 160

Arranque de los motores a jaula de ardilla . . . . . " 162

Protección de motores eléctricos de c.a. . . . . " 164

Arranque de motores a jaula de ardilla con limitación de co-- rriente. . . . . " 167

Arranque de un motor trifásico por resistencias. . . . . " 168

Arranque con tensión reducida por reactancias. . . . . " 173

Arranque con autotransformador. . . . . " 174

Arranque con limitación de corriente estrella triángulo . . . " 178

Arranque manual de cuchilla estrella-triángulo. . . . . " 181

Arranque manual de tambor estrella-triángulo . . . . . " 182

Arranque automático estrella triángulo con transición a cir-- cuito abierto. . . . . " 183

Arranque estrella triángulo con transición a circuito cerrado " 184

Arranque de motores de rotor devanado con relés de tiempo.. " 188

Arranque de un motor de rotor devanado con relé de frecuencia " 189

Control de velocidad y frenado de los motores de inducción... " 192

Control de velocidad de un motor de doble bobinado, dos veloci- dades. . . . . " 193

Control de velocidad de un motor de doble velocidad y unico be

binado . . . . . " 194

Inversión de giro y frenado de las máquinas de inducción . . " 198

Conclusiones. . . . . " 200

Apéndice Nº 1: . . . . . " A1

Apéndice Nº 2 . . . . . " A2

Apéndice Nº 3 . . . . . " A3

Bibliografía. . . . . " A4.

P R O L O G O.

La presente tesis tiene por objeto proporcionar una guía de consulta que sirva como base para el estudio de la materia de Control Industrial que se comenzó a dictar en el sexto semestre de la Facultad de Ing. Eléctrica en el año lectivo de 1974-1975.

Indudablemente, la presente tesis cumple con lo propuesto, sin que esto sea un obstáculo que impida posteriores investigaciones más exshaustivas, respecto al tema.

Cualquier persona, que de una u otra manera esté relacionado con actividades que tienen que ver con el desarrollo del presente trabajo, es de desear que en éste encuentre una ayuda para el cabal desempeño de su trabajo o actividad inherente al control industrial de motores eléctricos.

La forma general de como enfoca el tema de control basado en el razonamiento lógico y respaldado con el álgebra binaria, da oportunidad de escoger el método más adecuado de control, sea utilizando las clásicas técnicas de circuitos con relés y contactores o adoptando las nuevas técnicas de control con elementos lógicos estáticos.

CAPITULO I.

1.- TEORIA DE LOS CONTACTORES Y RELES.

1.1.- Introducción.

A raíz de la post-guerra, la carestía de la mano de obra se hizo presente; además los continuos avances tecnológicos y la evolución industrial, impulsaron a utilizar nuevas técnicas de producción y se inició la era de la automatización.

En instalaciones industriales en donde se requiere de movimientos precisos y con cierta frecuencia de repetición, mover grandes interruptores desde cierta distancia con el mínimo esfuerzo, se hace necesario el uso de los llamados Contactores o Relevadores.

El mando a distancia de gruas, ascensores, tableros de control, válvulas, etc. requieren el uso de contactores. Estos presentan la facilidad de ser controlados con pequeñas corrientes mediante pulsadores o relés que reciben órdenes de realizar un trabajo.

Tanto las protecciones como los avisos de anormalidades o tiempos de funcionamiento de un sistema, se consiguen satisfactoriamente con el uso de los relés. Estos, conjuntamente con los contactores se combinan ya sea en un sólo dispositivo o conectados separadamente para cubrir las exigencias más duras en lo que a maniobras en baja tensión se refiere.

Los aparatos de maniobra según las normas VDE 0660 y las IEC --

158-1, son aparatos que unen, interrumpen o separan uno o más circuitos eléctricos. Como esta definición es muy general y siendo este sector muy diverso e importante, es necesario tener una subdivisión más concreta. Las normas VDE proponen la siguiente subdivisión:

a.- Interruptores.

b.- Aparatos de regulación.

c.- Dispositivos de enchufe.

d.- Fusibles.

Estas denominaciones corresponden a los siguientes conceptos:

a.- Los Interruptores son aparatos de maniobra para la conexión y desconexión voluntaria o automática de circuitos de corriente, en los cuales todas las piezas que sirven para la interrupción están fijamente unidas sobre una base común.

b.- Los Aparatos de regulación son aparatos de maniobra que sirven para el ajuste o variación de las magnitudes de servicio (por ejemplo resistencias) en los circuitos, con la inclusión eventual de su conexión o desconexión, tal es el caso de los arrancadores, reguladores de tensión, etc.

c.- Los Dispositivos de enchufe son aparatos de maniobra en los cuales las piezas que sirven para la unión o la interrupción no están montadas conjuntamente.

d.- Los Fusibles son aparatos de maniobra para la interrupción

automática de circuitos por fusión de una pieza conductora de la co-- rriente.

Según estas definiciones y para el estudio que este tratado propone, no es de utilidad tratar con los interruptores aparatos de regulación y fusibles.

El término Interruptor es muy genérico puesto que puede ser clasificado desde varios puntos de vista:

a.1.- Según su funcionamiento: con o sin retroceso.

a.2.- Según la clase de accionamiento: manuales, de pie, magnéticos, térmicos, etc.

a.3.- Según la clase de extinción del arco: Interruptores en aire, en aceite, en gas, a presión, etc.

a.4.- Según la finalidad del empleo: Interruptores Selectores , de protección, seccionadores, de mando, auxiliares, etc.

a.5.- Según la potencia de desconexión: Interruptores para maniobra en vacío, para maniobra bajo cargas, interruptores para motores, e interruptores de potencia.

En esta primera parte del estudio nos referimos de una manera especial a los interruptores de accionamiento magnético y térmico.

1.2.- Contactores.

Los interruptores de accionamiento magnético en general pueden ser para maniobra en vacío, para circuitos de potencia, para motores,

etc. El término Contactor puede ser usado para cualquiera de estos casos, teniendo en cuenta las definiciones que se apliquen para cada caso.

Según las normas IEC 158 (2.1.1): Contactor es un aparato designado a cerrar o interrumpir la corriente en uno o más circuitos eléctricos. Si la forma de interrumpir o cerrar el circuito es por separación de elementos mecánicos, el contactor será de contactos mecánicos. (Esta aclaración hacemos puesto que los semiconductores también pueden ser clasificados como contactores a pesar de que el cierre o interrupción no se realiza por separación mecánica sino por conducción o no conducción electrónica).

Contactor Electromagnético. Según la norma IEC 158 (2.1.1) se define como: "Un contactor en el cual la fuerza para cerrar los contactos principales es provista por un electroimán". Estos dispositivos tienen regreso propio cuando el electroimán es desactivado.

Un contactor electromagnético es constituido de las siguientes partes:

a.- Dispositivo Electromecánico.

b.- Contactos.

a.- El Dispositivo Electromecánico comprende:

El circuito electromagnético que provee de la fuerza para que se realice el cierre de los contactos y de un circuito mecánico que -

comprende el resorte de reposición de los contactos, peso del elemento móvil, inercia y rozamientos que presenta el sistema.

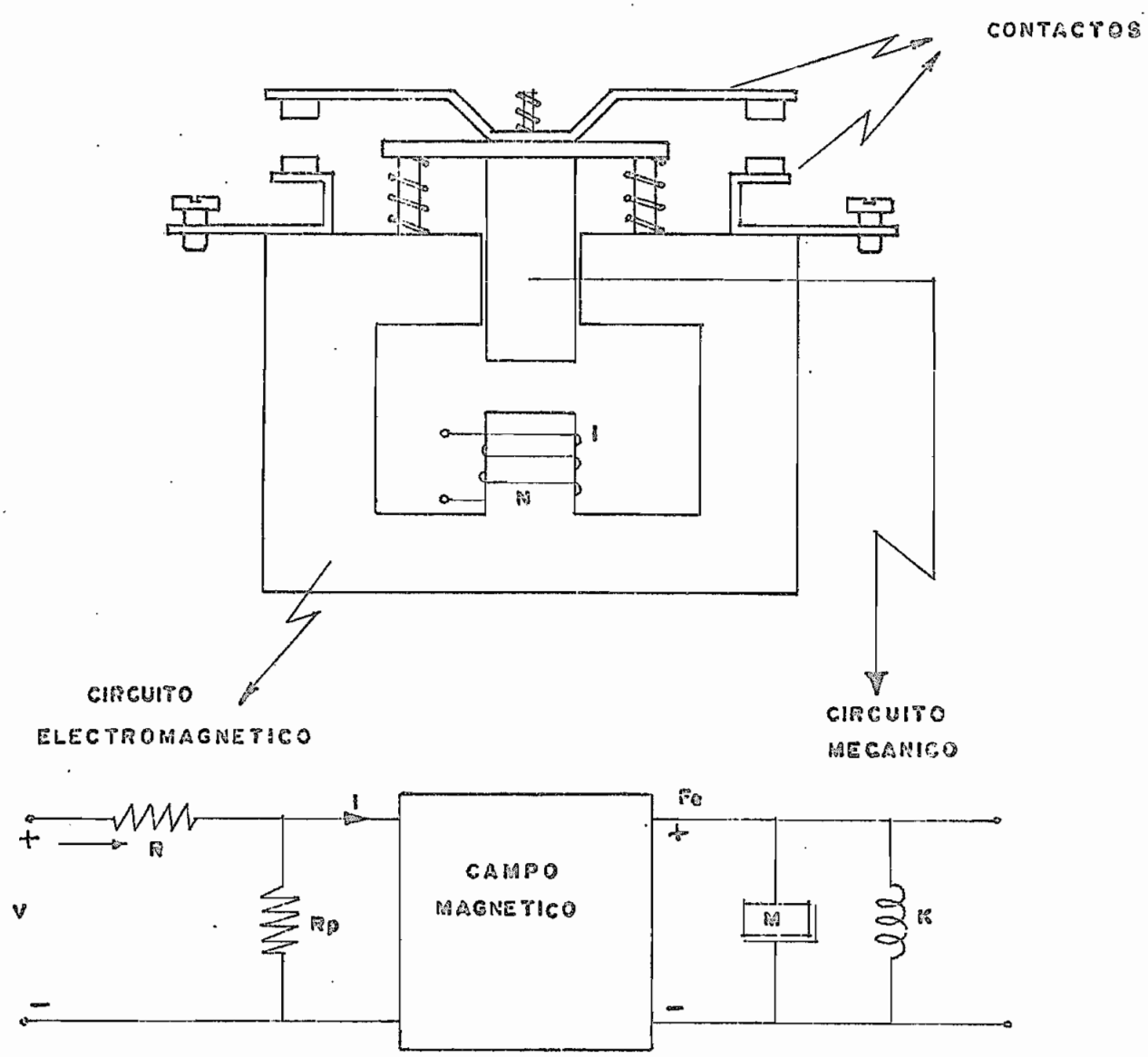


Figura 1.1

Los contactos son las piezas mecánicas utilizadas para la apertura o cierre de un circuito eléctrico independiente del circuito del dispositivo electromagnético del contactor (ver fig. 1.1). La forma de las estructuras más comunmente usadas para los contactores o relés son las mostradas en la figura 1.2.

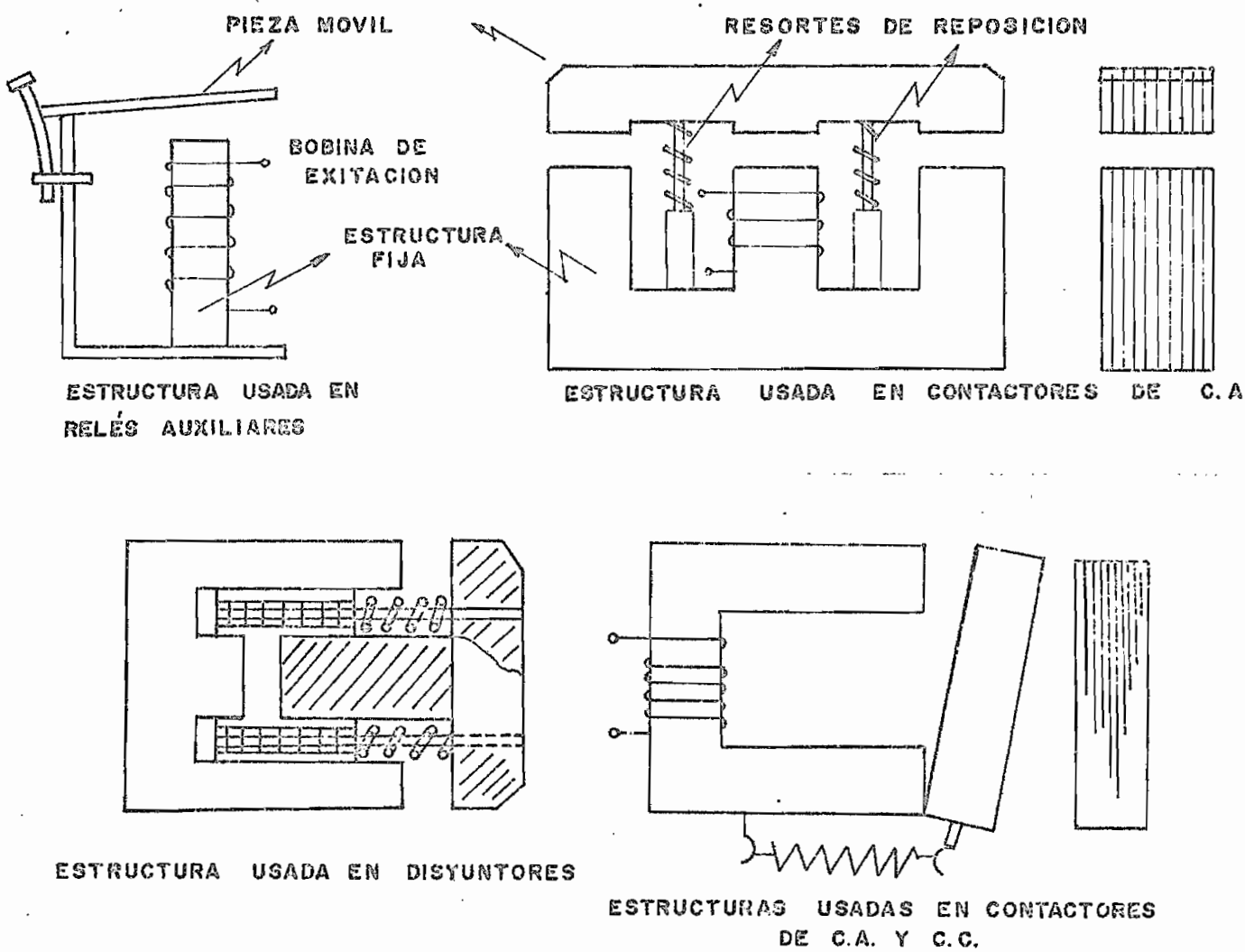


Figura 1.2.

Tanto la estructura fija como la pieza móvil del núcleo están - constituidas por chapas de material ferromagnético. Cuando la excitación de la bobina es con corriente continua este núcleo puede ser sólido. Con el fin de evitar en lo posible las corrientes parásitas de Foucault son aconsejados materiales magnéticos con contenido de silicio, el cual aumenta la resistividad eléctrica (ρ) del hierro. En la tabla I damos algunos materiales comunmente usados en contactores y - relés con valores de resistividad (ρ). Otras propiedades exigidas para estos materiales ferromagnéticos en lo que a relés y contactores - se refiere, es que tengan alta permeabilidad (μ) con el fin de obtener mayor flujo de operación a bajas corrientes de excitación, baja - fuerza cohercitiva (H_c) y bajo magnetismo residual (B_r) para que el - lazo de Histeresis sea más pequeño y cuando el relé haya sido desenergizado la pieza móvil vuelva a su posición original sin que influya - el magnetismo B_r.

Las características de los materiales magnéticos vienen determinadas por las curvas B-H y μ-B. Para el caso del hierro estas curvas son como las de la figura 1.3.

De estas curvas se pueden tomar como valores de referencia la B' correspondiente a μ' (permeabilidad máxima), B" valor de inducción -- cuando la curva ha llegado a la saturación para un valor de $\mu \approx 1000$, el valor B_r (magnetismo residual) y el valor de H_c (fuerza cohercitiv-

va. Valores característicos de algunos materiales se encuentran en la Tabla I.

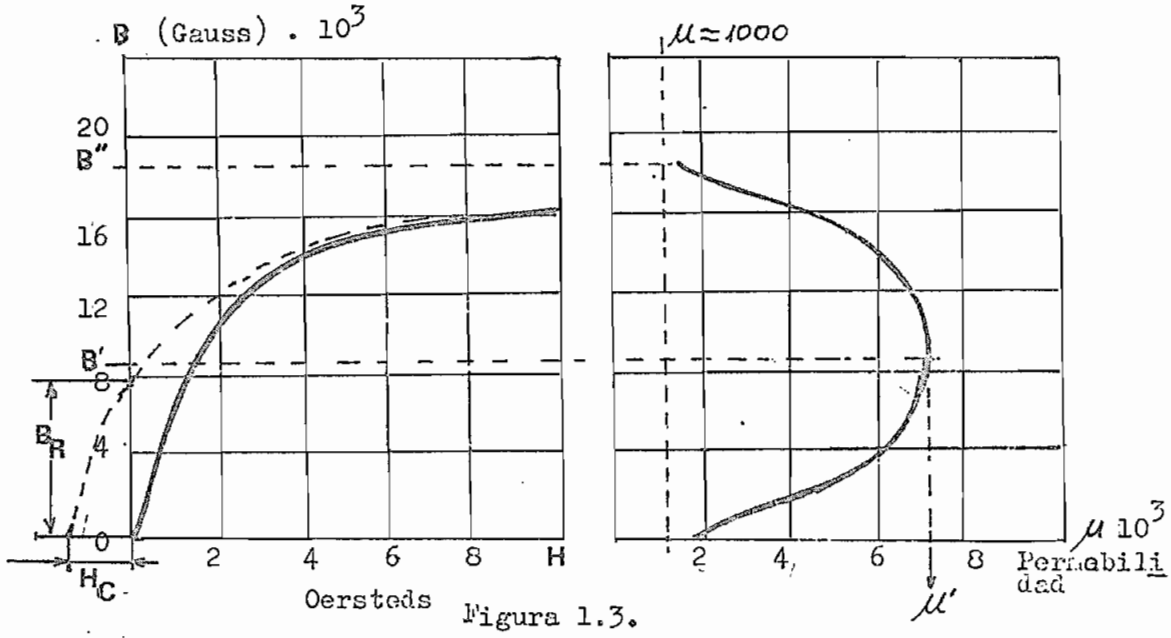


Figura 1.3.

TABLA I.

MATERIALES MAGNETICOS BLANDOS

Material.	Magnetización				Desmagnetización ++				Resistividad. (Microhm cm⁻¹)
	μ' 10^3		B"* (gauss) 10^3		B_R (gauss) 10^3		H_c (oersteds)		
	min	max	min	max	min	max	min	max	
Hierro en chapas	4,3	12	15,5	16,2	10,5	15	0,5	1,4	11
Hierro en barras	4,3	8	15,5	16,2	10,5	15	0,5	1,4	11
Hierro dulce	2,2	7,5	14	16	7,8	15	0,8	2,5	12
Hierro fundido	Nom:	0,6	B"= 10,0		--	--	--	--	25
Hierro al 1% de silicón	4	15	14,7	15,6	9	14,5	0,4	1,4	25
Hierro al 2,5% de silicón	4	12	14	15	8	12	0,4	1,4	40
Hierro al 4% de silicón	5	12	13,5	15,5	6	12	0,3	1,1	60
Chapas de Fe recocido.	7	15	15,5	16,5	14	15	0,5	0,9	11
Permalloy 45.	15	60	14	15	7,5	10	0,1	0,4	50

Notas de la Tabla 1.

(‡)Después de magnetizar con un campo de H = 27 oersteds.

(*)Valor de inducción B" para un $\mu = 1.000$ (B"= hierro saturado).

(-)Después del envejecimiento para el hierro μ' puede ser más bajo de - 3.000 y Hc mayor que 2,5 oersteds.

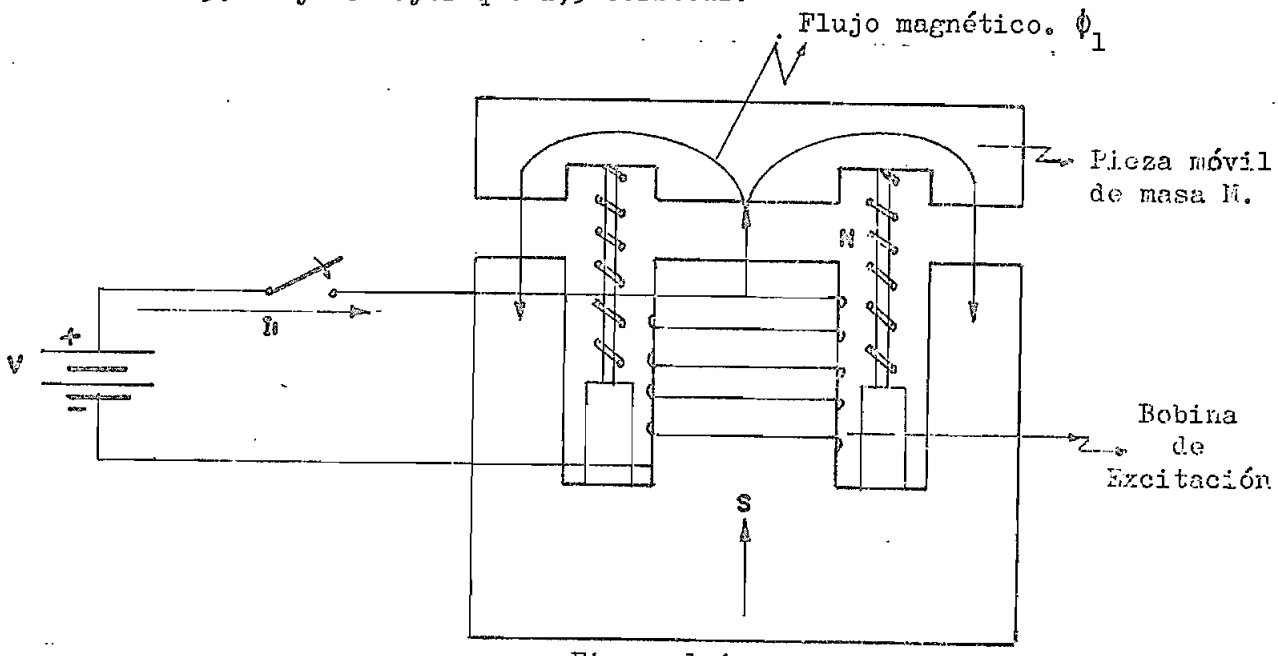


Figura 1.4.

La operación ocurre cuando la Bobina N de la fig.1.4 es recorrida por una corriente i_1 la cual produce un flujo magnético $\varnothing_1$ que atrae a la pieza móvil. En esas condiciones se cumple que:

$$\varnothing_1 = \frac{N_1 \cdot i_1}{R} \qquad (1)$$

Considerando que la resistencia del hierro es despreciable:

$$R = \frac{x}{\mu_o \cdot s} \qquad (2)$$

Donde: R= Reluctancia equivalente del circuito magnético.

x= Distancia del entrehierro equivalente.

s= Sección.

μ_o= Permeabilidad del aire.

Para obtener un cierre de los contactos correcto, necesariamente la fuerza de atracción F_e debe permanecer constante. Cuando la corriente i_1 es continua el cierre es normal puesto que:

$$\phi = k \cdot i_1 \qquad (3)$$

Por las leyes de campos magnéticos:

$$Fe = \frac{\mu_o \cdot S\, N^2 \cdot i_1^2}{x^2} = k_2 \cdot i_1^2 \qquad (4)$$

Es decir que la fuerza se mantiene constante y de un valor que depende del cuadrado de la corriente, para un determinado entrehierro x.

Cuando la i_1 que alimenta la bobina es alterna y de la forma:

$$i_1 = i_1 \text{ max.} \operatorname{sen} \omega t \qquad (5)$$

El flujo también será:

$$\phi_1 = \phi_1 \text{max.} \operatorname{sen} \omega t \qquad (6)$$

En este caso la fuerza de atracción será:

$$Fe_1 = k_2 \left(i_1 \text{max.} \operatorname{sen} \omega t \right)^2 \qquad (7)$$

$$Fe_1 = k_2 i^2 \text{ max } \tfrac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t) \qquad (8)$$

Esto nos indica que la fuerza de atracción no se mantiene constante y en esas condiciones se produce un efecto de vibración de doble frecuencia que la de alimentación. (Fig. 1.5).

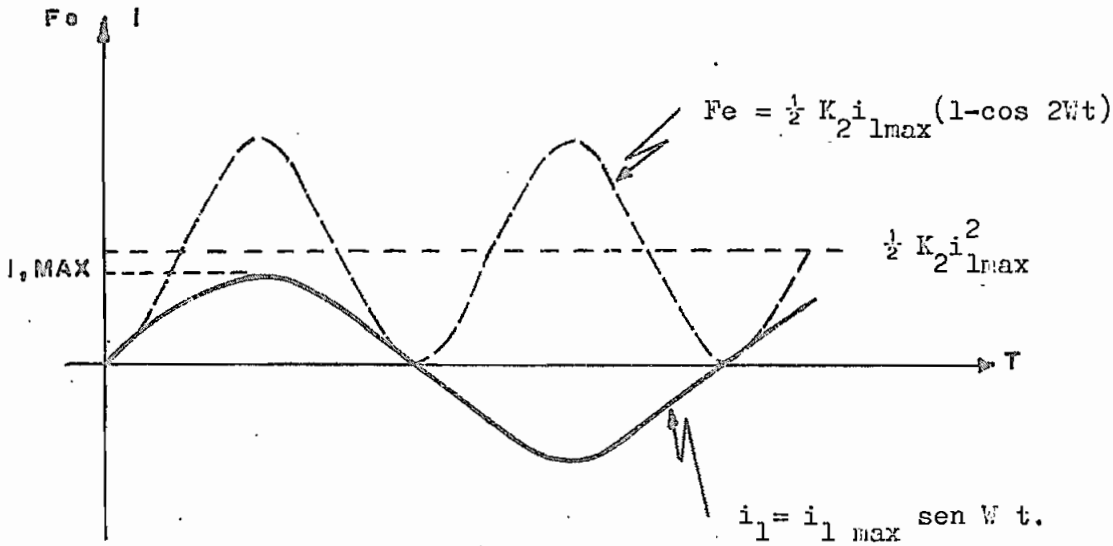


Figura 1.5.

Si la frecuencia de la corriente es F = 60 c/seg. la pieza móvil y contactos vibrará a 120 veces/seg. lo que dañaría muy rápidamente los contactos y la estructura mecánica. Para evitar este fenómeno, los contactores cuya bobina se excita con corriente alterna, van provistos de una o dos espiras de alambre de cobre en cortocircuito que se colocan sobre la estructura fija del núcleo magnético como muestra la figura 1.6.

Estas espiras se las conoce como "Espiras de Sombra".

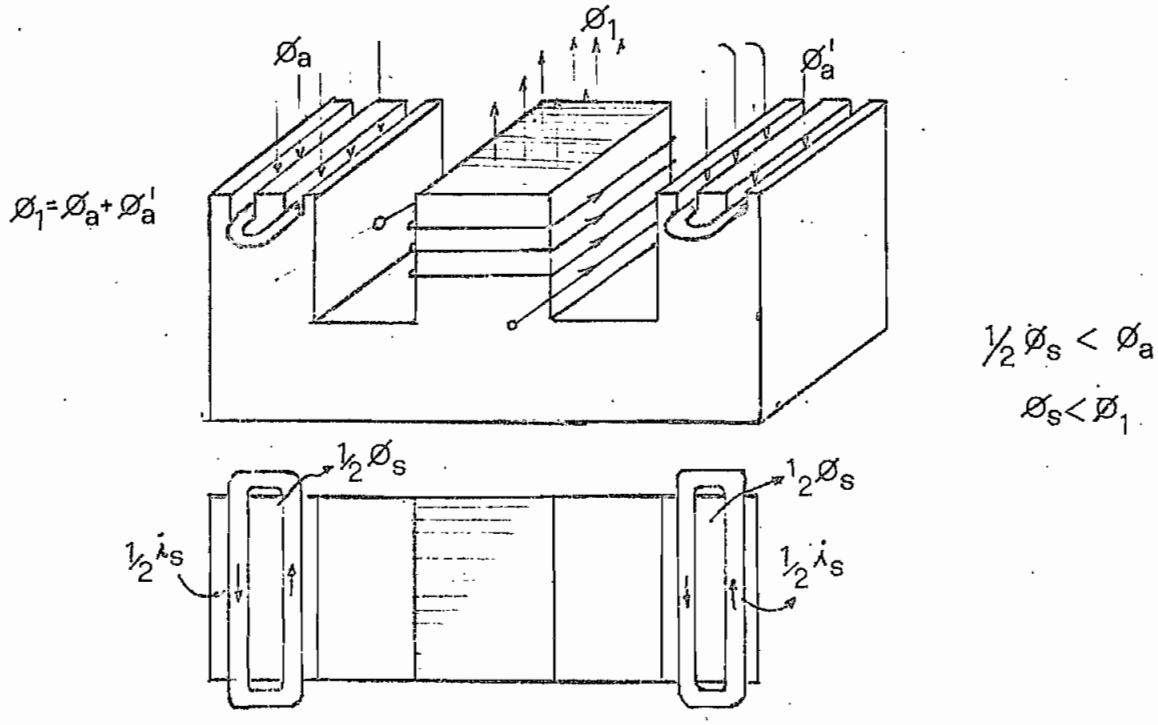


Figura 1.6.

De esta manera el flujo ϕ_1 variable que atraviesa el núcleo y - se divide en los flujos ϕ_a y ϕ_a' inducirán en las espiras de sombra una corriente i_s que se opone a la corriente que lo genera. Este co--- rriente i_s va retrasado aproximadamente 90º.

Con respecto a i, es decir:

$$i_s = i_s \max . \cos wt \qquad (7)$$

Por consiguiente:

$$\phi_s = \phi_s \max . \cos wt \qquad (8)$$

Debido a este flujo inducido en la espira de sombra aparecerá una fuerza Fe' :

$$Fe_1' = \frac{k_2'' \cdot N_s^2}{N_1^2} \; i_s^2 \max . \cos Wt \qquad (9)$$

El valor: $\frac{Ns}{N_1} i_s \max \leq i_1 \max$ (10)

Esto es debido a que no todo el flujo $\mathscr{O}_1$ que atraviesa N_1 pasa por N_s (ver fig. 1.6)

Si sumamos la (9) con la (6), considerando que $N_s\ i_s \max \approx N_1 i_1 \max$ tendremos:

$$Fe = Fe_1 + Fe' \quad (11)$$

$$Fe = k_2\ i_1^2\ \max\ (\ \text{sen}^2 \omega t + \cos^2 \omega t\ ) \quad (12)$$

$$Fe = k_2 i_1^2\ \max \quad (13)$$

La ecuación (13) nos indica que la fuerza tiene un valor cons-- tante (ver fig.) y que el efecto de vibración se habrá evitado.

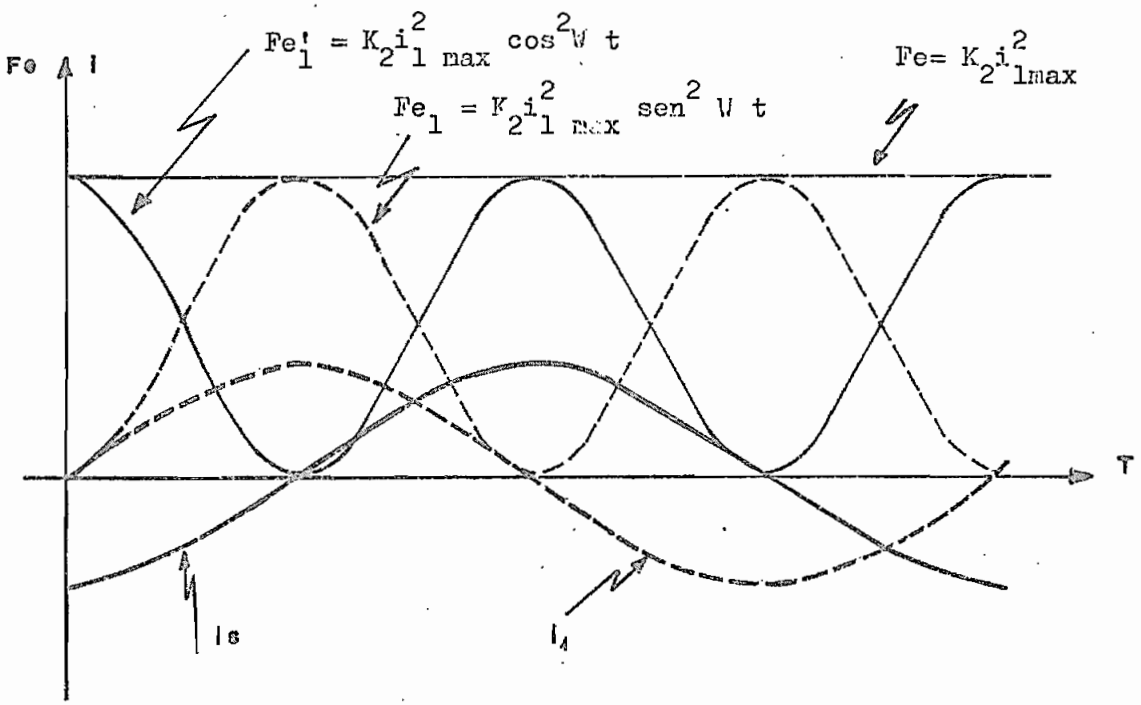


Figura 1.7.

Valores de Puesta en Trabajo y Reposición.

Si un contactor o relé es alimentado por una fuente de tensión variable (Fig. 1.8) con la cual variamos la tensión desde cero hasta cuando la bobina reciba una corriente tal que haga que la pieza móvil sea atraida, habremos encontrado el valor de puesta en trabajo.

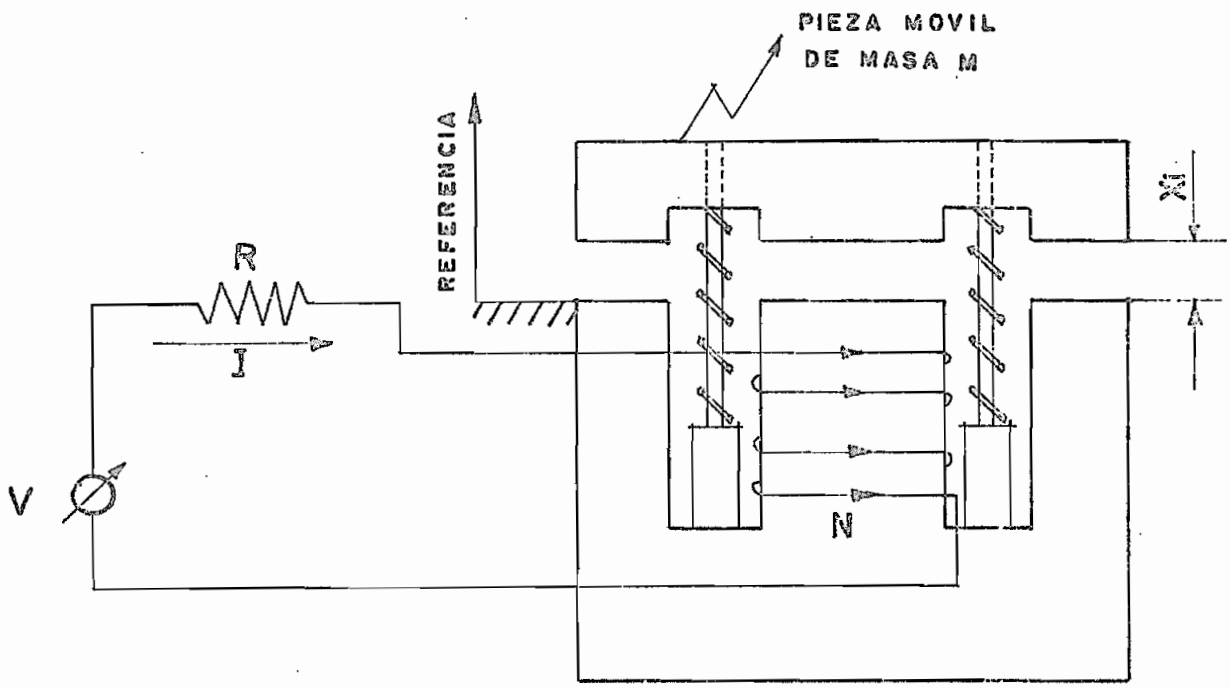
Si disminuimos la tensión hasta que la pieza móvil vuelva a su posición inicial, este será el valor de la reposición. La variación de la tensión se la hace en forma lenta de modo de aproximar a un estado estacionario donde se cumple:

$$I = \frac{V}{R} \; ; \; \frac{d\,Li}{dt} = 0 \qquad (14)$$

A medida que vamos aumentando la tensión V, la pieza móvil se desplaza disminuyendo el entrehierro como indica la figura 1.8.

Esta se conoce como característica de operación del relé o contactor. Al disminuir el entrehierro, la fuerza de atracción aumenta con el cuadrado de x, como indica la ecuación (4), es por esto que llega un momento crítico que con una pequeña variación de la corriente, la pieza es atraida completamente. A este valor crítico de voltaje se lo conoce como valor de puesta en trabajo (Vo). En la figura 1.9 observamos que al antrehierro final x_o no llega a ser cero, puesto que mecánicamente es muy difícil llegar a esta condición ya que cualquier limadura o polvo, hará que el entrehierro final sea distinto de cero. En ciertos relés de alta sensibilidad como en grandes con

tactores se hace a propósito que este entrehierro sea distinto a cero ya sea utilizando láminas de cobre o aluminio, con el fin de evitar - que la pieza móvil quede atraida después de desenergizarse el relé debido al magnetismo permanente, o también para amortiguar los choques- mecánicos de la estructura cuando el contactor es activado.



R = RESISTENCIA DE LA BOBINA
N = NUMERO DE ESPIRAS
V = FUENTE DE TENSION VARIABLE

$X_i \approx 5 - 10$ m.m.
$X_o \approx 0,1$ m.m.

Figura 1.8.

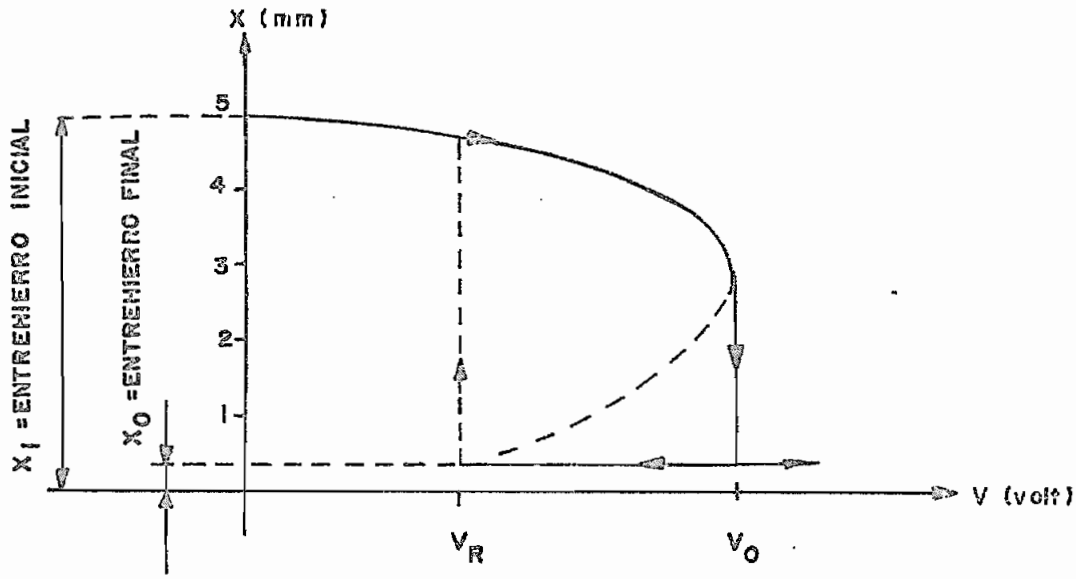


Figura 1.9.

Si después de haber sido atraida la pieza móvil con el voltaje crítico, disminuimos su valor, se notará que la pieza móvil no se repone, puesto que a pesar de ser menor la corriente, el entrehierro es tan pequeño que la fuerza de atracción es todavía capaz de mantener la pieza móvil atraida.

Si seguimos disminuyendo la tensión V, llegará un momento en que la fuerza de reposición del resorte supera el valor de la fuerza de atracción, entonces la pieza móvil volverá a situarse en la posición superior de la curva de la figura 1.7 correspondiente al valor V_r llamado valor de reposición del relé. Si queremos encontrar los valores de V_o (puesta en trabajo) y V_r (valor de reposición), debemos plantearnos las ecuaciones de equilibrio en régimen estacionario del dispositivo.

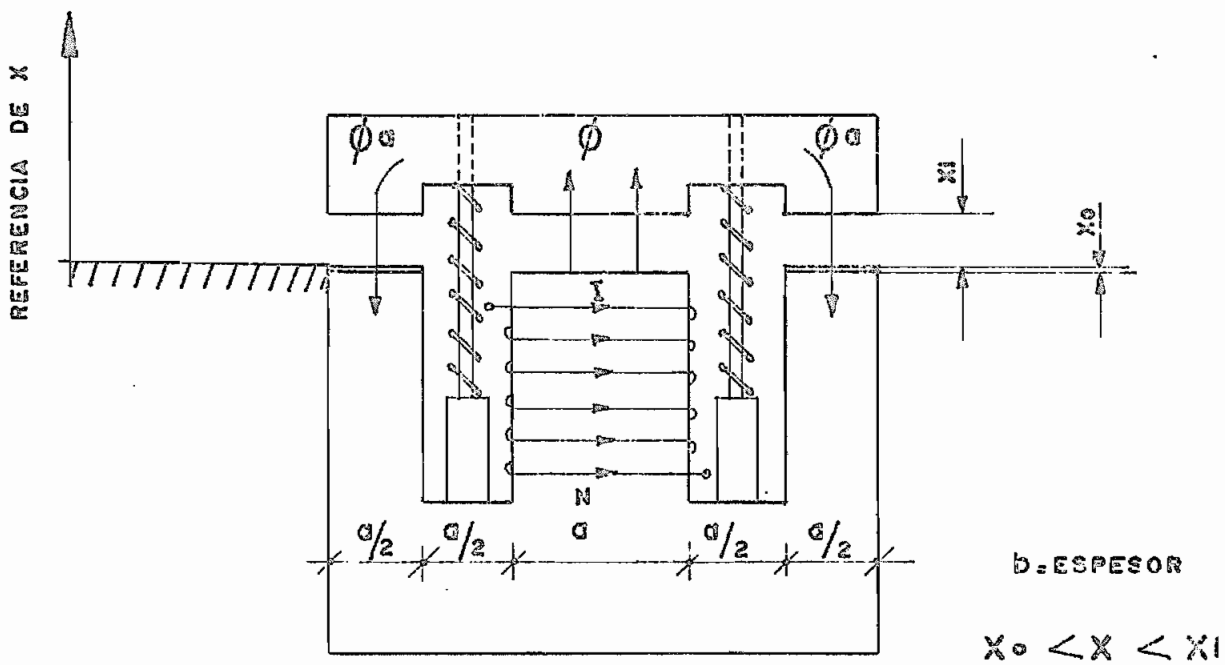
La ecuación de equilibrio eléctrico viene dado por:

$$V = I \cdot R \qquad (15)$$

La ecuación de equilibrio mecánico en régimen estático toma en cuenta el peso, de la pieza móvil ($M \cdot g$), la constante de los resor-- tes (k, l) y el desplazamiento x debido a la fuerza $Fe = F_r - Mg$.

$$Fe = k\,(x_i - x) - Mg.$$

Para el dispositivo de la figura 1.10, y suponiendo que la re-- luctancia del hierro es despreciable tenemos que:



- Diagrama de equilibrio:

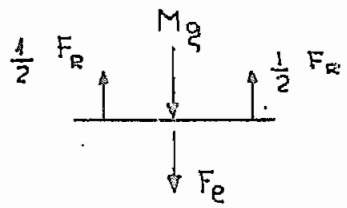


Figura 1.10

Por aplicación de circuitos magnéticos; figura 1.11

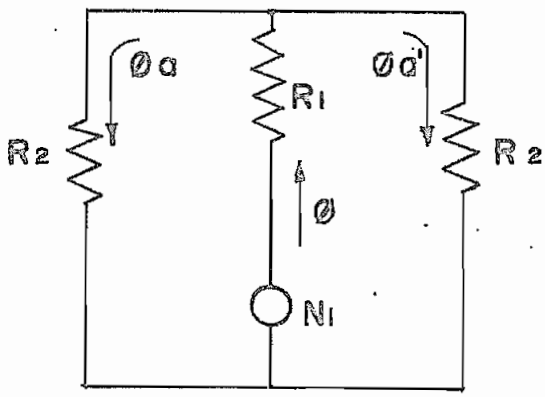


Figura 1.11.

$$R_e = R_1 + \tfrac{1}{2} R_2 = \frac{x}{\mu o.a.b} + \tfrac{1}{2} \frac{x}{\mu o \frac{a}{2} b} \qquad (17)$$

La inductancia de este circuito en régimen estacionario es:

$$L = \frac{N^2}{R} = \frac{\mu o.\ a.bN^2}{2x} \qquad (18)$$

La energía almacenada será:

$$W = \tfrac{1}{2} \cdot L.I^2 = \frac{\mu oabN^2I^2}{4x} \qquad (19)$$

La fuerza producida por este dispositivo es:

$$Fe = \frac{dw}{dx} = \frac{a.b.N^2.I^2}{4x^2} \qquad (20)$$

Luego, si reemplazamos la (20) y la (15) en la ecuación (16) de equilibrio mecánico tendremos:

$$\frac{\mu oa.b.N^2.V^2}{4R^2.\ x^2} = k(x_1 - x) - Mg \qquad (21)$$

$$V_o = \frac{4R}{3N.K}\sqrt{\frac{(kx_i - Mg)^3}{3\mu_o a.b}} \qquad (25)$$

El valor de reposición V_r puede ser encontrado por subsitución de $x = x_o$ (entrehierro final) en la ecuación (21). Efectuando algunas simplificaciones se obtiene:

$$V_r = \frac{2RX}{N}\sqrt{\frac{\left[k(x_i - x_o) - Mg\right]}{\mu_o . a\, b}} \qquad (26)$$

La aplicación de estos dos conceptos, de V_o y de V_r es aplicable al diseño de relés de voltaje o corriente. Como se puede ver en las expresiones (25) y (26) modificando los parámetros:

k (constante del resorte).

N (espiras de la bobina de excitación).

R (resistencia del circuito).

se puede obtener amplia regulación del voltaje de operación o reposición, obteniéndose relés de mínimo y máximo voltaje o corriente.

Aunque si bien el funcionamiento de los contactores y relés es el mismo, las funciones que desempeñan son distintas, puesto que el relé es un dispositivo destinado a detectar o transmitir el cambio de una magnitud eléctrica, puede ser ésta, voltaje corriente impedancia, etc.

En el caso de los contactores, se define el valor del voltaje de la bobina de excitación como voltaje nominal del circuito de control U_c (norma IEC 158 4.4.1) para una determinada frecuencia, si el contactor es de C.A. Este valor de puesta en trabajo V_o es mayor, pa-

ra dar seguridad en la operación y depende de las características y - calentamiento de la bobina.

Las normas (IEC 158. 4.4.1) establecen que si el voltaje nomi-- nal de operación de la bobina de los contactores en U_c para una deter minada frecuencia, el voltaje de la fuente de control U_s no sea menor que el 85% de U_c ni mayor que 110% de U_c. Los valores estandard de U_c son:

TABLA Nº 2

Bobinas de C.C.	Bobinas de C.A.
24 V =	24 V
48	48
110	110
125	127
220	220
250	

Los tiempos de operación, ya sea el tiempo de puesta en trabajo o el tiempo de desconexión, tiene importancia en el funcionamiento de circuitos que tienen combinaciones de contactores. Estos tiempos de o peración varían de acuerdo al tamaño del contactor y dependen de la - constante de tiempo, tanto del circuito mecánico como del circuito e- léctrico. Matemáticamente resulta difícil predecir con exactitud es--

tos tiempos de cierre y desenganche, puesto que implican resolver un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales como lo indica el apéndice Nº 2. Experimentalmente se han determinado estos tiempos, como indica el apéndice anterior, al igual que se ha determinado la forma de onda de la corriente de escitación de la bobina cuando es energizada. El cuadro Nº 3 da algunos tiempos de conexión y desconexión así como la potencia absorbida al instante del cierre y después de cerrado. La clasificación de los contactores de acuerdo al tamaño para los contactores del cuadro Nº 3 son según las normas NEMA:

CUADRO Nº 3.

Tamaño	Ie (Am)	Tiempo conex. (m seg)	Tiempo desconex. (m seg)	Potencia perm (VA)	Potencia cierre (VA)
0	20A	25-30	15-20	90-160	20-40
1	30A	"	"	140-170	22-50
2	50A	"	"	500-750	60-85
3	100A	"	"	800-1100	100-1600
4	150A	60-85	35-50	1100-1800	140-190

b.- Contactos.

Son las partes del contactor, que realizan el trabajo de cerrar o abrir el circuito al asociado. Debido a las continuas operaciones a -- las que están expuestos los contactos, estos deben ser construidos -- con un material capaz de resistir las siguientes solicitaciones elec-

tromecánicas:

Buena conductividad eléctrica.

Poca tendencia a soldarse.

Resistencia a la erosión eléctrica producida por el arco cuando un circuito de potencia se interrumpe.

Poca tendencia a formar óxidos o sulfuros.

Los materiales más comunmente usados son la plata y el cobre.

La plata, si bien tiene las ventajas de tener buena conductividad eléctrica y no se oxida fácilmente, ésta generalmente no se usa en forma pura, debido a que no tiene buena resistencia mecánica al impacto, tiene tendencia a soldarse y está sujeta a erosión por el arco. La plata pura está restringida al uso de contactos para relés o contactores auxiliares para circuitos de control, en donde las corrientes y formaciones de arcos son pequeñas.

Las aleaciones de plata más usadas por sus propiedades alcanzadas son:

a.- Plata-Cadmio.- Aumenta la dureza y reduce la tendencia a soldarse.

b.- Plata-Níquel.- Aumenta la dureza mecánica y resistencia de la erosión por arco. Es de uso general en la fabricación de contactores e interruptores de media potencia.

Los contactos de cobre tienen buenas propiedades mecánicas, tales como: resistencia mecánica, resistencia a la erosión por arco y -

poca tendencia a soldarse. La desventaja de este material en contac-- tos es que a condiciones ambientales se oxida rápidamente y como el - óxido de cobre es aislante aumenta la resistencia de contacto, lo que lleva a sobrecalentarse. Los contactos de cobre se acomodan bien en - contactores grandes e interruptores de potencia en donde los esfuer-- zos mecánicos al cerrarse y la potencia del arco eléctrico en la interrupción son grandes.

Los contactos móviles no son rígidamente montados al soporte de la pieza móvil sino que vienen sujetos por un resorte de amortigua--- ción para contrarrestar el efecto del rebote que sufren los contactos cuando inicialmente se produce el cierre. El efecto de rebote trae -- consigo la formación de pequeños arcos que causa desgaste de los contactos y al mismo tiempo disturbios en el sistema. Eliminar completamente el efecto de rebote es muy difícil pero el uso de los resortes de amortiguación como indica la figura 1.13 elimina gran parte.

Los contactos vienen diseñados para soportar un determinado número de operaciones o maniobras. Entendiéndose por maniobra el cierre y la apertura de los contactos.

La duración de los contactos depende de la intensidad de desconexión. Se habla de $1....5x10^6$ operaciones cuando la corriente de apertura es la nominal del contactor. Cuando esta corriente es mayor, la vida decrece, como indican las curvas características de la figura --

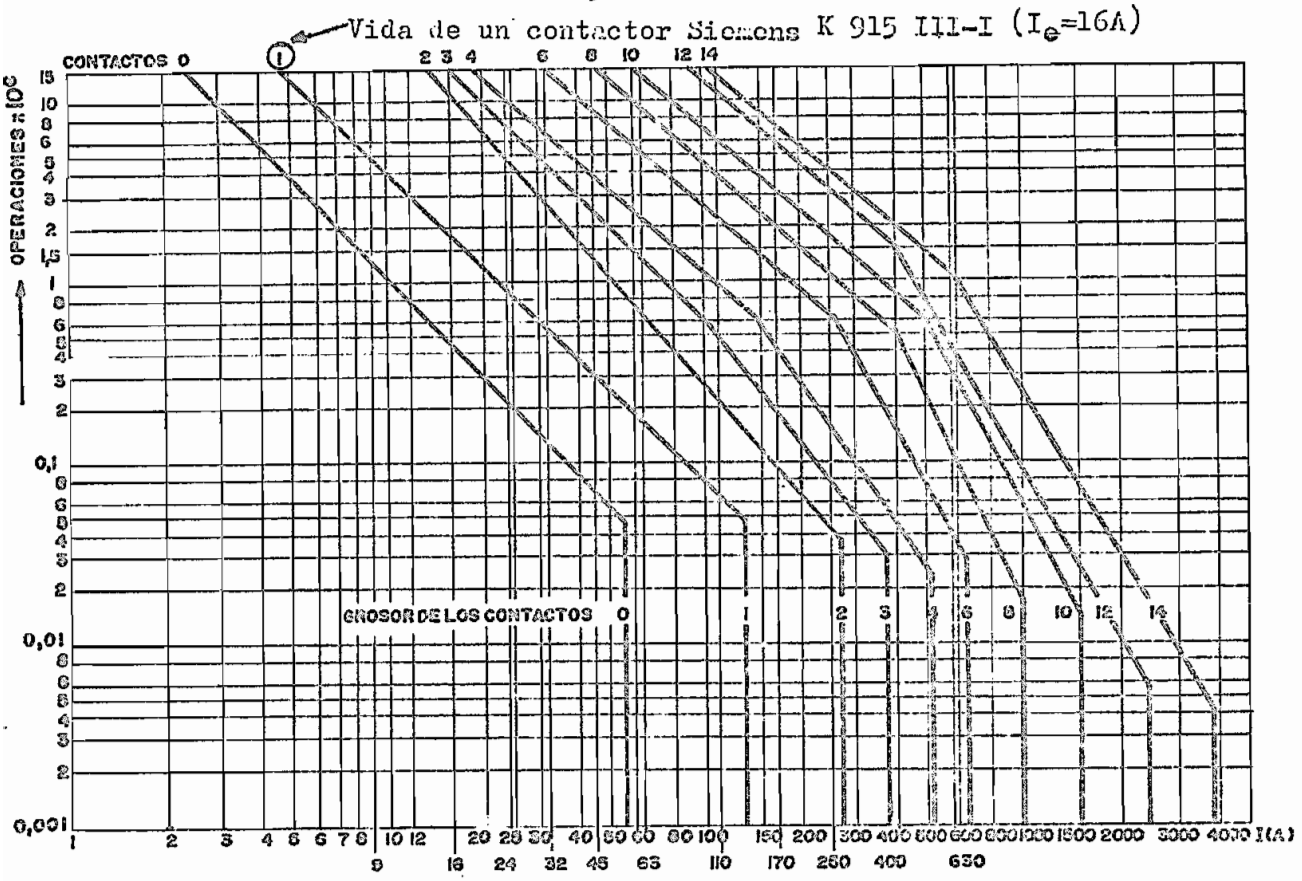


Figura 1.12.

1.12, que corresponden a un contactor Siemens K 915 III-I. (Corriente nominal 16 A).

La norma IEC-158-1.4.38 establece la capacidad de la corriente de desconexión con respecto a la corriente nominal del contactor I_e para un determinado tipo de servicio. Por ejemplo, no es lo mismo una corriente de desconexión de una carga óhmico y una carga inductiva o capacitiva.

Los contactos son diseñados de tal forma que permiten fácilmente hacer mantenimiento o cambio cuando éstos se han dañado. La vida total de un contactor se establece por el desgaste mecánico de su estructura, considerando que la bobina no ha sufrido sobrecalentamiento por a

001636

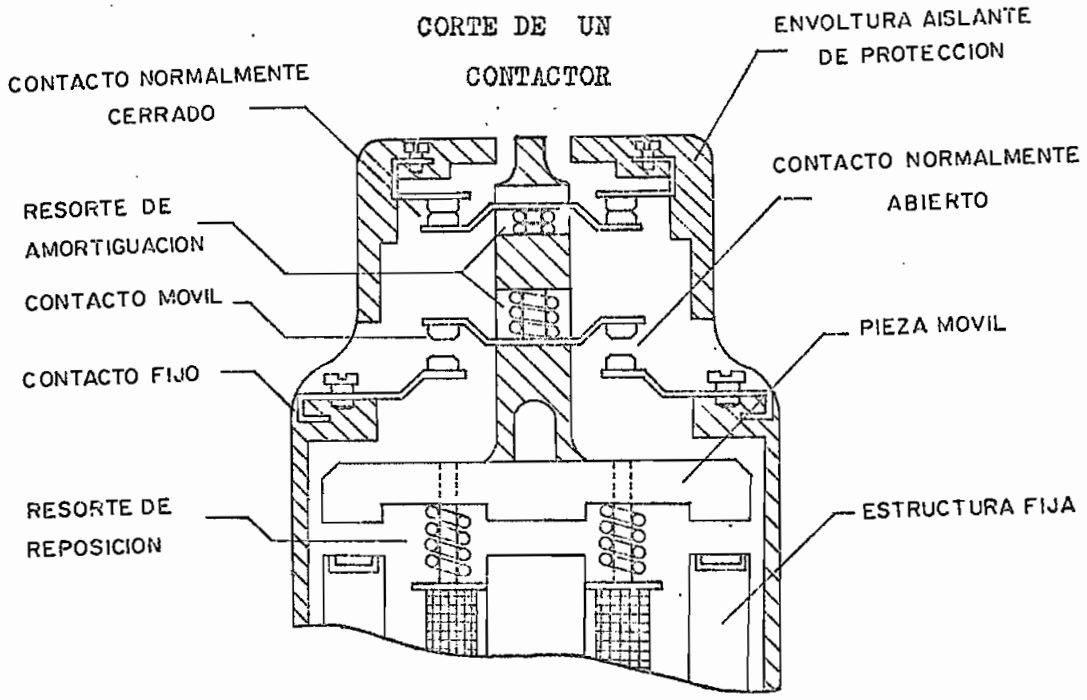


Figura 1.13

plicación de voltajes mayores. La vida mecánica con respecto a la duración de los contactos tienen una relación de 20 veces el número de ciclos de operación de los contactos, lo cual indica, que el contactor puede admitir en toda su vida normal ser cambiado 20 veces sus -- contactos. Tanto la duración mecánica como la de contactos, son datos que provee el fabricante de acuerdo a normas internacionales previamente establecidas.

El desgaste principal que sufren los contactos, además de la oxidación, sulfuración e impacto, se realiza por efecto del arco eléctrico producido en la apertura. Una forma de aumentar la vida de los contactos, es proveer al contactor de un soplado del arco. Antiguamente, este soplado del arco se lo hacía con aire a presión. En la actualidad se usan dos formas para soplar el arco:

a.- En contactores cuya corriente es de 30 hasta 100 A, se usan

las llamadas cámaras desionizadcras, que no son sino láminas de un material ferromagnético que cubre el exterior de los contactos; figura-1.14.

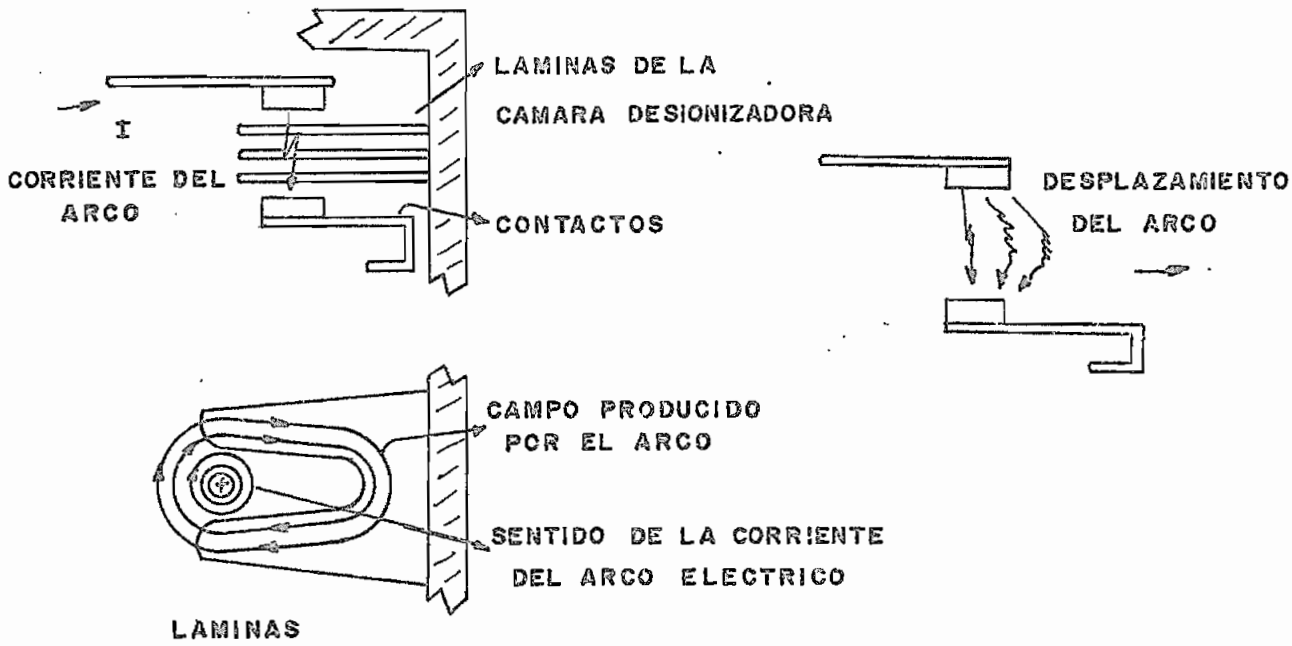


Figura 1.14

El arco tiende a desplazarse en el sentido indicado en la figura 1.14, debido a que la corriente del arco produce un campo magnético. Este tiende a circular por el camino de menos reluctancia, luego el conductor (que representa el arco eléctrico) se desplaza aumentando su longitud hasta que se apague.

b.- Para contactores en aire de más de 100 A y en general todos los contactores cuyos contactos sean para corriente continua utilizan

un "soplado magnético" que consiste en hacer incidir la forma perpendicular a la corriente del arco, un flujo magnético de modo que dicho arco (que se compacta con un conductor) se desplace por efecto motriz y desaparezca.

La forma de obtener este soplado magnético se muestra en la figura 1.15.

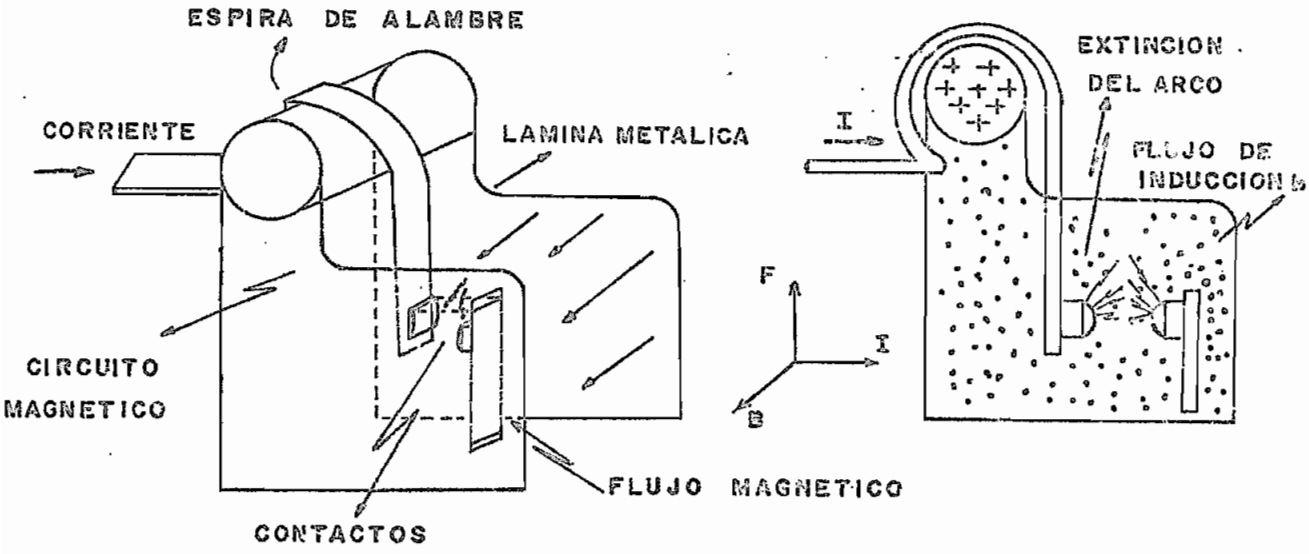


Figura 1.15.

En un contactor determinado se debe distinguir dos tipos de contactos:

a.- Los contactos principales o de trabajo.

b.- Los contactos auxiliares.

a.- Los Contactos Principales, según norma IEC 158-2.12, son aquellos incluidos en el circuito principal del contactor y que llevan la co--

rriente especificada en el contactor.

Generalmente todos los contactores de C.A. tienen tres contactos principales, puesto que su función es el mando de motores trifásicos. Sólo en el caso de contactores usados en arranques 人-△o con auto--- transformador se requiere el uso de 2 y 5 contactos principales.

b.- Los Contactos Auxiliares, según norma IEC 158-1.2.25, son aquellos incluidos en los circuitos auxiliares del contactor y operados mecánicamente por éste. Por su naturaleza, sólo son usados para activar o - desactivar las bobinas de otros contactores. Por consiguiente, su corriente es pequeña. Si no se establece lo contrario, la corriente que pueden soportar son 6 A. Hay dos clases de contactos auxiliares:

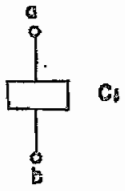
1.- Los contactos auxiliares normalmente abiertos. (a).

2.- Contactos auxiliares normalmente cerrados, (b) según norma IEC 158-1.2.2.6 y 2.2.7.

Los normalmente abiertos son aquellos que se cierran cuando los contactos principales son cerrados y viceversa. Es decir, que en estado de reposo estos están abiertos.

Los normalmente cerrados son aquellos que en estado de reposo , están cerrados y cuando los contactos principales se han cerrado, estos se abren.

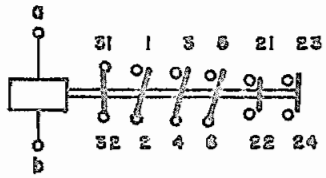
Según las normas IEC 117.3 o la Din 50713 sobre símbolos eléctricos, la bobina de un contactor o relé se presenta como: Fig. 1.16.



TERMINALES DE LA BOBINA (a-b)

Figura 1.16.

Asociado a este contactor, mecánicamente unidos van los contactos principales y auxiliares. Figura 1.17.



CONTACTOS	PRINCIPALES		1 - 2 3 - 4 5 - 6
CONTACTOS	AUXILIARES	N.A	21 - 22 23 - 24
"	"	N.C	31 - 32 33 - 34

Figura 1.17.

Las características de un contactor vienen determinadas según las normas IEC 158-1.4 por los siguientes términos:

1.- Tipo de contactor.

2.- Valores nominales.

3.- Sistemas de circuito de control y contactos auxiliares.

1.- Tipo de Contactor. Se debe especificar:

- Número de polos.
- Clase de corriente. Si los contactos de trabajo son para circuitos c.c. o c.a. si se trata de c.a. la frecuencia.
- Medio de interrupción. Si la forma de extinguir el arco es en el aire, en aceite, etc.
- Método de control. Es decir, si el accionamiento es electromagnético, neumático, etc.

2.- Valores nominales. Según la norma que se especifica en la placa de los contactores, estos traen los siguientes valores nominales:

Según normas IEC 158-1

V_e = Voltaje nominal de operación (se refiere a los contactos principales). Definición según artículo 4.3.1.1.

I_e = Corriente nominal de operación. Definición según artículo 4.3.2.2. Algunos contactores no traen explícitamente este valor de I_e, pero viene determinado en forma de potencia activa para un determinado voltaje de operación V_e y "categoría de utilización" que se encuentran definidas en

el artículo 4.3.6.; por ejemplo categoría AC3 o AC4.

I_{th} = Corriente de régimen térmico. Definición artículo - 4.3.2.2.

f = Frecuencia nominal. Definición artículo 4.3.3.

U_i = Nivel de aislamiento. Definición artículo 4.3.1.2.

3.- Sistema de Circuito de Control. Sobre el circuito de control viene especificado:

- U_c = Tensión nominal de la bobina con la respectiva clase de corriente (c.a. o c.c.). Si la bobina es de c.a. la frecuencia (artículo 4.5.).
- La clase de los Contactos Auxiliares si son normalmente abiertos o cerrados, el número y la capacidad de corriente. Cuando no se especifica lo contrario, la corriente - nominal de los contactos auxiliares es 6A y el voltaje y frecuencia se asume el de los contactos principales.

Cuanto todos los contactos de un contactor son de la misma capacidad de corriente y esta no pasa de 10 A., se llama contactor auxiliar. Este sirve como elemento de acción de otros contactores en un - circuito de control.

1.3. Temporizadores o Relés de Tiempo.

La automatización de los circuitos de control se realiza mediante relés temporizados, los cuales se encargan de operar el circuito a

intervalos de tiempo previamente calibrados. Estos se pueden regular para controlar períodos de tiempo cortos como fracciones de segundo , o también largos, como de varios minutos y hasta horas, como en el caso de relés de tiempo a motor.

Según el principio que utilizan para retardar el tiempo de accionamiento se conocen los siguientes tipos:

Relés de Tiempo a Motor.

Relés de Tiempo Neumáticos.

Relés de Tiempo Inductivos.

Relés de Tiempo Capacitivos.

Relés de Tiempo Térmicos.

Relés de Tiempo Electrónicos.

Según la acción que realizan cualquiera de los relés de tiempo-anteriores, estos pueden ser:

a.- Relés de Tiempo con retardo posterior a la excitación (on-delay).

b.- Relés de Tiempo con retardo posterior a la desexcitación -- (off-delay).

a.- Un relé de tiempo con retardo posterior a la excitación (on-delay) es aquel que cierra sus contactos con intervalo de tiempo (previamente calibrado) después que la bobina o elemento de operación del relé recibió una señal de corriente eléctrica. Por ejemplo, si el relé

de tiempo es tipo a motor y su acción es con retardo a la excitación, éste se representará como indica la figura 1.18

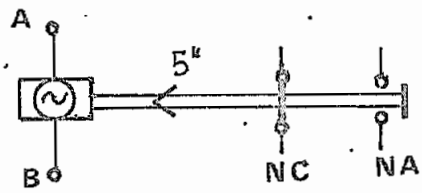


Figura 1.18

Generalmente las letras de designación que acompañan a estos relés son RT o TR. La representación de estos relés en diagramas funcionales se hace de la siguiente manera:

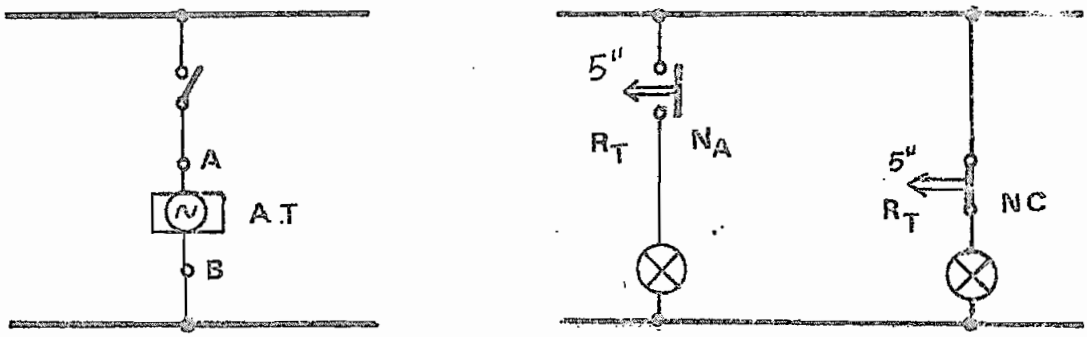


Figura 1.19.

Las figuras 1.18 y 1.19 indican que este relé opera sus dos contactos (NA y NC), 5 segundos después de que los terminales a y b del motor han recibido señal eléctrica. Cuando la señal eléctrica de los terminales a y b desaparece (es decir, cuando desconectamos al interruptor b de la figura 1.17), instantáneamente sus contactos vuelven

vuelven a su posición inicial o estado de reposo.

b.- Un relé con retardo posterior a la desexcitación (off-delay) es el que opera sus contactos instantáneamente cuando la bobina o elemento de operación del relé ha recibido señal eléctrica, pero cuando la señal desaparece sus contactos se reponen, es decir, vuelven a su posición inicial después de un intervalo de tiempo previamente cali-- brado. Por ejemplo, si el relé es de tiempo a motor y retardado a la desexcitación, éste se representa de la siguiente manera:

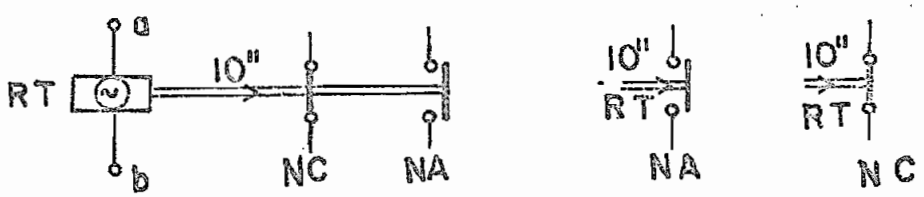


Figura 1-20

El símbolo de la figura 1.20 quiere decir que los contactos (NA y NC) operan instantáneamenta cuando los terminales a y b del relé TR han recibido señal eléctrica pero vuelven a su posición inicial (reposición) 10 segundos después de que la señal de los terminales a y b- es quitada.

En ciertos casos se necesitan relés de tiempo con retardo a la excitación y desexcitación a la vez. Este tipo de relé resulta de la combinación de los tipos de relé antes mencionados, los cuales pueden ser calibrados independientemente su retardo a la excitación o desexcitación. Algunos relés pueden tener un cierto tipo de elemento usado -

para el retardo a la excitación (por ejemplo motor) y otro elemento - para el retardo a la desexcitación (pueden ser inductivos, neumáticos, etc).

La representación de este tipo de relé, es como se indica en la figura 1.21.

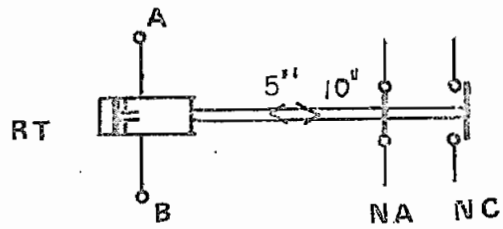


Figura 1.21.

Este RT retarda 5" a la excitación y 10" a la desexcitación. Estos contactos, independientemente se representan de la siguiente manera:

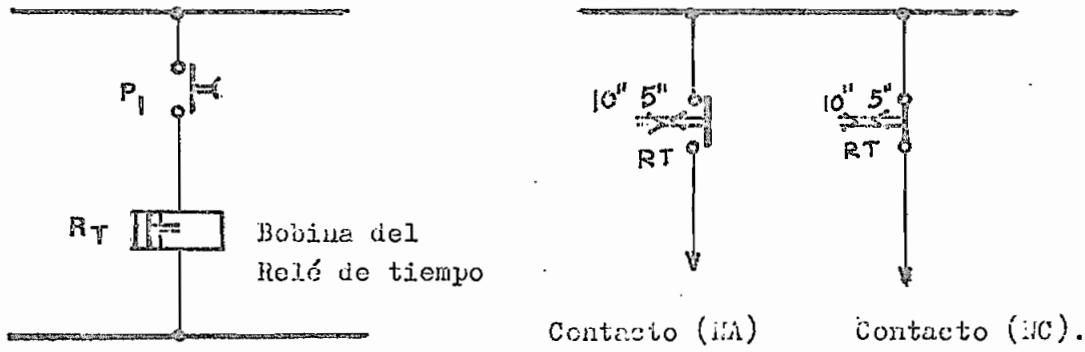


Figura 1.22.

Algunos tipos de relés de tiempo, además de tener los contactos de retardo (on-delay y off-delay), vienen provistos de unidades de -- contactos instantáneos, que son montados en ciertas posiciones mecáni

cas en donde se puede detectar el inicio del movimiento. Estos contac tos instantáneos, para su representación, no llevarán el símbolo de - retardo. Figura 1.23.

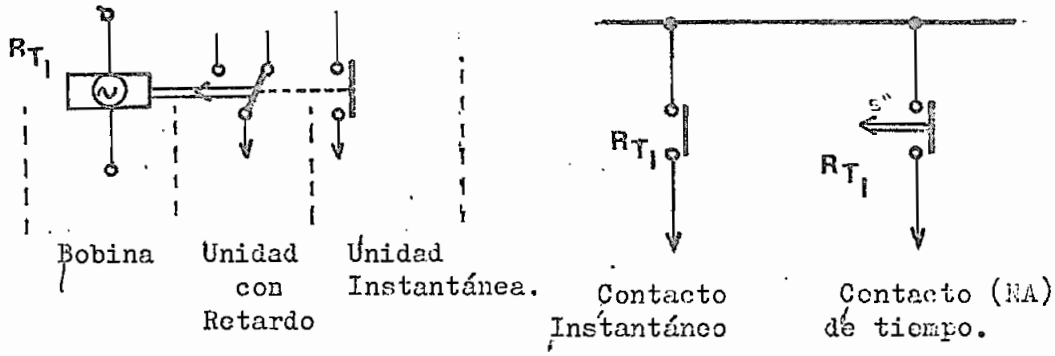


Figura 1.23.

Los relés de tiempo tipo a motor para proveer el retardo de accionamiento de los contactos, tienen un mecanismo de relojería accionados por un pequeño motor sincrónico. Acoplado a uno de los piñones de reducción de velocidad hay un diente que acciona los contactos, -- los cuales se mantienen cerrados durante el tiempo que está conectado el motor. Cuando el motor se desconecta, los piñones se desengranan y un resorte hace que éstos vuelvan a su posición inicial.

El tiempo de ajuste deseado se obtiene desplazando la posición del piñón que acciona sobre los contactos. Estos relés de tiempo tipo a motor pueden brindar retardos de unos pocos segundos así como tiempos largos de una hora, además tienen las ventajas de poder trabajar en ambientes en donde la temperatura o humedad son variables, sin que

se altere la precisión del tiempo calibrado. Adecuándoles debidamente, pueden servir como relés de tiempo de tipo cíclico, es decir, que pueden realizar procesos repetitivos gracias a su mecanismo o motor.

Los relés de tiempo tipo neumáticos, para su accionamiento tiene un electroimán similar al de un contactor, sobre él, van montados contactos instantáneos y, para el accionamiento retardado tienen a un elemento neumático unido mecánicamente a los juegos de contactos temporizados como indica la figura 1.24

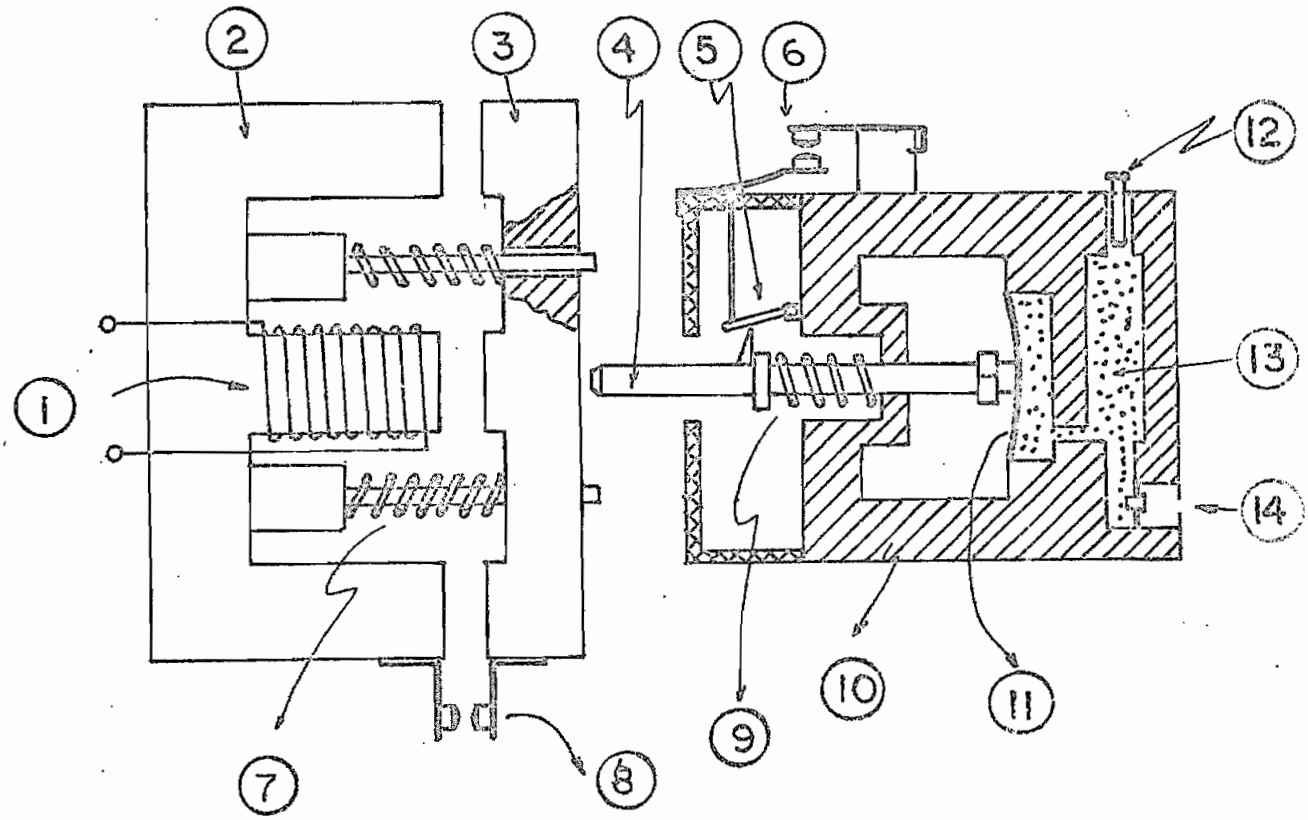


Figura 1.24.

ESQUEMA DE UN RELE DE TIEMPO TIPO NEUMATICO.

1.- Bobina de excitación

2.- Núcleo magnético.

3.- Pieza móvil

4.- Vástago.

5.- Balancín.

6.- Contactos con retardo de tiempo.

7.- Resortes de reposición (b).

8.- Contactos instantáneos.

9.- Resorte (a).

10.- Caja hermética.

11.- Diafragma de caucho de silicona.

12.- Tornillo de regulación de entrada de aire para ajustar el tiempo de retardo.

13.- Cámara de aire.

14.- Válvula de escape.

Cuando la bobina es excitada, la pieza móvil es atraida cerrándose los contactos instantáneos del relé. En ese instante el vástago del elemento neumático queda separado de la pieza móvil, la cual empieza a moverse lentamente debido a que sobre éste actúa el resorte (a) del elemento neumático y el aire entra por un orificio (controlado por el tornillo de regulación), actuando sobre el diafragma de caucho de silicona que es el que permite que el vástago se mueva retarda

damente y produzca el cierre de los contactos de retardo a través de mecanismos. Mientras más cerrado esté el orificio de entrada de aire, mayor será el tiempo de retardo, puesto que aumentará la subpresión - de aire en la cámara y no permitirá que el vástago se mueva con facilidad. Cuando se desexcita la bobina, los resortes de reposición (b)- del electroimán hacen que la pieza móvil vuelva a su posición inicial, actuando sobre el vástago, el cual repone los contactos de retardo instantáneamente. La membrana de caucho de silicona al ser empujada por- el vástago saca el aire de la cámara a través de la válvula de escape. Estos relés se pueden ajustar en un rango de 1/5 a 180 segundos aproximadamente. De la forma de como se coloque el elemento neumático, se pueden obtener relés de tiempo on-delay o relés off-delay.

En algunos circuitos de corriente continua se utilizan los relés de tiempo de tipo inductivo. Estos por su naturaleza, brindan retardo a la desexcitación, es decir, son off-delay. A continuación, se describirá el principio en el cual se basa su funcionamiento. Cuando la bobina L_1 del relé mostrado en la figura 1.25, se excita, esta produce un flujo magnético suficiente como para atraer la pieza- móvil cerrándose los contactos casi instantáneamente, ya que la constante del tiempo $\frac{C_1}{R_1} << 1$ seg. en la práctica.

La bobina L_2 de la figura 1.24, está en cortocircuito y su re--

sistencia eléctrica debe de ser lo más baja posible de modo de obte-- ner en este circuito una constante de tiempo de 1 a 2 segundos.

$$\left(\frac{L_2}{R_2} \approx 2 \text{ seg.} \right)$$

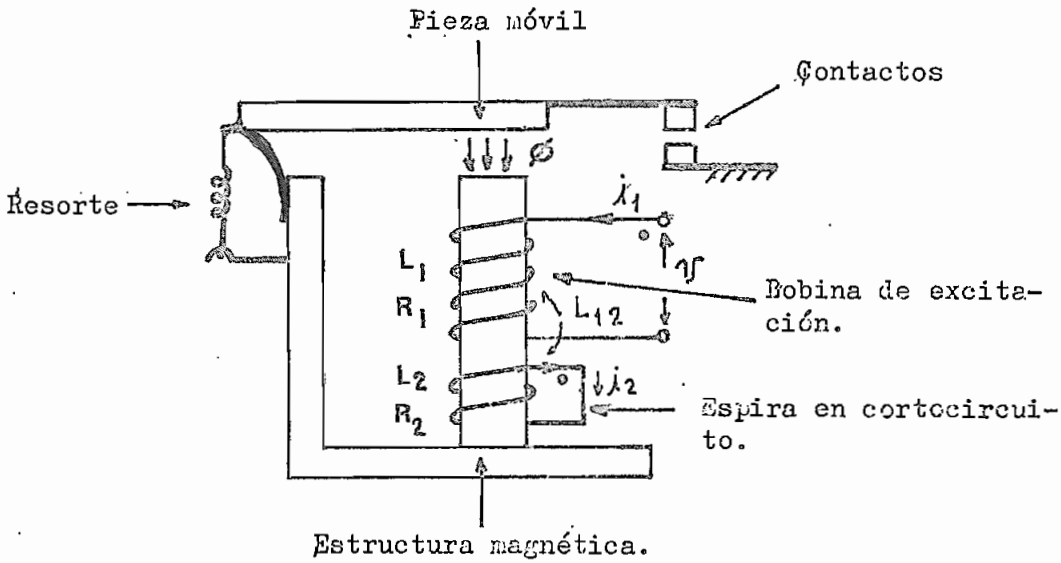


Figura 1.25

Cuando la bobina L_1 es desexcitada, la energía magnética almacenada en forma de flujo no desaparece instantáneamente sino que se disipa en forma de calor en la resistencia R_2 de la bobina L_2 que está en cortocircuito. Por consiguiente la corriente que ésta mantiene circulando, produce un flujo magnético que hace que el tiempo de reposición de los contactos se retarde. El tiempo de desconexión lo podemos encontrar planteando la ecuación de equilibrio eléctrico del sistema. Para esto habremos de asumir que este es un sistema ideal, es decir -

que su núcleo magnético es de permeabilidad infinita, las inductan--- cias L_1 y L_2 y mutua inductancia L_{12} se mantienen constantes aunque va- ría su circuito magnético y despreciaremos el tiempo en que se demo-- ren en recorrer los contactos la distancia del entrehierro.

Las condiciones iniciales, es decir, cuando L_1 está conectada - son:

Al tiempo t=0 (-) $$I_1 = \frac{V}{R_1}$$

$$I_2 = 0$$

Cuando la bobina L_1 se desexcita:

t= 0 en adelante:

$$I_1 = 0$$

$$0 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - L_{12} \frac{di_1}{dt}$$

Resolviendo esta ecuación, utilizando transformadas de Laplace, se tiene:

$$0 = R_2 I_2 + L_2 (SI_2 - I_{2(o)}) - L_{12} (SI_1 - I_{1(o)})$$

De las condiciones iniciales se tiene:

$$I_{1(o)} = \frac{V}{R_1}$$

$$I_{2(o)} = 0$$

Como I_1=0 después de t=0 se tiene:

$$0=(R_2+L_2S)I_2+L_{12}I_{1(o)}$$

$$I_2 = -\frac{L_{12}\ \frac{V}{R}}{(R_2+L_2S)} = \frac{\frac{L_{12}}{L_2} x\ \frac{V}{R}}{\left(\frac{R_2}{L_2}+S\right)}$$

Tomando la transformada inversa:

$$i_2(t)= -\frac{L_{12}}{L_2} x\ \frac{V}{R}\ e^{-\frac{R_2}{L_2}t}$$

Llamando:

$$I_2= -\frac{L_{12}}{L_2} x\ \frac{V}{R}$$

$$\tau_2 = \frac{L_2}{R_2}\ \text{(Constante de tiempo)}$$

Se tiene:

$$i_2(t) = I_2\ e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

$i_2(t)$ se mantendrá más tiempo mientras τ_2 sea más grande es decir mientras más pequeña sea la resistencia R_2.

En la práctica, esta espira en cortocircuito es un cilindro de-cobre (una espira) cuya resistencia es $R_2 \approx 0005\Omega$, que rodea al nú---cleo magnético como muestra la figura 1.25

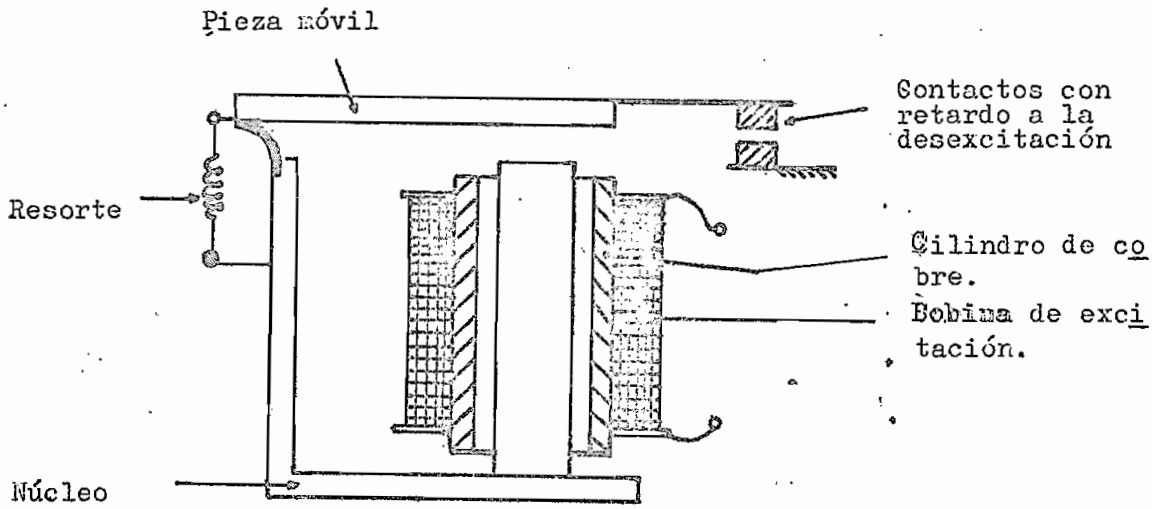


Figura 1.25.

En forma similar se pueden obtener relés de tiempo de tipo capacitivos, cuyo principio de funcionamiento se basa en la carga o descarga de un condensador.

CAPITULO II.

CIRCUITOS BASICOS DE CONTROL.

La forma y clases de circuitos eléctricos existentes, son de varios tipos. Tanto en el diseño, construcción, mantenimiento y operación, es necesario de instrucciones concretas que permitan facilidad en el trabajo. Los diagramas son justamente el medio por el cual el diseñador, constructor y técnico se comunican fácilmente; de ser así, éstos deben ser simples, los signos o símbolos deben ser de conocimiento general y en el mejor de los casos estandarizados.

2.1. Diagramas y simbología.

La elaboración del diagrama tiene como objeto cumplir con los siguientes objetivos:

a.- Servir de ayuda en la explicación del funcionamiento del circuito, mediante el cual se puede hacer modificaciones al diseño.

b.- Que los diagramas sean usados como guía en la realización del alambrado de control, de equipos o tableros de control, de equipos o tableros de control. El técnico que realiza este trabajo no necesita conocer en detalle el funcionamiento del circuito, pero sí es necesario que se lo indique exactamente la posición física de los aparatos y el recorrido más económico que tengan los conductores.

c.- Que los diagramas indiquen claramente la interconexión entre las piezas del circuito de control con las máquinas u otros tableros. Esto servirá a los instaladores del equipo - para usar los terminales que le corresponden en un mínimo - de tiempo; y

d.- Que los diagramas sean una guía eficaz para la localización de una falla o para realizar mantenimiento por los operadores del sistema.

Para cumplir los objetivos arriba mencionados, un sistema de -- control debe ser representado de la siguiente forma:

I.- Diagrama funcional o elemental.

II.- Diagrama de conexión o de montaje que incluye el diagrama de interconexión.

I.- Diagrama funcional o elemental.

En circuitos de control industrial, el diagrama funcional representa el circuito en dos partes:

I. 1.- Circuito de mando; y

I. 2.- Circuito de trabajo o potencia.

I.1. El circuito de mando, agrupa: alimentación a las bobinas de los contactores o relés a través de los pulsantes, contactos auxiliares , llaves de seguridad, etc. De ser así, la corriente absorbida por este circuito es baja, por consiguiente la sección de los alambres de los

DIAGRAMA FUNCIONAL DE MANDO DE DOS MOTORES.

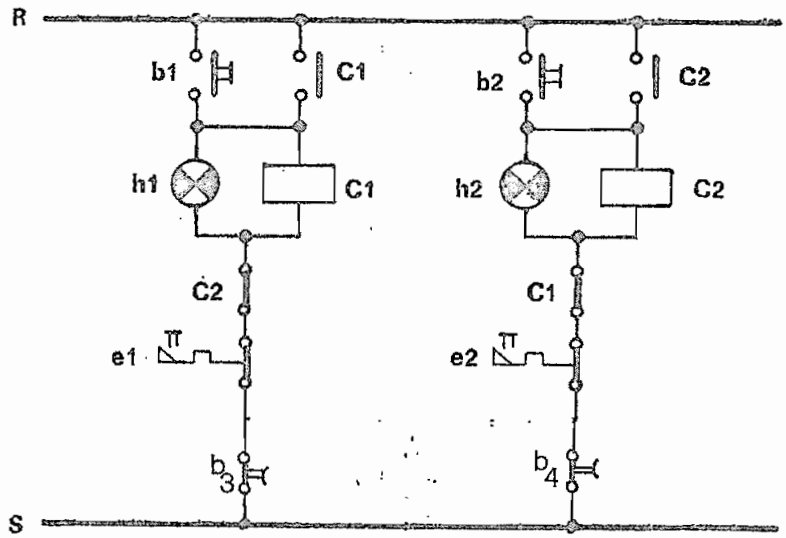


Figure 2.1

CIRCUITO DE POTENCIA O DE TRABAJO DEL CIRCUITO DE MANDO ANTERIOR.

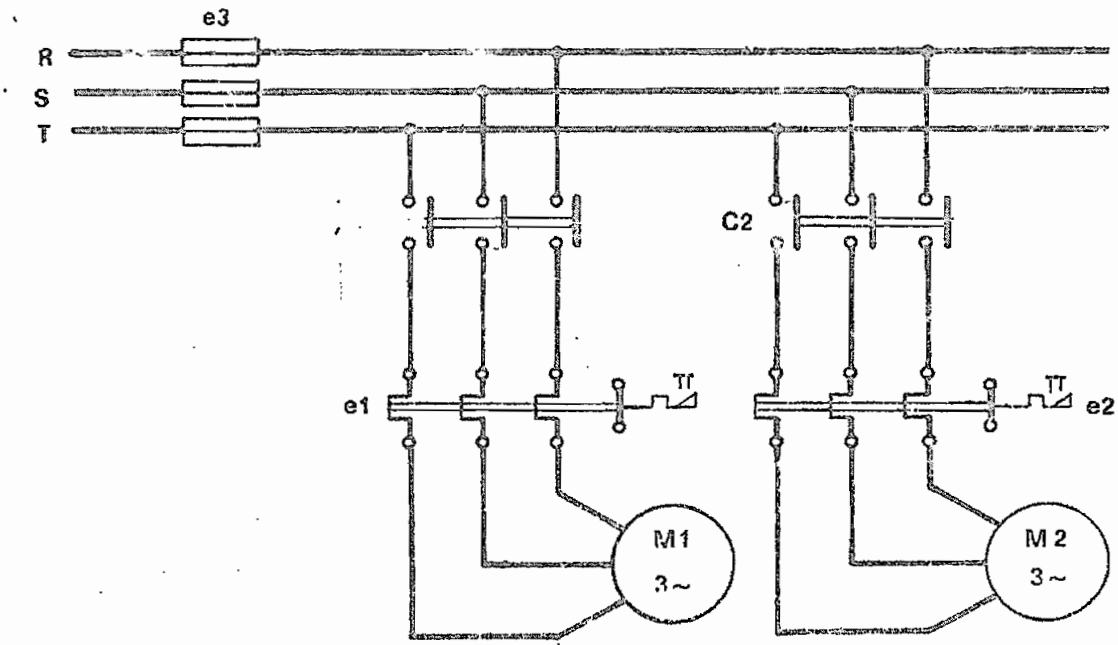


Figura 2.2

circuitos de mando se recomienda realizar con alambre #16AWG, si no hay norma que especifique lo contrario. En este circuito, para lograr más sencillez, los diferentes aparatos pueden situarse en el dibujo, sin importar la posición física, debe evitarse en lo posible los cruces de líneas y se debe asumir una designación adecuada para cada elemento. Por ejemplo, el diagrama funcional de la figura 2.1 representa el circuito de control de dos motores que pueden ser accionados con botones desde dos puestos diferentes.

I. 2. El circuito de trabajo o de Potencia, agrupa a las máquinas que se van a controlar, los contactos principales de los contactores, protecciones de las máquinas, el tipo de alimentación de las máquinas (a corriente continua o alterna de tres fases), etc.

Por este circuito circulará la corriente de carga de las máquinas, lo que significa que los conductores que alimentan o conectan las diferentes piezas de este circuito serán de una sección mayor que la sección de los conductores del circuito de control. Esta sección dependerá del cálculo en base a la potencia de las máquinas, pero cualquiera que sea su valor, es necesario hacer notar que debido a esto, las líneas utilizadas en estos circuitos serán más gruesas que las líneas empleadas en el circuito de mando. En la figura 2.2 apreciamos el circuito de potencia del ejemplo anterior.

II. Diagrama de conexión o de Montaje. Este representa el circuito --

DIAGRAMA DE CONJUNTO O DE MONTAJE

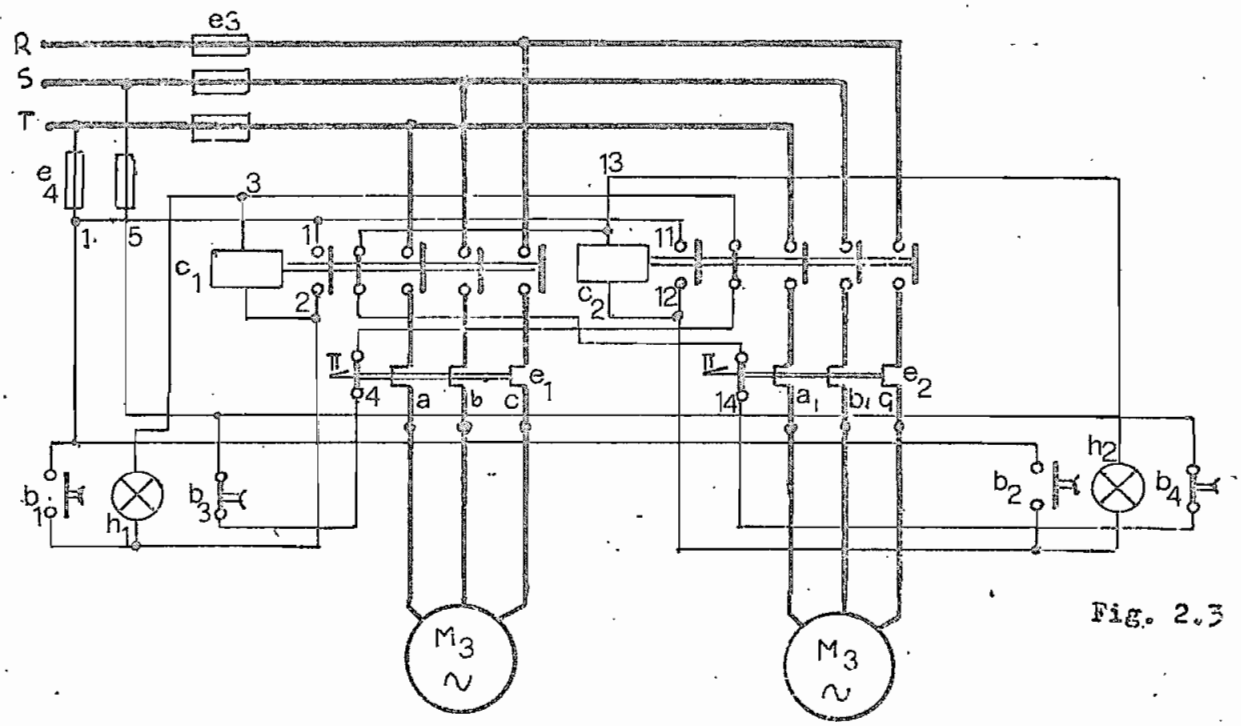


Fig. 2.3

DIAGRAMA DE INTERCONEXION.

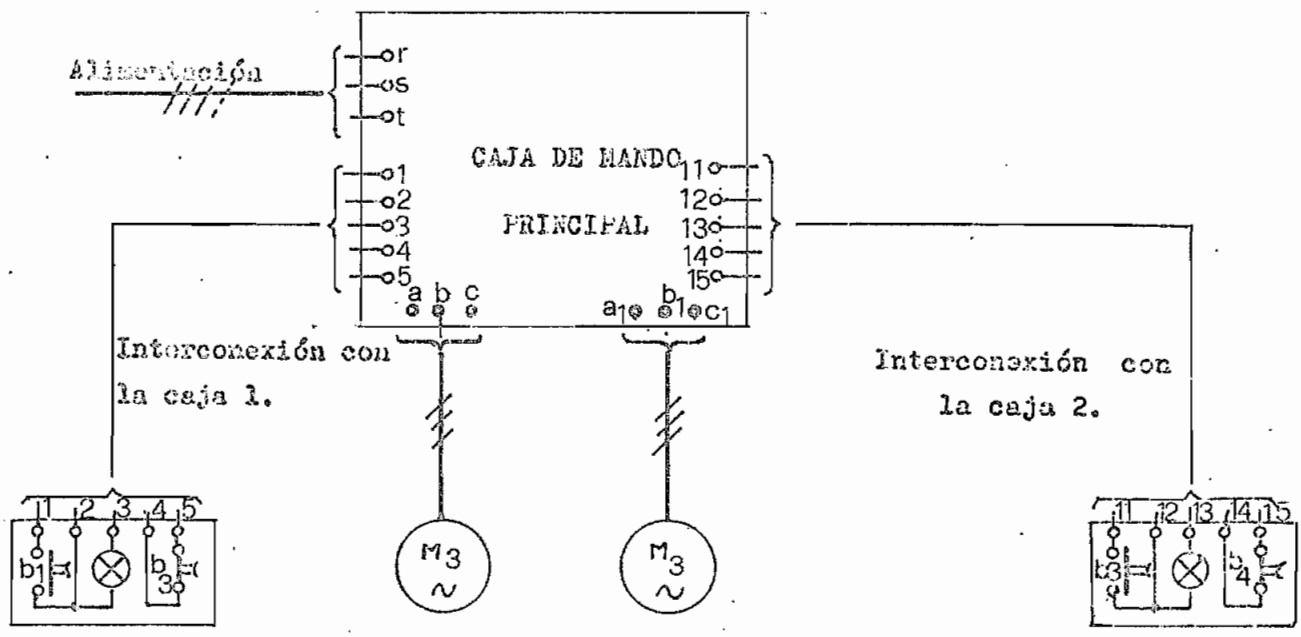


Figura 2.4.

con sus elementos dispuestos en la posición física que ocuparán en el tablero o sistema de control. Eléctricamente, agrupa en un sólo circuito tanto el circuito de mando, como el circuito de potencia.

La figura 2.3 muestra el diagrama de conjunto del ejemplo de la figura 2.1. Este tipo de diagrama es útil para el técnico que va a realizar el alambrado, puesto que en él encuentra la información sobre el recorrido de los conductores y la posición correspondiente de los elementos del circuito.

Cuando el sistema de control incluye varios tableros, máquinas o fuentes de alimentación que tienen interconexión entre ellos, adjunto al diagrama de montaje, se recomienda presentar un diagrama de interconexión. La figura 2.4, presenta el diagrama de interconexiones de las dos máquinas del ejemplo anterior, interconectadas con el tablero principal en donde van montados todos los contactores, pulsantes, protecciones, etc; y el tablero secundario en donde se complementan los mandos del sistema. Como se ve en este diagrama, las conexiones internas no interesan al instalador, pero sí es necesario la numeración de las terminales y la posición del equipo y la referencia correspondiente del diagrama funcional o de montaje de la parte que sea de interés.

Simbología. Antiguamente, cada fabricante de equipo eléctrico acostumbraba elaborar su propia representación de los aparatos y adjuntar a

los diagramas en forma de leyenda. Con el tiempo se vio que esto resultaba inconveniente por varias razones: desde el punto de vista de los fabricantes, estos símbolos resultaban incómodos, puesto que no habían sido estudiados para que resulten simples. Esto traía como consecuencia pérdida de tiempo en la realización de los mismos. Desde el punto de vista del usuario, las diferentes formas de representar de cada fabricante causaba desconcierto a los técnicos y encargados del mantenimiento. Como resultado, los fabricantes y usuarios de equipo eléctrico decidieron trabajar juntos en elaborar una simbología estandar que satisfaga condiciones convenientes para todos. Estos símbolos deben tener presente los siguientes postulados: los símbolos deben ser simples tanto para trazarlos como para entender el equipo que trata de representar; los símbolos deben ser concisos.

Todavía no se ha llegado a tener una simbología que sea reconocida internacionalmente; aunque existen organismos como la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional), que tratan de unificar a nivel internacional, tanto normas como símbolos. En EE.UU. se conoce la simbología elaborada por NEMA, ASA, ANSI; en Europa, por VDE, IEC, SVE, AEE, DIN. Sobre control industrial, los símbolos dados por la IEC han sido adoptados en su mayoría por las normas americanas ANSI. En nuestro país el INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) ha elaborado también una simbología que se acoge en su mayoría a las normas IEC. Para

el desarrollo del presente tratado, se ha adoptado la simbología dada en el apéndice Nº 1 referente a: "Contactos, interruptores, mandos mecánicos, arrancadores y elementos de relés electromecánicos". (Proyecto A4 de Norma Ecuatoriana).

2.2. Excitación de Contactores mediante Contactos Normalmente Abiertos y Normalmente Cerrados.

La energización de la bobina de un contactor, se puede realizar mediante el cierre de un interruptor (como el ejemplo anterior), pulsante o mediante el cierre o apertura de otro contactor.

En la figura 2.5, se presenta el funcionamiento del contactor A mediante el cierre del contactor correspondiente al contactor B que puede estar asociado a otra parte del circuito.

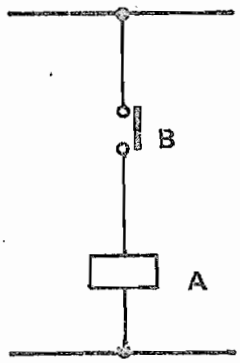


Figura 2.5.

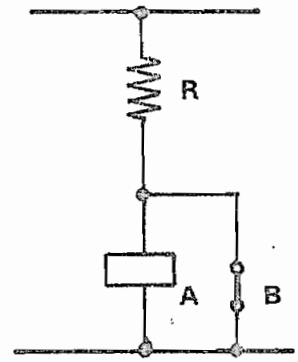


Figura 2.6.

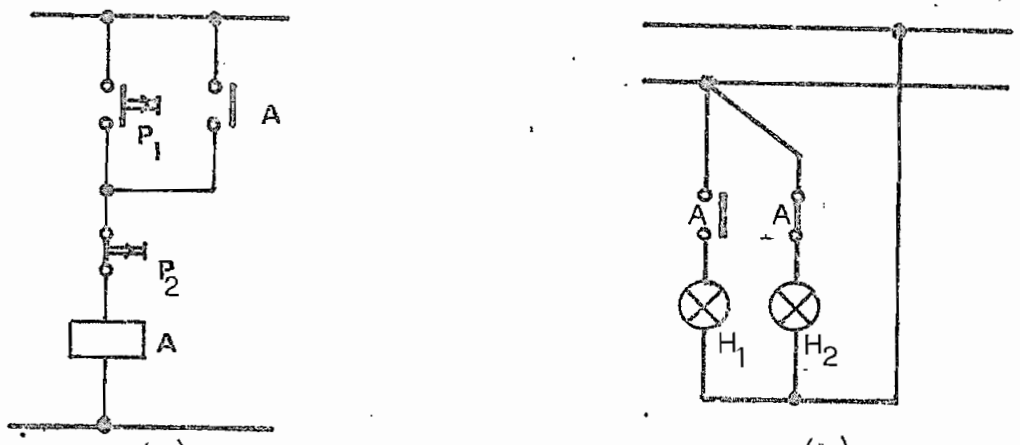
El mismo contactor A de la figura 2.5. puede energizarse mediante un contacto normalmente cerrado B del contactor B, como indica la figura 2.6. En este caso se utiliza la resistencia R para limitar la-

corriente del circuito a través del contacto B.

Los elementos que pueden dar la señal para que el contactor funcione pueden ser: contactos de un interruptor, pulsantes, contactos de relés auxiliares, de tiempo, térmicos, etc.

2.3. Circuitos con memoria y de enclavamiento.

El objeto de un circuito con memoria es indicar que se ha realizado cierta operación así haya cesado la señal de activación del contactor. Esta señal se puede quitar solo si se produce otra orden diferente. En la figura 2.7 (a) se tiene la energización de A (con memoria), mediante el pulsante P_1, puesto que es paralelo con éste, está el contacto A que viene a constituir la memoria o llamada también autoalimentación. La señal de A desaparece si se actúa sobre el pulsante normalmente cerrado P_2 o cuando la energía del sistema se ha cortado. A este tipo de memoria se le llama de enclavamiento o de sello con regreso a cero, puesto que cuando regresa la energía el circuito no reconoce en qué estado se encontraba.



(a) Figura 2.7. (b)

Asociado con este circuito de mando, puede estar el circuito de trabajo como indica la figura 2.7 (b). En este caso, la lámpara H_1 está encendida cuando el contactor A está activado y, la lámpara H_2 funciona cuando el contactor A se ha desenergizado, es decir cuando A está en reposo.

Una variación del diagrama de la figura 2.7 (a), es el que se muestra en la figura 2.8.

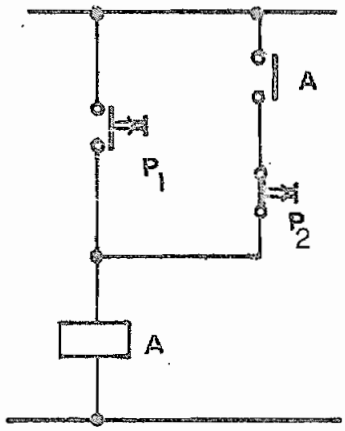


Figura 2.8.

También se puede tener un circuito con memoria, utilizando la señal de un pulsante P_1 normalmente cerrado, un contactor A, una resistencia R y un pulsante normalmente abierto para borrar la señal de A. Este diagrama se muestra en la figura 2,9 (a) (b) y (c); con el puede estar asociado el diagrama de trabajo de la figura 2.7 (b).

En circuitos en donde se requiere recordar la secuencia de funcionamiento así haya existido un corte involuntario de la señal del -

circuito de control, se usan elementos de memoria retentiva, los cuales necesitan de una señal eléctrica para funcionar y de otra señal independiente para desactivarse. Esto se consigue con contactores que tengan enganche mecánico al energizarse. Este enganche se suprime con otra bobina de levante. Ver figura 2.10.

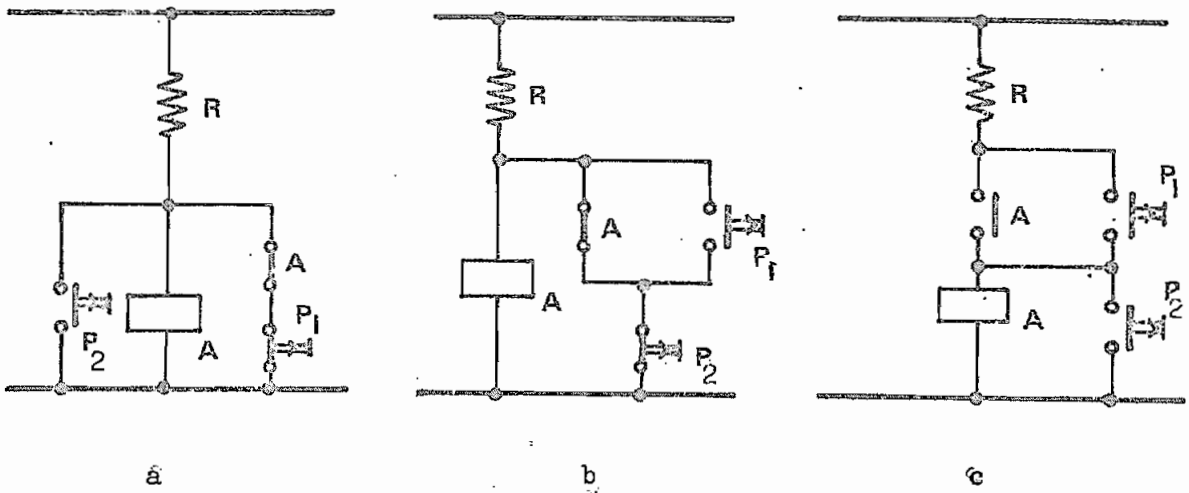


Figura 2.9.

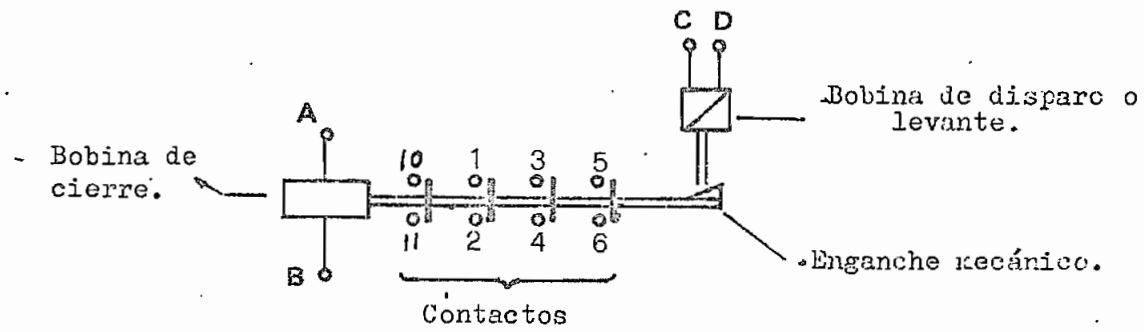


Figura 2.10.

El circuito de la figura 2.11 es de memoria retentiva, puesto que al presionar P_1 el contactor A todavía recuerda la señal. Sólo —

presionando el pulsante P_2, A deja de funcionar.

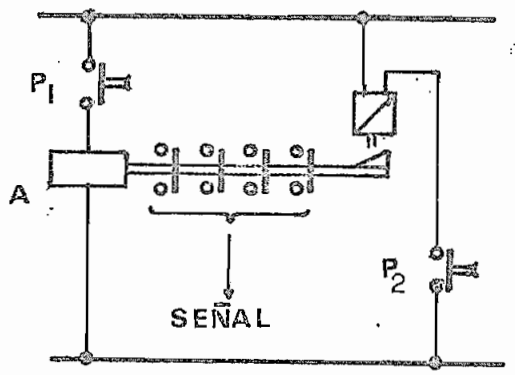


Figura 2.11.

2.4. Circuitos Serie, Paralelo de Contactos.

El circuito de energización de la bobina de un contactor gene-- ralmente depende del estado en que se encuentren los componentes del- circuito, sean éstos pulsantes, relés auxiliares, relés de protección, etc. Estos contactos son conectados entre sí en serie o en paralelo,- dependiendo de las funciones que se quiere que éstos realicen.

La conexión de dos o más contactos normalmente abiertos (NA) co mo indica la figura 2.12, se usa cuando se desea que el contactor o - relé X se energice; sólo si el contacto A y B y C se han cerrado.

Debido a que este circuito serie cumple con las condiciones des critas por la lógica gramatical con la conjunción copulativa "y", se lo conoce como circuito lógico "Y". La expresión lógica abreviada es $x \longrightarrow AyByC$.

La conexión de dos o más contactos (NA) en paralelo como indica

la figura 2.13 se usa cuando se desea que un relé X funcione cuando - el contacto de A o B o C se cierren.

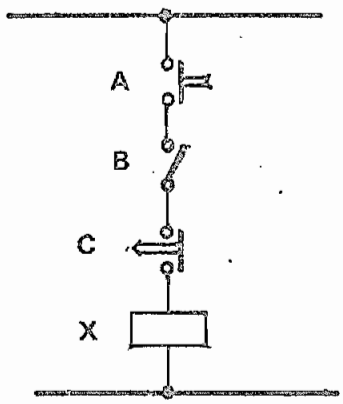


Figura 2.12

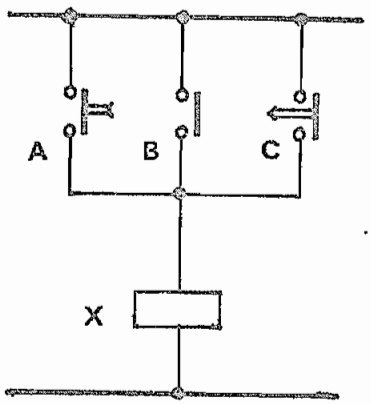


Figura 2.13.

Debido a que este circuito paralelo cumple con las condiciones- descritas por la lógica gramatical mediante la conjunción disyuntiva- "o", se lo conoce como circuito lógico "o". La expresión lógica abre-

viada es x⟶A o B o C.

Con el álgebra binaria se demostrará que el circuito "Y" es un multiplicador y el circuito "o" es sumador.

En la práctica es muy común encontrar combinaciones de estos dos tipos de circuitos que pueden ser interpretados y escritos con funciones lógicas. (Fig. 2.14.) (a), (b) y (c).

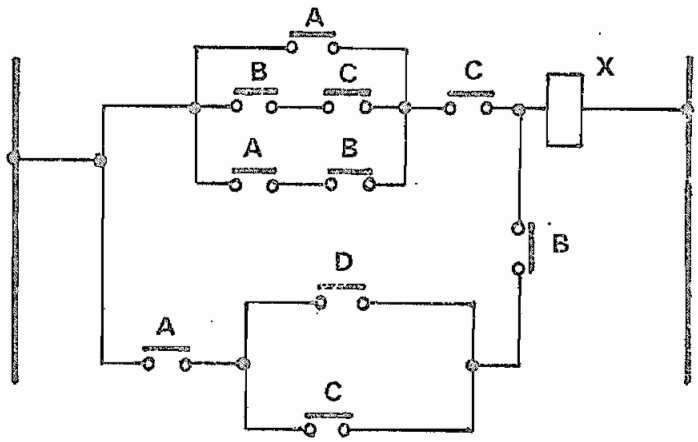


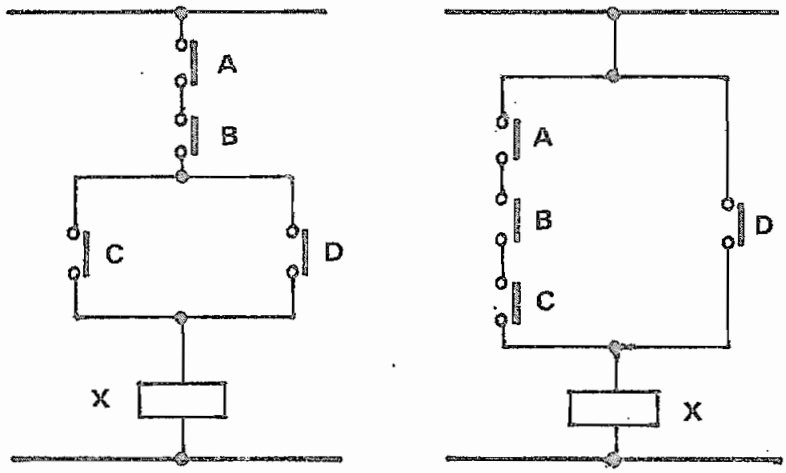
Figura 2.14.(a)

La expresión lógica para al fig. 2.14 (a)

X⟶(A o B y C o A y B) y C o A y (D o C) y B

Para la figura 2.14 (b) la expresión es: X⟶A y B y (C o D)

Para la figura 2.14 (c) la expresión es: X⟶(A y B y C) o D



(b) (c)

Figura 2.14.

La conexión en serie de dos o más contactos normalmente cerra-- dos (NC) es usada para que la bobina de un contactor X se desenergice si el A' o B' o C' se abren. Fig. 2.15

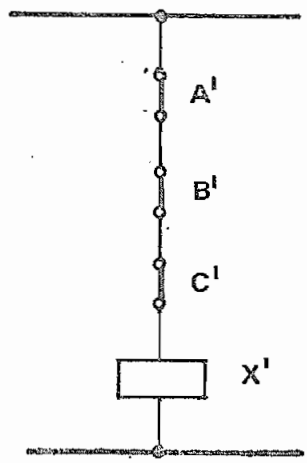


Figura 2.15.

También se puede interpretar como que X "no puede funcionar" si

A' o B' o C' se abren. Debido a que este circuito hace exactamente lo contrario del circuito paralelo ("o") de la figura 2.13 se lo llama - circuito "o inverso". La expresión lógica abreviada es:

X (No)——→A' o B' o C'

o también: X'——→ A' o B' o C'

Donde: A', B', C': indican que el contacto se abre y X(No)=X' - que no funciona.

La conexión en paralelo de dos o más contactos normalmente ce-- rrados (NC) se usa cuando se quiere obtener que la bobina de un con-- tactor X "No pueda funcionar" si los contactos (NC) A' y B' y C' se a bren. Fig. 2.16.

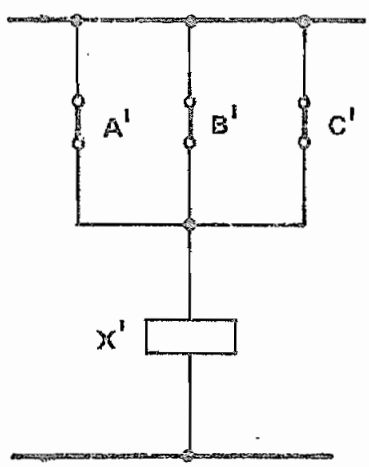


Figura 2.16.

Debido a que este circuito hace exactamente lo contrario del - circuito serie (y) de la fig. 2.10 se lo llama circuito "y inverso" . La expresión lógica abreviada es:

X'——→ A' y B' y C'.

Resumiendo: las expresiones lógicas básicas y su representación se tendrá:

Expresión lógica.	Representación.
"Y" (AND)	Contactos (NA) en serie
"O" (OR)	Contactos (NA) en paralelo
"Y inverso" (NAND)	Contactos (NC) en paralelo
"O inverso" (NOR)	Contactos (NC) en serie.

CAPITULO III.

3. REPRESENTACION DE FUNCIONES LOGICAS MEDIANTE EL ALGEBRA DE BOOLE.

El diseño de circuitos de control ya sea con elementos mecánicos (relés o contactores) o con elementos estáticos (díodos, transistores, válvulas, etc.) requiere de simplificación, tanto por razones económicas como de construcción.

El álgebra de Boole, al permitir la representación matemática - de "expresiones o Funciones Lógicas", representa una ayuda valiosa en el diseño, simplificación y posible substitución de circuitos de contactores con módulos estáticos.

Boole desarrolló una álgebra de dos valores aplicables a proposiciones lógicas que pueden ser "Verdaderas" o "Falsas". Los símbolos: "1" (uno) representa "Verdad" y "0" (Cero) "Falsedad". Como las letras "Y" (Conjunción copulativa) y "o" (Conjunción disyuntiva), son muy utilizadas en la lógica gramatical, la letra "Y" se asoció con el signo matemático "." (multiplicación) y la letra "o" con el signo "+" -- (suma). Cuando una función lógica, al igual que una función matemática, resulta ser verdadero o falso se indica con el signo "=" (igual-- dad). Si la preposición o función lógica depende de algunas condiciones (variables independientes), ésta puede ser verdad o falsedad; entonces la preposición lógica será igual a una variable dependiente -- (X) que está restringida en este tipo de álgebra a tomar valores "0"-

(cero) o "1" (uno).

Por ejemplo, en la función booleana:

X = A+B

A,B variables independientes o condiciones.

X variable dependiente.

Esta función representada lógicamente sería:

X ⟵ A o B

que representa que X será verdad (1) si A o B son verdaderos (1).

De esta forma, el álgebra de Boole es aplicable a circuitos o elementos que pueden tomar uno de dos estados tales como los contactores (activados o no), transistores (conducción o no), etc.

Debido a que el álgebra de Boole asocia dos estados: verdad (1) y falso (0), se la conoce también como "Algebra Binaria", "Algebra de Conmutación", etc.

3.1. Símbolos y Teoremas.

A partir de los dos valores que pueden tener las variables lógicas se tienen las siguientes definiciones que representan las reglas de cálculo en esta álgebra:

$0.0=0$ (3.1)

$0.1=1.0=0$ (3.2)

$1.1=1$ (3.3)

$0+0=0$ (3.4)

$0+1=1+0=1$ (3.5)

$1+1=1$ (3.6)

Puede observarse que de las seis definiciones, sólo la (3.6) es diferente a la de la aritmética normal.

Si en estas definiciones se introducen los símbolos de las variables que representan el estado de los contactos de uno o más relés, se obtienen algunos teoremas que serán de utilidad. Para esto se establece que si un contactor o relé se representa con una letra mayúscula (A, B, X, etc) sus contactos también deben ir acompañados de la misma letra.

Cuando los contactos son normalmente abiertos (relé en reposo), X=0 y cuando los contactos son normalmente cerrados (relé en reposo), se representa como X'=1 conocido como valor inverso de X.

Sustituyendo estas variables en las definiciones anteriores se tiene:

$1 \cdot x = x$ (3.7)

$0 \cdot x = 0$ (3.8)

$1 + x = 1$ (3.9)

$0 + x = x$ (3.10)

$x \cdot x = x$ (3.11)

$x + x = x$ (3.12)

$x \cdot y = y \cdot x$ (3.13)

$$x+y=y+x \tag{3.14}$$

$$x+y+z=(x+y)+z=x+(y+z)=(x+z)+y \tag{3.15}$$

$$x.y.z=x(y.z)=y(x.z)=z(x.y) \tag{3.16}$$

$$x+xy=x \tag{3.17}$$

$$x(x+y)=x \tag{3.18}$$

$$(x+y)\ (x+z)=x+yz \tag{3.19}$$

$$x+x'=y \tag{3.20}$$

$$x.x'=0 \tag{3.21}$$

$$x=(x')' \tag{3.22}$$

$$(x+y+z)'=x'.y'.z' \tag{3.23}$$

$$(x.y.z)'=x'+y'+z' \tag{3.24}$$

$$(x+y')\ y\ =xy \tag{3.25}$$

$$xy'+y=x+y \tag{3.26}$$

$$xz+x'y+yz=xz+x'y \tag{3.27}$$

$$(x+y)\ (x'+z)\ (y+z)=\ (x+y)\ (x'+z) \tag{3.28}$$

$$(x+y)\ (x'+z)=xz+x'y \tag{3.29}$$

Todos estos teoremas pueden ser demostrados fácilmente y tienen su representación equivalente a un circuito de contactos o elementos estáticos. La demostración se realiza por sustitución de los valores 0 y 1 en cada una de las variables y se evalúa el resultado como indica la expresión. Esta sustitución sistemática se conoce como "Tabla de la Verdad". Por ejemplo, el teorema (3.9), se demuestra de la siguiente manera:

$\bar{x}$	$1 + \bar{x}$	
0	$1 + 0 = 1$	Según definición (3.5)
1	$1 + 1 = 1$	Según definición (3.6)

Luego: $1 + X = 1$ l.q.q.d.

El teorema (3.17) puede ser demostrado de igual forma:

x	y	$x + xy =$
0	0	$0 + 0 \cdot 0 = 0$
0	1	$0 + 0 \cdot 1 = 0$
1	0	$1 + 1 \cdot 0 = 1$
1	1	$1 + 1 \cdot 1 = 1$

Como en todas las cuatro posibles combinaciones de x e y, la expresión $x + xy$ toma los valores de x, entonces:

$x + xy = x$ l.q.q.d.

También puede ser demostrado por técnicas de factoreo del álgebra normal:

$x + xy =$

$x (1 + y) =$

Según el teorema (3.7) $(1 + y) = 1$

Luego: $x + xy = x$ l.q.q.d.

Los teoremas (3.23) y (3.24) son de interés, puesto que en base a esto se permite enunciar que la inverse de un circuito paralelo es

un circuito serie, con sus elementos variables invertidos y viceversa, como veremos al tratar las funciones inversas. La demostración se hace probando que la función suma para cualquier combinación es lo opuesto de la función producto:

x	y	z	x+y+z =	x'. y' . z' =
0	0	0	0+0+0 = 0	1 . 1 . 1 = 1
0	0	1	0+0+1 = 1	1 . 1 . 0 = 0
0	1	0	0+1+0 = 1	1 . 0 . 1 = 0
1	0	0	1+0+0 = 1	0 . 1 . 1 = 0
0	1	1	0+1+1 = 1	1 . 0 . 0 = 0
1	1	1	1+1+1 = 1	0 . 0 . 0 = 0

Luego: $(x+y+z)' = x' \cdot y' \cdot z'$ l.q.q.d.

El teorema (3.27) puede demostrarse con la ayuda de un artificio igual que en el álgebra normal:

$$xz + x'y + yz = xz + x'y$$

Como sabemos que: $x + x' = 1$ y la multiplicación por uno no altera el resultado, entonces:

$$xz + x'y + yz \ (x+x') =$$

$$xz + x'y + xyz + x'yz =$$

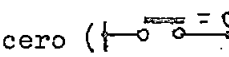
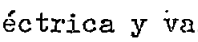
$$xz \ (1+y) + x'y \ (1+z) =$$

Como sabemos que: $1+y = 1$ y $1+z = 1$

Luego:

$xz+x'y+yz = xz+x'y$ l.q.q.d.

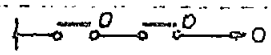
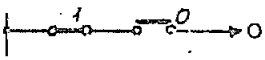
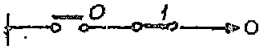
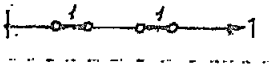
3.2. Representación de Funciones Binarias con Relés.

Por lo visto anteriormente, una expresión binaria puede ser o (cero) o 1 (uno) de acuerdo al estado en que se encuentren las variables independientes. Cualquier expresión binaria puede representarse por un circuito de contactos o viceversa, en donde la variable dependiente - se representa por la bobina de un relé y las variables independientes representan contactos de relés en reposo. Un contacto abierto no da - paso, por consiguiente vale cero (); mientras que un contacto cerrado da paso a la señal eléctrica y vale uno (). Según estas definiciones, la función: $X = A.B$

X = Representa la bobina del relé.

A,B = Contactos N.A. de los relés A y B.

Esta función puede tener los siguientes valores:

A	B	X	Representación
0	0	0	
1	0	0	
0	1	0	
1	1	1	

De acuerdo a la tabla de verdad, el relé X se activa (es decir,- la respuesta es uno); si el relé A y B se activan. La representación- del circuito se hace con los contactos en posición de reposo (Fig.3.1)

y la interpretación se hace para el relé X funcionando.

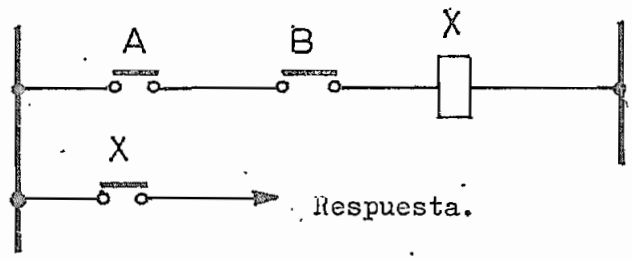


Figura 3.1

Como vemos, este circuito es la representación de la expresión - lógica "Y", puesto que X funciona si A y B valen 1. Luego las repre-- sentaciones binarias lógica y eléctrica son:

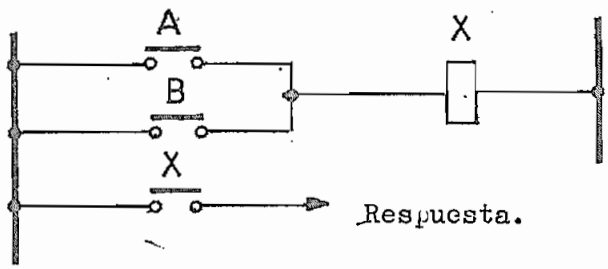
Binaria	Lógica	Circ.de contactos (NA)
X = A * B	X → A y B	Serie

De igual forma procedemos para representar la función binaria:

X = A+B

A	B	X	Representación
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	1	1

Según la tabla de la verdad, con A o con B activados, habrá paso para energizar X. El circuito se representa como la figura 3.2



- Figura 3.2.

Binaria	Lógica	Circ. de contactos (NA)
X= A + B	X ⟶ A o B	Paralelo.

3.3. Funciones Binarias Inversas.

Por definición una función binaria puede llegar a tomar uno de los dos estados uno o cero. La función inversa será aquella que realiza todo lo contrario de la función normal. La única condición necesaria y suficiente para satisfacer la definición de inversa, será que el valor de ésta sea dero (0) si la normal vale uno (1) o viceversa.

Un caso típico de un valor inverso es el contacto N.A. de un relé: X = 0 y el contacto N.C.: X' = 1, estando el relé en reposo.

Según los teoremas 3.23 y 3.24 hemos demostrado que la inversa de un circuito de contactos N.A. en serie es un circuito de contactos N.C. en paralelo y viceversa. Esto es:

$$(A+B+C)' = A'.B'.C' \qquad (3.23)$$

$$(A.B.C)' = A'+B'+C' \qquad (3.24)$$

Si hacemos que:

$X = A+B+C$

La inversa será:

$X' = A'.B'.C'$

La representación con circuitos de contactos según la tabla de - la verdad es como la figura 3.3. (a) y (b).

TABLA DE LA VERDAD PARA LAS FIGURAS 3.3. (a) y (b)

A	B	C	A'	B'	C'	X=A+B+C	X'=A'.B'.C'
0	0	0	1	1	1	0	1
0	0	1	1	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1	1	0
0	1	1	1	0	0	1	0
1	0	0	0	1	1	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0
1	1	0	0	0	1	1	0
1	1	1	0	0	0	1	0

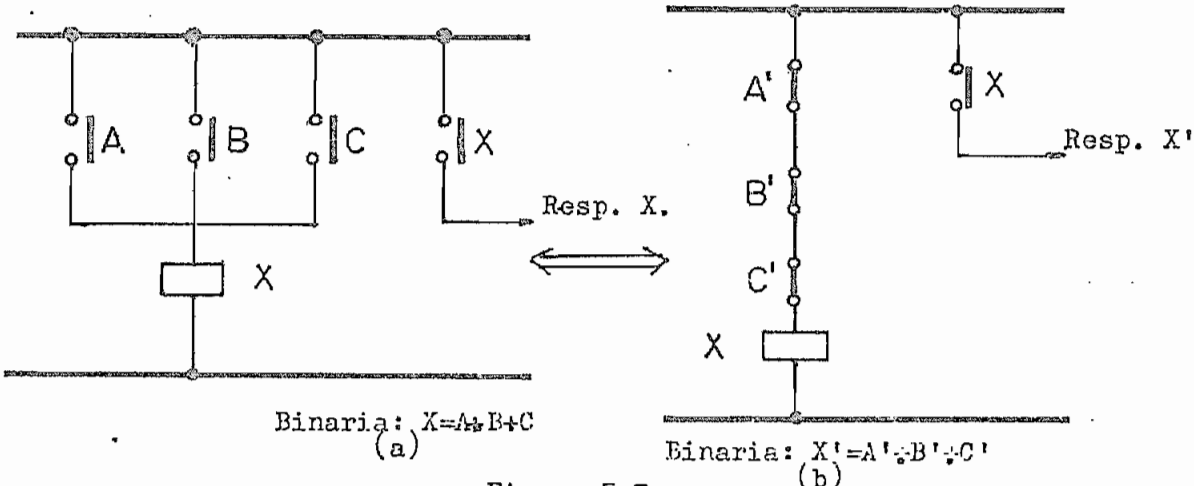


Figura 3.3

Si la función normal es:

X= A.B.C (Circuito de la figura 3.4 (a)

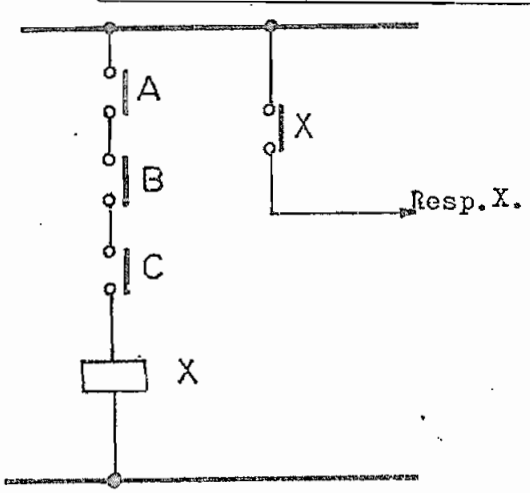
La función inversa es:

X'= A'+B'+C'

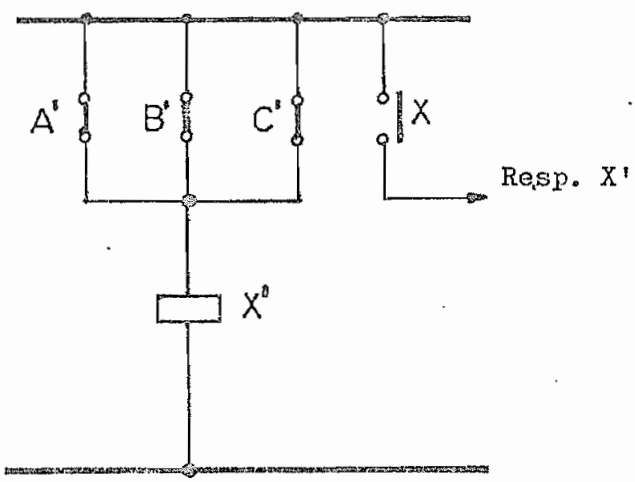
y su representación con circuitos de contactos es de acuerdo a la tabla de la verdad, como la figura 3.4 (b).

TABLA DE LA VERDAD PARA LAS FIGURAS 3.4 (a) y (b).

A	B	C	A'	B'	C'	X=A.B.C	X'= A'+B'+C'
0	0	0	1	1	1	0	1
0	0	1	1	1	0	0	1
0	1	0	1	0	1	0	1
0	1	1	1	0	0	0	1
1	0	0	0	1	1	0	1
1	0	1	0	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1	0	1
1	1	1	0	0	0	1	0



Binaria: X=A.B.C
(a)



Binaria: X'=A'+B'+C'
(b)

Figura 3.4

Las funciones inversas son de gran ayuda en la simplificación de contactos o cambio de estructura de circuitos. Además, éstas representan las funciones lógicas de negación (NOR y NAND).

Como hemos establecido para una función normal X significa que se activa, en cambio X' significa que se desactiva. Luego, X'=NO(X) . Si queremos representar con el álgebra binaria o circuitos la siguiente función lógica de negación: "El relé X se desactiva si el relé A o el relé B se activa" Se procede de la siguiente manera:

"X se desactiva" NO (X) = X' → A o B

El relé A y B tienen contactos: A (NA) y A' (NC); ydebemos escoger cual nos conviene para cada caso; la función lógica que expresa este trabajo es : NO (X) → A o B (Expresión "o inversa" o NOR). En sistema binario la función "NOR" será multiplicación de contactos (NC)

Si: X' = A+B

Tomando la inversa en ambos miembros:

X = (A+B)' = A'.B'

El circuito correspondiente a la función binaria X = A'.B' (función lógica NOR) es la figura (3.5).

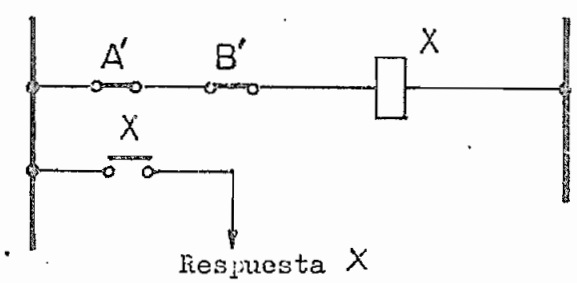
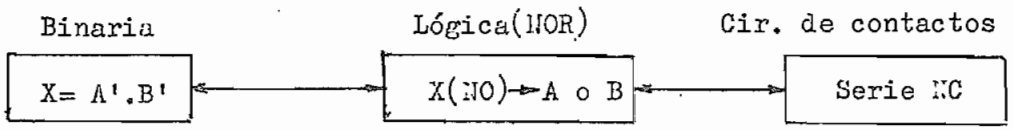


Figura 3.5

TABLA DE LA VERDAD

A'	B'	X
1	1	1
0	1	0
1	0	0
0	0	0



La función binaria X' = A . B (función lógica de negación "Y inversa" (NAND) se representa como la figura (3.6).

Si: X' = A . B

X = (A.B)' = A'+B'

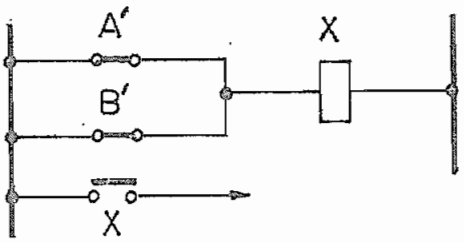
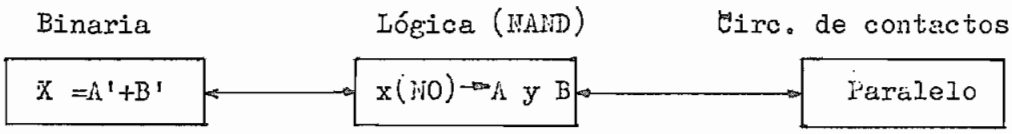


Figura 3.6

TABLA DE LA VERDAD

A'	B'	X
1	1	1
0	1	1
1	0	1
0	0	0



Ahora estamos en condiciones de representar circuitos combinados de cualquiera de las funciones anteriores. Por ejemplo, la función binaria:

$$X = (A + B)\ (C + D') + A\ B'\ C'\ (E' + F')$$

El circuito correspondiente es:Figura 3.7.

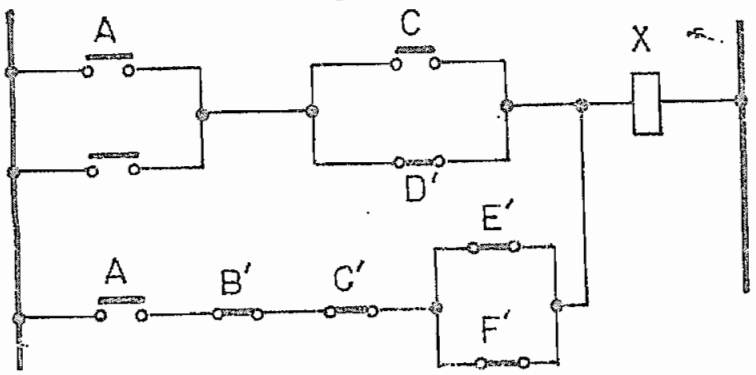


Figura 3.7.

La expresión lógica será:

$$X \longrightarrow (A \circ B) \text{ y } (C \circ D') \circ A \text{ y } \left[(B' \circ C') \circ (E' \text{ y } F')\right]$$

3.4. Criterios de simplificación de contactos y aplicaciones.

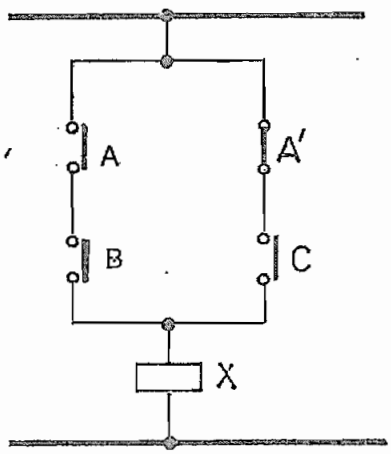
Generalmente, un circuito de control puede tener varias soluciones posibles, sin que ello afecte el funcionamiento del mismo. Sin dejar a un lado las condiciones que debe cumplir el circuito, es muy común simplificar algunos contactos o parte del circuito.

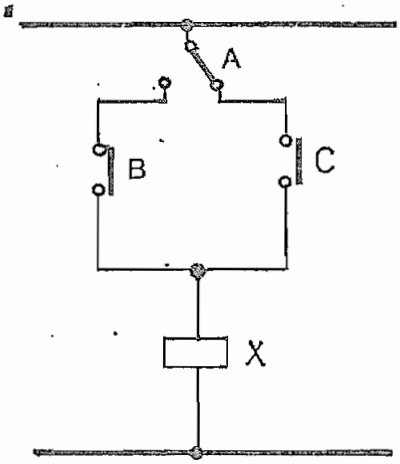
Este criterio se hace importante y necesario en donde hay gran número de contactos y los contactores existentes no tienen el número suficiente de aquellos que exige el diseño. Por ejemplo, si un contactor A necesita 8 contactos, pero en la práctica no hay este tipo de contactor sino sólo con 6 contactos, entonces se debe buscar una simplificación posible.

Se debe acostumbrar a simplificar los contactos en todo circuito por más simple que sea, puesto que el más sencillo resulta ser el más económico, el más fácil de revisar y tiene menos posibilidad de fallas.

A continuación daremos algunos casos típicos de simplificación:

a.- Un contacto normalmente abierto, se puede combinar con uno normalmente cerrado del mismo contactor obteniéndose uno de conmutación, en tanto tengan o puedean conectarse a un punto común; por ejemplo, X debe funcionar si A y B se activan o si A' no se activa y C se cierra. De esta expresión se obtiene el diagrama de la figura 3.8 (a).



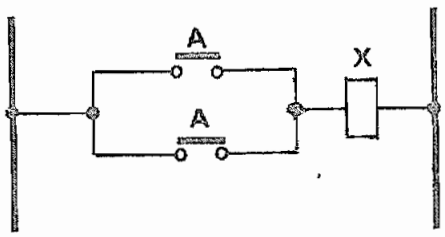


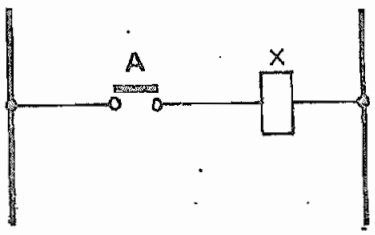
(a) Figura 3.8 (b)

En este diagrama, los contactos A y A' se pueden reemplazar por uno de conmutación A, como se indica en la figura 3.8 (b). En ambos - circuitos la función binaria es X= A.B+A'.C

b.- Los contactos normalmenta abiertos o cerrados de un mismo -- contactor, que estén en serie o en paralelo pueden reemplazrse por u- no sólo. Ver figuras 3.8 y 3.10.

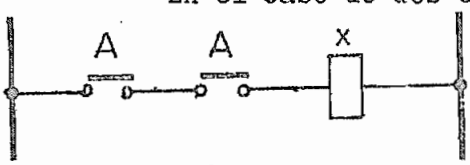
En el caso de dos contactos A en paralelo:

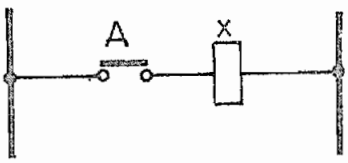




X=A+A = 2A=A Figura 3.9 X=A

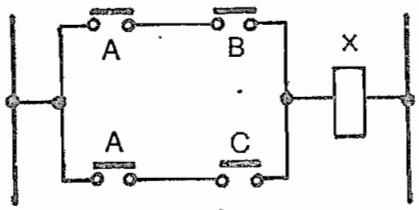
En el caso de dos contactos A en serie:





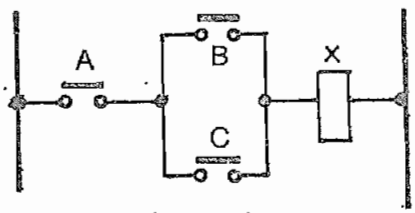
$X=A.A=A^2=A$ Figura 3.10 X=A

Ejemplos: Si un contactor X funciona cuando A y B o A y C se activan; el diagrama de esta función muestra la figura 3.10 de la izquierda. En esta figura los contactos A están en paralelo, luego podemos reemplazar por uno sólo como indica la Fig. 3. 11 (b).



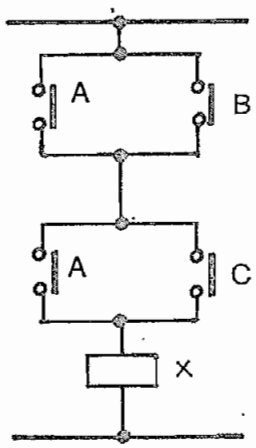
X=A.B + A.C
(a)

Figura 3.11.



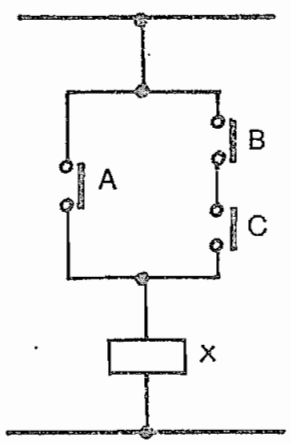
X= A (B + C)
(b)

Si X debe funcionar cuando A o B y cuando A o C se activan. El diagrama de esta función se muestra en la figura 3.12. (a).



X= (A+B) (A+C)
(a)

Figura 3.12



X = A+B.C
(b)

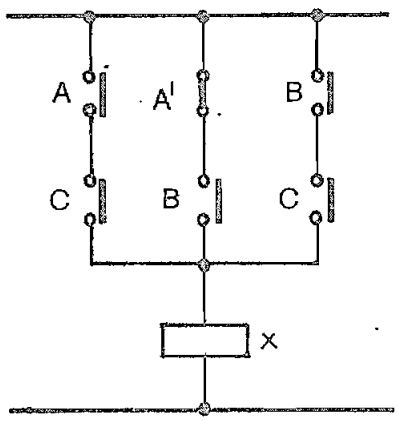
Aplicando las reglas básicas:

$$X= (A+B)\ (A+C)= A+AC+AB+BC= A(1+C+B)+BC = A+BC$$

El diagrama simplificado de esta función se muestra en la figura 3.12 (b).

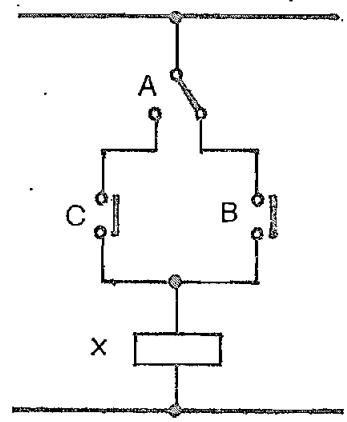
Como reglas de simplificación de los contactos pueden servir los teoremas (3.7) al (3.29) y los principios de factoreo del álgebra normal, puesto que cualquiera de estas expresiones representa un circuito de contactos.

Por ejemplo, según el teorema (3.27) podemos reducir el circuito de la figura 3.13 (a) al circuito de la figura (3.13) (b).



X= AC + A'B + BC
(a)

Figura 3.13



X= AC + A'B
(b)

Una ayuda importante en la simplificación de contactos es tomar la inversa del circuito en estudio. Se simplificará entonces el circuito obtenido y se tomará nuevamente la inversa obteniéndose el circuito simplificado del original.

Ejemplo: Simplificar el circuito de la figura 3.14 siendo su función lógica: X= (A+B'+C) (A+E') (A+C) (A+D+D).

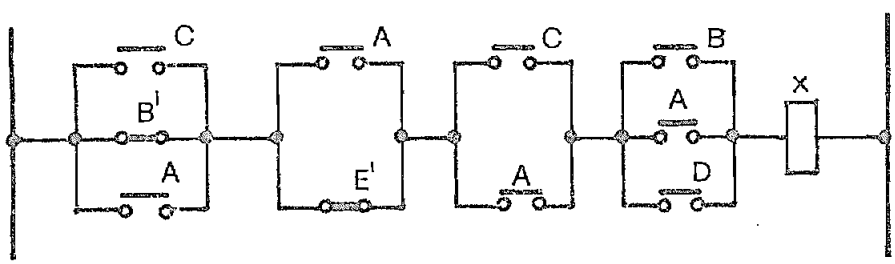


Figura 3.14

Solución: Se toma la inversa de este circuito y de su expresión-lógica: X'= A'.B.C'+A'.E+A'.C'+A'.B'.D'

Esta función inversa corresponde a la figura 3.15

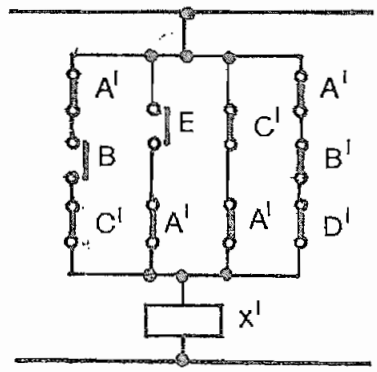
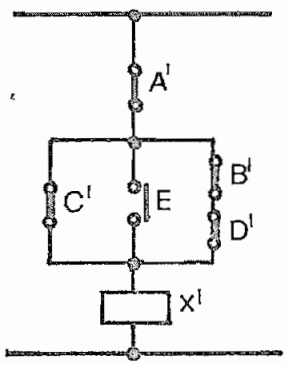


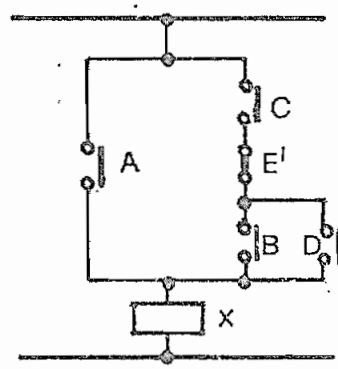
Figura 3.15

De este diagrama observamos que en las cuatro ramas en paralelo-existe el contacto A'; entonces podemos simplificar por un sólo A'.

$$X' = A'(BC'+E+C'+B'.D')$$

$$X' = A'(C'(B+1)+E+B'.D') = A'(C'+E+B'.D')$$





$X'=A'(C'+E+B'.D')$ (a)

Figura 3.16

$X=A+C.E'(B+D)$ (b)

Del diagrama de la figura 3.16 (a) se toma la inversa y se obtiene X simplificada junto a su función lógica. Figura 3.16.

A continuación se presentan algunas aplicaciones del álgebra de-Boole en el diseño de circuitos de contactos.

1.- Hacer el diagrama funcional y de trabajo para que la lámpara H se encienda a través del contactor X cuando A y P, o D y P, o C y P se cierran. A,B,C y P son interruptores.

Solución: La función lógica que realiza este trabajo es:

X ⟶ (A y P) o (B y P) o (C y P) o lo que es lo mismo, la fun-- ción binaria

$$X = A.P + B.P + C.P$$

Simplificando se tiene:

$$X = P(A+B+C)$$

Esta función se representa en el diagrama de la figura 3.17

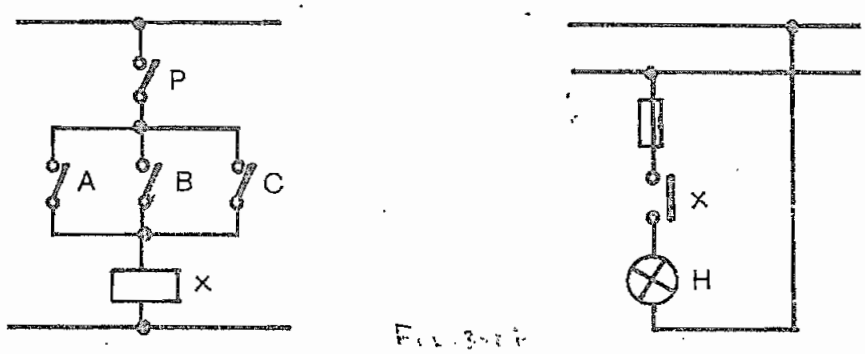


Figura 3.17

2.- Escriba la función lógica del siguiente circuito (Fig. 3.18):

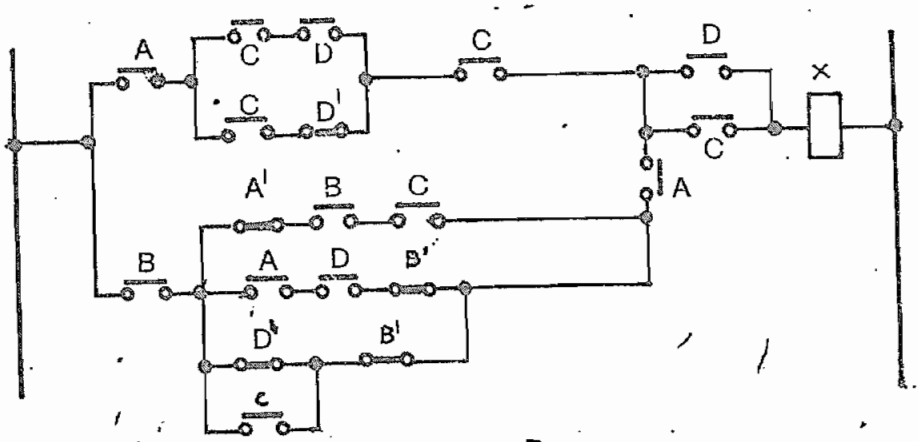
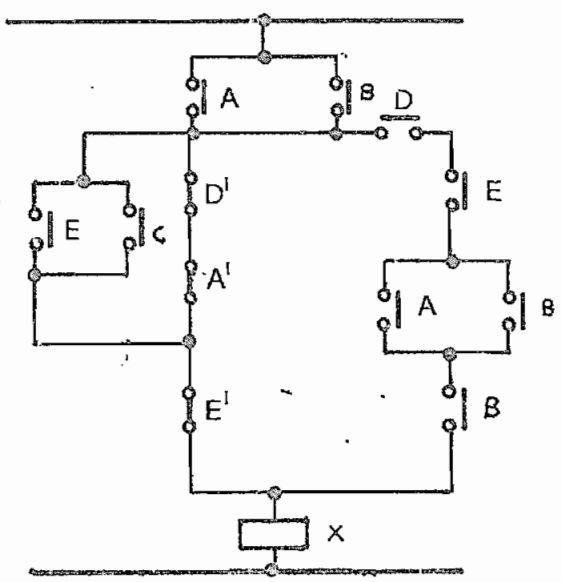


Figura 3.18

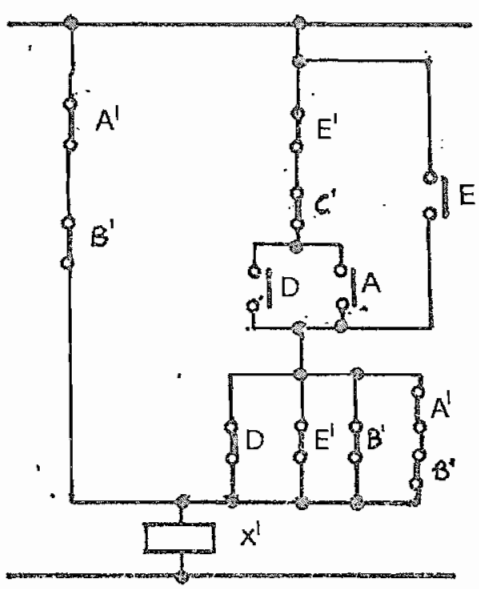
Solución:

$$X=\left\{A.C(C.D+C.D')+B\left[A'.B.C+\left[A.D.B'+B'(D'+C)\right]\right]A\right\}(C+D)$$

3.- Dar el inverso del diagrama de la figura 3.19. Escriba sus - funciones binarias



(a)



(b)

Figura 3.19

La función binaria de la figura 3.19 (a) es:

$$X=(A+B)\left[(E+C+D'.A')\ E'+D.E.B\ (A+B)\right]$$

Para encontrar el circuito inverso, cambiamos los circuitos serie por paralelo y los contactos normalmente abiertos por cerrados. El -- circuito inverso es de la figura 3.19(b), su función binaria es:

$$X'=A'.B'+\left[(E'.C'(D+A)+E\right]\ (D'+E'+B'+A'.B')$$

4.- Escriba las funciones binarias y su interpretación, del circuito de la figura 3.20 el cual representa el funcionamineto de un -- circuito de trabajo con una determinada secuencia.

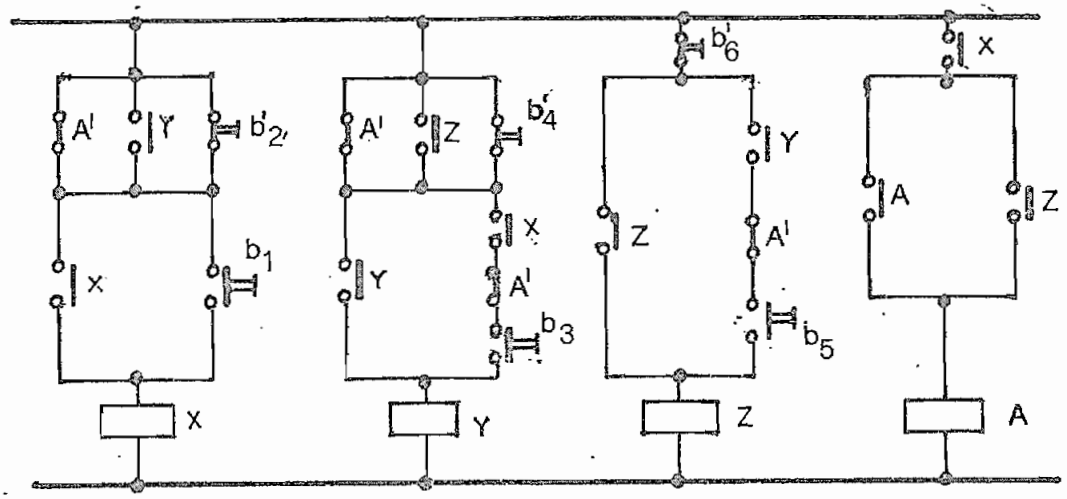


Figura 3.20

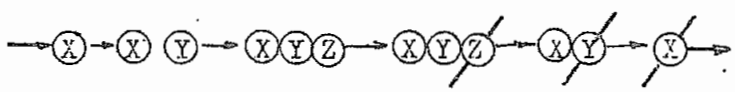
Solución: El sistema de funciones binarias será:

$$\begin{cases} X=(b'_2+Y+A')(b_1+X) \\ Y=(b'_4+Z+A')\ (b_3.A'.X+Y) \\ Z=((b_5.A'.Y)+Z)\ b'_6 \\ A=X(A+Z) \end{cases}$$

De acuerdo al circuito dado y analizando las expresiones binarias, veremos que este circuito permite que los contactores se energicen sólo a una secuencia determinada:

- Presionando b_1, se nergiza X y se autoalimenta. Sin antes energizarse X, no funciona Y ni Z.
- Presionando b_3 seenergiza Y y sólo después de éste al presionar b_5 podemos accionar Z.
- Si queremos apagar el circuito se puede hacer sólo primero Z - con el pulsante b_6', luego Y con el pulsante b_4', y al último X con b_2'.

De esta manera se ve que el circuito permite la siguiente secuencia manual de funcionamiento:



CAPITULO IV.

INTRODUCCION AL CONTROL CON CIRCUITOS LOGICOS ESTATICOS.

Se define como "Control Estático" a un sistema tal que da una señal de proceso sin emplear movimientos de contactos eléctricos. La sustitución de los clásicos relés por aparatos en estado sólido, trae consigo mayor seguridad, más sensibilidad, mayor rapidez y se incrementa notablemente la vida del sistema de control.

El tema de control se puede dividir en tres partes: información, decisión y acción.

La información consiste en las órdenes que emiten los aparatos sensores o transductores tales como: pulsantes, relés térmicos, contactos de fin de carrera, interruptores de presión, etc.

Después de recibir la información, debemos asimilar y comparar con las condiciones que le han sido impuestas al circuito para poder llegar a tomar la decisión. La toma de decisión se realiza a través de la forma de cómo esté conectado el circuito de contactos o los elementos estáticos, los cuales después de tomar una decisión deben ejecutar la acción como por ejemplo hacer funcionar el contactor principal para que accione el motor de una bomba, abrir una válvula electromagnética, dar una señal luminosa o acústica de alarma, etc.

El control estático se refiere a la parte de toma de decisiones en un circuito de control. En los capítulos anteriores vimos que esta decisión la tomaban los relés y contactos auxiliares, pero éstos en -

ciertos casos resultan lentos para muchos procesos automáticos y la productividad es baja. Además, la vida de un contactor estimado en un 5 a 10.10^6 operaciones resulta baja para algunos procesos industriales, de altas frecuencias de repetición. Cuando la instalación se hace cada vez más automática, el número de relés aumenta considerablemente y ocupan demasiado espacio, entonces el empleo del control estático resulta ser el más adecuado para cubrir estas exigencias mencionadas.

Hay gran variedad de formas para obtener control estático, pero las exigencias cada vez mayores han desplazado algunos métodos. El más antiguo fue a base de tubos al vacío, pero presenta muchas desventajas tales como espacio, su niquelina está expuesta al envejecimiento y a quemarse, son frágiles y además necesitan gran corriente en el cátodo.

El uso de amplificadores magnéticos presenta gran resistencia, seguridad y larga duración del sistema pero resultan obsoletos frente a las técnicas usadas con los elementos a transistores y semiconductores en circuitos integrados. El empleo de transistores tiene muchas ventajas como: reducido espacio, rapidez de acción, es resistente y para su polarización necesita de corrientes muy bajas.

Estos elementos se combinan con resistencias, condensadores, diodos, etc. para así obtener circuitos que satisfagan las funciones lógicas requeridas para el control. Estos circuitos electrónicos vienen

encapsulados en forma de pequeños paquetes y se fabrican con distintos nombres comerciales tales como: LO GISTAT, SIMATIC, LOGIMATIC, etc.

A continuación se dará la explicación de las funciones que desempeñan los módulos lógicos y una breve idea de como vienen diseñados sus circuitos internamente.

4.1 Módulos lógicos y su representación.

El control estático en cuanto a requisitos del circuito se refiere se realiza mediante módulos individuales, los cuales han sido diseñados para cubrir las exigencias básicas en cuanto a funciones lógicas se refiere. En los capítulos anteriores se vio que una función lógica se podía representar por medio de un circuito de contactos. Ahora se verá lo mismo, pero con circuitos estáticos. Básicamente las funciones lógicas son tres:

I D I O M A	FUNCIONES LOGICAS		
Español	Y	O	NO
Inglés	AND	OR	NOT
Francés	ET	OU	NON
Alemán	UND	OR	NEIN
Italiano	E	O	NO

4.1.1. Función Lógica "Y".

Se consigue con un circuito electrónico que viene encapsulado y su representación como módulo estático es el de la figura 4.1. La re-

presentación de los elementos lógicos se encuentran regulados por las normas ASA, NEMA o por las normas IEC 117-15. En la mayoría de los casos adoptaremos las normas IEC

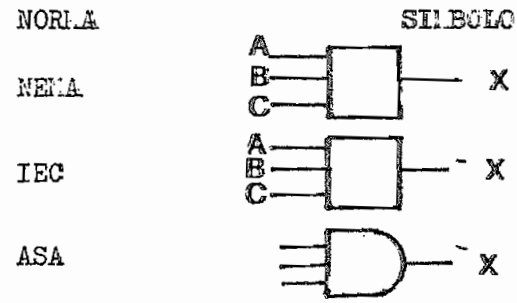


Figura 4.1.

Este módulo Y indica que si en las entradas AyByC hay señal eléctrica binaria = 1, habrá señal de salida = 1. Estas señales de entrada y salida son voltajes convertidos adecuadamente para poder aplicar al módulo. El interior de esta función es un circuito como el de la figura 4.2.

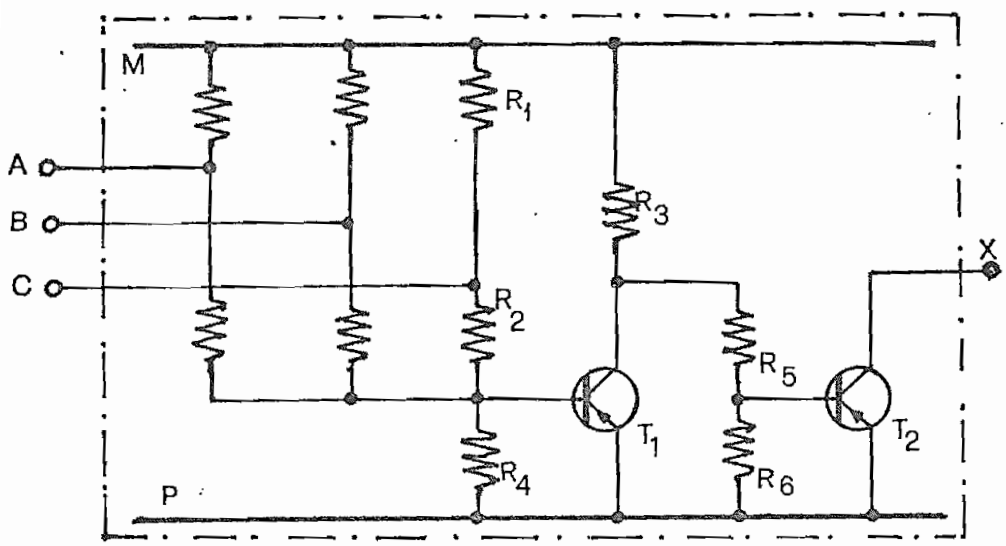


Figura 4.2.

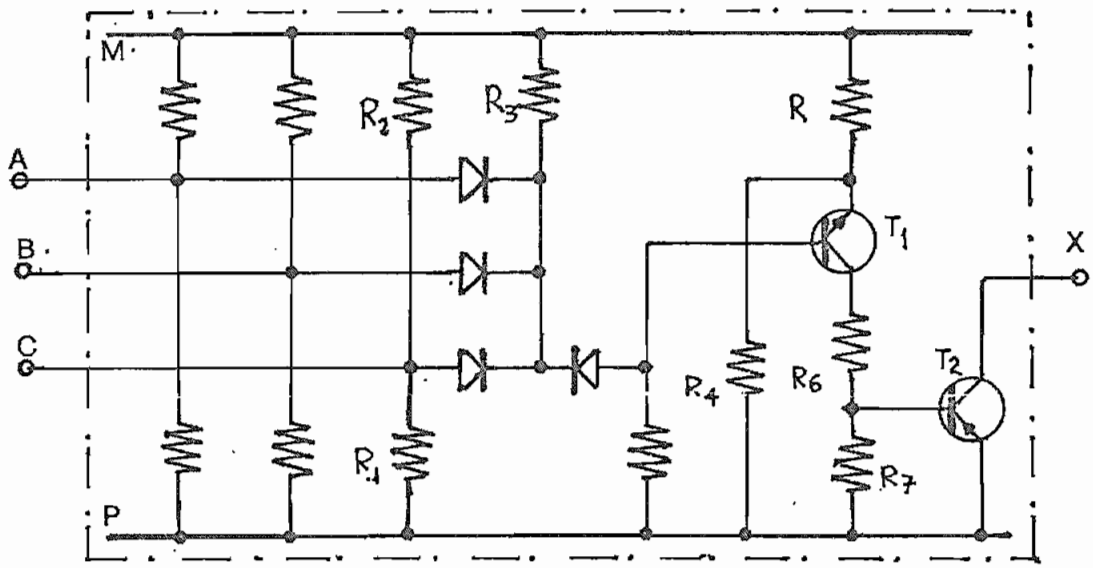


Figura 4.4

El cálculo adecuado de R_1 con R_3 y R_4 con R_6 hace que el potencial de la base sea más negativo que el emisor en el transistor T_1 (NPN) - entonces no hay conducción por T_1 y T_2. Si cualquiera de las entradas A o B o C de este módulo, tienen señal positiva, entonces el transistor T_1 se polariza con su base (+) y conduce. Conduciendo el transistor T_1, la caída de tensión en la Resistencia R_7 polariza T_2 y éste - da salida.

Las funciones lógicas NO, indican que existe señal de salida -1, si no hay señal de entrada en el módulo (es decir cuando hay señal-0). Como se vio en los capítulos anteriores, las funciones lógicas de negación o funciones inversas pueden ser de dos tipos:

La función "Y INVERSA" o "NAND" y

La función "O INVERSA" o "NOR"

4.1.3. Función Lógica NAND.

Se representa como módulo estático como indica la figura 4.5

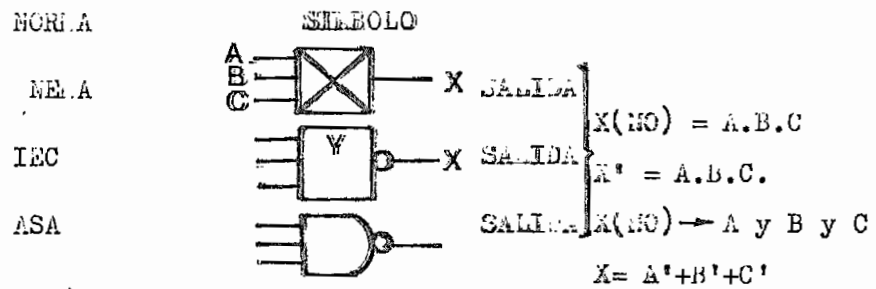


Figura 4.5.

Esta función representa que la salida del módulo se suprime (señal-0) si hay señal-1 en A y B y C. El circuito electrónico interno de este módulo es igual al módulo Y sin el transistor T_2. Fig. 4.6

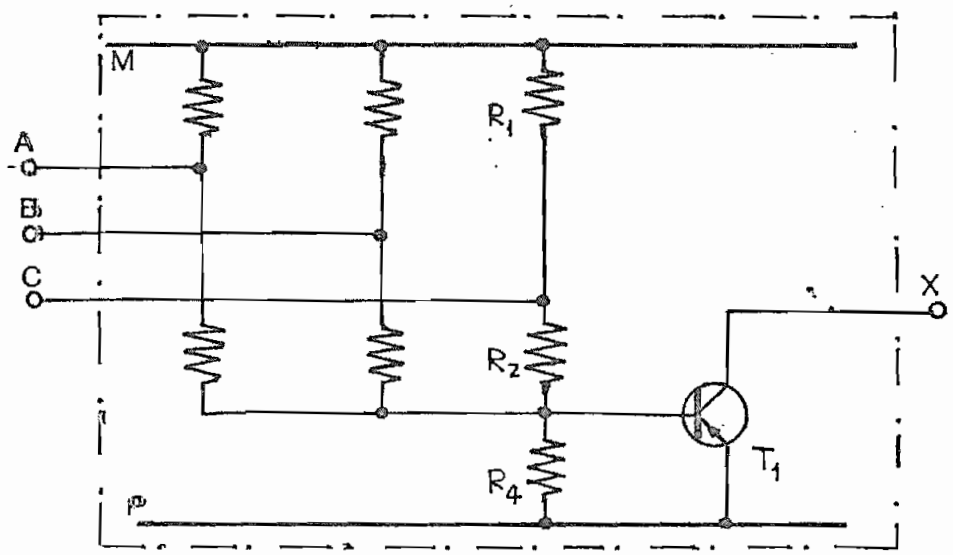


Figura 4.6.

En estado de reposo (sin entrada en A, B y C) el transistor T_1 - se encuentra en plena conducción, puesto que se encuentra polarizado- con R. Cuando hay señal de entrada (+) a los terminales A, B y C, se bloquea la polarización de R_3 y se suprime la salida del transistor - T_1.

4.1.4. Función lógica NOR.

Se representa como módulo estático como la figura 4.7.

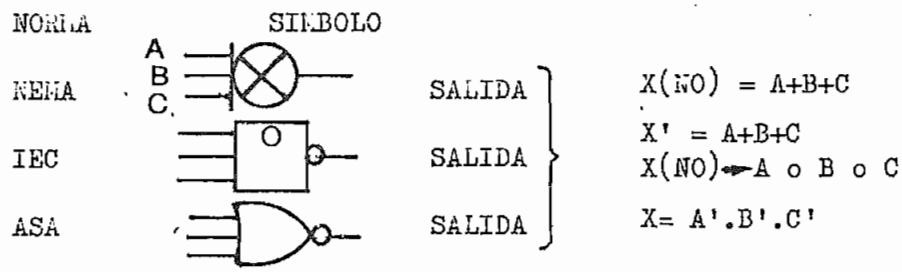


Figura 4.7

Este módulo indica que la señal de salida se suprime si hay se-- ñal-1 de entrada en uno de los terminales A o B o C. El circuito in-- terno de este módulo es como la figura 4.8

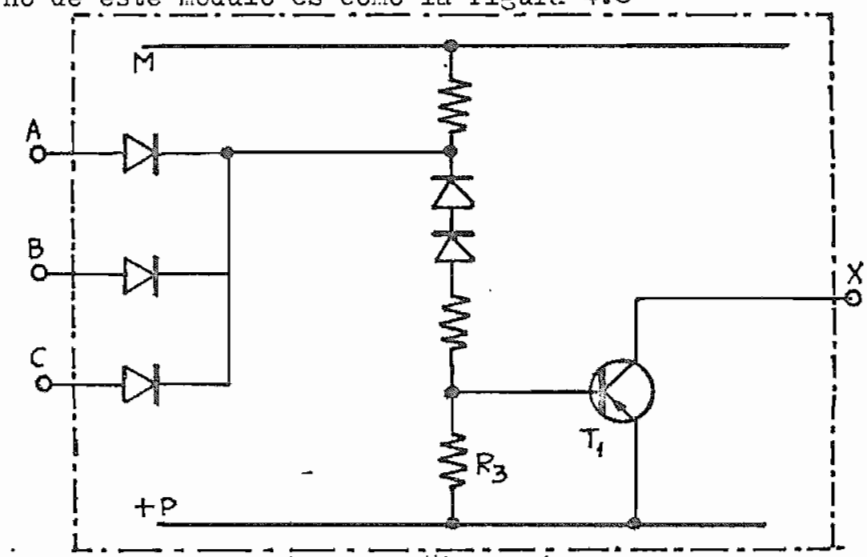


Figura 4.8.

Cuando no hay señal eléctrica en los terminales de entrada, A, B y C, existe una circulación de corriente por la Rama del divisor de - tensión de polarización, entonces T_1 está dando salida al terminal X. Si una de las entradas, A o B o C es conectado al potencial (+) entonces no hay conducción por R_3 y se corta la señal de salida del tran-- sistor T_1 hacia X.

Todas estas funciones hasta aquí descritas, tienen en común lo - siguiente:

a.- Necesitan de una fuente de alimentación de c.c. estabilizada.

b.- Las señales de entrada necesitan ser convertidas a un valor- adecuado para que puedan ser aceptadas por los módulos lógi- cos; y

c.- La señal de salida puede ser la señal de entrada de otro mó- dulo lógico, pero si queremos utilizar esta salida en accio- nar un elemento como relé, lámparas, etc, esta señal binaria debe ser adecuadamente amplificada.

4.1.5. Fuente de alimentación.

Generalmente las fuentes de alimentación de los módulos lógicos- son aparatos que transforman la tensión de 110 ó 220 V (~) a 6, 12, - 24 y hasta 48 V (—). Dependiendo del sistema de que se trate, las - fuentes pueden o no ser estabilizadas, datos que son debidamente espe cificados por el fabricante. La representación de la fuente de ali..en

tación es como indica la figura 4.9. (Según las normas IEC 117-13 símbolo Nº).

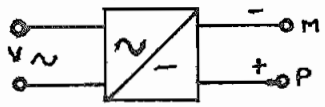
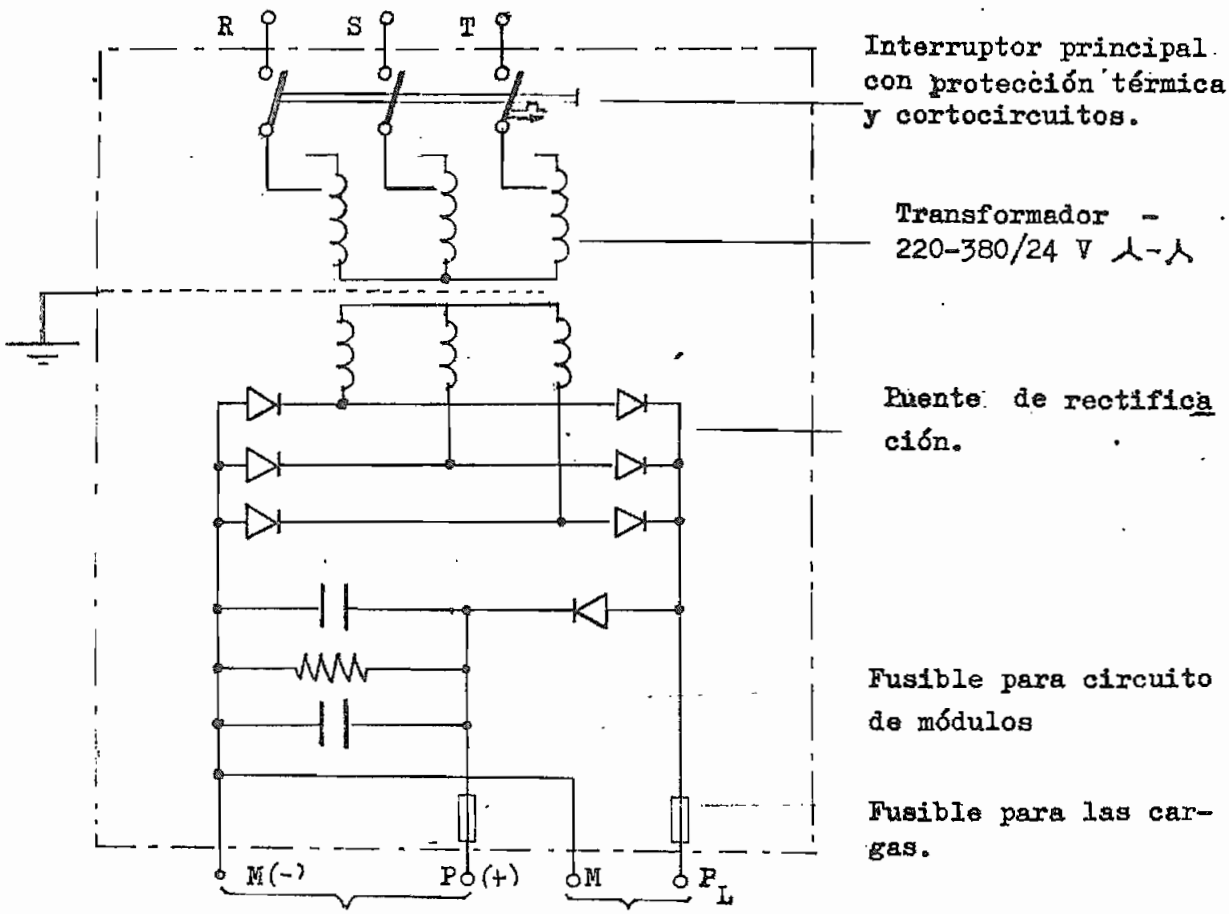


Figura 4.9.

Su circuito interno consiste en un sistema transformador y rectificación de onda completa con elementos adicionales para suavizar el rizado de la onda. La figura 4.10 muestra una fuente de alimentación, tanto para módulos como para las cargas.



4.1.6. Convertidos de señal.

Para asegurarnos de que los módulos reciban una señal de entrada correcta, se utiliza un elemento lógico adicional llamado "Convertidor de señal" o "Adaptador de Entrada", o también "Original Input". En la descripción de los módulos básicos vimos que para tener una señal de-entrada, ésta debía adquirir un potencial positivo (señal binaria=1) y la salida significa tener un potencial positivo (salida binaria=1). Por consiguiente, la salida de un módulo no necesita tener un convertidor de señal para poder ser entrada de otro módulo lógico. Pero -- cuando la señal de entrada se trata de elementos de información (pulsantes, relés, etc.), entonces debemos asegurarnos de que dicha señal pase primero por el adaptador de entrada. Este se representa como indica la figura 4.11.

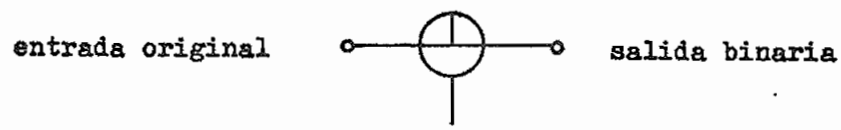


Figura 4.11.

Los circuitos internos de este módulo lógico vienen en su diseño de acuerdo a la señal que recibe a su entrada. Sea cual fuese su en-- trada, se debe acostumbrar a usar un convertidor de señal antes de la señal original del elemento de información lógico al módulo lógico. Ver figura 4.12.

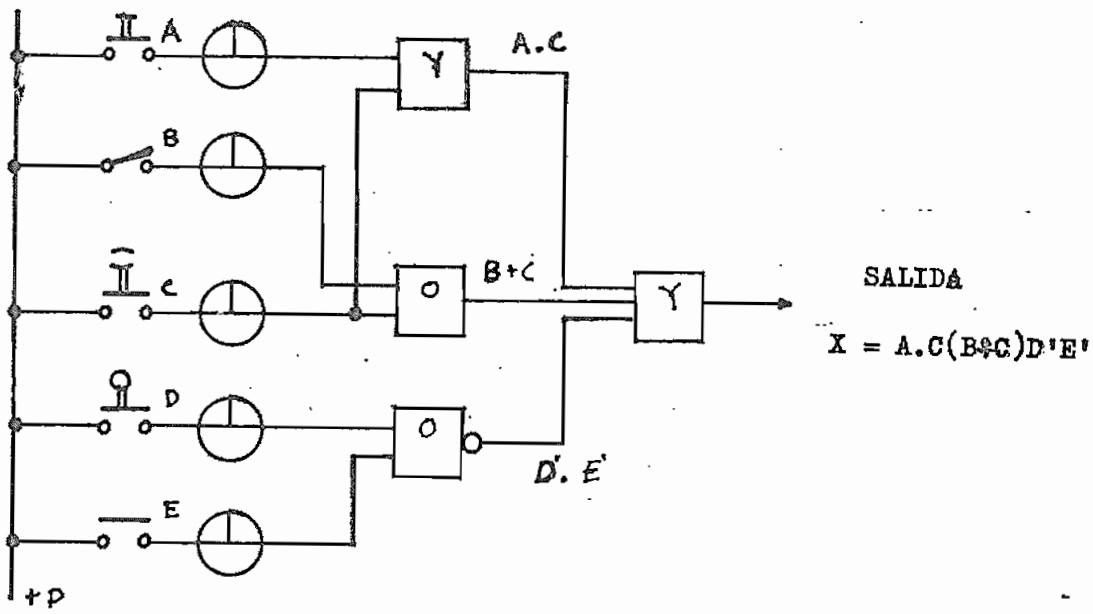


Figura 4.12.

4.1.7. Amplificador.

La potencia de salida de un módulo lógico es del orden de los - miliwatt (10 . 15 mA a 24 V) dependiendo de las características de los transistores usados en su circuito. Para poder utilizar esta señal en accionar la bobina de un contactor, relé, etc., necesitamos amplifi-- carla adecuadamente, hasta tener una potencia capaz de activar el aparato controlado. El símbolo de esta unidad lógica (amplificador) se - ve en la figura 4.13 (Según las normas AIEE Nº 91 o IEC 117-13. Símbolo Nº 1355)

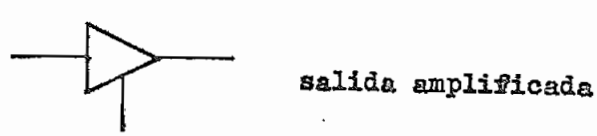


Figura 4.13.

Las bobinas de los contactores usados con circuito lógicos gene-

ralmente son de 24 - 48 volt. de corriente continua y deben ser de - gran número de espiras para que su corriente sea lo más pequeña posible. La fuente de alimentación para el circuito de las unidades de amplificación puede ser la misma que la usada para la alimentación de - los módulos, aunque en instalaciones industriales en donde la carga - es considerable, se usa una fuente de alimentación independiente de - la del control. La figura 4.14 muestra la forma de cómo se conectan - los relés o contactores a través del amplificador, el cual recibe alimentación de una fuente distinta que la de control

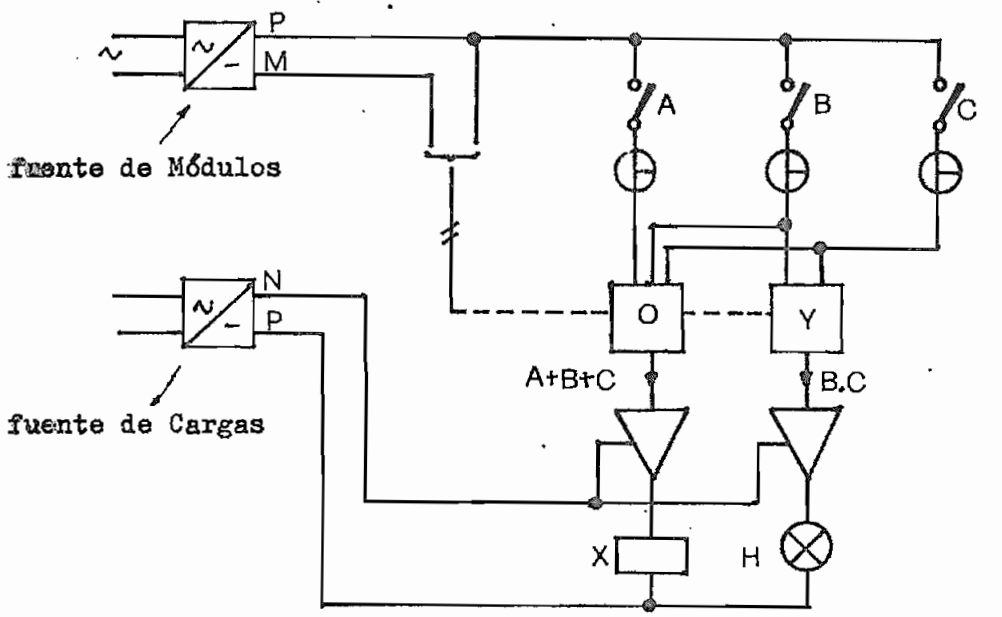


Figura 4.14.

Además de los cuatro elementos básicos: Y, O, [illegible], A-B, convertidores de nivel, amplificadores y fuentes de alimentación, existen otros elementos lógicos que se basan en el funcionamiento de los cir--

cuitos multivibradores biestables o llamados también elementos "Flip-Flop" y elementos logicos con retardo al tiempo de recibir la señal o cuando se pierda.

4.1.7. Elementos de Memoria.

Un elemento biestable es un módulo lógico que almacena una sóla señal de información (de valor binario 0,1). Este normalmente tiene dos entradas: La entrada S, de puesta en memoria (set) y la R, de reposición (Reset) y dos posibles salidas que de acuerdo a la función que desempeñen pueden tener salidad 0 y 1. Este elemento según las normas IEC 117-15, se representa como indica la figura 4.15

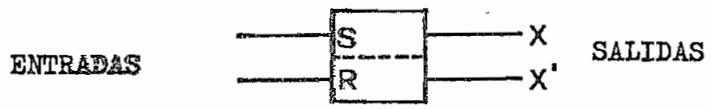


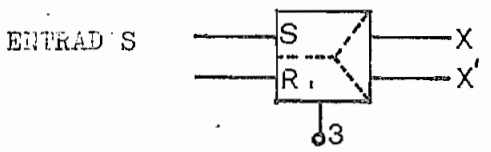
Figura 4.15

Este módulo almacena 1 (es decir se tiene salida-1 en el terminal X y salida-0 en el terminal X') cuando una señal de estado-1 se aplica primero al terminal R (reposición). En este módulo, el regreso al estado 0 de las señales de entrada R o S no altera el estado de las salida . A este tipo de elemento así constituido se le llama "Memoria con retorno a cero", puesto que si la alimentación se corta, no recuerda el estado de la memoria sino que el "Módulo de Reposición" de todo el sistema le obliga a que la salida en X sea estado-0 y en X' sea estado-1. Además de los terminales mostrados en la figura 4.15,

los elementos de memoria tienen un terminal adicional para la interconexión con el módulo de reposición.

La función de memoria puede ser diseñada para obtener una memoria de tipo retentivo. Esta memoria retentiva es similar a la anterior pero con la capacidad adicional de recordar siempre su estado de salida al momento de producirse un apagón y después de que se reestablece la energía. Para diferenciar de la memoria con retorno se pueden usar -- los símbolos de la figura 4.16 aunque no se encuentra normalizado.

Memoria con regreso a cero



Memoria Retentiva.

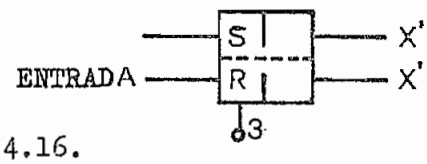


Figura 4.16.

Estos elementos de memoria pueden tener además un terminal T de-disparo, llamdo gatillo (trigger). Cuando una señal de estado-1 es aplicada a este terminal T, la salida de los terminales X y X' se in-- vierte en cualquier estado anterior en que hayan estado.

Otro tipo de función lógica muy usada es el módulo de sello o de enclavamiento (similar al circuito de autoalimentación con contacto-- res). Este viene acompañado de un elemento Y y toma el nombre de"módu lo Y con sellamiento" (Sealed AND). Este se representa como indica la figura 4.17.

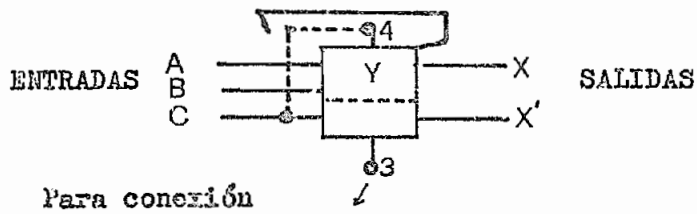


Figura 4.17

La operación es de la siguiente forma:

La salida X adquiere estado-1 sólo si las entradas A y B y C reciben señal de estado-1. Si quitamos la señal de A y B, sigue la salida de estado-1 en X y, sólo si quitamos la señal de C entonces la salida de X vuelve a estado-0. Si el terminal 4 no se conecta a ninguna entrada, el elemento se comporta como un módulo Y normal. Si el terminal 4 se conecta a la entrada C, las entradas A y B se pueden quitar y sólo quitándose C, X vuelve a estado-0. Si el terminal 4 conectamos a B, sólo la entrada A se puede quitar sin perder la salida de estado-1 en X, pero, quitando la entrada de B o C, X vuelve a estado-0.

4.1.8. Módulo de tiempo (Time Delay).

El módulo de retardo de tiempo se representa como indica la figu 4.18.

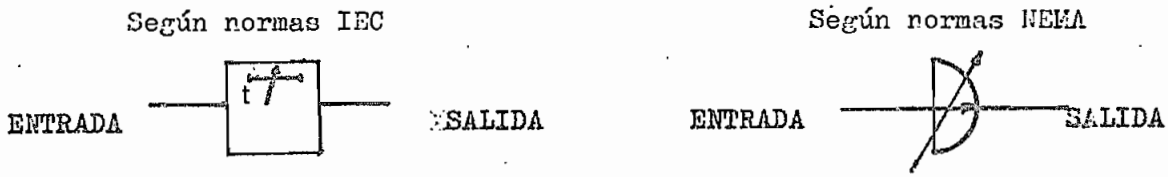


Figura 4.18

Cuando no existe señal de entrada, la salida es de estado-0. Si damos señal de estado-1 y la mantenemos, entonces la salida adquiere estado-1, retardado un cierto tiempo, el cual depende de las características del circuito R-C que se acondiciona a este módulo. Si la señal de entrada es de corta duración (menor que el tiempo calibrado en el módulo), no alcanza a producirse la salida, ya que es necesario

mantener la entrada hasta que se produzca la respuesta. La salida se corta en cualquier instante que la entrada se suprime. El circuito - interno puede ser como la figura 4.19.

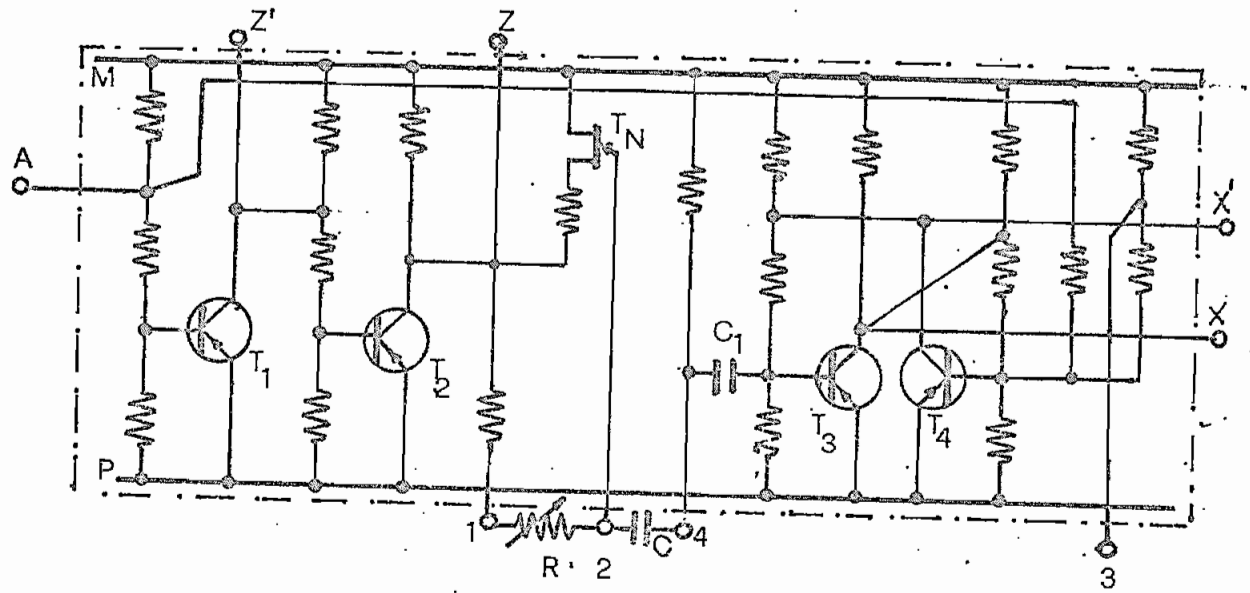


Figura 4.19.

La figura 4.19, muestra los siguientes terminales:

El "A" es terminal para recibir la señal de entrada (o , 1). Los terminales 1 , 2 y 4 para formar el circuito R-C y calibrar el tiempo de retardo ($\tau = R.C$).

El terminal X es la salida con retardo; X' es el inverso de X. - El terminal Z, es una salida auxiliar que proves al módulo de opera-- ción instantánea además de la de retardos. El terminal Z' es inverso- de Z.

El terminal 3 es usado para conectarse con la unidad de reposi--

ción (Reset). Los terminales M y P son entradas de alimentación.

La salida X se produce después de un determinado tiempo de haber recibido la señal-1 de entrada en el terminal A. Cuando no hay señal de entrada (señal-0), el circuito se encuentra en el siguiente estado: El transistor T_1 en conducción lo que origina salida-1 en el terminal Z'; el transistor T_2 bloqueado por el T_1 por consiguiente hay señal - de salida-0 en Z; el transistor T_N de una sóla juntura está bloqueado, puesto que el condensador C se encuentra descargado y además T_2 - está bloqueado. El transistor T_4 se encuentra en conducción dando salida-1 al terminal X', mientras que el transistor T_3 se encuentra -- bloqueado por T_4 lo que significa tener salida-0 en el terminal X. La conexión de los transistores T_3 y T_4 , forman un circuito multivibrador monoestable, lo que permite la conmutación en las salidas X y X', mientras dure la señal de entrada. Al conectar la alimentación a los módulos podría darse el caso de que T_3 o T_4 se polaricen más pronto , lo que significa no tener seguridad en las salidas X y X'. Esto se evita conectando el terminal 3 a la unidad de reposición, con esto se consigue que T_4 tenga mayor oportunidad de polarizarse y siempre al iniciar el proceso, T_4 esté en conducción y T_3 bloqueado.

Cuando aparece señal-1 de entrada en A, T_1 se bloquea cortando - la señal instantáneamente al terminal Z'; T_2 entra en conducción dando salida-1 en Z. La conducción de T_2 hace que el condensador C empie

ce a cargarse a través de la resistencia variable R. Cuando la ten--- sión del condensador alcanza el voltaje necesario para polarizar el - transistor T_N , éste entra en conducción y el condensador C se descar ga a través del condensador C_1. El impulso de la descarga polariza el T_3 lo que da señal-1 en X. La conducción de T_3 bloquea al T_4 cortándo se la señal en el terminal X'. La señal-1 en X dura hasta cuando la - entrada de A se mantenga.

Con algunas modificaciones de este circuito, se puede obtener e- lementos con retardo de tiempo posteriores a cuando la señal binaria- se quita al terminal de entrada; también se consigue elementos de tiem po combinados, es decir salida retardada a t (seg) de la señal-1 de - entrada y con retardo de t_2 (seg.) cuando la señal de entrada vuelve- a estado-0. La forma normalizada de representar estas funciones se -- muestra en el apéndice Nº 1.

4.1.9. Unidad de Reposición. (Unit Reset).

Hemos visto que todos los elementos que en su circuito tienen -- multivibradores biestables o monoestables, requiere de una señal que- al iniciar el proceso ponga al elemento en un determinado estado. Es- to se consigue con la unidad de reposición, la cual se encarga de dar

señal negativa en el instante de conectar el sistema, pero después de algunos milisegundos (10-15 mseg.), la señal de esta unidad es permanentemente positiva. Esta unidad se representa como indica la figura 4.20

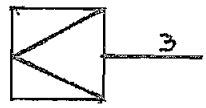


Figura 4.20.

Su circuito interno es como indica la figura 4.21.

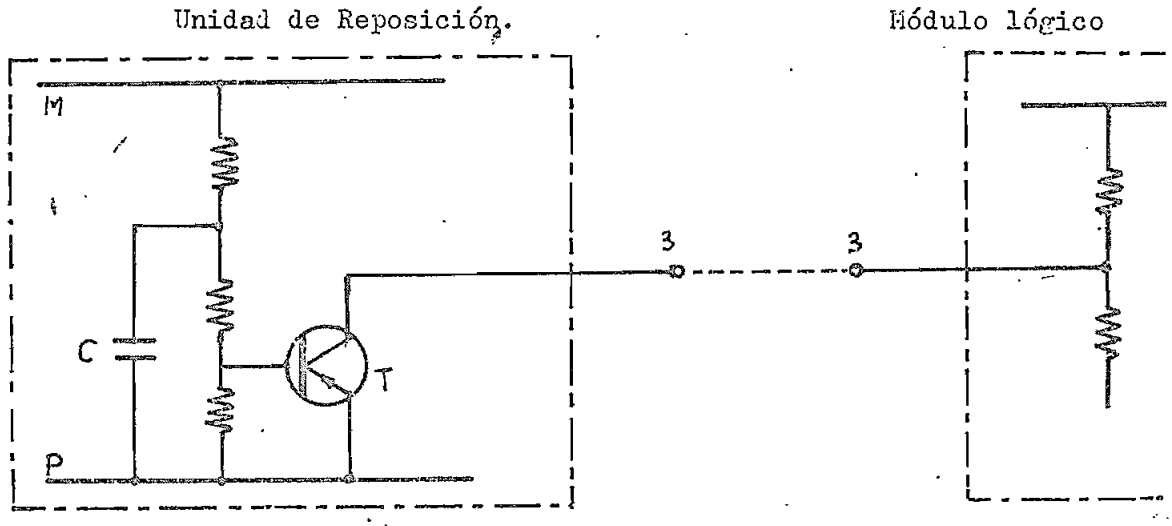
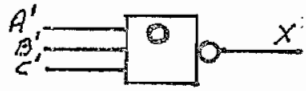


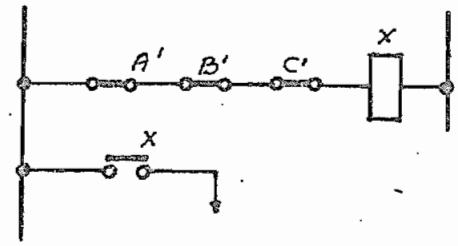
Figura 4.21.

Cuando conectamos la alimentación general de los módulos (terminales +P y -M) el condensador C de esta unidad bloquea al transistor T dando señal negativa a todos los terminales 3 que están conectados a esta unidad. Después de algunos milisegundos, el condensador da paso a que el T se polarice, entonces los terminales 3 se hacen positivos.

4.2. Equivalente entre circuitos lógicos de contactos y las funciones lógicas estáticas.

4.2.3.1. Función NOR.





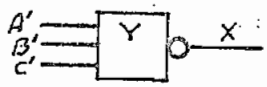
Expresión binaria: X'= A+B+C.

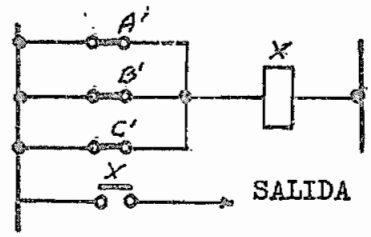
X = A'.B'.C'

Expresión lógica X(NO) → AoBoC.

Figura 4.25.

4.2.3.2. Función NAND.





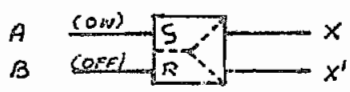
Expresión binaria: X'=A.B.C.

X =A'+B'+C'.

Expresión lógica: X(NO) → AyByC.

Figura. 4.26.

4.2.4. Función de Memoria con regreso a Cero.



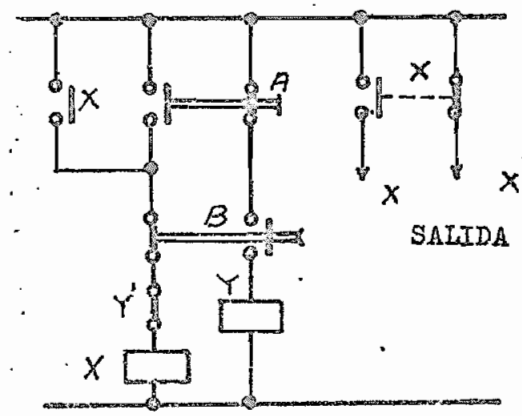


Figura 4.27.

Expresión binaria: $X=(A+X).B'.Y'$

como: $Y=A'.B$; $Y'=A+B'$

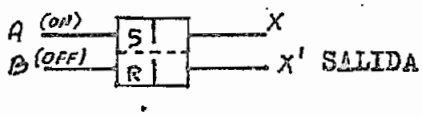
$X=(A+X).B'(A+B')$

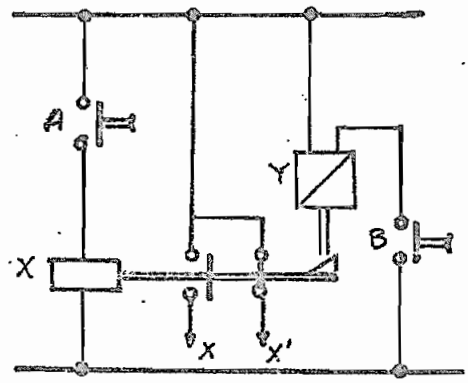
$X=(A+X)\ (AB'+B')=(A+X)\ B'(A+1)$

$X=(A+X)\ B'$

Figura 4.28.

4.2.5. Función de Memoria Retentiva.

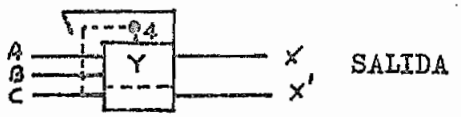




Expresión binaria: $X=(A+X).B'$ (retentiva)

Figura 4.29.

4.2.6. Función Y con Memoria de sello (autoalimentación).



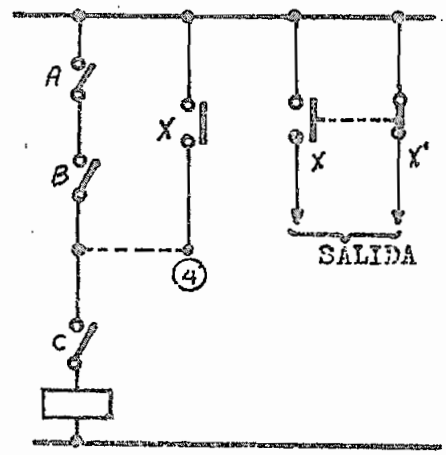


Figura 4.30

Expresión binaria:

a.- Si el terminal queda libre:

$$X = A.B.C.$$

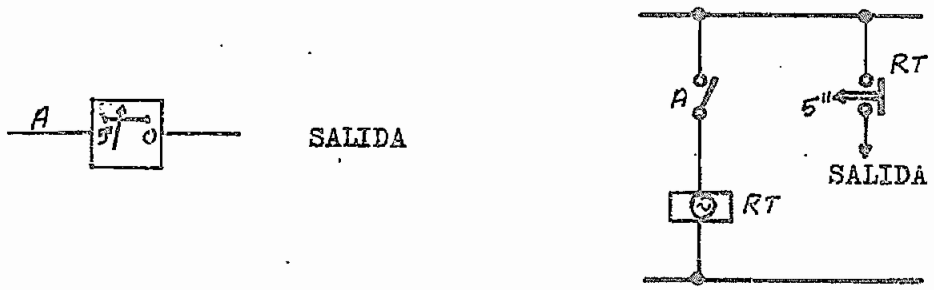
b.- Si el terminal 4 conectamos a entrada C:

$$X = (A.B+X)\ C.$$

Si el terminal 4 conectamos a entrada B:

$$X = (A+X)\ B.C$$

4.2.7.1. Función de Tiempo . (Retardo a la excitación).



Expresión: A sale con retardo de 5 seg.

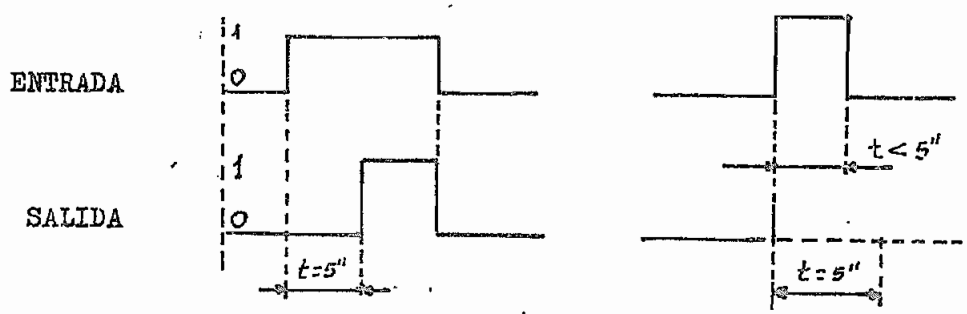
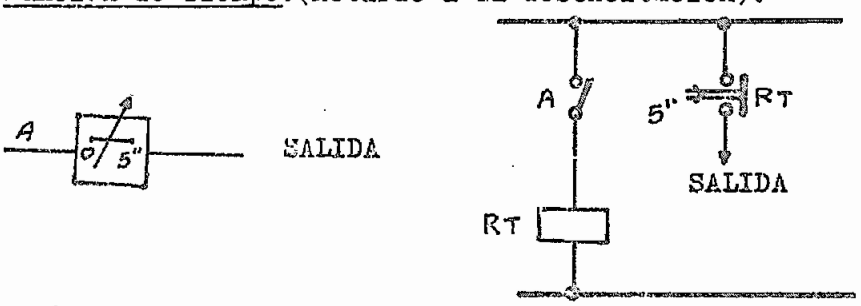


Figura 4.31.

4.2.7.2. Función de Tiempo.(Retardo a la desexcitación).



Expresión: A sale instantáneamente, pero regresa a estado-0 5seg.

después de A.

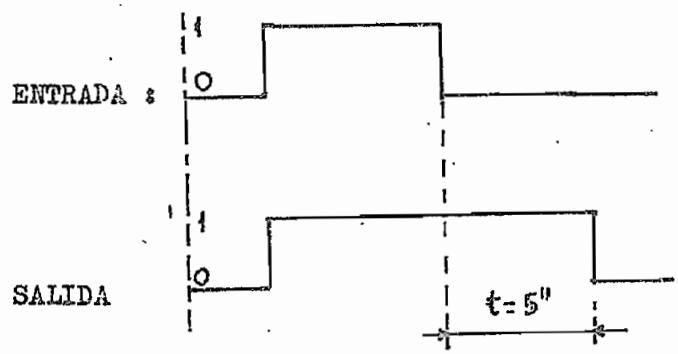
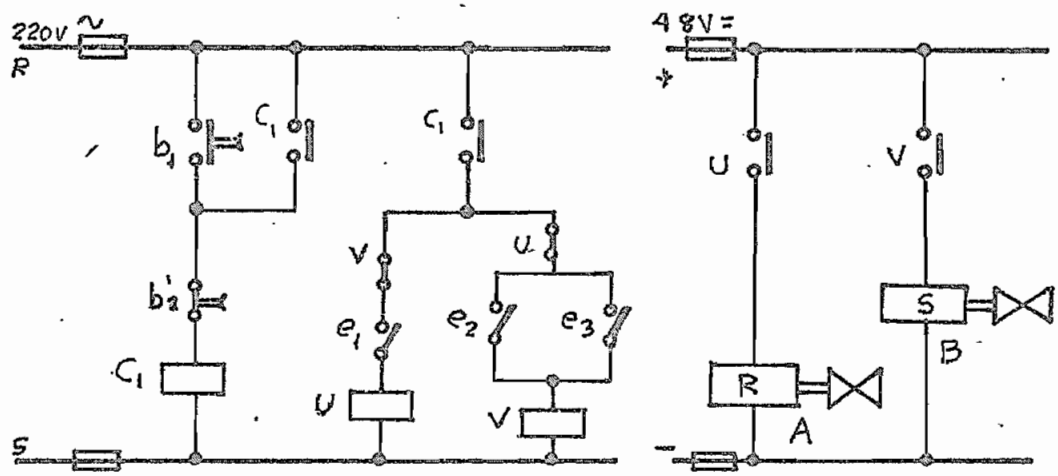


Figura 4.32.

4.3. Cambio de circuitos de control con contactos a circuitos con Funciones lógicas.

Al inicio de este capítulo, habíamos explicado que un circuito de control consta de tres fases: información, toma de decisiones y acción. Tanto en los circuitos de contacto como en los estáticos, los elementos de información y acción, son los mismos. La fase de toma de decisiones se puede hacer mediante contactos auxiliares y la ayuda de relés o por la operación auxiliar de los módulos lógicos. Para comprender mejor la función que desempeñan estos elementos, analicemos el circuito de control dado en la figura 4.33 y en la 4.34.



a)Circuito de mando. Circuito de trabajo.

Figura 4.33

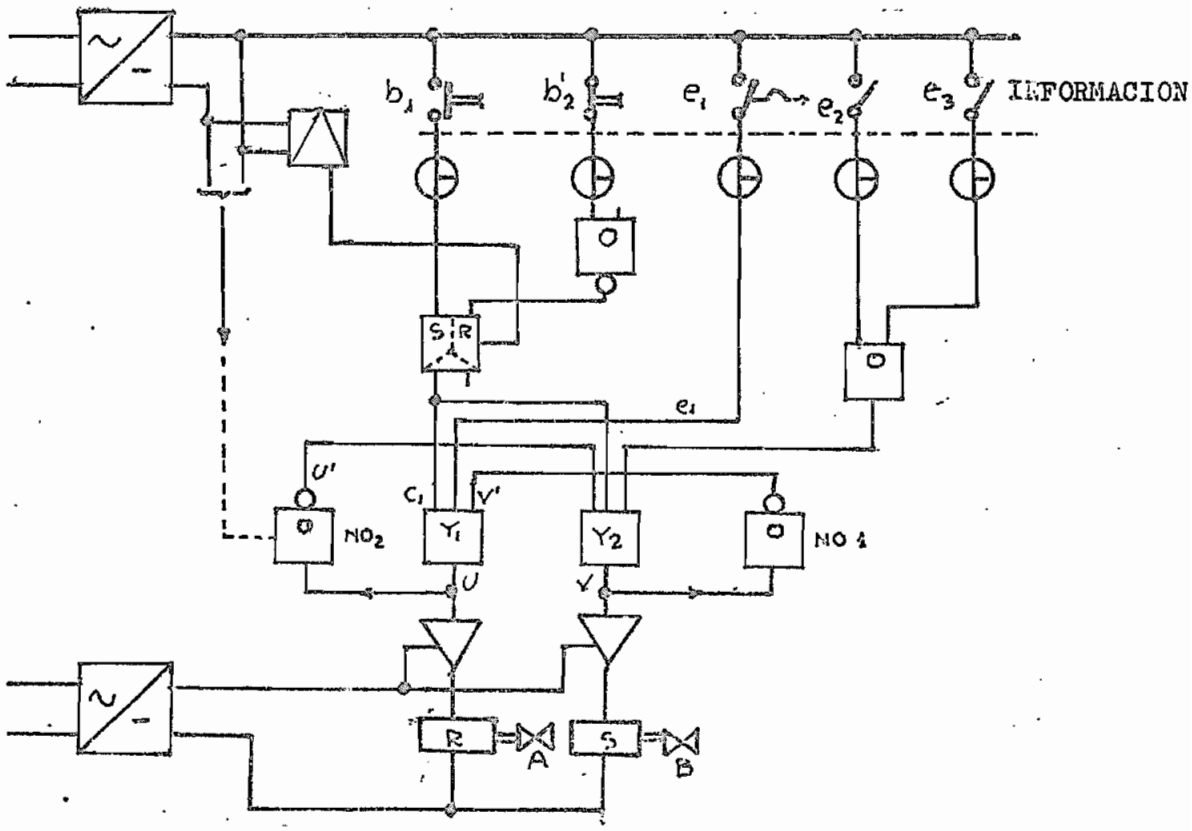


Figura 4.34.

Los circuitos de la fig. 4.33 y 4.34 hacen la misma función, aunque en el primer caso usamos relés y en el segundo caso se usan funciones lógicas. Este circuito es el mando de las válvulas A y B accionadas por solenoides. El mando se inicia con la señal del pulsante b_1 y se apaga con el pulsante b_2. La señal de b_1 tiene memoria con regreso a cero. que se obtiene con el relé auxiliar C_1. La señal de C_1 puede poner en funcionamiento ya sea al relé U o al V.

El relé U pone en funcionamiento a la válvula A si existe señal de C_1 y del elemento de información e_1 (contacto de un relé térmico) y si además el relé V no está funcionando.

El relé V pone en funcionamiento a la válvula B si existe señal de C_1, de los contactos e_2 o e_3 y si el relé U no está funcionando.

En este circuito los elementos de información son:

b_1 pulsante de funcionamiento.

b'_2 pulsante de parada.

e_1, e_2 y e_3 contactos de relés térmicos.

Los elementos de acción son:

R bobina apertura de la válvula A.

S bobina apertura de la válvula B.

En el circuito con elementos lógicos, la señal de b_1 va al terminal S de una memoria con regreso a cero. Al terminal R va la señal de b'_2 (que pasa por un elemento NO) para poner en cero la memoria. La sa

lida C_1 de la memoria hace lo mismo que el contacto N.A del relé C_1 . Para cumplir las condiciones de funcionamiento de la válvula A empleamos un elemento Y_1 en donde llegan las señales de C_1, e_1 y la señal de V a través de un elemento NO_1. La salida de Y_1 es similar al contacto U, pero esta señal se amplifica para dar funcionamiento a la bobina de la válvula A,

En el circuito de la figura 4.34 la alimentación de M y P debe llegar a todos los módulos; además, el módulo de reposo va conectado al elemento de memoria.

De este ejemplo ilustrativo, podemos ver que cualquier circuito de contactos o cualquier expresión binaria, puede ser expresada con funciones lógicas y en la mayoría de los casos estos circuitos se los puede simplificar de acuerdo a las reglas del álgebra de Boole.

4.3.1. Representación de funciones binarias con elementos lógicos.

A continuación se darán algunas representaciones de expresiones binarias usando módulos del mismo tipo de entrada y salida. Esto significa que todas las entradas requieren de señal positiva para cumplir la función en ella indicada y la salida también es positiva. Esta aclaración se hace, puesto que existen módulos que pueden necesitar señales negativas para excitar un transistor o pueden dar salidas negativas.

Si la expresión booleana es $X = A+B'.C$ su representación es co-

mo la figura 4.35.

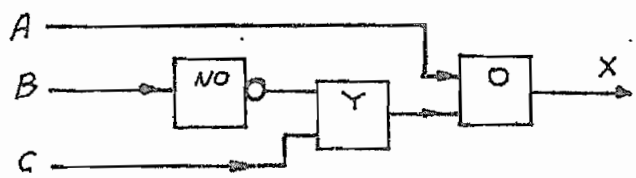


Figura 4.35.

Si la expresión binaria es X = A B'+A'B podemos representar como la figura 4.36.

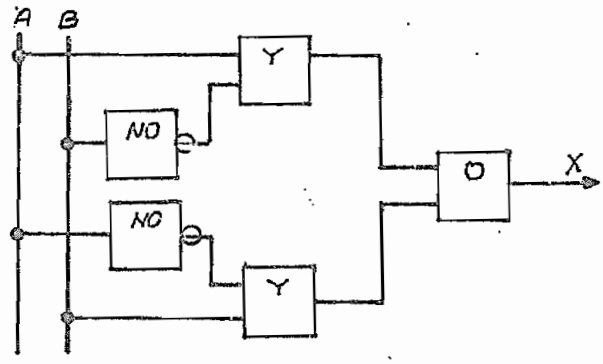


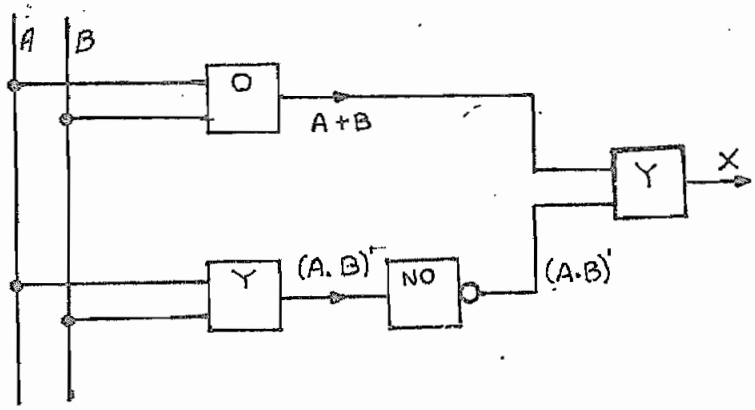
Figura 4.36 (a).

Una representación más simplificada se la puede obtener si se utiliza otra forma de expresión:

$$X = A\,B' + A'\,B = (A + B)\,(A' + B')$$

Pero: $A' + B' = (A.B)'$

Luego: $X = (A + B)\,(A\,.\,B)'$



$$X=(A+B)(A.B)'$$

Figura 4.36. (b).

Cualquier función binaria puede ser representada utilizando un - sólo tipo de módulo ya sea Y, O , NAND, es como la figura 4.36 (c):

$$X = AB' + A'B$$

$$X = \left((AB')' \cdot (A'B)'\right)'$$

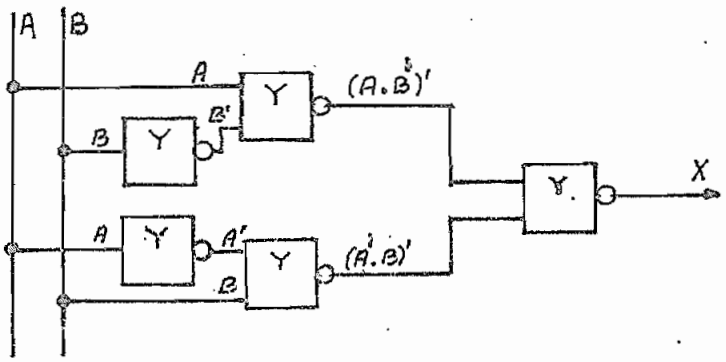
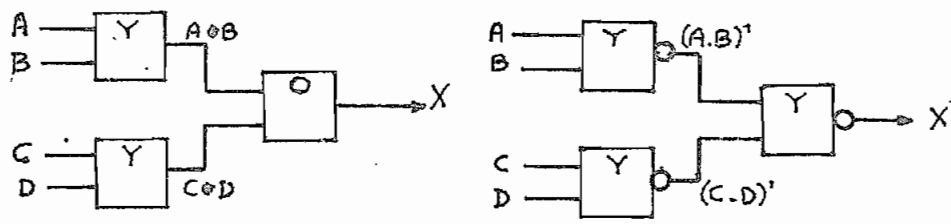


Figura 4.36. (c).

Si la función es: X = AB + CD (fig. 4.37 (a) y (b).



(a)

X = AB + CD

(b)

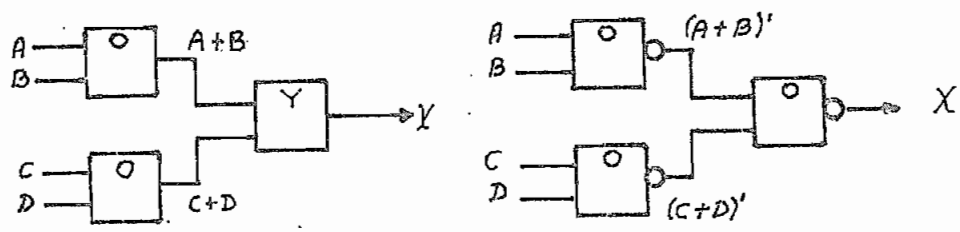
$X = \left[(A \cdot B)' \cdot (CD)'\right]'$

$X = AB + CD$

Figura 4.37.

Las dos formas de representar son equivalentes.

Si la función es X = (A+B)(C+D) (Fig. 4-38 (a) (b) y (c)).



(a)

X = (A + B) (C + D)

(b)

$X = \left[(A + B)' + (C + D)'\right]'$

Figura 4.38

Las dos formas son equivalentes.

Si tenemos un circuito lógico dado, podemos encontrar su expresión lógica y luego representar en forma de contactos. Por ejemplo ,- del circuito de la figura 4.39.

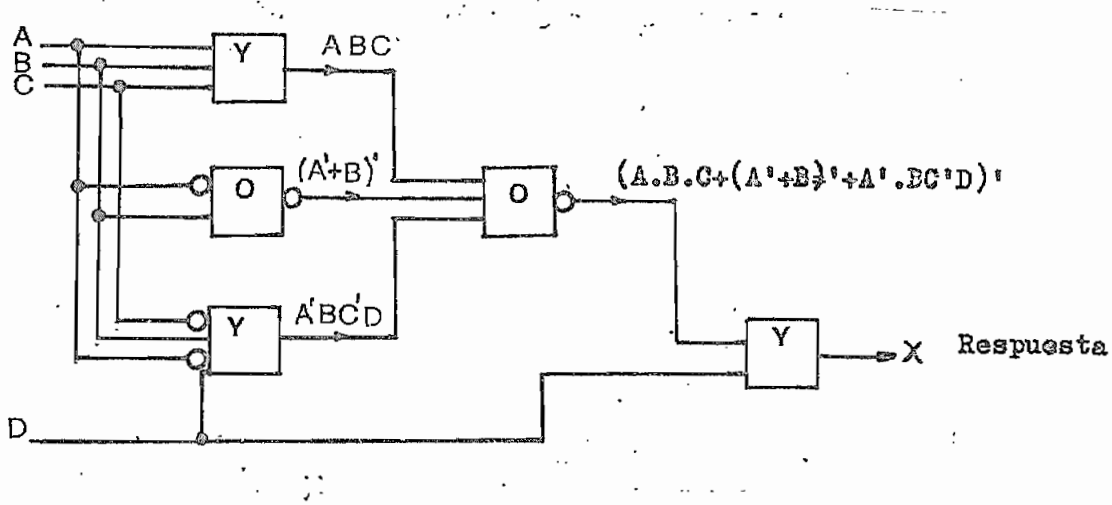


Figura 4.39

De este circuito se obtiene la siguiente expresión:

$$X = \left[A\ B\ C + (A' + B)' + A'BC'D \right]' D$$

Para encontrar el respectivo circuito de contactos, se desarrollan las expresiones inversas:

$$X = (ABC)'\ \ (A' + B)'\ \ '\ \ (A'\ B\ C'\ D)'\ D$$

$$X = (A' + B' + C')(A' + B)\ (A + B' + C + D')\ D$$

Esta expresión corresponde al circuito de contactos de la figura 4.40.

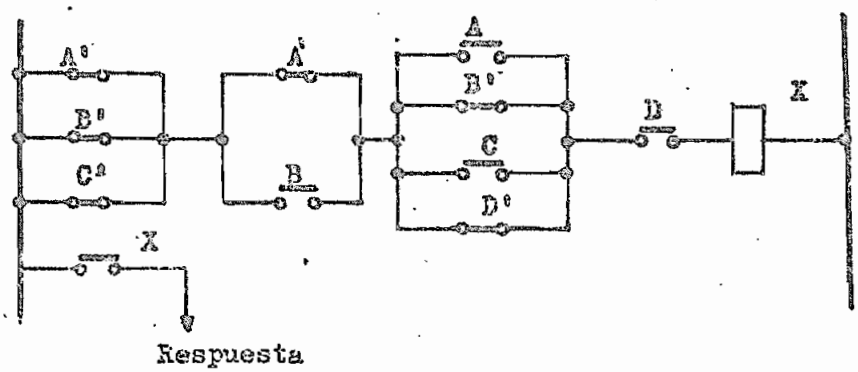


Figura 4.40.

4.3.2. Aplicaciones en diseño.

A continuación se darán algunos ejercicios y la forma de llegar a obtener el circuito de mando que cumple las condiciones prescritas.

4.3.2.1. Mando de un motor trifásico con dos pulsantes.

El pulsante b_1 da señal de pulso y el motor funciona.

El pulsante b_2 da señal de pulso y el motor se apaga.

Solución: Para la alimentación del motor es necesario un contactor X.

Funciones lógicas:

Para encender $X = (b_1 + X)$ ①

Para apagar: $X(NO) = b_2 \quad X' = b_2 \; ; \; X = b_2'$ ②

Si se multiplica la ① con la ② se tiene: $X.X=(b_1+X)\, b_2'$

Luego: $X = (b_1 + X)\, b_2'$

Esta función lógica se la puede representar de varias formas:

a.- Circuito de contactos.

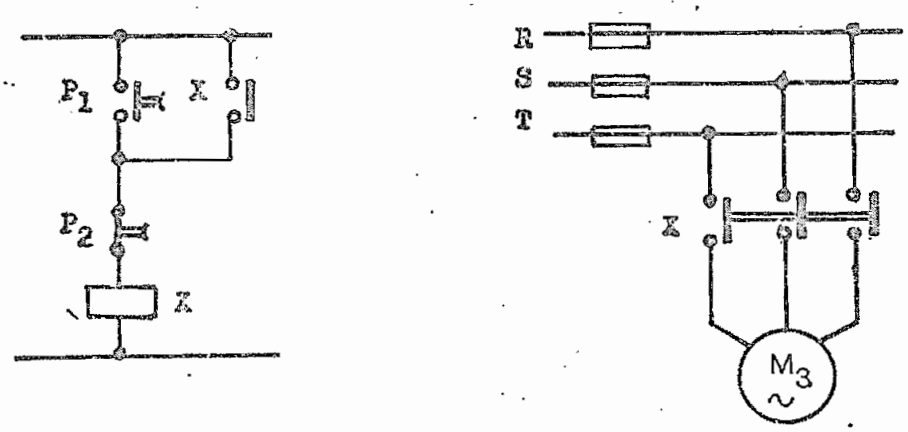


Figura 4.41.

b.- Usando el módulo de memoria con regreso a cero.

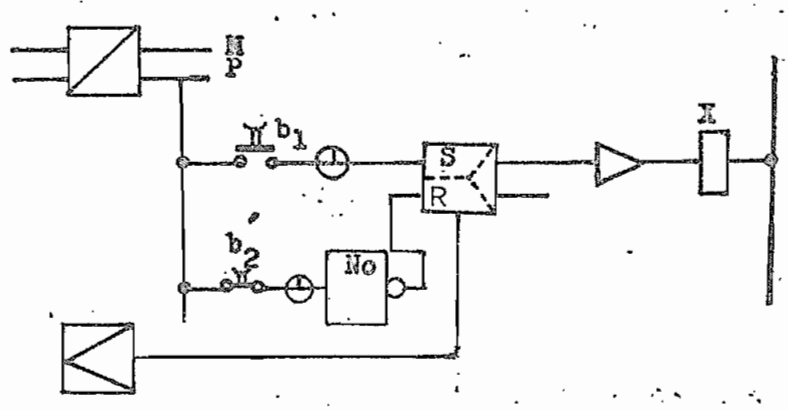


Figura 4.42

c.- Usando el módulo Y con sello.

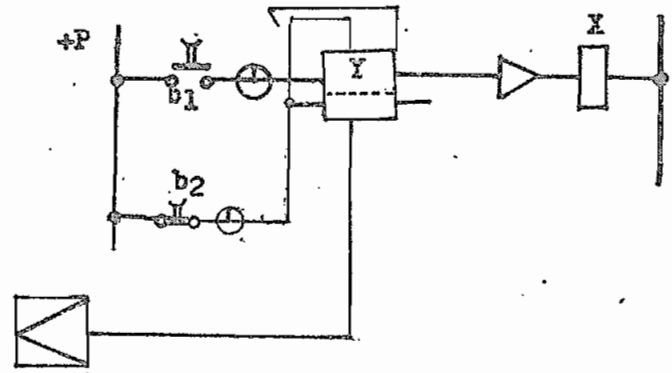


Figura 4.43.

Para todos estos circuitos se tiene que utilizar el contactor X que comanda el motor. Este contactor en el circuito de contactos debe ser su bobina de 220 V~; en los circuitos estáticos, este contactor X debe ser de la tensión del sistema de alimentación 24 V⎓

4.3.2.2. Circuito de mando de una caja fuerte.

La caja fuerte se abre cuando acciona la bobina A. Para su fun-- cionamiento se necesita presionar en forma secuencial una combinación

de tres pulsantes b_1, b_2 y b_3.

Si se presionan los pulsantes en una secuencia distinta de la anterior suena una alarma B.

La alarma B se puede quitar con un pulsante b_4 y la caja fuerte, se vuelve a cerrar con un pulsante b_5.

Solución: La secuencia correcta de las señales de pulso de los botones es: b_1, b_2 y b_3.

Las señales de b_1, b_2 y b_3 requieren de memoria, así se tiene:

$$(1) \quad \begin{cases} X = b_1 \\ Y = b_2 \\ Z = b_3 \end{cases}$$

La bobina A funciona sólo si:

$$(2) \quad A = X.Y.Z.B'$$

La alarma B suena y queda con memoria.

$$(3) \quad B=Y.X'+Z.X'Y'+XZY'+B = YX'+ZY'+B$$

Las señales de X, Y y Z se producen sólo si se ha seguido la secuencia correcta. Luego, estas señales no se producen si:

$$(4) \quad \begin{cases} X(NO) = Y + Z \Rightarrow X = Y' \cdot Z' \\ Y(NO) = Z \quad \Rightarrow Y = Z' \end{cases}$$

Luego, agrupando las ecuaciones (1) y (4) se tiene (5) :

$$(5) \quad \begin{cases} X = (b_1 Y'.Z' + X) \\ Y = (b_2.Z' + Y) \\ Z = (b_3 + Z) \end{cases}$$

(2) $A = X.Y.Z.B'$

(3) $B = X'Y + Y'Z + B$

La alarma se puede quitar con llave b_4 y la caja fuerte se vuelve a asegurar con el botón b_5; luego se tiene:

(6) $B(NO) = b_4 \Rightarrow B = b_4'$

(7) $A(NO) = b_5 \Rightarrow A = b_5'$

Al apagarse A, también los elementos de memoria deben reponerse, luego:

(5)
$$\begin{cases} X = (b_1 . Y' . Z' + X)\, b_5' \\ Y = (b_2 . Z' + Y)\, b_5' \\ Z = (b_3 + Z) b_5' \end{cases}$$

Agrupando las funciones (3) y (6) se tiene:

(3) $B = (X'Y + Y'Z + B) b_4'$

(2) $A = XY \bullet ZB'$

Estas ecuaciones se las puede representar:

a.- Con circuitos de contactos.

b.- Con circuitos estáticos.

a.- <u>Representación con circuitos de contactos.</u>

Circuito de mando de una caja fuerte con relés y módulos lógicos

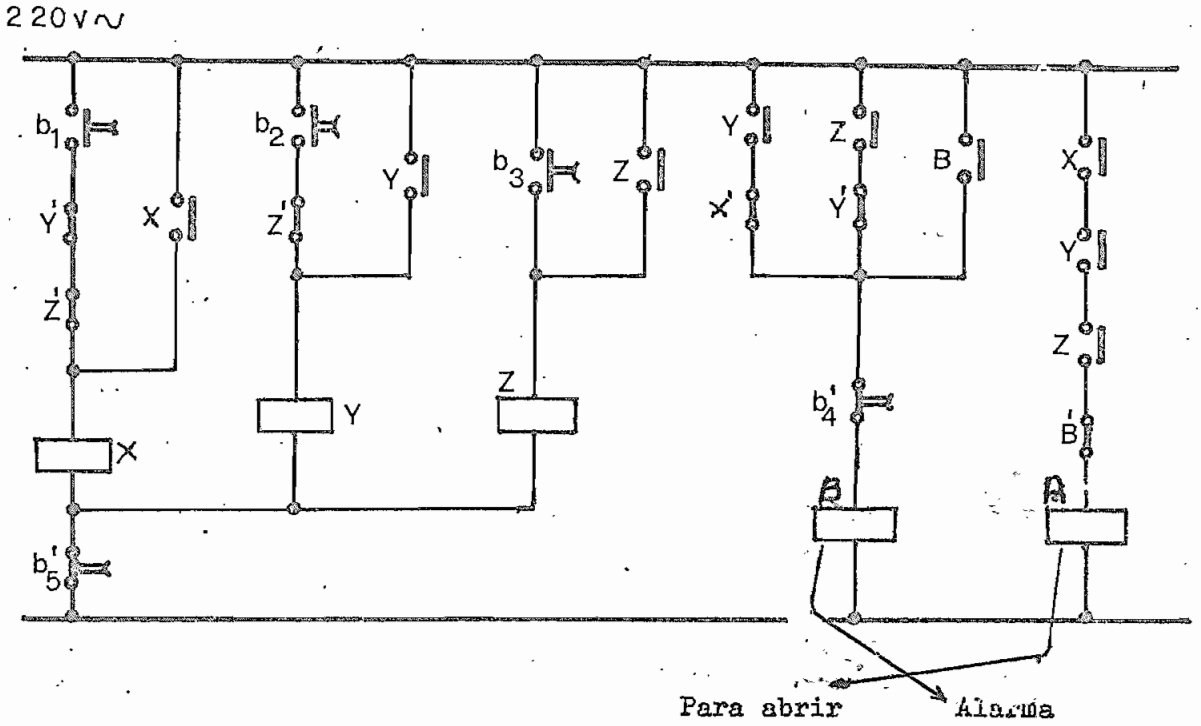


Figura 4.44.

b.- Representación con circuitos estáticos.

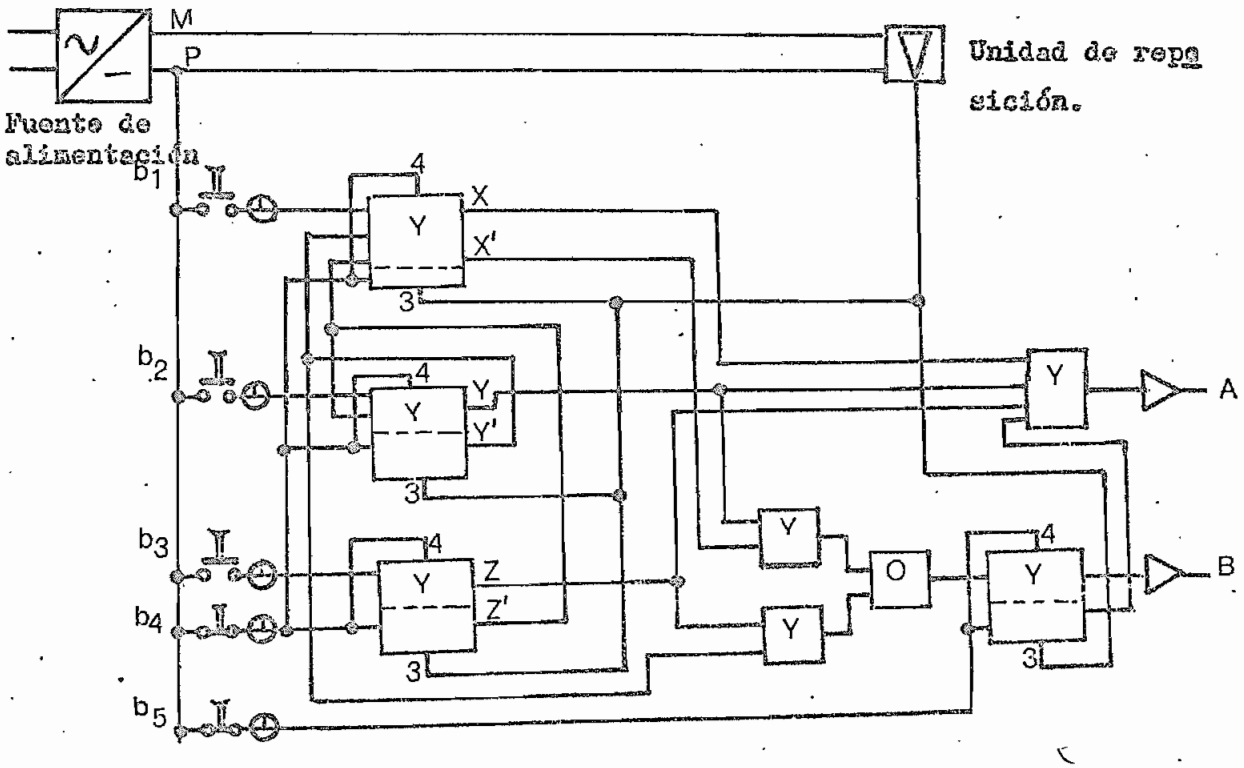


Figura 4.45.

4.3.2.3. Diseño de un circuito de mando para la operación automática de dos motores A y B.

El motor A funciona al recibir la señal de un pulsante b_1. Después de un tiempo t_1 funciona el motor B automáticamente. Después de un tiempo t_2 se apagan los dos motores A y B automáticamente. También se pueden apagar los motores dando una señal con el pulsante b_2.

Solución: El programa de trabajo se puede interpretar en la figura 4.46.

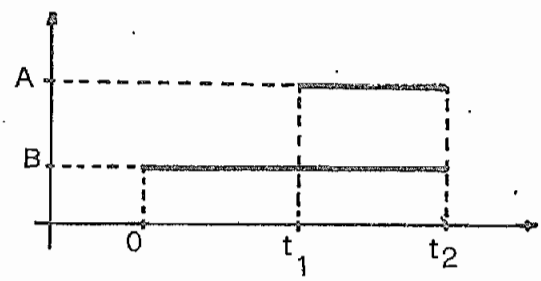


Figura 4.46

Las ecuaciones binarias son:

El motor A funciona con el contactor X

El motor B funciona con el contactor Y

$$\textcircled{1}\begin{cases} X = b_1 \text{ (contactor X)} \\ Y = R_1 \text{ (contactor Y y } R_1 \text{ señal temporizada con } t_1) \end{cases}$$

$$\textcircled{2}\begin{cases} X(NO) = R_1 + b_2 \\ Y(NO) = R_2 + b_2 \text{ } (R_2 \text{ señal temporizada con } t_2) \end{cases}$$

$$③ \begin{cases} R_1 = X & \text{Elemento de tiempo para } t_1 \\ R_2 = Y & \text{Elemento de tiempo para } t_2 \end{cases}$$

$$④ \begin{cases} R_1(NO) = Y \\ R_2(NO) = X \end{cases}$$

Agrupando las ecuaciones ① y ② y utilizando una memoria para X y para Y:

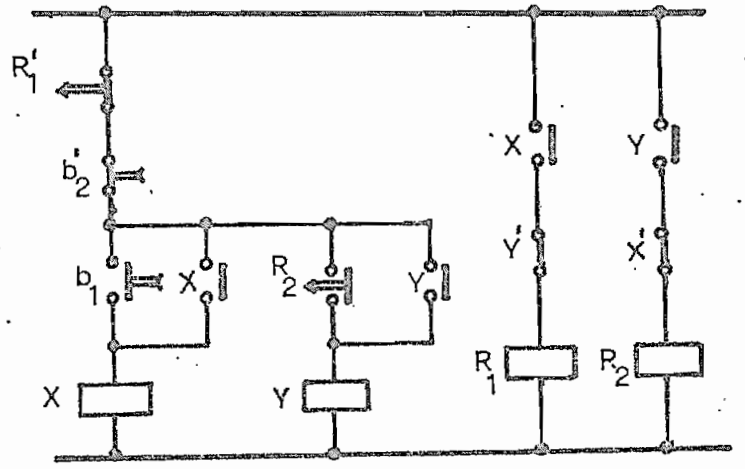
$$① \begin{cases} X = (b_1' + X)\, R_2' \cdot b_2' \\ Y = (R_1 + Y)\, R_2'\, b_2' \end{cases}$$

Agrupando las ecuaciones: ③ y ④

$$② \begin{cases} R_1 = XY' \\ R_2 = YX' \end{cases}$$

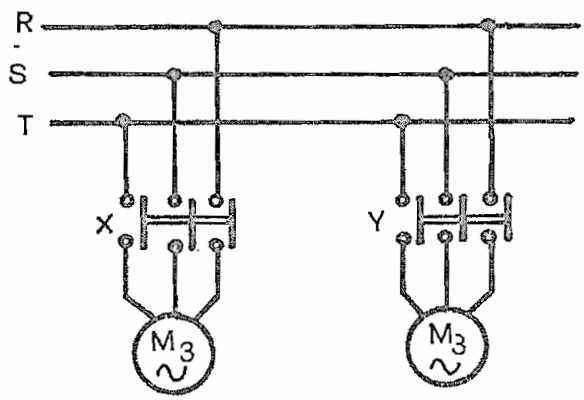
Estas ecuaciones representan la solución del problema

a.- Representación con contactos.



a.- Circuito de mando.

Figura 4.47.



b.- Circuito de trabajo

Figura 4.47.

b.- Representación con módulos estáticos.

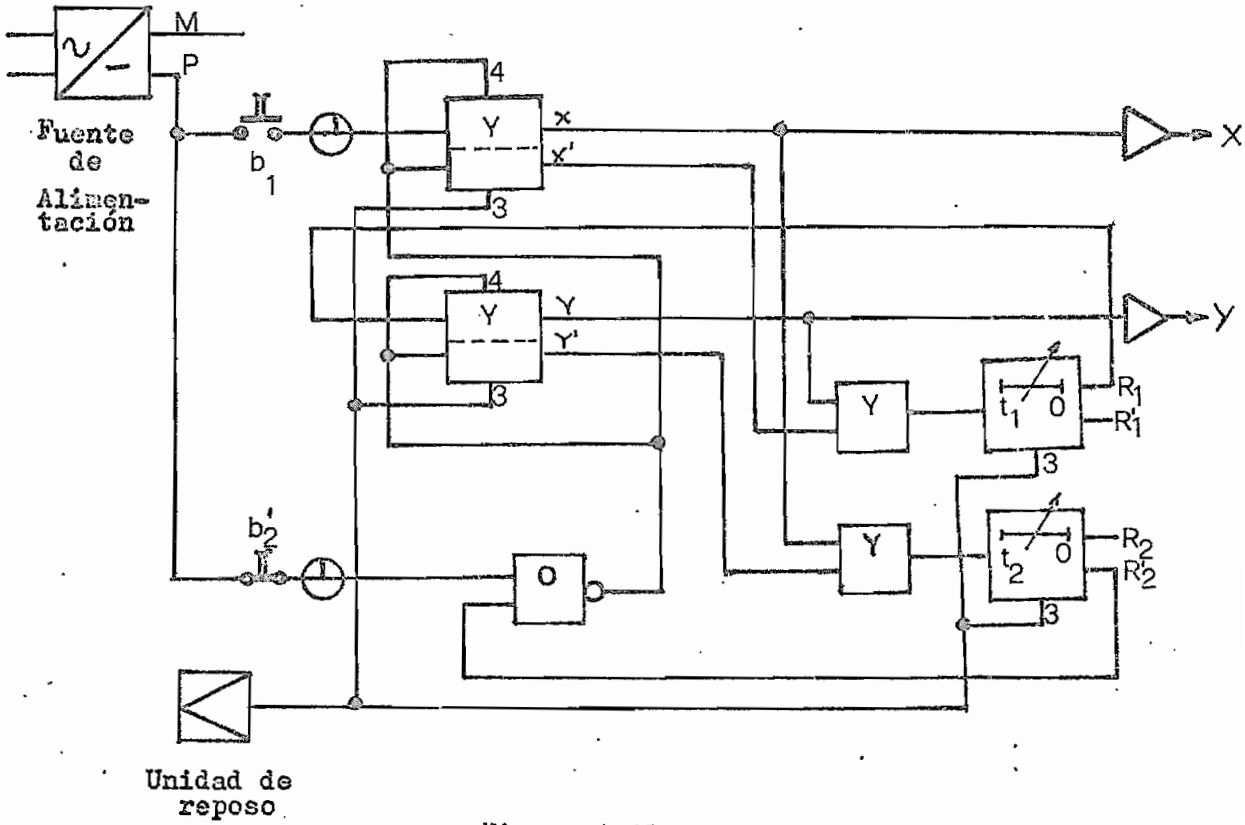


Figura 4.48.

CAPITULO V.

CONTROL DE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA.

5.1. Generalidades.

La energía mecánica requerida para mover las máquinas de tipo industrial tales como: tornos, tejedoras, bobinadoras, bombas, ascensores, etc. , es suministrada en la mayoría de los casos por Motores Eléctricos, sea que estos funcionen con corriente continua o alterna.

Como cada motor o grupo de motores han de realizar trabajos repetitivos con una cierta secuencia de funcionamiento, es necesario equipar a cada unidad o a cada grupo de motores con su respectivo tablero de control o unidad de proceso que bien puede ser, manual, automático, o semiautomático, según sean las necesidades e importancia del trabajo que han de desarrollar.

En el caso de controles automáticos, bastará la presión de un botón o una llave de seguridad para que el proceso comience a desarrollarse y repetirse de acuerdo a las funciones previamente determinadas.

Los controles semiautomáticos, implican la presencia de un operador para comenzar el proceso, el cual debe desarrollarse de una forma determinada. De esta manera, el circuito de control será el encargado de permitir o no funciones pre-establecidas aunque el operador incurriera en algún error. Por ejemplo, si dos motores deben funcionar alternadamente y controlados por un operario, el control debe brindar -

la seguridad de que nunca los dos motores funcionen al mismo tiempo , así el operador haya maniobrado mal.

Los controles manuales implican la presencia y la atención continua de un operario. Estos se utilizan en instalaciones de poca importancia, en donde el costo de un control automático o semiautomático - no es justificado por las funciones que debe desempeñar.

Las funciones que pueden ser asignadas a un sistema de control - son:

a.- Arranque de Motores.

Todos los motores (sean de corriente continua o alterna), cuando empiezan a funcionar absorben de la línea corrientes más grandes que- las nominales del motor. Dependiendo de la potencia y clase de motor, las corrientes en el momento de arranque puede ser de orden de 8 a 12 veces la corriente nominal (o corriente de placa).

Este efecto, cuando se trata de motores grandes, causa disturbios al sistema eléctrico en general, disminuye la vida del motor; además, el dimensionamiento de los conductores de alimentación al motor y sus protecciones se tendrán que hacer en base a estas corrientes de arranque y no a las nominales, lo que significa gastos mayores y perjudica el grado de protección del motor cuando trabaja con su corriente nominal.

Para disminuir los efectos de estas corrientes de arranque, se utilizan los llamados Arrancadores. Estos son limitadores de corriente

que gradualmente disminuyen su resistencia hasta cero, que es cuando el motor ha llegado a su estado normal de funcionamiento, sin permitir que la corriente de arranque haya superado un valor de 1.5 a 2 veces la nominal.

La forma de disminuir la resistencia de un arrancador puede ser manual o automática, según la importancia y potencia de la máquina.

b.- Protección contra fallas o sobrecargas.

Un equipo o máquina en trabajo está expuesto a continuos disturbios, causados ya sea por el operador o que son propios del sistema. Estos pueden ser:

- Subidas o bajadas del voltaje.
- Sobrecargas imprevistas.
- Cortocircuitos.
- Puestas a tierra imprevistas.
- Falla del aislamiento.
- Falsas maniobras; y
- Defectos mecánicos.

Cualquiera que sea la falla, puede traer consigo graves consecuencias, como destrucción de la máquina, incendios, interrupción de un proceso metalúrgico, etc. y además las consecuentes pérdidas económicas para las empresas.

Para disminuir los efectos causados por la falla, se utilizan ciertos elementos de protección como los fusibles y los relés. Estos-

relés se encargan de detectar la falla y producir señales digitales o cierre de contactos, los cuales se encargan de accionar o interrumpir ciertos elementos del sistema, como contactores u otros relés. Hay muchos tipos de relés de protección, ya pueden ser: de sobrecorriente , sobrevoltaje, impedancia, sobrevelocidad, etc., según la necesidad de cada caso.

Estos elementos protectores son parte del quipo de control y deben ir acoplados al circuito, donde se encargarán de realizar las funciones descritas según el diseño.

c.- Programación de funcionamiento.

La mayoría de las instalaciones industriales tienen necesidad de realizar procesos con un cierto orden determinado y éstos pueden ser repetitivos.

En estos casos, el control del operador u operadores es insuficiente, puesto que son muchas las funciones que deben desarrollar y además la precisión y velocidad necesaria en las maniobras sería imposible de lograr. Esto se puede conseguir mediante el uso de transductores, unidades lógicas, temporizadores, etc., los cuales se encargan de realizar funciones a intervalos de tiempo que son regulados convenientemente. Una de las ventajas más importantes de estos elementos es el grado de exactitud con que se pueden calibrar y obtener controles completamente automáticos.

5.2. Análisis de los motores de corriente continua.

5.2.1. Tipos de motores.

De acuerdo a la forma de como es excitado, la máquina de corriente continua, puede ser de tres tipos:

a.- Motor Shunt.

b.- Motor Serie.

c.- Motor Compound. (Acumulativo o diferencial)

a.- Motor Shunt.

Su conexión es como indica la figura 5.1. Su devanado de campo tiene una resistencia (Rf) relativamente grande razón por la cual la corriente de campo es pequeña (1~4% de la corriente nominal).

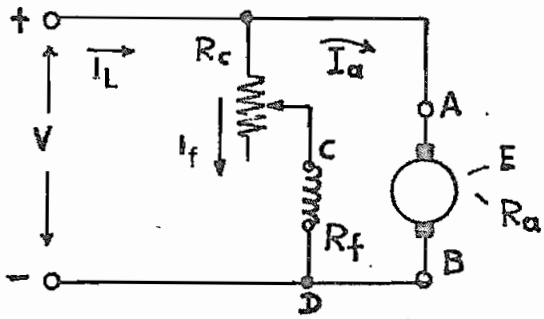


Figura 5.1.

Ra resistencia de armadura.

Rf resistencia del devanado de campo.

Rf >> Ra

V tención de alimentación.

E fuerza electromotriz inducida.

Generalmente en serie, con el devanado de campo se conecta un Reóstato (Rc), para control de la corriente If. Variando esta corriente, se puede controlar la velocidad del motor.

b.- Motor Serie.

Este tipo de motor resulta de la conexión en serie de la armadura con el bobinado de campo E.F, como indica la figura 5.2.

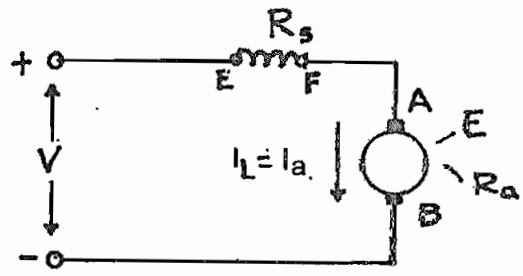


Figura 5.2.

Rs Resistencia de bobinado serie.

Ra Resistencia de armadura.

I_L=Ia Corriente de línea, de campo serie y armadura.

V Tensión de terminales.

E Fuerza electromotriz inducida.

El devanado de campo serie E-F es de pocas espiras y sección mayor que las bobinas de campo Shunt, de tal forma de obtener un valor equivalente de Amperios-vueltas entre los dos devanados. La misma corriente que circula por la armadura constituye la corriente del campo serie. (Ia). Generalmente la resistencia del campo serie Rs es menor que la resistencia de armadura y aproximadamente es 1/3 Ra.

c.- Motor Conpound.

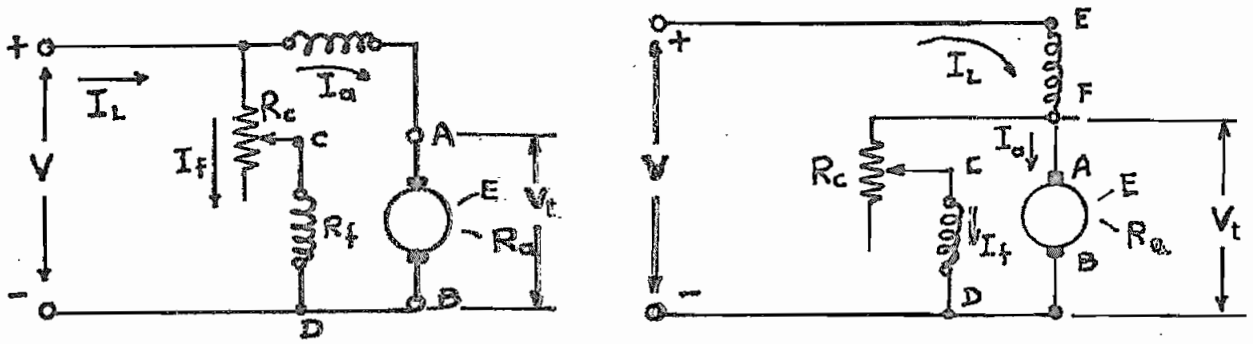
Es el resultante de la conexión de los dos tipos de bobinas antes mencionadas. De la forma de como vayan conectadas estas bobinas de campo, se pueden obtener cuatro modalidades de motores Conpound y son:

a.- Motor Conpound Largo { Acumulativo (1) / Diferencial (2)

b.- Motor Conpound Corto { Acumulativo (1) / Diferencial (2)

Tenemos Conpound largo o corto, si el devanado de campo Shunt lo

conectamos antes o después del devanado serie, como indican las figuras 5.3. (a) y (b).



Conpound Largo (a)

Figura 5.3.

Conpound Corto. (b)

De acuerdo al sentido de alimentación de las bobinas de campo serie y Shunt, podemos tener motores Conpound acumulativo y diferencial (pueden ser largos o cortos).

El conpoundaje acumulativo se obtiene cuando las bobinas de campo serie y Shunt se conectan de tal manera que sus flujos producidos se sumen:

$$\phi_c = \phi_s \pm \phi_{sh} \qquad (5.1)$$

Donde:

ϕ_c flujo de campo resultante.

ϕ_s flujo de campo serie.

ϕ_{sh} flujo de campo Shunt.

El Compound diferencial se obtiene cuando estos dos flujos se - restan.

5.2.2. Operación y características.

El comportamiento eléctrico en estado permanente para los motores de corriente continua se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$E = K\phi_c . \omega \qquad (5.2)$$

$$K = \frac{P.Z}{2\pi a} \qquad (5.3)$$

$$V = E + I_a (R_a + R_s) \qquad (5.4)$$

$$V_t = E + I_a R_a \qquad (5.5)$$

$$I_L = I_a + I_f \qquad (5.6)$$

Donde:

E fuerza electromotriz inducida (viene indicado en forma de gráfico conocido como "curva de saturación").

V voltaje de alimentación. (volt).

V_t voltaje en terminales de armadura (volt).

ϕ_c flujo de campo resultante (líneas).

K constante de la máquina.

P número de polos.

Z número total de conductores de armadura.

a número de caminos en paralelo.

ω velocidad del motor (rad/seg).

I_L corriente de línea (Amp).

I_a corriente de armadura (Amp).

I_f corriente de campo shunt (Amp).

El comportamiento mecánico en estado permanente, se determina a-partir de las ecuaciones:

$$T = K\phi_c I_a \tag{5.7}$$

$$\omega = \frac{V_t - IR_a}{K\phi_c} \tag{5.8}$$

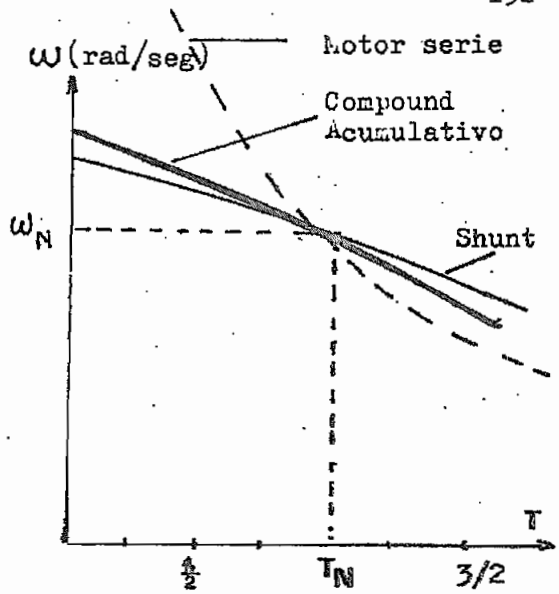
$$P = E \cdot I_a = T \cdot W \tag{5.9}$$

Donde:

T torque (Nw-m)

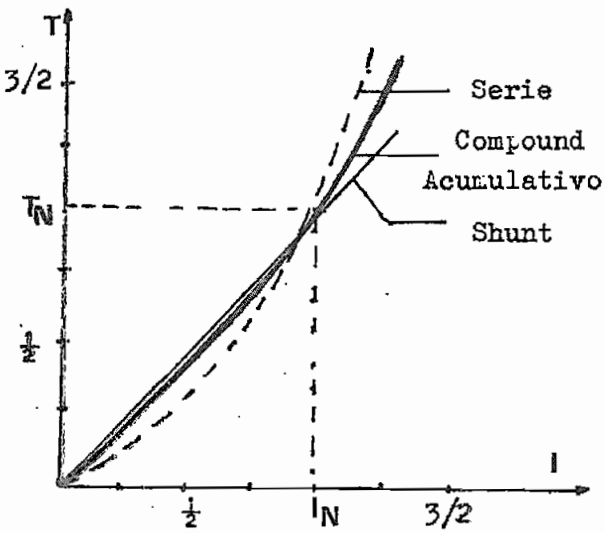
P potencia desarrollada (watt)

A partir de las ecuaciones descritas anteriormente y conociendo-la curva de saturación de la máquina o por su correspondiente repre--sentación matemática dada por la ecuación de Froelich's, se determina el comportamiento para un determinado estado de funcionamiento. Estas características vienen dadas en forma de curvas de Velocidad-Torque o Velocidad-Corriente de armadura -Torque- Corriente de armadura. Figuras 5.4 y 5.5. respectivamente.



Curvas Velocidad-Torque

Figura 5.4



Curvas Torque-Corriente de arranque.

Figura 5.5.

De estos gráficos se observa que el motor Shunt opera con velocidad casi constante (Regulación 10 a 20%), aunque su torque de arranque es bajo. De la ecuación 5.8 se observa que en este tipo de motor, el control de la velocidad se puede hacer variando el flujo de campo ϕ_c, o variando la resistencia del circuito de armadura, o variando el voltaje de alimentación.

El motor Serie, por su parte, tiene excelentes torques de arranque aunque su regulación de velocidad es mala; además, el control de velocidad es un tanto difícil y tiene el peligro de que en vacío puede embalarse.

La máquina Compound acumulativa, al ser la combinación de motor-Shunt-Serie, se comporta mejor que el Shunt en cuanto a torques de arranque se refiere, aunque su regulación se empobrece.

5.2. Arranque de Motores de Corriente Continua.

Si a un motor de c.c. se le conecta directamente a la fuente de alimentación, éste absorbe gran corriente de la línea (8 a 12 veces la corriente nominal del motor), debido a que en el momento del arranque (la velocidad $\omega = 0$) la corriente se ve limitada sólo por la Resistencia de armadura R_a y por la de campo Serie R_s, puesto que la fuerza electromotriz inducida para $\omega = 0$ es $E = 0$.

De las ecuaciones (5.2) y (5.5), se tiene que para el momento de arranque:

$$\omega = 0$$

$$E = K\phi_c \omega = 0$$

$$I_{arr} = \frac{V - E}{R_a} \qquad (5.10)$$

$$I_{arr} = \frac{V}{R_a} \qquad (5.11)$$

A medida que el motor va ganando velocidad, en la armadura se produce la E que se opone al voltaje de la red V y el flujo de campo ϕ_c se mantienen constantes. La característica de velocidad-corriente en vacío sería una recta (ecuación 5.10) como la de la figura 5.6.

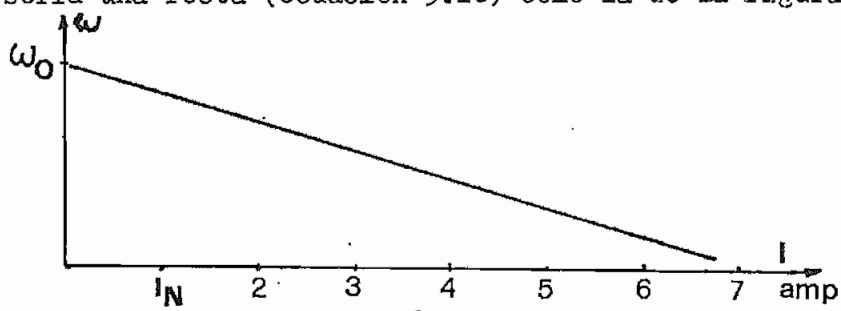


Figura 5.6.

Cualquiera sea el tipo de motor de c.c. para tener buenos torques de arranque, la expresión $T = K \phi_c I_a$ debe ser máxima. Para tener máximo T, debemos hacer que el ϕ_c sea el más grande que se pueda(es decir,- el reóstato de regulación del campo debe estar en cero de resistencia). La corriente I_a es también grande en el momento del arranque, pero estas corrientes deben ser limitadas dentro de un cierto margen de va-- riación (valores recomendados son: 1.5 a 2 veces la I_N) puesto que corrientes de arranque de 6-12 veces la nominal dañarían muy rápidamente el colector y además el torque aplicado al sistema sería muy brusco.

5.2.1. Cálculo de un arrancador con "n pasos de resistencia".

Para limitar dicha corriente de arranque a un valor de 1.5 a 2 - I_N y al mismo tiempo tener buena aceleración del motor hasta llegar a la velocidad nominal, se diseñan sistemas de arranque, los cuales intercalan pasos de resistencia que son cortocircuitados conforme el motor gana velocidad. Estas resistencias se calculan a partir de los datos de placa del motor y asumiendo la corriente límite de arranque en 1.5 a 2 I_N. Este método se puede aplicar en cualquier tipo de motor - de c.c y puede hacerse gráfica o analíticamente. La figura 5.7 presenta el circuito eléctrico y la figura 5.8 el método gráfico de cálculo.

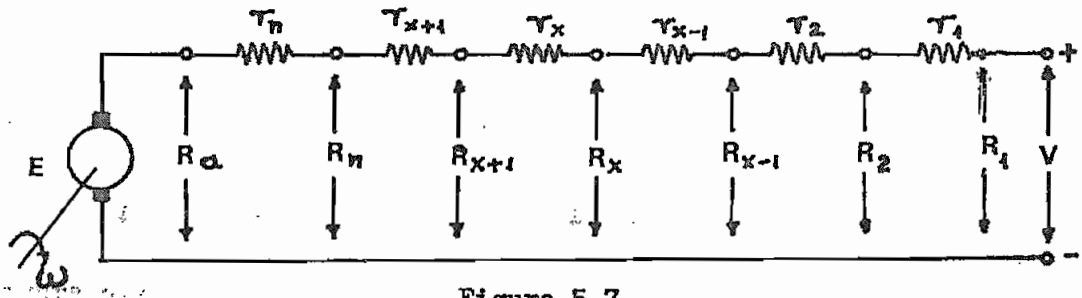


Figura 5.7.

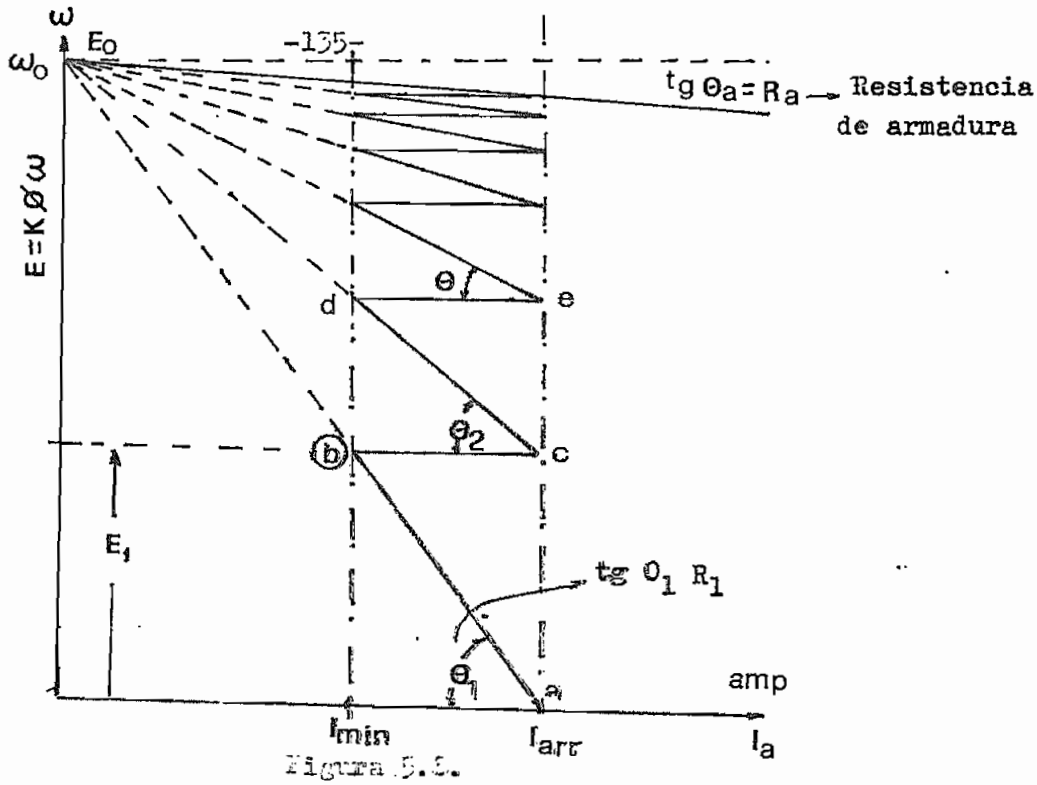


Figura 5.1.

En estos gráficos tenemos que:

E_o = V (fuerza electromotriz en vacío).

V voltaje de la red.

I_{min} corriente mínima (generalmente es igual a la nominal I_o)

I_{arr} máximo valor de corriente de arranque (1.5-2 I_n).

R resistencia total de arranque intercalada ($R=R_1-R_a$).

R_x resistencia con (n-x) pasos y armadura R_a

n pasos de resistencia.

En el eje de ordenadas se dibuja a escala, la fuerza electromotriz E_o el valor de velocidad ω. Se traza el valor de resistencia de-armadura como $tg\,\Theta_a = \frac{E_o - E}{I_N} = R_a$; luego trazamos las rectas a-E_o . La tag $\Theta'_1 = R_1$. El punto (b) de corte con la corriente I_{min} significa -

que la ... inducida o velocidad han subido, entonces se hace necesario cortocircuitar el paso de resistencia Y_1 para que el motor siga acelerando con mayor rapidez. La $tg\ \Theta_2 = R_2$ se obtiene trazando la recta E_o-C y así sucesivamente hasta llegar a coincidir con la resistencia $R_a = tg\ \Theta_a$.

Un pequeño cálculo permite encontrar los valores de resistencia intercalados para un determinado número de pasos.

Cuando el motor se conecta a la red, la corriente se debe limitar hasta I_{arr}:

$$R_1 = \frac{V}{I_{arr}} \qquad (5.12)$$

La resistencia intercalada es: $R = R_1 - R_a$.

El motor gana velocidad, entonces la corriente disminuye hasta I_{min}. En ese punto:

$$E_1 = V - I_{min} R_1 \qquad (5.13)$$

Despejando se tiene:

$$I_{min} R_1 = V - E_1 \qquad (5.14)$$

Se cortocircuita el paso de resistencia r_1 y la corriente nuevamente sube a I_{arr}. Luego:

$$R_2 . I_{arr} = V - E_1 \qquad (5.15)$$

Relacionando la ecuación 5.15 y 5.14, se tiene:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{I_{arr}}{I_{min}} = g \qquad (5.16)$$

De igual forma:

$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{I_{arr}}{I_{min}} = g \qquad (5.17)$$

Sustituyendo el valor de la (5.16) en la (5.17), se tiene:

$$R_2 = \frac{R_1}{g} = \frac{R_1}{\left(\frac{I_{arr}}{I_{min}}\right)} \qquad (5.18)$$

$$R_3 = \frac{R_2}{g} = \frac{R_1}{g^2} \qquad (5.19)$$

Para cualquier punto de resistencia se tiene que:

$$R_X = \frac{R_1}{g^{(x-1)}} \qquad (5.20)$$

Si n igual número de pasos de resistencia, entonces:

$$R_a = \frac{R_1}{g^n} = \frac{R_n}{g} \qquad (5.21)$$

Donde se puede encontrar el valor de n, para valores conocidos de R_a y R_1

$$(g)^n = \frac{R_1}{R_a} \qquad (5.22)$$

$$n \ln g = \ln \frac{R_1}{R_a} \qquad (5.23)$$

Si se fija el número de pasos de resistencia y el valor máximo de la corriente de arranque: I_{arr}

$$g = \frac{I_{arr}}{I_{min}} \qquad (5.17)$$

$$n \ln \left[\frac{I_{arr}}{I_{min}}\right] = \ln \frac{R_1}{R_a} = \ln \left[\frac{V}{I_{arr} \cdot R_a}\right] \qquad (5.24)$$

$$\ln \left[\frac{V}{I_{arr} R_a}\right] = j \qquad (5.25)$$

$$\ln \frac{I_{arr}}{I_{min}} = \frac{j}{n} \qquad (5.26)$$

$$I_{min} = \frac{1}{I_{arr}} e^{-j/n} \qquad (5.27)$$

La ecuación, 5.27 nos indica el valor de la corriente mínima para un arrancador de un determinado número de pasos.

La resistencia de cada paso r_x, puede ahora ser determinada como se indica:

$$r_x = R_x - R_{(x+1)} = R_x - \frac{R_x}{g} = \frac{R_x}{g}(g-1) \qquad (5.28)$$

$$r_x = \frac{R_1}{g(g)^{x-1}}(g-1) = \frac{R_1}{g^x}(g-1) \qquad (5.29)$$

Estos pasos de resistencia r_x calculados, se cortocircuitan sucesivamente ya sea por medios manuales o automáticos.

El arranque manual se realiza mediante reóstato de tambor llamados arrancadores de tres y cuatro puntos. La figura 5.9, indica la conexión de un arrancador de tres puntos conectado a un motor Shunt.

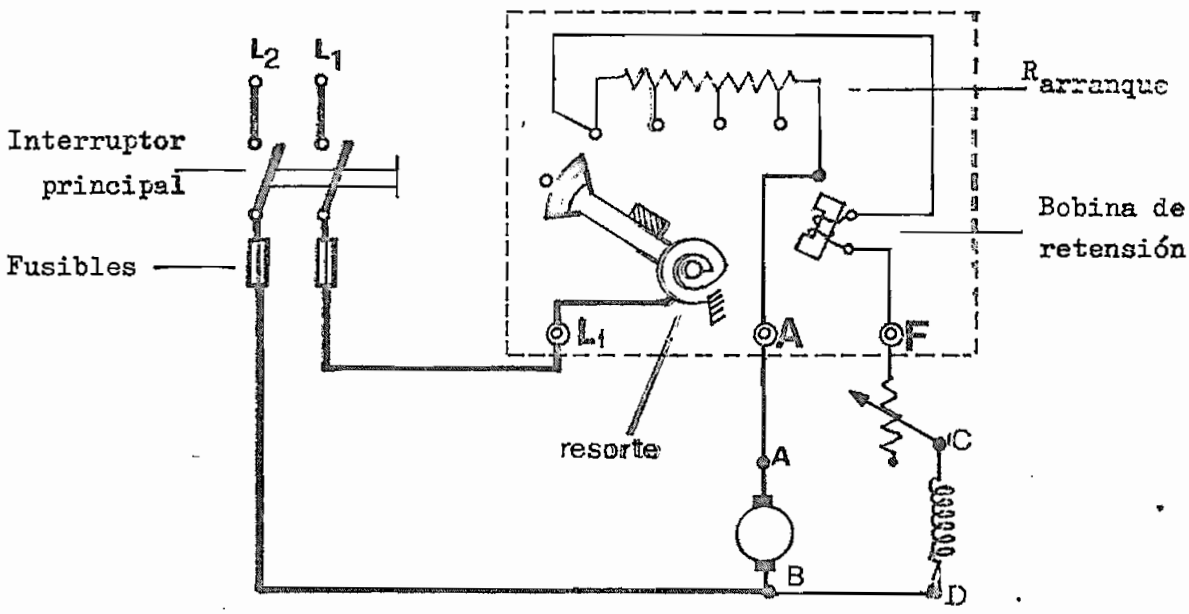


Figura 5.9

La bobina de retención de la figura 5.9 tiene dos fines: el primero es brindar enclavamiento magnético a la palanca, cuando ésta ha terminado la operación de arranque. El segundo fin, es brindar protección contra embalamiento de estos motores cuando hay pérdida del campo magnético del devanado C-D, puesto que la corriente de campo I_f

deja de circular, la bobina de retención que antes estaba sujetándolo, magnéticamente suelta un resorte y hace que la palanca vuelva a su posición inicial apagando el motor.

El embalamiento en una subida de velocidad del motor que puede - destruir mecánicamente la máquina o causar daños al sistema a él asociados. Si se despeja de la fórmula

$$I_a = \frac{V_t - K.\phi_c.a}{R_a}$$

La velocidad S se tiene:

$$\omega = \frac{V_t - I_a R_a}{K\phi_c}$$

Si hay interrupción en el circuito de campo, If = 0 entonces el- flujo que esta corriente mantenía, desciende a un valor muy bajo —— $\phi_c = 0$ (este valor de flujo no es cero, debido al magnetismo remanente) entonces $\omega \to \infty$ produciéndose el embalamiento.

Este tipo de arrancadores han sido reemplazados casi en su totalidad por arrancadores automáticos, aunque todavía hay fábricas o instalaciones en donde se los utiliza.

Las razones por las cuales es recomendado usar un método de arranque en un motor son:

1.- Limitar las corrientes de arranque que pueden destruir los - delgas del conmutador en un motor de c.c.

2.- Reducir al mínimo las perturbaciones causadas a la red por - sobrecorrientes que producen altas caídas de tensión en las resistencias de las líneas. Este efecto es válido para motores de c.a o c.c.

3.- Proporcionar una aceleración suave, de forma que la maquinaria y la instalación en general no sufran solicitaciones mecánicas por la brusca aplicación del Torque mecánico del motor.

5.2.2. Arrancadores automáticos para motores de c.c

Existen varios métodos de arranque automático para motores de - c.c.; todos pueden clasificarse en dos métodos generales:

1.- Arranque con limitaciones de la corriente y

2.- arranque con tiempo fijado.

El primero emplea un juego de relés de corriente mínima o de --- fuerza contra electromotrices que ordenan cortocircuitar la resistencia de arranque cuando la corriente baja hasta el valor mínimo Imin. El tiempo en que dicha resistencia es cortocircuitada depende de la corriente o carga aplicada al motor en el momento del arranque; mientras que el arranque a tiempo fijo, emplea un juego de relés los cuales se calibran previamente y van cortocircuitando la Resistencia de arranque independientemente de la corriente a carga aplicada al motor.

A continuación se dan algunos tipos de arranque automático:

5.2.2.1. Arranque de un motor Shunt mediante relés de mínima corriente.

Se deberán cortocircuitar tres grupos de resistencia R1, R2 y R3- cuando la corriente baja de su valor nominal.

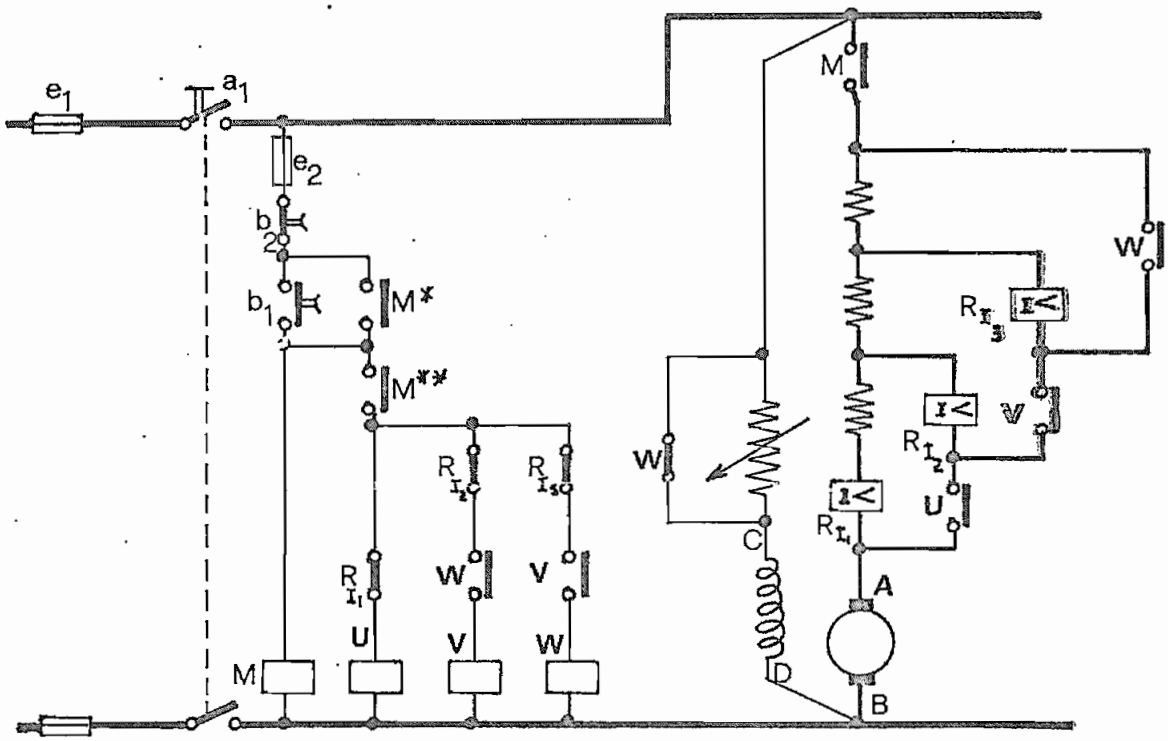


Figura 5.10

El equipo empleado en la figura 5.10 es:

1 interruptor principal de c.c. manual. (a_1)

2 fusibles contra cortocircuitos del circuito de potencia e_1.

1 fusible de protección del circuito de mando e_2.

2 pulsantes, el uno de arranque y el otro de parada (b_1 y b_2).

3 relés de mínima corriente (es decir opera con $I > 1{,}5\ I_N$ y --- vuelve a su posición inicial con $I < I_N$

4 Contactores M, U, V, W.

Resistencia de arranque en pasos de R1, R2 y R3 (debidamente

calculados).

1 Reóstato de regulación de campo Rc.

Las funciones binarias son:

$$\begin{cases} L = (b_1+K)\ b_2' \\ U = L.b_2'.RI_1' \\ V = L.W.b_2'.RI_2' \\ W = K.V.b_2' \ .\ RI_3' \end{cases} \qquad (5.39)$$

Con estas funciones se puede diseñar el correspondiente circuito de mando con funciones lógicas estáticas.

El circuito dado funciona de la siguiente manera:

Al accionar el interruptor principal a_{II}, el devanado de campo recibe tensión y se establece flujo magnético en el motor. Nótese que el reóstato de campo Rc permanece cortocircuitado por el contacto W hasta cuando el motor haya terminado de arrancar, pues es requisito fundamental de los motores el arrancar con su máximo flujo de campo. Al presionar el contacto b_1, el contactor L se energiza, cerrándose el contacto L de alimentación al motor y sus contactos auxiliares L* que sirve para autoalimentarse y el contacto auxiliar L** que se utiliza para que el contactor U no funciona antes de la operación del relé de mínima corriente RI_1. En el instante en que se cerró el contacto de trabajo L de alimentación al motor, circula una corriente de armadura Ia (se permite hasta 2 I_{II}) que atraviesa las resistencias de a-

cortocircuite el tercer paso de resistencia R3 y al mismo tiempo saque del cortocircuito el reóstato de regulación del campo que durante el arranque estaba cortocircuitado por el contacto auxiliar W.

Presionando el pulsante b2, se vuelve al estado inicial con el bobinado de campo conectado. Para apagar todo el circuito se accionará el interruptor a_1.

5.2.2.2. Arranque de un motor Shunt mediante relés de fuerza contra-electromotriz.

Este es un arranque con limitación de corriente, se diferencia del anterior porque la forma de detectar la corriente, es recibiendo señales de caída de tensión en las terminales de armadura con relés de fuerza contraelectromotriz. La figura 5.11 presenta un arrancador automático del tipo descrito.

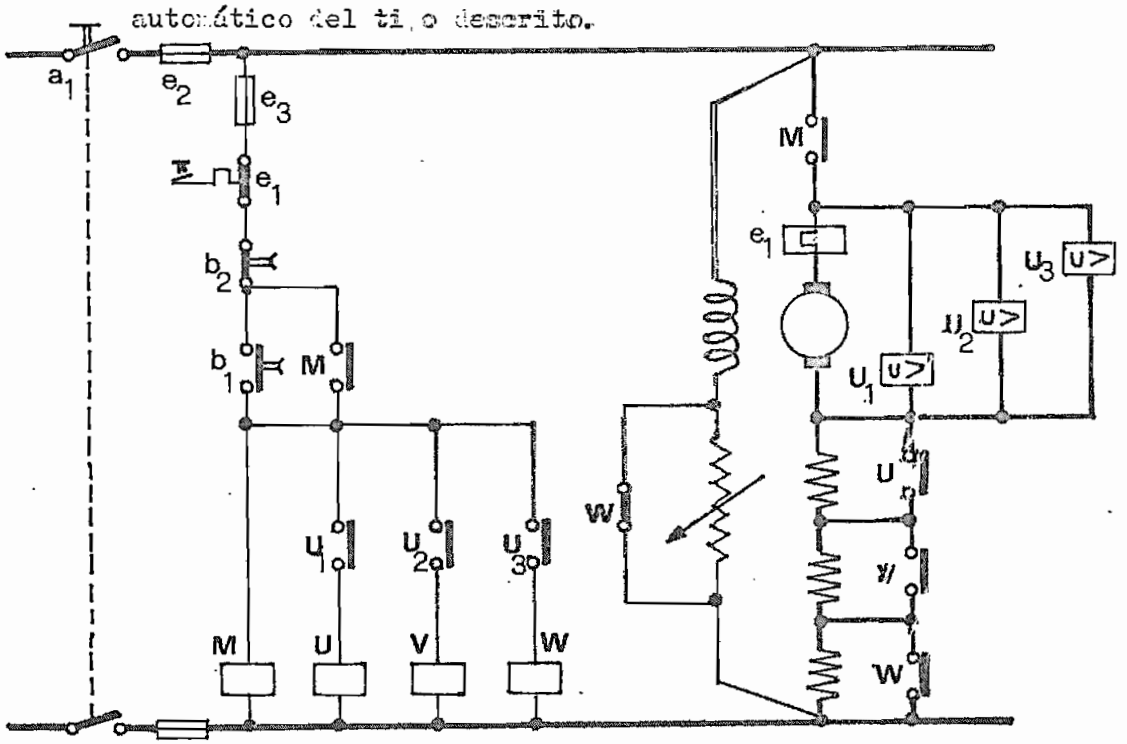


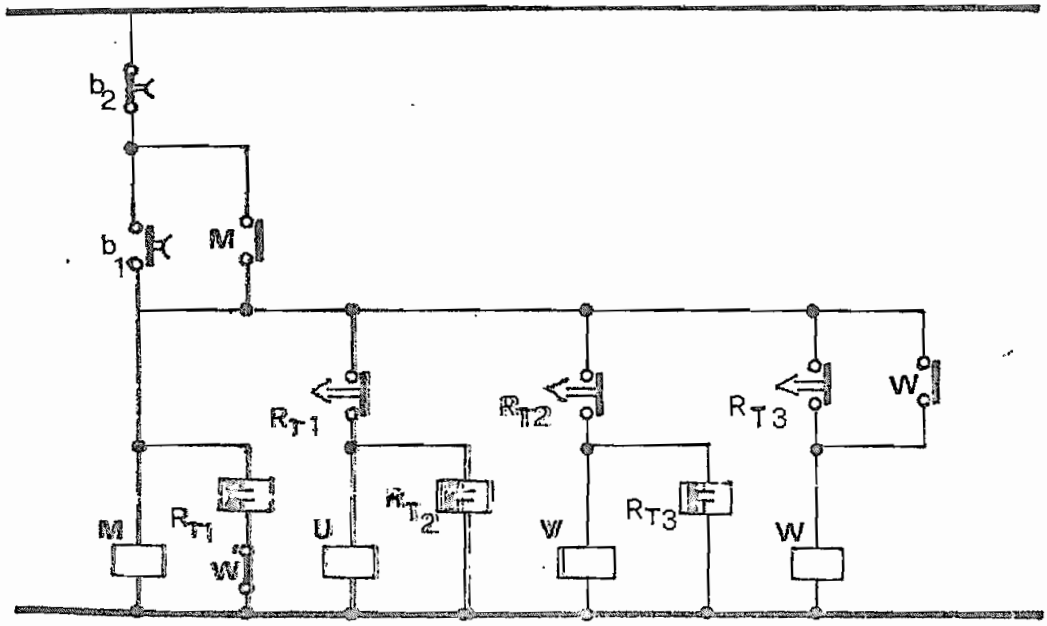
Figura 5.11.

madura del motor sometida a la tensión de línea.

5.2.2.3. Arranque de un motor Compound mediante relés de tiempo.

De acuerdo al tipo de relés de tiempo utilizados, se debe - diseñar un circuito de mando diferente. Si se utilizan relés de tiempo tipo neumáticos con retardo posterior a la excitación, el circuito

de . ..lo será el de la figura 5.12



Arrancador de un motor Compound con relés de tiempo (circuito de mando).

Figura 5.12 (a).

El circuito de trabajo o de potencia de este arranque es el de - la figura 5.12 (b).

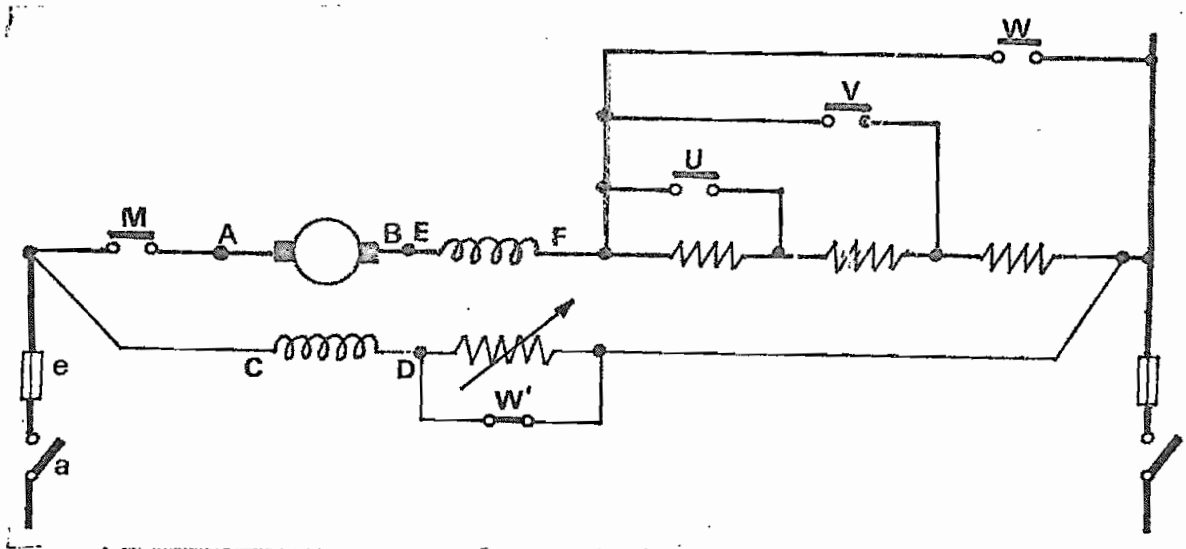
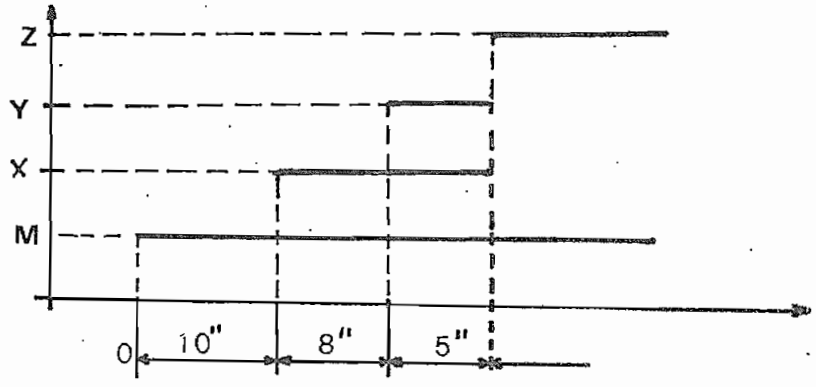


Figura 5.12 (b).

El programa de trabajo en el tiempo es el siguiente:



Las funciones binarias son:

$$\begin{cases} \text{..} = (b_1+\text{..})\ b_2' \\ \text{U} = \text{..}\cdot\text{RT1} \\ \text{V} = \text{..}\ \text{RT2} \\ \text{W} = \text{..}(\text{RT3}+\text{..}) \end{cases} \qquad (5.3.2.)$$

Para los relés de tiempo:

$$\begin{cases} \text{RT1} = \text{..}\cdot\text{W}' \\ \text{RT2} = \text{..}\cdot\text{RT1} \\ \text{RT3} = \text{..}\cdot\text{RT}_2' \end{cases}$$

Al presionar el pulsante de arranque b_1, se excita el contactor-M y el relé RI_1. El motor arranca con sus resistencias conectadas en serie. Pasados 10", el relé RI_1 opera su contacto normalmente abierto y activa el contactor U y el relé RI_2. Al activarse U, cierra su contacto de trabajo que cortocircuita el paso de Resistencia R1 de la figura 5.12 (b).; 8 segundos después de activarse el relé RI2, cierra -

brirse RI_1, el contactor U y el relé RI2 se reponen y, al abrirse RI2, el contactor V y el relé RI3 se reponen quedando solamente excitado el contactor L (principal) y el contactor 1 del arranque. Si se presiona el pulsante b_2, el circuito vuelve a su posición inicial

5.3. Control de velocidad y frenado.

El control de velocidad de una máquina, significa el cambio voluntario de valor cuando se varían los siguientes parámetros:

$$V = \frac{Vt - IRa}{K\phi c} \qquad (5.34)$$

1 Variando ϕc (por medio del reóstato Rc).

2 Variando Ra (control reostático de armadura).

3 Variando el voltaje de armadura (Sistema Ward Leonard).

Las máquinas de corriente continua son muy utilizadas porque presentan mucha facilidad sobre el control de velocidad.

Cuando el rango de velocidad requerido no es muy grande y el torque de la carga es cercano al nominal del motor, se utiliza el control

por variación de flujo de campo.

Cuando el rango de velocidad que se desea es desde cero hasta el nominal, con los torques cercanos al nominal, se puede utilizar el método por variación de resistencia en la armadura. Este método es muy utilizado puesto que las mismas resistencias que sirven para el arran que sirven para el sistema de control de la velocidad.

Cuando el rango de velocidad que se desea es desde cero hasta valores más altos que el nominal y para torques nominales y hasta mayores, se utiliza el método por variación de voltaje de armadura, conocido como sistema Ward Leonard. Este sistema es mejor, pero el más costoso de todos puesto que implica una unidad adicional motor-generador.

Dentro del control de velocidad se considera, además, la inversión de giro del motor. En este tratado no entraremos en detalles sobre los métodos de control de velocidad, se tratará sobre las técnicas usadas con contactores para la inversión de giro y frenado.

5.3.1. Inversión de giro.

El sentido de rotación de los motores de c.c. se puede invertir:

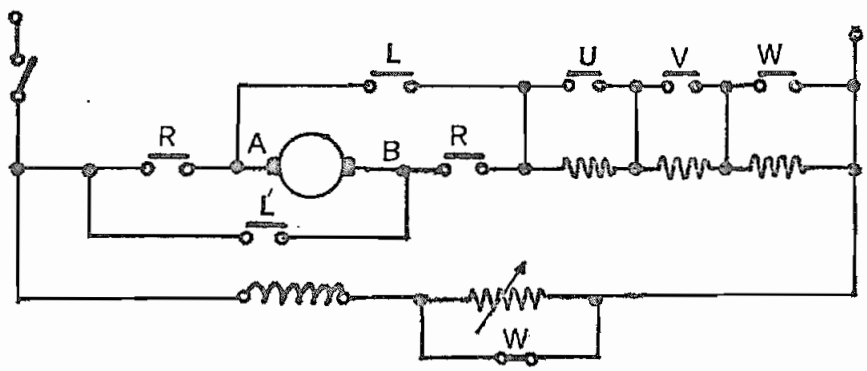
a.- Cambiando la polaridad en la armadura.

b.- Cambiando la polaridad en el campo Shunt y Serie si se trata de un Compound.

El segundo método no es muy utilizado, debido a que el circuito-

de campo es muy inductivo por lo que la apertura y cierre va acompañado de formaciones de arco y el tiempo de establecimiento del flujo ϕ_c sería retardado. Además, cuando se trata de motores Compound, es necesario cambiar tanto el campo Shunt como el campo Serie lo que implica usar más contactores.

El método que generalmente se usa, es cambiar la polaridad de armadura, para lo cual se usan dos conductores que realizan la conmutación . (Ver figura 5.13 (a)).



Inversión de giro de un motor de c.c.

figura 5.13 (a).

El circuito de mando para realizar este trabajo es el de la figura 5.13 (b).

En este circuito, sólo se ha dejado indicada la conexión que se debe hacer con el circuito de mando para el arranque, el cual es como el de la figura 5.12 (a).

c.- Inversión momentánea de las conexiones de armadura.

d.- Frenado regenerativo.

a.- El frenado por zapatas consiste en una bobina que acciona un juego de zapatas que se ponen en rozamiento con un tambor acoplado al motor. Hay dos sistemas:

1.- Cuando la bobina del freno está desenergizada el sistema está frenado. Fig. 5.14 (a).

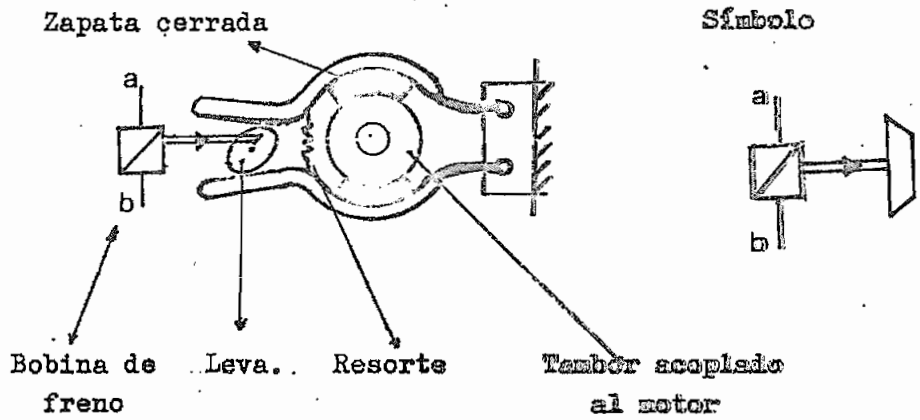


Figura 5.14 (a).

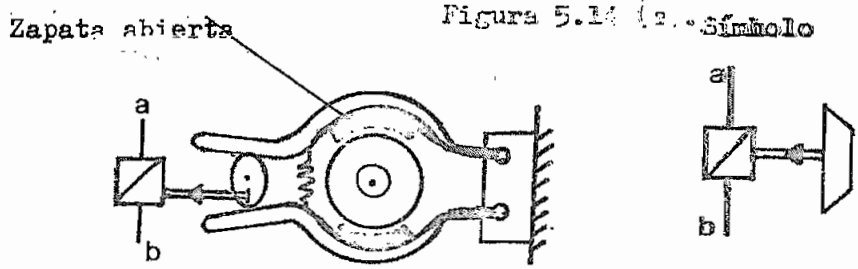


Figura 5.14 (b).

2.- Cuando la bobina del freno se energiza, el freno actúa. Fig. 5.14.(b).

Este tipo de freno se utiliza para mantener bloqueado el motor -

se desconecta el motor de la línea (excepto el campo) y se le conecta a una resistencia RF que se llama resistencia de frenado. Fig. 5.15.

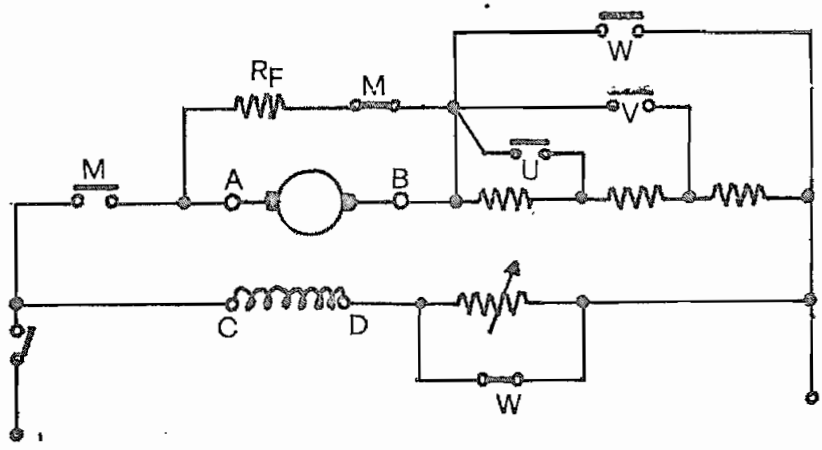


Figura 5.15.

El circuito de mando es el mismo que de 5.12 (a).

El cálculo de RF se hace de tal forma que la corriente, en el instante de frenar el motor no supere el valor de 3 veces la corriente nominal. Entonces se tiene que:

$$R_F = \frac{E_o}{I_F} = \frac{(V_t - I_N \cdot R_a)}{I_F} \qquad (5.36)$$

Donde:

E_o valor de f.e.m. inicial.

$\bar{E}_M$ caída de tensión o voltaje que llega a los terminales de una-fase del motor. El diagrama fasorial es como el de la figura-6.9.

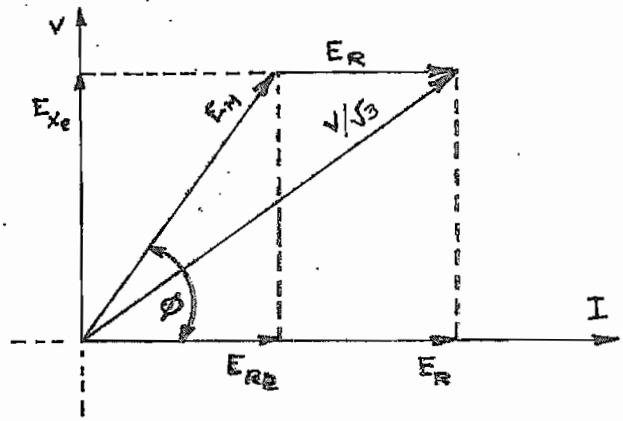


Figura 6.9.

La corriente admisible que circulará en el momento del arranque-es:

$$I = \frac{E_R}{R} = \frac{E_M}{Z_e} \quad 2 \sim 3.5\ I_M \text{ (con resistencia de arranque).} \quad (6.10)$$

donde Z_e = impedancia equivalente del motor a rotor bloqueado.

La tensión que llega a los terminales del motor E_M tiene dos componentes, como indica la figura 6.9. Una, debido a la resistencia equivalente a rotor bloqueado R_e y otro, debido a la reactancia equivalente X_e.

$$E_M = E_{Re} + j\ E_{Xe} \quad (6.11)$$

Estas caídas de tensión E_{Re} y E_{Xe} dependen del cos $\varnothing$ (factor de potencia del motor a rotor bloqueado).

El valor de $\bar{E}_M$, depende de la limitación de corriente que quere-

mos permitir. Si:

$$I_{arr} = \frac{V/\sqrt{3}}{Z_e} \quad \text{(corriente de arranques sin resistencias)}. \tag{6.12}$$

$$I = \frac{E_M}{Z_e} \quad \text{(corriente admisible de arranque)} \tag{6.13}$$

Si se divide la (6.13) para la (6.12) se tiene:

$$\frac{I}{I_{arr}} = \frac{E_M}{V/\sqrt{3}} \qquad \text{donde: } E_M = \frac{V}{\sqrt{3}} \left(\frac{I}{I_{arr}}\right) \tag{6.14}$$

$\frac{I}{I_{arr}}$ = relación entre la corriente de arranque con resistencias y sin ellas.

Conociendo E_M , se puede encontrar:

$$E_{Re} = E_M \cos \phi \tag{6.15}$$

$$E_{Xe} = E_M \operatorname{Sen} \phi \tag{6.16}$$

$E_{Re} + E_R = \sqrt{(V/\sqrt{3})^2 - E_{Xe}^2}$: despejando y reemplazando:

$$R = \frac{\sqrt{\left(\frac{V}{\sqrt{3}}\right)^2 - E_{Xe}^2} - E_{Re}}{I} \tag{6.17}$$

Estas resistencias de arranque, después de que han llegado al motor con una cierta velocidad, se cortocircuitan. Para motores grandes, se prefiere que este proceso se realice en forma automática, puesto que es el único que garantiza operaciones correctas.

El diagrama de la figura 6.10, presenta al circuito de mando y -

de potencia de un arranque automático por resistencia.

Este circuito está proyectado para conectar el motor a través de las resistencias de arranque y luego después que el motor gana velocidad, las resistencias son cortocircuitadas automáticamente. Su funcionamiento comienza al oprimir el pulsante b_1, el cual excita la bobina del contactor C_1 y el relé de tiempo R_T. El contactor C_1, al energizarse, arranca el motor a través de las resistencias R. Pasado un tiempo determinado en el que el motor ha llegado a una cierta velocidad, el relé R_T cierra su contactor R_T (retardado a la excitación, 10 segundos por ejemplo), el cual energiza el contactor C_2. Este se autoalimenta con su contacto auxiliar normalmente cerrado y con sus tres contactos de trabajo, pone en cortocircuito las resistencias de arranque R que sirvieron en el arranque. En este circuito el contacto C_1, sigue conectado igual con C_2. Esto brinda mayor capacidad de corriente al momento de una desconexión del motor por sobrecarga.

e_1 = relé térmico contra sobrecarga.

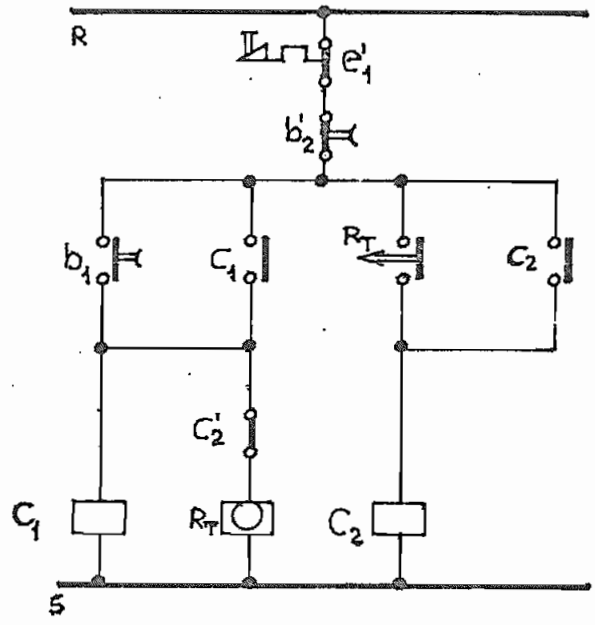
e_2 = protección contra cortocircuitos del circuito de potencia.

Las ecuaciones binarias que expresan el funcionamiento anteriormente descrito son las siguientes:

$$\text{Contactores Principales} \begin{cases} C_1 = (b_1 + C_1)\, e_1' \cdot b_2' \\ C_2 = (R_T + C_2)\, e_1' \cdot b_2' \end{cases} \tag{6.18}$$

$$\text{Relé de tiempo: } RT = C_1 \cdot C_2' \tag{6.19}$$

Con estas funciones se puede diseñar el circuito correspondiente con circuitos lógicos estáticos.



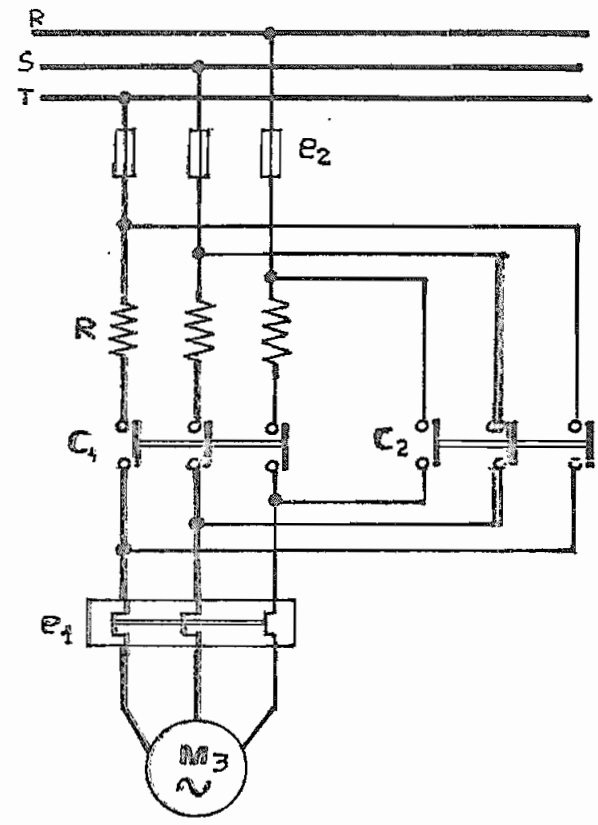


Figura 6.10.

Cuando los motores son grandes y se requiere que el arranque tenga una aceleración uniforme, al igual que en los motores de corriente continua, se utilizan pasos de resistencia (en cada línea) que son cortocircuitadas a intervalos de tiempo regulados.

6.2.3.2. Arranque con tensión reducida por reactancias.

En instalaciones de motores grandes en donde las tensiones e intensidades son elevadas, el grupo de resistencias de arranque resultan ser muy voluminosas y además tienen el inconveniente de disipar -

calor. En este caso se prefiere limitar las corrientes de arranque usando reactancias, puesto que resultan ser mucho más pequeñas y no disipan calor. Estas reactancias, al igual que las resistencias, tienen como objeto limitar la corriente debido a la caída de tensión ocasionada. Luego el tratamiento y forma de conectarlas es similar al método con resistencias. Para el cálculo de dichas reactancias de arranque (X), se deberá tener presente que las caídas de tensión reactiva del motor (E_{Xe}). Por esta razón, aunque si bien estos elementos tienen ventajas sobre las resistencias, disminuyen el factor de potencia al momento del arranque, con lo que la regulación de la línea de alimentación baja notablemente. Los circuitos de mando y de trabajo para este tipo de arranques es similar al descrito para las resistencias .

6.3.3.3. Arranque con autotransformador.

Aunque este resulta ser el más caro de todos los métodos de arranque para motores trifásicos a jaula de ardilla, es el más efectivo puesto que reduce la corriente de línea de alimentación cuadráticamente al voltaje aplicado, mientras que la corriente que va al motor se reduce linealmente. Esto significa obtener mejores torques de arranque para igual reducción de corriente en la línea, comparando con los otros métodos de arranque. Los autotransformadores para arranques de motores trifásicos vienen diseñados para la tensión de trabajo del motor y traen taps para el 50, 60 y 80% de la tensión aplicada. Estos -

taps permiten escoger el valor de corriente al que se quiere limitar- en el arranque. Generalmente estos autotransformadores son trifásicos, aunque se puedenobtener los mismos efectos con dos autotransformadores monofásicos conectados en V.

En este método de arranque se debe tener presente que al reali-- zar el cambio de tensiones, el autotransformador debe ser desconectado de la red, lo que ocasiona estados transitorios que puede hacer -- que las corrientes que van al motor sean sumamente elevadas. Debido a este fenómeno, los arranques con autotransformadores se pueden clasificar en dos grupos:

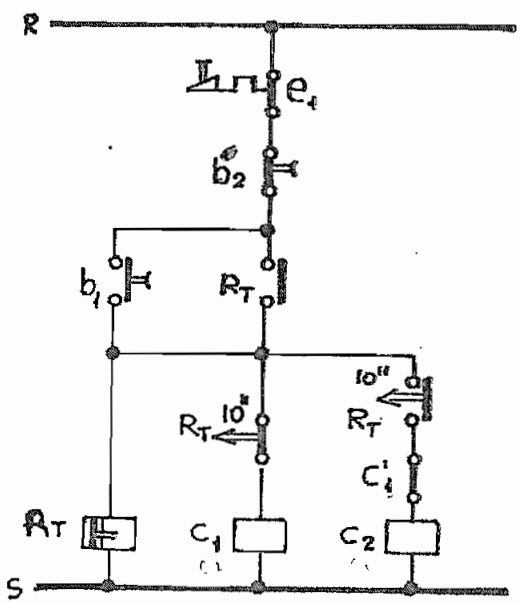
a.- Con transición a circuito abierto y

b.- Con transición a circuito cerrado.

En el sistema con transición a circuito abierto, hay un instante de tiempo en que el motor queda completamente fuera de línea, lo que- ocasiona los estados transitorios. La figura 6.11 muestra este sistema de arranque que no es muy utilizado por las razones expuestas.

En este diagrama, C_1 es un contactor con 6 contactos de trabajo, (se puede poner dos contactos en paralelo). R_T es un relé de tiempo - neumático que tiene unidades de cierre instantáneo y contactos normal mente cerrados y abiertos retardados a la excitación. Al presionar b_1 el relé R_T y el contactor C_1 se excitan y se autoalimentan con su unidad instantánea R_T y El contacto auxiliar C_1(normalmente cerrado) blo

quea el funcionamiento indeseado del contactor C_2, puesto que significaría un cortocircuito del autotransformador. Pasados 10 seg. el R_T - (NC) desexcita el contactor C_1 y el R_T (N.A) a través del contacto C_1 auxiliar (N.C) excita el contactor C_2, quedando el motor sometido a-- la tensión total. En el tiempo de conmutación C_1 abre todos sus contactos antes de cerrarse C_2 quedando el motor desconectado fracciones de segundo que producen sobretensiones y corrientes elevadas. (El tiempo de conmutación es de 0,1 - 0,3 seg).



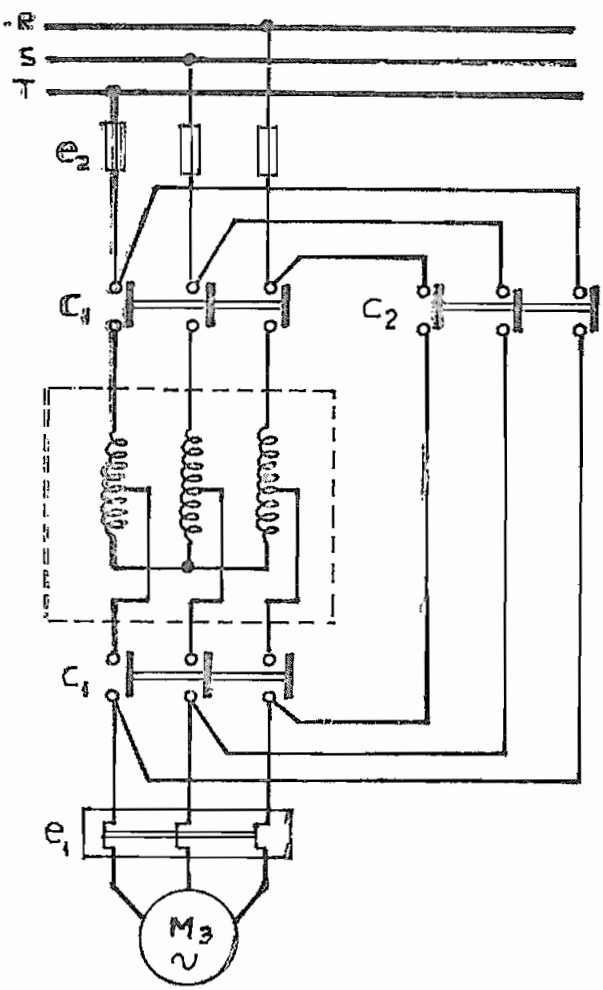


Figura 6.11.

En el sistema con transición a circuito cerrado, el motor nunca queda sin alimentación, puesto que el autotransformador se desconecta por partes, quedando en un instante conectado como una simple reactancia que después es cortocircuitada. La figura 6.12 muestra este sistema de arranque.

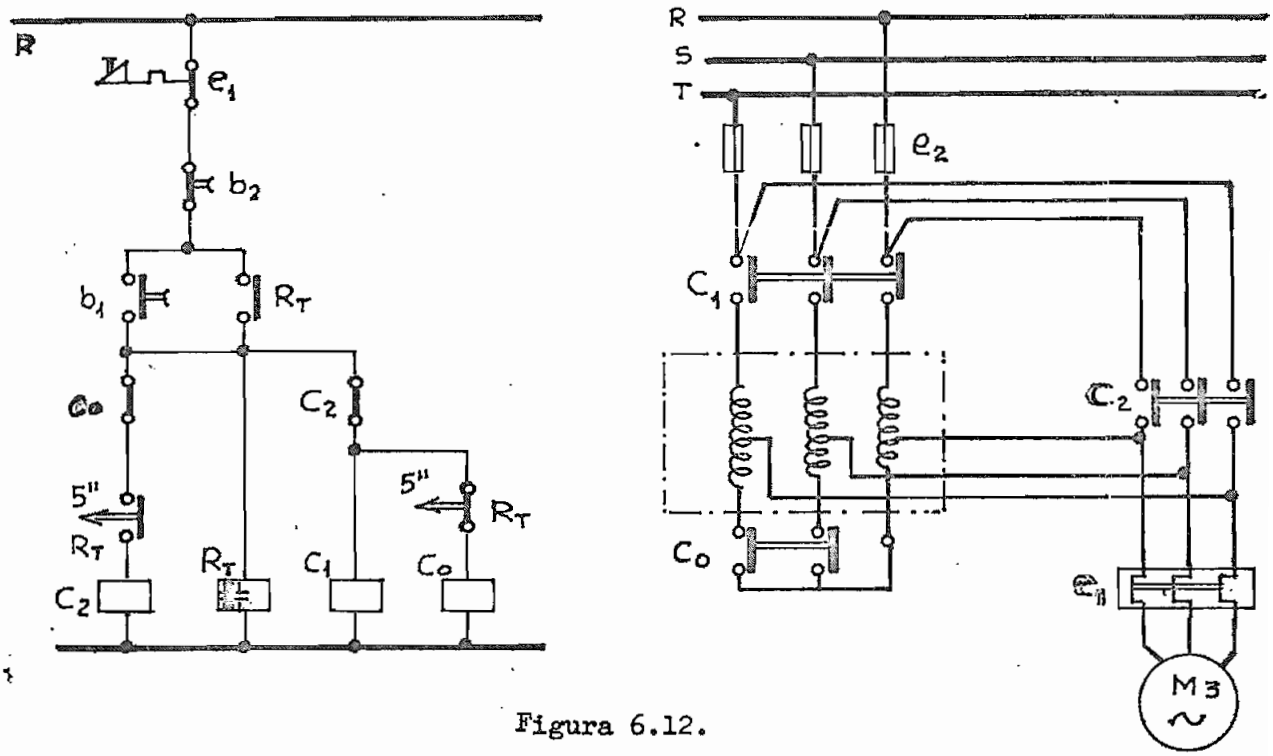


Figura 6.12.

Presionando b_1, se excitan el relé R_T (igual que en el caso anterior), el contactor C_1 y el contactor C_o. Mediante el contacto instantáneo de R_T, estos tres elementos quedan autoalimentados. Los contactos de trabajo de C_1 conectan el autotransformador a la línea y el C_o realiza la conexión en estrella del autotransformador. El motor entonces recibe la tensión reducida con la cual arranca. Pasados 5 seg.

el contacto R_T (N.C) desexcita el contactor C_o, instante en el cual - el autotransformador actúa como una reactancia. Este estado de funcionamiento dura fracciones de segundo hasta que el contactor auxiliar - C_o (N.C) se repone energizando el contactor C_2 el cual conecta el motor directamente a la tensión total de la línea. Al mismo tiempo, su contacto auxiliar C_2 (N.C) desconecta al contactor C_1, el cual saca - al autotransformador de servicio. Este circuito, a más de tener bloqueo eléctrico, tiene bloqueo mecánico para evitar que cuando esté operando C_1, el contactor C_2 no opere. Presionando el pulsante b_2 el - sistema se apaga y vuelve a sus condiciones iniciales.

6.2.3.4. Arranque con limitación de corriente estrella-triángulo.

Cuando un motor trifásico está proyectado para funcionar normalmente en conexión triángulo y cuando las conexiones externas del motor lo permiten, se puede arrancar utilizando el método estrella triángulo. La corriente de arranque disminuye a la tercera parte del valor de la corriente de arranque a tensión total, puesto que el voltaje que recibe cada fase del motor conectado en estrella es $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$ siendo V_L, el voltaje de alimentación entre fases que es igual al voltaje nominal del motor conectado en triángulo. Ver la fig. 6.13.

Este método de arranque es el más adecuado para cuando se desea limitar la corriente sin que el torque de arranque sea importante considerar, pero cuando los motores deben arrancar con carga, puede resul-

tar que el torque de arranque no sea suficiente, debido a la reducción de corriente obtenida en el arranque.

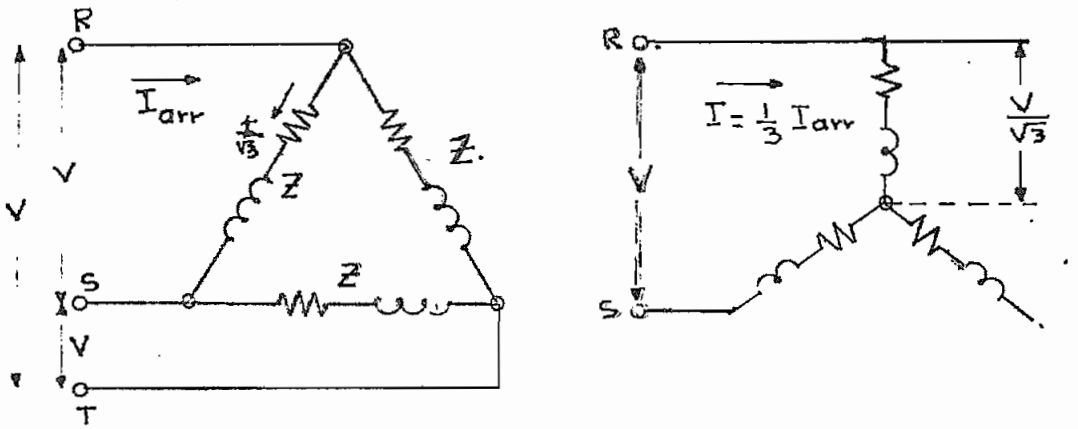


Figura 6.13.

Debido a esto, los arranques Y - Δ se utilizan para motores --- grandes que arrancan con fracciones de la carga nominal, tal es el caso de compresores, unidades de aire acondicionado, ventiladores, unidades motor-generador de c.c., etc. En este método de arranque, al igual que con los autotransformadores, al momento de realizar el cambio de conexiones, el motor queda fracciones de segundo desconectado del sistema, lo que origina estados transitorios que deberán ser tomados en cuenta si éstos tienen magnitudes que pueden dañar las bobinas del motor. La forma y magnitud de estas corrientes transitorias se determinarán experimentalmente. (Apéndice Nº 3).

Hay dos sistemas de arranque estrella triángulo:

a.- Con transición a circuito abierto y

b.- Con transición a circuito cerrado.

El arranque estrella-triángulo con transición a circuito abierto se puede hacer en forma manual o automática. Cuando los motores son pequeños y económicamente no se justifica un arranque automático, se utilizan los arrancadores estrella-triángulo manuales. Estos son conmutadores de cuchillos o de tambor, acondicionados de tal manera que con dos movimientos se pueden realizar las conexiones estrella-triángulo,

La fig. 61.4 representa un arranque manual de cuhcillas y la fig. 6.15 un arranque manuela de tambor.

En ambos sistemas, al momento de cambio de conexiones , el motor queda en circuito abierto que produce transitorios, que debido a la pequeña potencia de los motores asociados a estos arranques, no se los toma en cuenta.

Cuando los motores son de potencia mayores a 50 H.P, todos los arranques estrella-triángulo son automáticos. La figura 6.16 muestra un - arranque automático con transición a circuito abierto.

Las funciones binarias que determinan el funcionamineto de este circuito de control son:

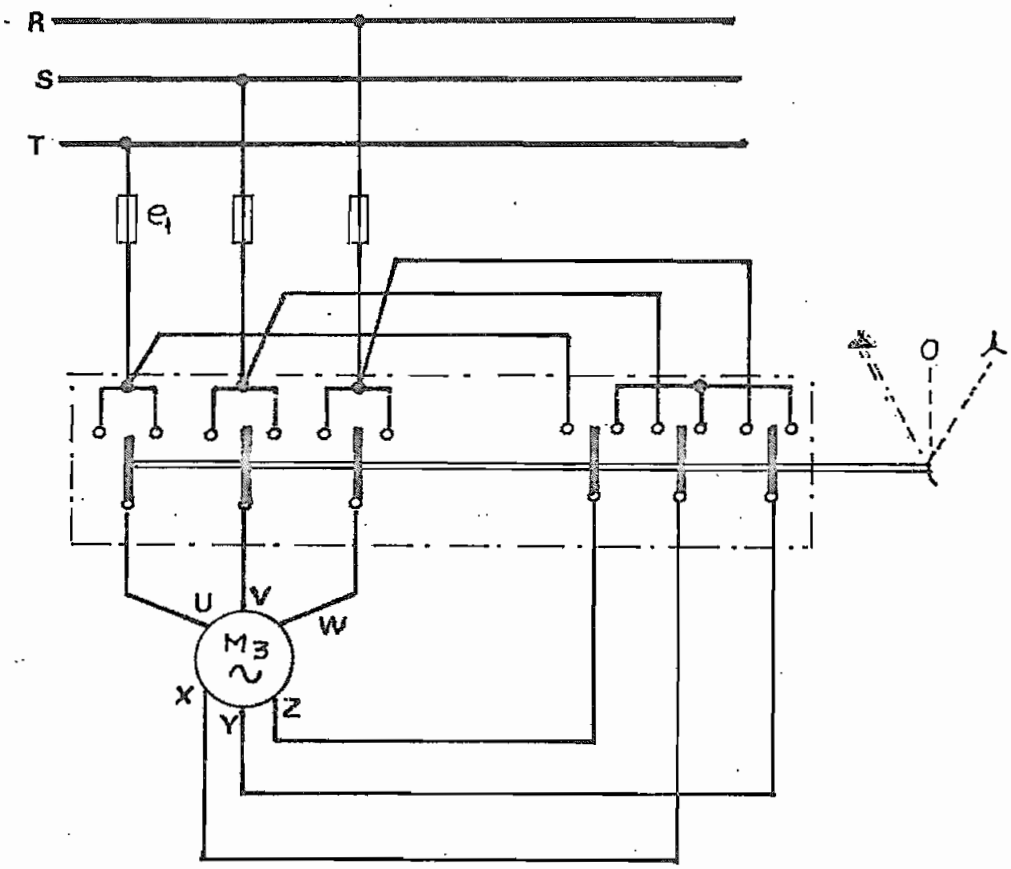
1.-Contactor de línea. $C_1 = (b_1 + C_1)\, C_1' . b_2'$

2.- Contactor de estrella. $C_2 = C_1 . RT' . C_3'$

3.- Contactor de triángulo. $C_3 = (RT + C_3)\, C_1 . C_2'$

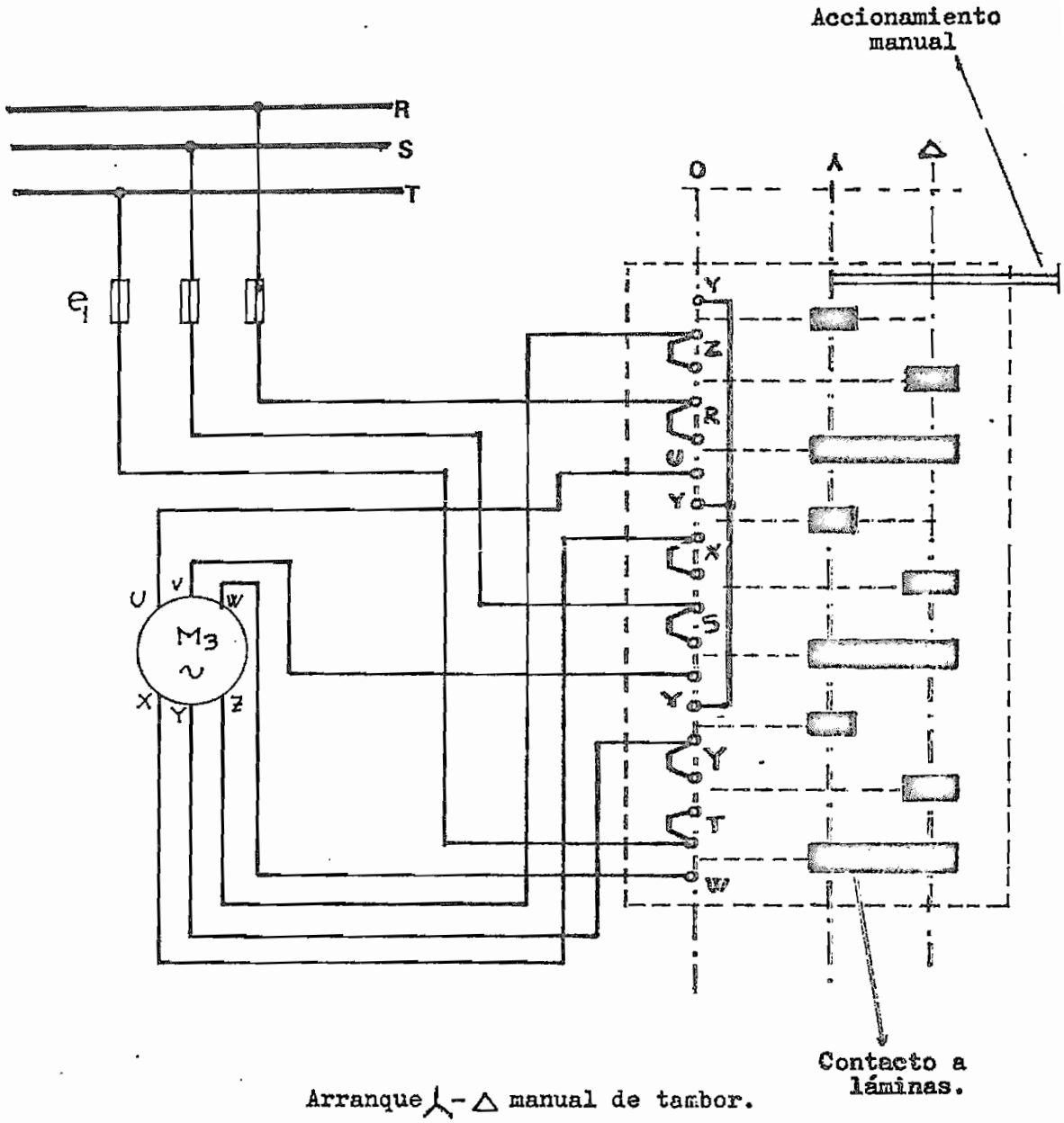
4.- Relé de tiempo. $RT = C_1 . C_3'$

El funcionamiento se interpreta de la siguiente manera:



Arranque manual de cuchilla. Y- Δ

Figura 6.14.



Arranque $\curlywedge$ - $\triangle$ manual de tambor.

Figura 6.15.

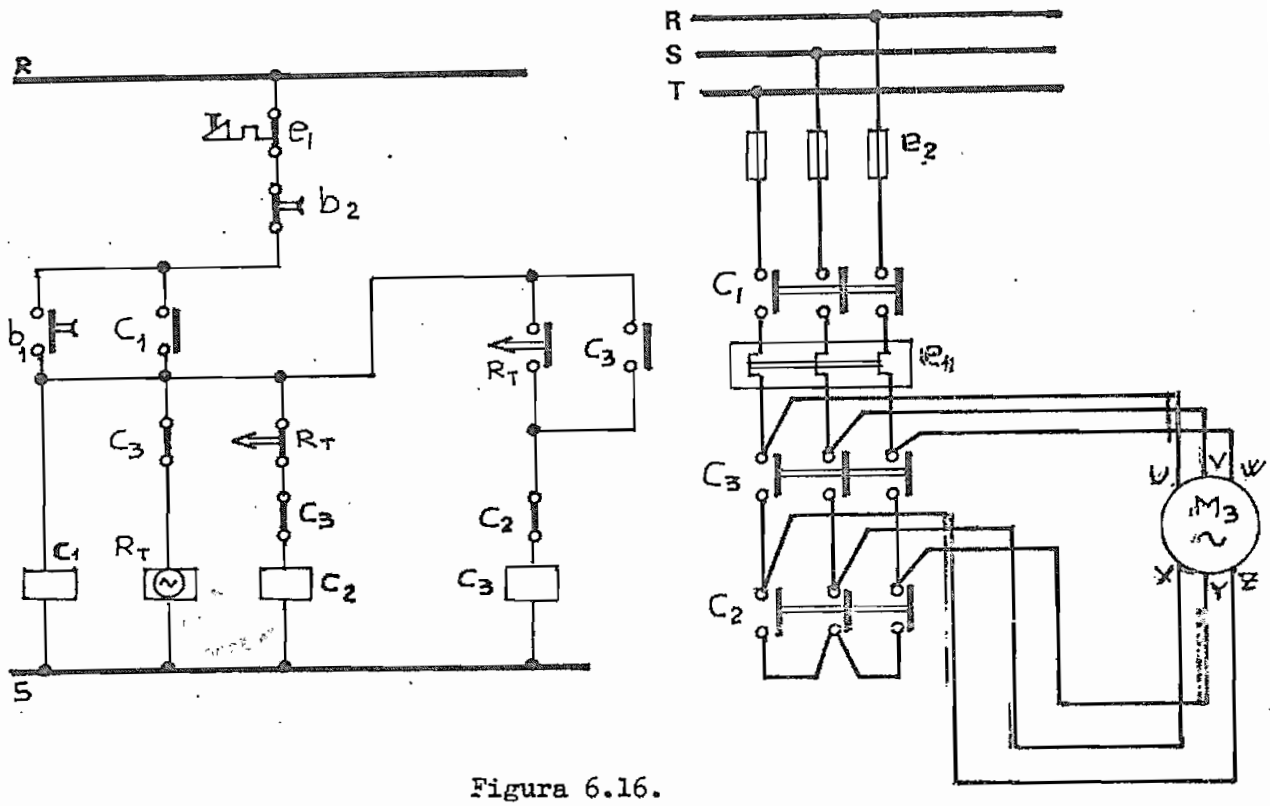


Figura 6.16.

Presionando el pulsante b_1, se energizan al mismo tiempo los contactores C_1 de la línea, C_2 que realiza la conexión estrella y el relé temporizado RT. Estos quedan autoalimentados a través del contacto auxiliar C_1 (N.A). El motor arranca en estrella, puesto que el contacto C_1 conecta los terminales U, V y W a la línea, mientras que C_2 conecta los terminales X, Y z en un sólo punto. Pasado un tiempo determinado, el relé RT abre su contacto NC y desconecta el contactor C_2 de la conexión. El contacto RT (N.A)energiza al contactor C_3 el cual se queda autoalimentado a través de su contacto auxiliar N.A. Hay un instante de tiempo (que es el que justamente se demora en cerrar los contactos C_3) que el motor no recibe tensión, bajando la corriente a

cero, pero al rato en que se realiza la conmutación, la corriente se-reestablece después de haber sufrido un estado transitorio. (Ver fotografías del apéndice Nº 3). Al cerrar el contactor C_3, reciben tensión de la línea las tres bobinas, quedando el motor conectado en triángulo. Presionando b_2, el sistema vuelve al estado de reposo.

El arranque estrella-triángulo con transición a circuito cerrado, no permite que el motor en el instante de conmutación se desconecte eliminándose los efectos causados por el estado transitorio que se producía en el circuito anterior. Esto se consigue intercalando resistencias a los terminales de las bobinas del motor que van a ponerse en - triángulo.

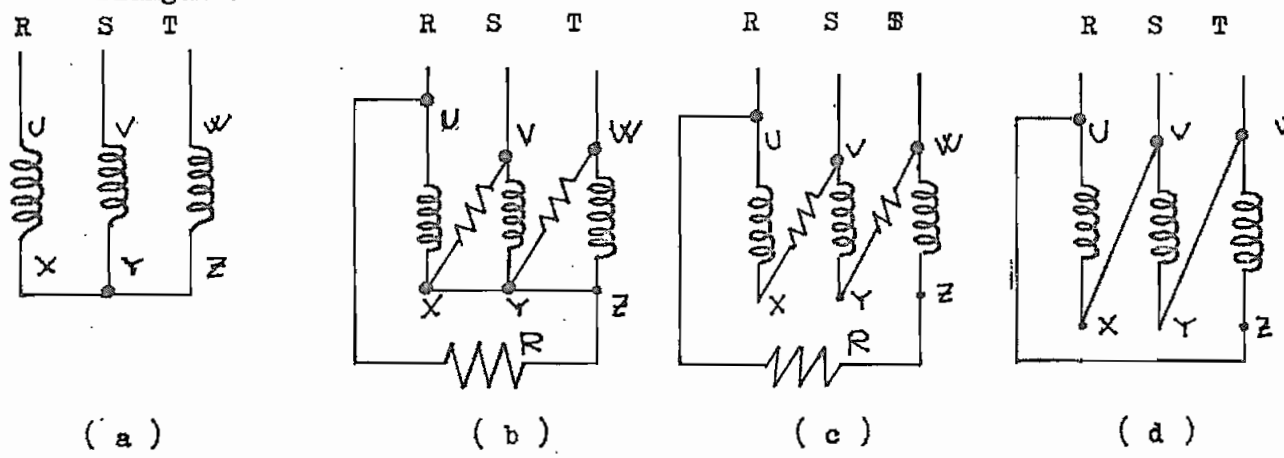


Figura 6.17.

En la figura 6.17 se puede ver la secuencia de conexiones que se realizan durante el arranque usando un arranque con transición a circuito cerrado como el de la figura 6.18. El arranque se realiza de la siguiente manera:

1.- Presionando el pulsante b_1, se energiza primero el contactor C_2 (que hace la conexión estrella). Este se autoalimenta y - acto seguido se energiza el contactor de líneas C_1 y el relé RT, que también se autoalimenta con su contacto auxiliar --- C_1 (N.A) puesto en paralelo con el contacto auxiliar C_2(NA). En este instante se cumple el circuito de la figura 6.17 (a) El relé RT al energizarse junto con C_2, también se autoali-- menta con su unidad de cierre espontáneo RT(N.A). Esto se ha ce para evitar que el relé RT se desenergice cuando el contac tor C_2 sea desactivado.

2.- Pasados 5 seg. el contactor retardado RT(N.A), cierra sus -- contactos y energiza el contactor C_3, el cual se encarga de- conectar las resistencias de transición. En este circuito,se cumple el circuito de la figura 6.17 (b) que casi en forma - instantánea se modifica el de la figura 6.17 (c), puesto que el contacto auxiliar C_3(N.C) desenergiza el contacto C_2 que efectuaba la conexión estrella.

3.- El contacto auxiliar C_3(N.C) opera al mismo tiempo que C_3(NA) pero el contactor C_4 (que hace el cambio de conexión a trián gulo) no se activa, puesto que estaba bloqueado por el contac to C_2 (N.C). Cuando este contacto C_2 (N.C) se repone, el con tactor C_4 conecta el motor en triángulo e instantes después, el contacto auxiliar C_4(N.C) desconecta el relé de tiempo -

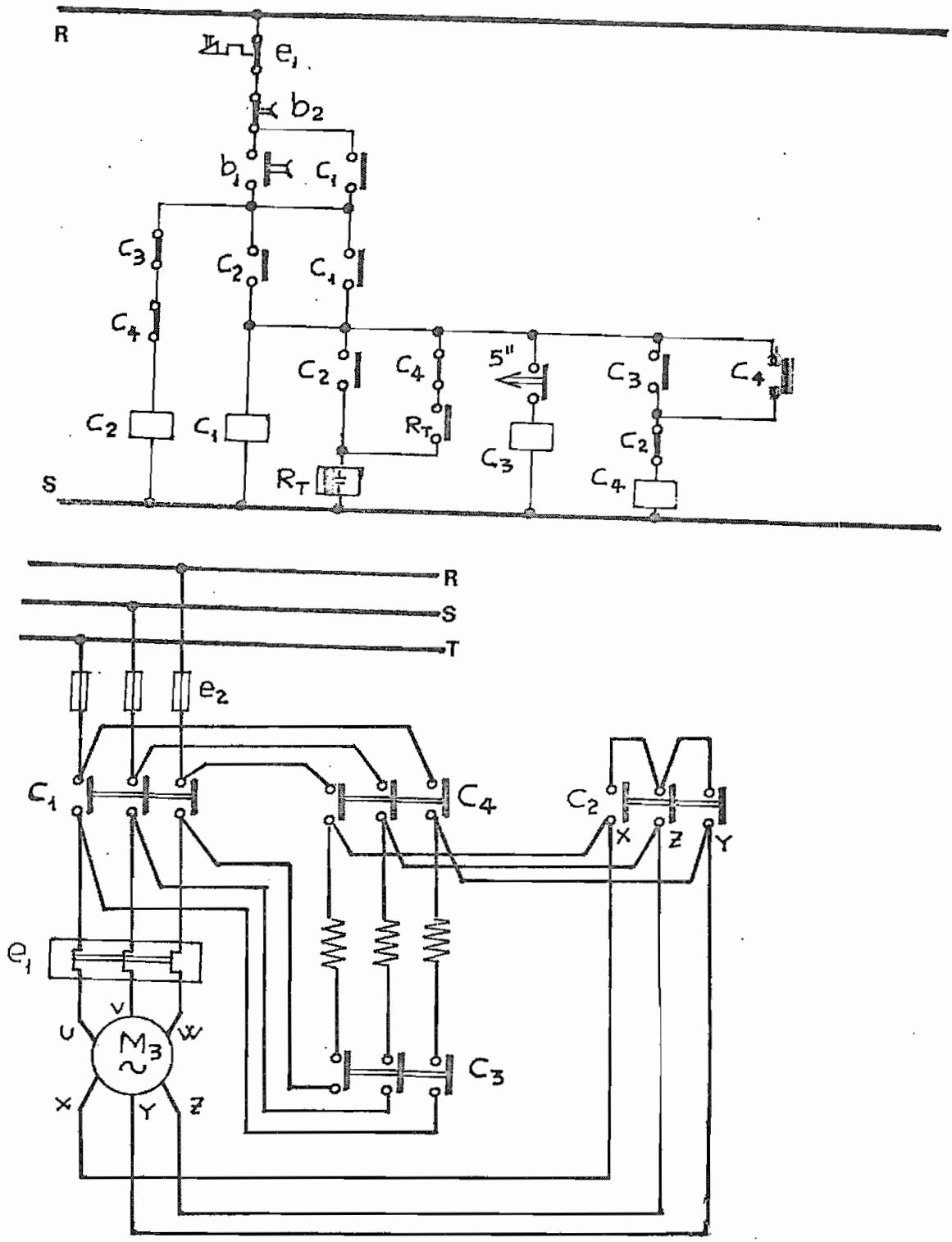


Figura 6.18.

Arranque estrella-triángulo automático con transición a circuito cerrado.

RT el cual hace reponer su contacto RT (N.A) que desconecta el contactor C_3 que mantenía conectado las resistencias en el tiempo de conmutación. Este proceso de conmutación no dura sino $\simeq$ 0.2 seg. (Ver apéndice Nº 3). El diagrama está provisto de protección contra sobrecargas meidante el relé térmico e_1. Debe notarse que este relé está intercalado en cada fase del motor y no en la línea de alimentación; por esta razón, este relé deberá calibrarse con $\frac{I_N}{3}$ y no con la I_N (corriente nominal) como ocurre en el arranque estrella-triángulo de la figura 6.16. También deberá tenerse en cuenta, para las especificaciones de los equipos, que en los contactores C_1 y C_4, sus contactos de trabajo llevan sólo $\frac{I_N}{3}$, lo que hace que éstos sean de una capacidad menor a la de especificación del motor. El tamaño o capacidad del contactor C_2 (conexión en estrella) puede ser más pequeño que el C_1.

6.3 Arranque de motores de rotor devanado.

Los circuitos de mando para el arranque de motores de rotor devanado son semejantes a los utilizados por el arranque de motores a jaula de ardilla con pasos de resistencia. Estos pasos de resistencia se van eliminando gradualmante, ya sea utilizando relés de tiempo o con relés de frecuencia.

6.3.1. Arranque de un motor de rotor devanado con relés de tiempo.

Los pasos de resistencia se pueden ir cortocircuitando al mismo tiempo para las tres fases utilizando contactores trifásicos. Pero también se puede utilizar contactores monofásicos e ir cortocircuitando cada resistencia independientemente, con lo cual se consigue más pasos de aceleración, aunque el circuito del rotor queda desequilibrado durante el tiempo de arranque.

A continuación se dará el circuito de mando de un arrancador automático con relés de tiempo para un motor de rotor devanado utilizando dos pasos de resistencia. Figura 6.19.

Las ecuaciones binarias que indican el funcionamiento de este circuito de control son:

$$\left.\begin{aligned} &1.\text{- Contactor principal: } C_1=(b_1+C_1)\, e_1' \cdot b_2' \\ &2.\text{- Contactor de arranque: } X=(RT_1+X)Y' . e_1' b_2' \\ &3.\text{- Contactor de arranque: } Y=(RT_2+Y) e_1' . b_2' \end{aligned}\right\} \quad (6.21)$$

$$\left.\begin{aligned} &4.\text{- Relé de tiempo: } RT_1 = C_1 . X' \\ &5.\text{- Relé de tiempo: } RT_2 = X \end{aligned}\right\} \quad (6.22)$$

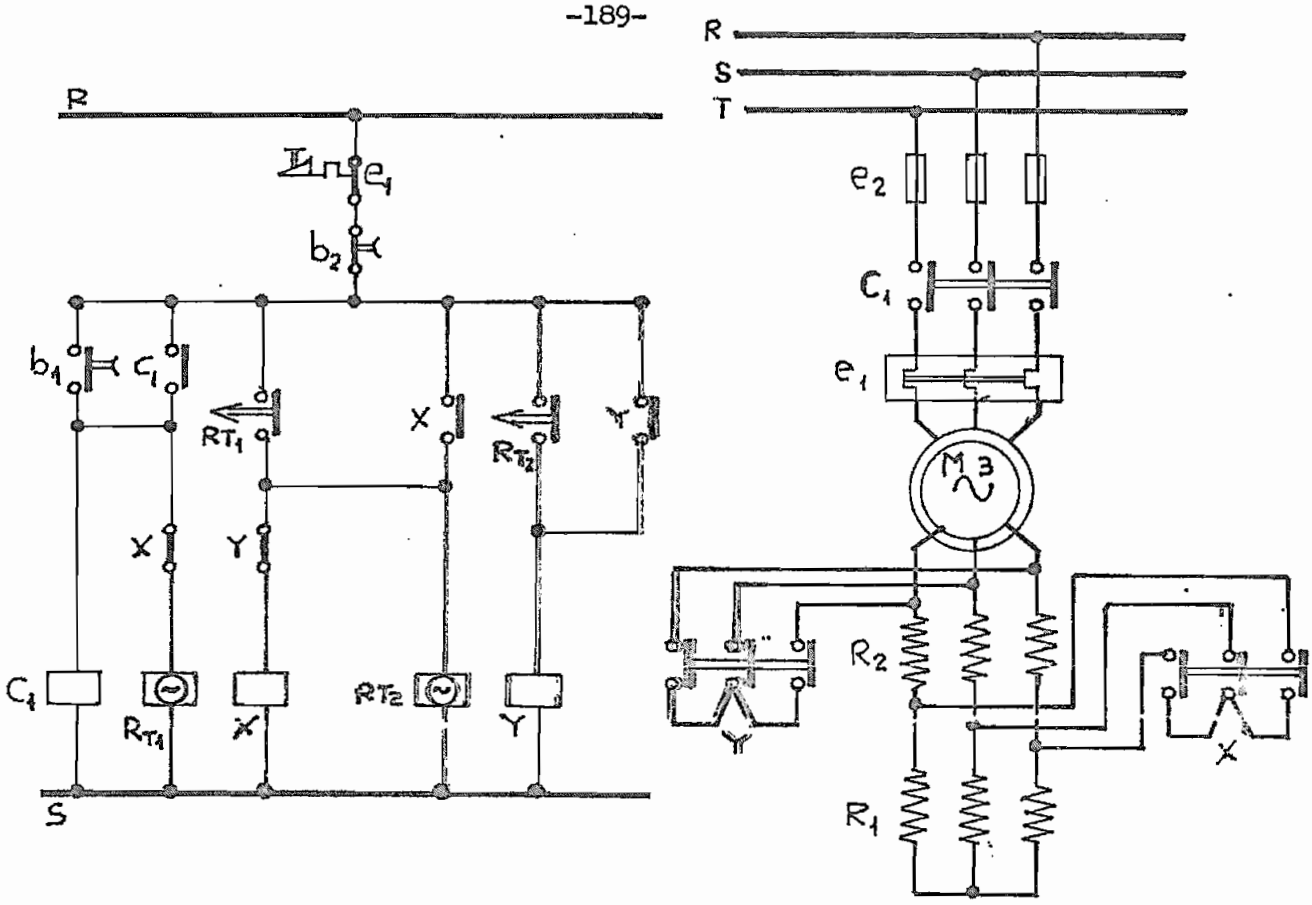


Figura 6.19.

El motor arranca cuando presionamos el pulsante b_1. Las resistencias intercaladas en el rotor son cortocircuitadas por los contactores X e Y que se excitan a través de los relés de tiempo RT_1 y RT_2 -- respectivamente. El motor se apaga con el pulsante b_2 o cuando opera el relé térmico de sobrecarga e_1.

6.3.2. Arranque de un motor de rotor devanado con relés de frecuencia.

Otra forma de arrancar el motor es utilizando relés de frecuencia en vez de relés de tiempo. Esto es posible ya que los voltajes y frecuencias inducidos en el rotor de una máquina de inducción son función del deslizamiento. El máximo valor de frecuencia y voltaje ocurre

para deslizamiento S = 1 que es cuando el rotor está en reposo, mientras que para deslizamiento S=0, el voltaje y frecuencias inducidos son cero. La señal para hacer funcionar el juego de relés de frecuencia se saca de los anillos del rotor.

Los relés de frecuencia consistem en un relé electromecánico sensible acoplado a un circuito resonante R-L-C que pueden calibrarse para operar a una determinada frecuencia.

El diagrama de la figura 6.20 indica el mando y el circuito de trabajo de este tipo de arranque.

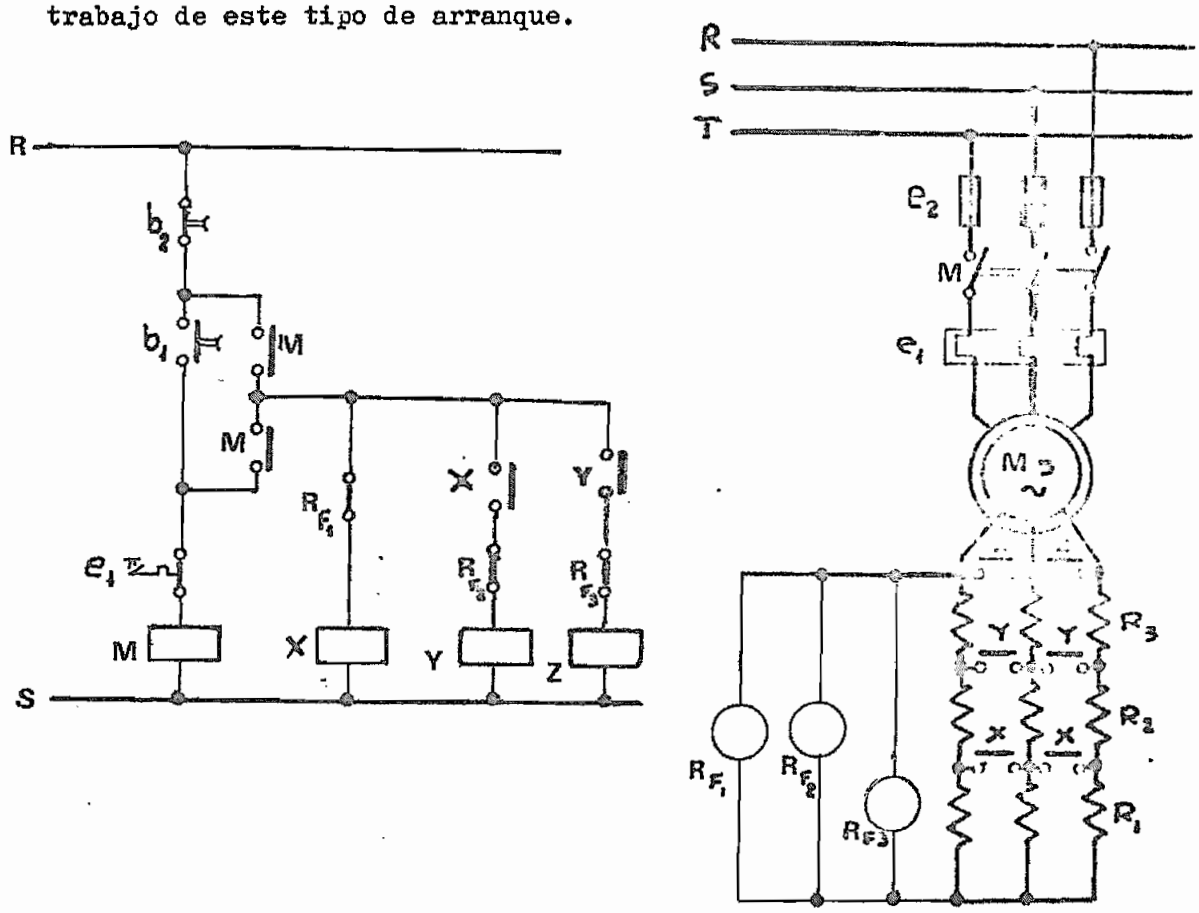


Figura 6.20.

RF_1 relé de frecuencia para desexcitarse a 44 H Z.

RF_2 " " " " " " 20 H Z.

RF_3 " " " " " " 9 H Z.

Estas frecuencias de 44, 20 y 9 H Z corresponden a las velocidades de 480, 1200 y 1530 RPM. para un motor de cuatro polos. La característica de operación de estos relés, es como lo indica la figura -- 6.21

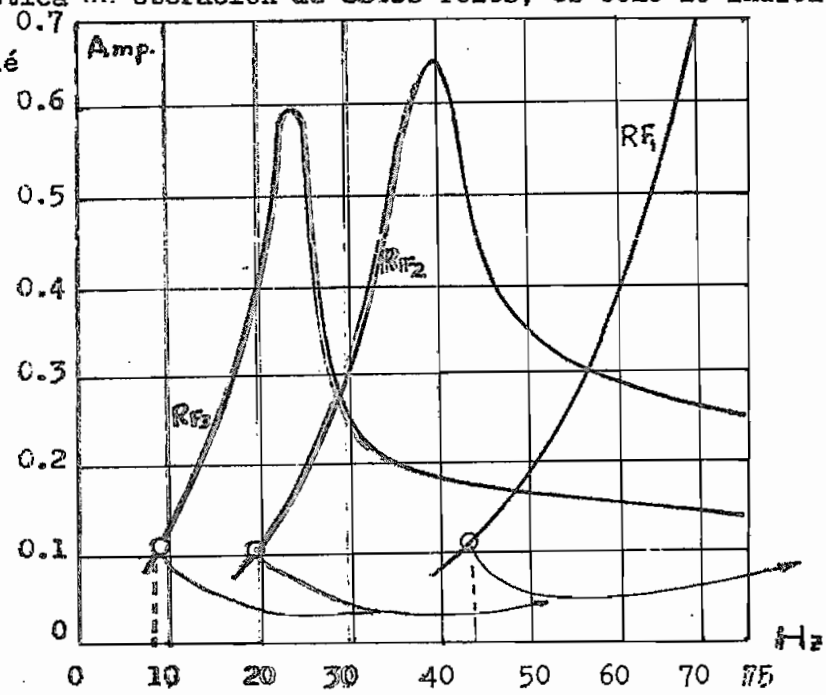


Figura 6.21.

El funcionamiento es de la siguiente forma: cuando arrancamos el motor con b_1, el conductor M queda autoalimentado. La frecuencia del rotor es 60 EZ, entonces con esa frecuencia, todos los relés de frecuencia operan abriendo sus contactos (NC) RF_1, RF_2 y RF_3. El motor comienza a girar con toda la resistencia intercallada. Cuando el motor llega a 480 RPM (45 HZ) RF_1 se desexcita, haciendo operar el contactor X que cortocircuita el primer paso de resistencia. Los otros re--

lés operan de igual forma.

6.4. Control de velocidad y frenado de los motores de inducción.

A diferencia de los motores de corriente continua, la máquina de inducción es en esencia de velocidad constante. Los métodos de control de velocidad son complicados, puesto que dependen de parámetros que - prácticamente son constantes de la máquina y del sistema de alimentación. La velocidad del campo giratorio depende de:

$$N_S = \frac{120.f}{P} \qquad (6.23)$$

N_S velocidad sincrónica RPM.

f frecuencia de la red.Hz.

P número de polos de la máquina.

Para el caso de motores con rotor devanado, la velocidad también depende del valor de la resistencia intercalada en el rotor.

De esto se deduce, que los métodos de control de velocidad de los motores de inducción:

a.- Por alimentación con frecuencia variable.

b.- Por cambio del número de polos, y

c.- Con resistencia variable en el rotor.

A continuación se hará referencia al control de velocidad por el cambio de número de polos que es en donde tiene aplicación el empleo de contactores.

6.4.1. Control de velocidad por cambio del número de polos.

Este sistema es aplicable cuando no se necesita tener una variación de velocidad continua sino en casos en donde dos o tres escalones de velocidad son suficientes. Dos son los métodos seguidos para conseguir el cambio del número de polos en un motor de inducción:

1.- Por construcción de un devanado doble.

2.- Por el cambio de conexiones de las bobinas de un único devanado.

6.4.1.1. Motores de doble bobinado de dos velocidades.

Estos motores vienen construidos con dos bobinados independientes ocupando las mismas ranuras que son más profundas que las de un motor normal. Estos motores se encuentran normalizados y vienen construidos de 4 y 6, 6 y 8, y 6 y 10 polos. Estos motores además de ser más caros que las máquinas normales, tienen algunas desventajas que son: bajo rendimiento debido a la gran concentración de conductores en el estator, el factor de potencia disminuye debido a que las ranuras son más profundas, lo que tiende a aumentar el flujo de dispersión.

Las salidas de este motor permiten diseñar un circuito de control para el arranque y control de velocidad. La figura 6.22 indica el control de velocidad para este tipo de motor que arranca con la tensión total.

Este circuito permite que el motor arranque con cualquiera de -

las dos velocidades, pero provee enclavamiento entre las dos contactores H y L que controlan el motor. La velocidad se puede cambiar sólo después de presionar el pulsante de parada b'_3. Además, cada devanado, tiene su protección térmica independiente.

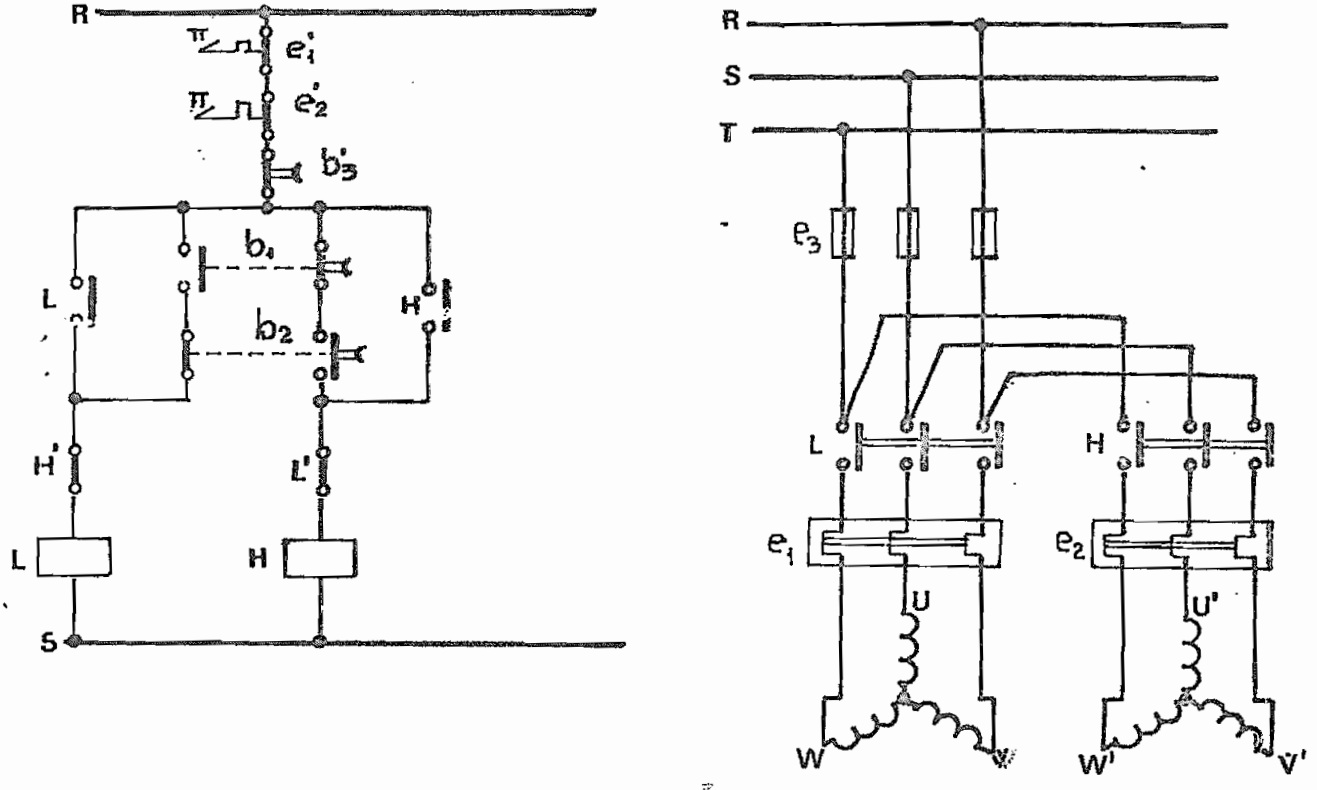


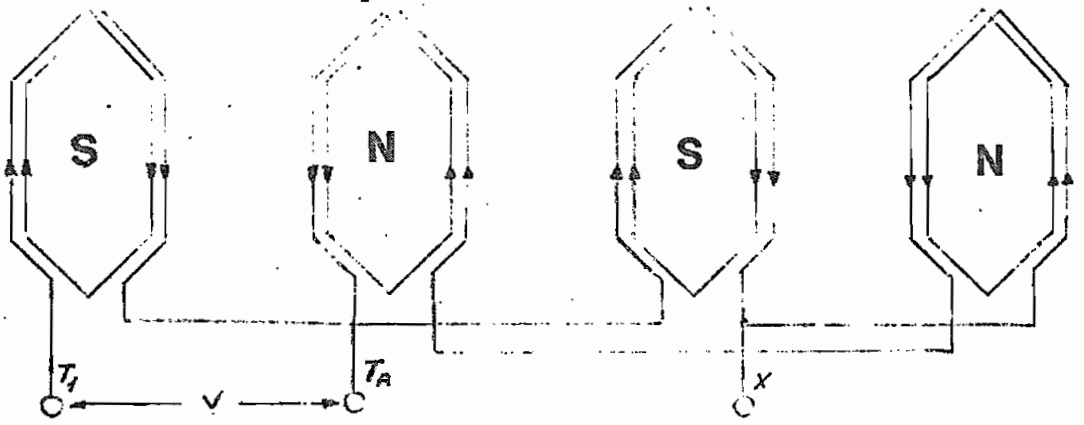
Figura 6.22.

6.4.1.2. Motor de doble velocidad y bobinado único.

Este tipo de motor trae diseñado su devanado de tal forma que permite la conexión externa de las bobinas haciendo posible cambiar el número de polos de dos a cuatro, de cuatro a ocho polos, etc.

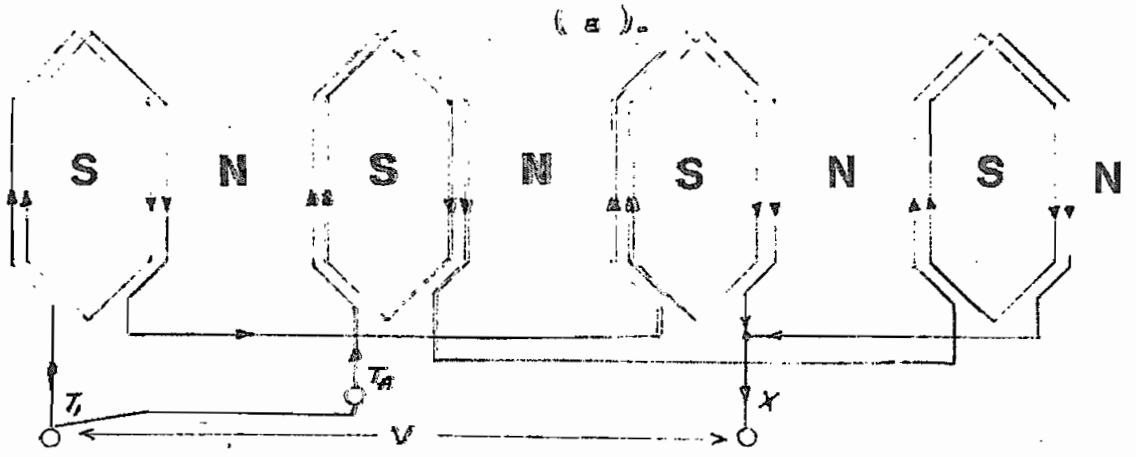
La figura 6.23 ilustra brevemente el principio en el que se basa el cambio de polaridad del devanado en una fase, pasando de 4 polos -

convencionales a 6 polos consecuentes.



Bobinado de una fase que forma 4 polos convencionales.

(a).



Cambiando la entrada de alimentación se obtiene 8 polos conse---

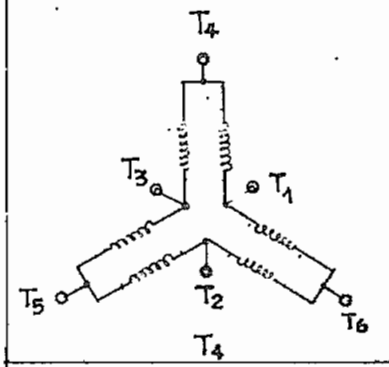
cuentes. (b)

Figura 6.23.

Conectando las tres fases entre ellas, se obtienen algunas varia

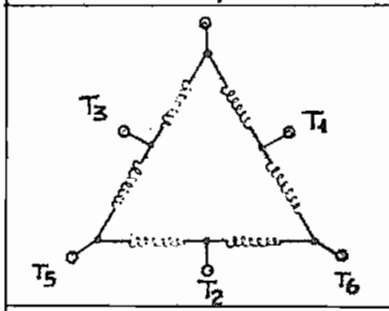
ciones en la forma de conectar el circuito. La figura 6.24 indica las

posibles conexiones:



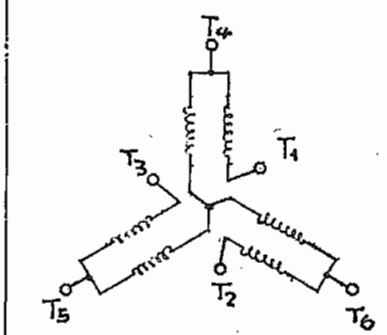
(a). Conexiones para torque constante.

Velocidad	Línea	Unir	Conexión
Baja	T1-T2-T3	--------	Δ en serie.
Alta	T4-T5-T6	T1-T2-T3	Y en paralelo.



(b) Conexiones para potencia constante.

Velocidad	Línea	Unir	Conexión
Baja	T1-T2-T3	T4-T5-T6	Y en paralelo.
Alta	T4-T5-T6	- - - -	Δ en serie.



(c) Conexiones para torque variable.

Velocidad	Línea	Unir	Conexión
Baja	T1-T2-T3	- - - -	Y en serie.
Alta	T4-T5-T6	T1-T2-T3	Y en paralelo.

Figura 6.24.

El circuito de mando para control de velocidad de la conexión - (b) para potencia constante, es como indica la figura 6.25.

En este circuito:

b_1 pulsante para velociad alta.

b_2 pulsante para velocidad baja.

b_3 pulsante de parada.

L contactor de velocidad baja.

M contactor para unir los terminales T4-T5-T6.

H contactor de velocidad alta.

Cada circuito para la velocidad alta o baja tiene su protección térmica, e_1 y e_2 respectivamente y además existe protección general contra cortocircuitos usando fusibles.

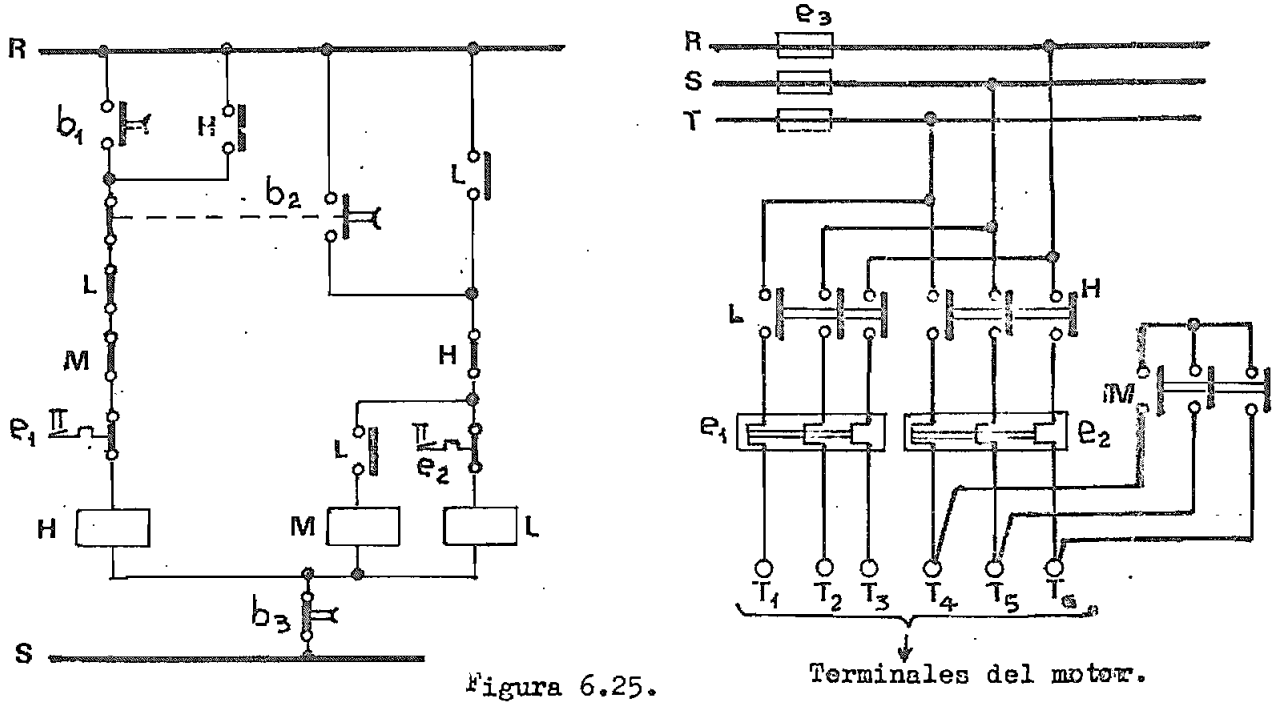


Figura 6.25.

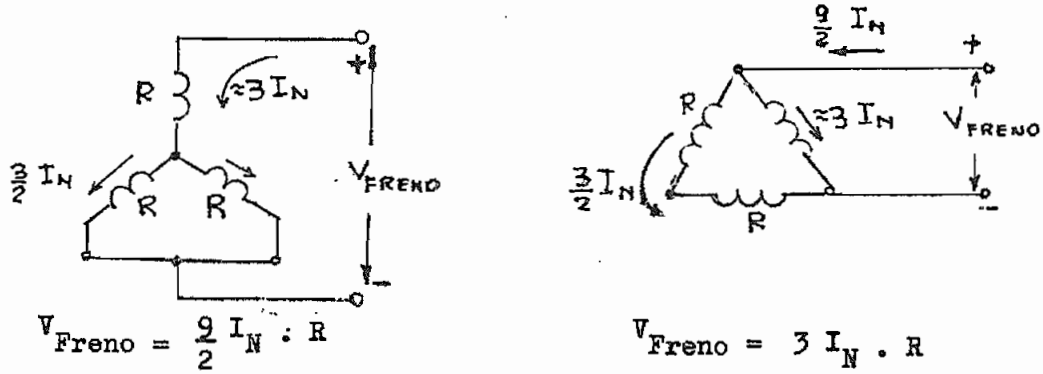
Las ecuaciones binarias que servirían para diseñar el circuito lógico estático son:

$$\begin{cases} H = (b_1+H)\ b_2'.L'.M'e_1'.b_3' \\ L = (b_2+L)\ H'.e_2'.b_3' \\ M = L\ .\ b_3' \end{cases} \qquad (6.24)$$

6.4.2. Inversión de giro y frenado de las máquinas de inducción.

Sea cual fuere el tipo de motor de inducción, la inversión de giro se realiza cambiando 2 fases de alimentación con lo cual se invierte la secuencia del campo magnético giratorio.

Los motores a jaula de ardilla se pueden frenar rápidamente si en el momento de desconectarse la energía trifásica de la red, se sustituye por una fuente de corriente continua que se aplica durante el período de frenado a una de las fases del motor. Esta corriente continua crea polos magnéticos estacionarios y como el rotor está girando, sus conductores que están en cortocircuito cortan líneas de campo, originándose una corriente eléctrica cuyo campo magnético se opone al que lo genera. Por tanto, la energía cinética del motor se transforma en calor. Para obtener frenados rápidos (2 a 3 seg.) se aplica una corriente continua de 3 a 4 veces la corriente nominal. Las formas de conectar los devanados en el momento de frenado, es como indica la figura 6.26.



$V_{Freno} = \frac{9}{2} I_N \cdot R$ $\qquad$ $V_{Freno} = 3\, I_N \cdot R$

Figura 6.26.

El frenado dinámico va generalmente acompañado don frenos de zapata para mantener bloqueado al rotor cuando el motor no está en funcionamiento.

El circuito de la figura 6.27 es el mando de un inversor de giro, con frenado dinámico antes de realizar la inversión.

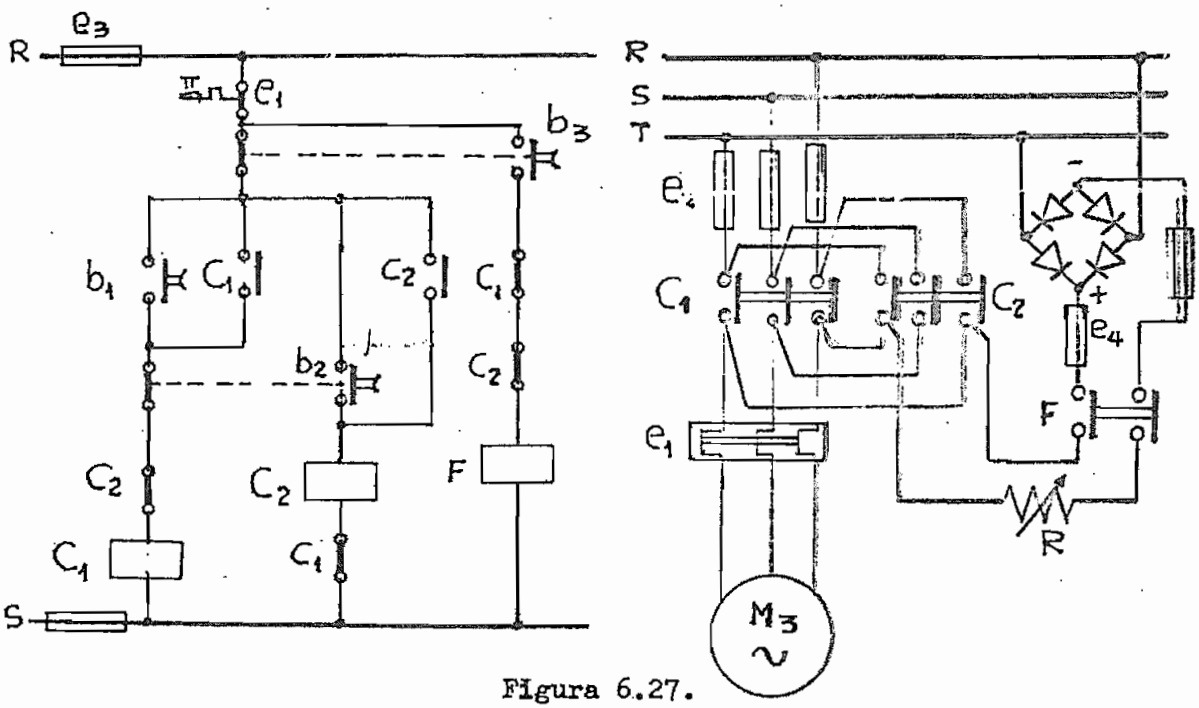


Figura 6.27.

Para proveer de corriente continua al circuito de frenado, se utiliza un sistema de rectificación y un contactor adicional F, el cual debe tener sus contactos acondicionados para c.c. La corriente de freno se regula con la resistencia R.

C O N C L U S I O N E S.

Es indudable que la parte teórica es amplia; desgraciadamente el Laboratorio de Control Industrial no está dotado de los suficientes equipos que permitan una enseñanza práctica al alumnado; por lo tanto, se recomienda ampliar el equipo de laboratorio de modo que de oportunidad a los alumnos para que adquieran un solvente conocimiento tanto teórico momo práctico.

Se demuestra que un problema de control puede ser solucionado técnicamente con sólo recibir las condiciones del problema, a través de las funciones lógicas y de las funciones binarias. La mayor parte de los controles automáticos de la industria nacional, están hechos a base de contactoses y relés, siendo esto una razón para que las personas relacionadas con esta actividad tengan una idea clara de este problema.

Como dentro de poco se incrementarán los sistemas de control con elementos lógicos, es de vital importancia que las personas que vayan a desempeñar funciones en este campo estén preparadas para ello.

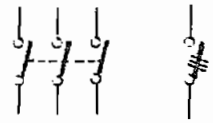
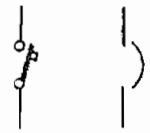
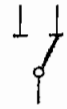
En el presente trabajo hay puntos que pueden ser desarrollados con mayor profundidad, sirviendo como trabajos de investigación, tal es el caso de mejoras en el diseño de relés o contactores, estudios de cambio de control de contactores por elementos estáticos, diseños de circuitos de arranque para máquinas, tableros de control,etc.

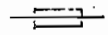
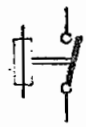
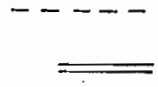
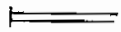
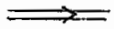
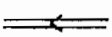
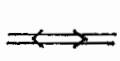
A P E N D I C E Nº 1

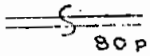
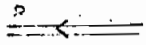
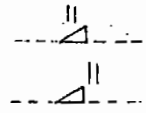
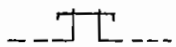
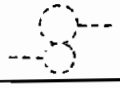
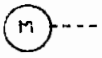
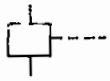
SIMBOLOGIA:

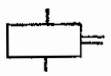
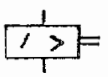
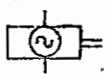
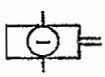
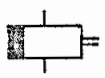
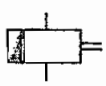
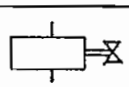
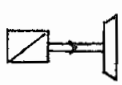
La simbología utilizada en la presente tesis, se basa en su mayoría en las normas internacionales IEC, puesto que el INEN trata en lo posible de acogerse a estas normas, en lo que a símbolos eléctricos - se refiere. Para mayor referencia consúltese en el Pryecto A4 de Norma Ecuatoriana que trata de: SIMBOLOS GRAFICOS PARA ESQUEMAS ELECTRICOS. CONTACTOS, INTERRUPTORES, MANDOS MECANICOS, ARRANCADORES Y ELEMENTOS DE RELES ELECTROMECANICOS.

Símbolo	Designación
	Contacto de cierre general
	Seccionador
	Contacto de cierre normalmente abierto (NA).
	Contacto de ruptura normalmente cerrado (NC).

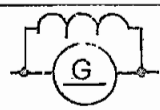
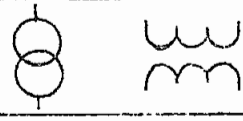
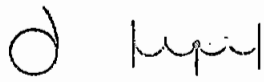
	Contacto de conmutación bidireccional, de corte antes del cierre.
	Contacto de conmutación bidireccional con posición neutral.
	Interruptor unipolar. Símbolo general.
	Interruptor tripolar. Representación multifilar.
	Contactor (normalmente abierto). Simplificado.
	Interruptor automático. (Breaker).
	Interruptor.
	Seccionador conmutador bidireccional (con interrupción del circuito).
	Seccionador conmutador bidireccional (con interrupción del circuito.
	Interruptor-seccionador (para funcionamiento en carga).
	Interruptor automático-seccionador (para funcionamiento automático en carga)

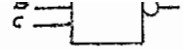
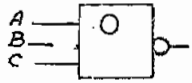
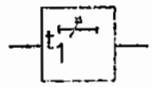
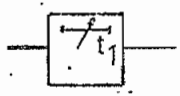
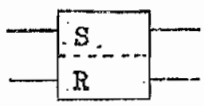
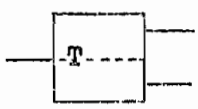
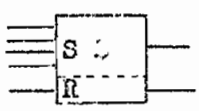
Fusibles.	Designación
	Fusible, cortacircuito fusible
	Lado del fusible que permanece con tensión después de fundirse.
	Cortacircuito con contacto de alarma
	Interruptor seccionador con fusible incorporado
	Seccionador con fusible incorporado.
Mandos mecánicos	**Designación**
	Acoplamiento mecánico. Símbolo general Para distancias pequeñas
	Sentido de la fuerza Hacia la derecha Hacia la izquierda En los dos sentidos
	Movimiento de rotación En el sentido de las manecillas del reloj En el sentido opuesto de las manecillas En los dos sentidos.
	Operación manual
	Operación de pie
	Operación de palanca
	Movimiento a la derecha
	Movimiento a la izquierda
	Movimiento en ambas posiciones

	Movimiento en forma periódica
	Movimiento con retardo de tiempo 8 seg.
	Dispositivo de enganche unidireccional En posición de enganche. Libre
	Dispositivo de enganche bidireccional En posición de enganche Libre
	Acoplamiento mecánico Embragado
	Engranaje
	Mando mediante leva
	Mando mediante motor eléctrico
	Mando neumático o hidráulico
	Mando electromagnético
Arrancadores	Designación
	Arrancador Símbolo general
	Arrancador para motor reversible
	Arrancador automático
	Arrancador estrella-triángulo

Elementos de Relés Electromecánicos. Designación	
	Organo de mando. Simbolo General
	Organo de mando con un devanado
	Organo de mando cuyo devanado tiene una resistencia de 200 ohmios
	Organo de mando con varios devanados
	Organo de mando de pasada lenta a la posición de trabajo
	Organo de mando de un relé de enclavamiento mecánico
	Organo de mando de un relé térmico
	Relé con regreso propio Símbolo general
	Relé con detección de sobrecorriente
	Relé con motor de C.A.
	Relé con motor de C.C.
	Relé con retardo de tiempo magnético
	Relé con retardo de tiempo térmico
	Relé con válvula electromagnética
	Relé de tiempo neumático
	Freno electromagnético

MAQUINAS ELECTRICAS.

Símbolo	Designación
	Devanado de campo.
	Escobilla sobre colector de delgas.
	Generador. Símbolo general.
	Motor. Símbolo general.
	Motor de corriente continua en general.
	Motor de corriente alterna en general.
	Motor de corriente continua tipo Serie.
	Motor de corriente continua tipo Shunt.
	Generador de corriente continua en conexión Shunt.
	Motor asincrónico trifásico con rotor en cortocircuito (con 6 term).
	Motor asincrónico trifásico con rotor devanado.(anillos).
	Motor asinc. trifásico, rotor en cortocircuito y estator conectado en △
	Transformador. Símbolo general.
	Autotransformador. General.

	produce cuando hay entrada A y B y C.
	Función lógica NOR. La salida O se produce cuando hay entrada A o B o C.
	Módulo de tiempo con retardo de t_1 a la excitación.
	Módulo de tiempo con retardo de t_1 a ladesexcitación.
	Elemento lógico de memoria. S puesta en memoria y R reposición.
	Elemento lógico de memoria. T terminal de disparo o gatillo
	Elemento de memoria con 4 terminales S juntados por un elemento "O"

APENDICE Nº2.

Tipos de conexión y desconexión de los contactores.

Para determinar los tiempos de conexión y desconexión y la corriente absorbida en el momento de cierre, se procedió experimentalmente, para lo cual se usó el siguiente equipo:

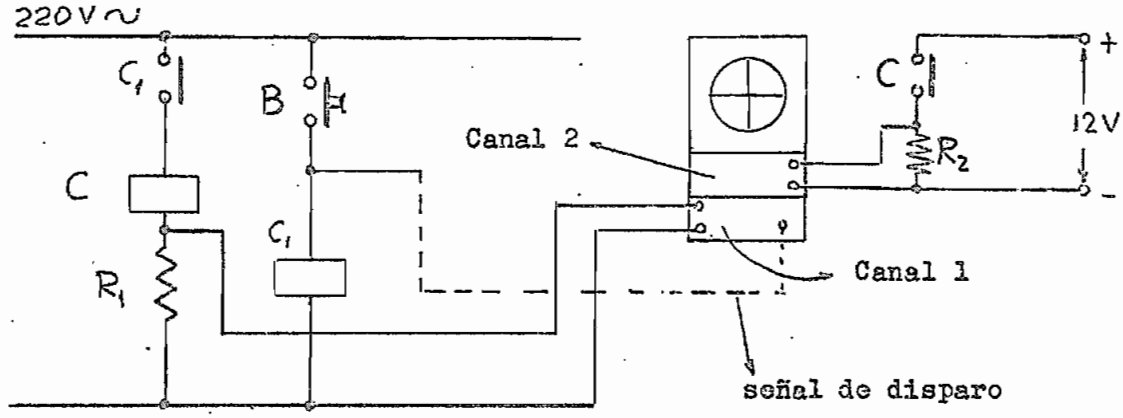
-Osciloscopio (con memoria y cámara fotográfica)

-Un contactor AEG LS 32/L 40.

-Un relé auxiliar.

a.- Tiempo y corriente de conexión.

Se armó el siguiente circuito.



C= Contactor bajo prueba.

C_1= relé auxiliar para retardar la señal de alimentación a C, con respecto a la señal de disparo de B al osciloscopio.

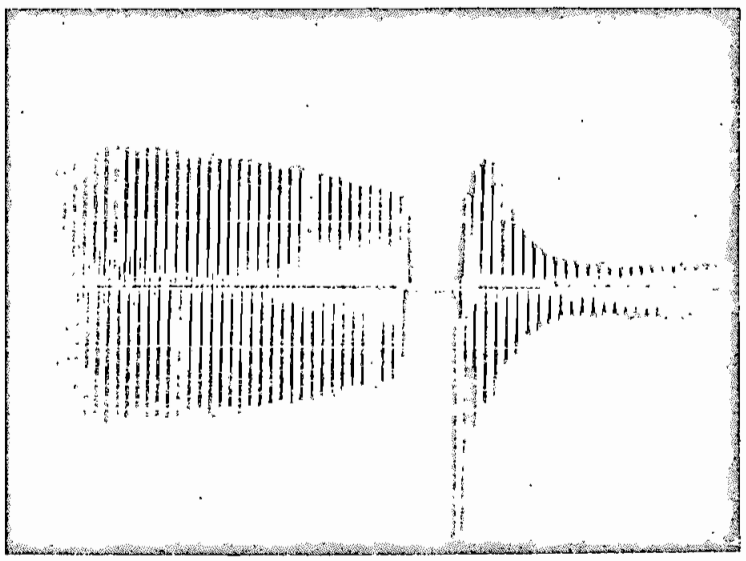
Al canal uno va la señal de corriente de conexión de la bobina C. Al canal dos, va la señal de cierre del contacto de trabajo C.

Los resultados obtenidos son las fotografías uno y dos.

De estas fotografías se desprende que:

Tiempo de conexión: 15 a 20 mseg.

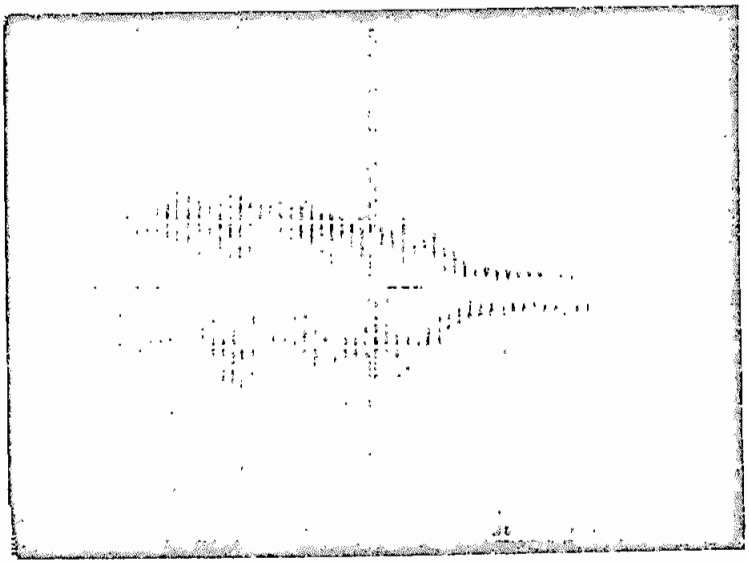
La corriente de excitación de la fotografía Nº 2 es una ampliación de la fotografía Nº 1. De aquí se ve que la corriente de excitación es de 8 a 10 veces el valor de la corriente permanente cuando el contactor ha operado.



Escalas:
horizontal: 0.1 seg/div.
vertical: 5 vol/div.

Fotografía Nº 2,

b.- Para eliminar la formación de este transitorio usamos el arranque $\curlywedge$-$\triangle$ con transición a circuito cerrado (como el descrito para el anterior diagrama de la figura 6.18). Los resultados obtenidos se muestran en la fotografía Nº 3.



Escalas:
horizontal: 0.1 seg/div.
vertical: 5 vol/div.

Fotografía Nº3.

BUCHHOLZ WOLF. Algebra Booleana
Ed. Marymar.
Argentina 1966.

CALDWELL SAMUEL H. Switching Circuits and Logical Design
John Wiley New York. 1961

FITZGERALD, KINGSLEY, KOSOW.. Principles of Direct-Courrent Machines.
International Student Edition.
Tokyo. 1971.

HEUMANN GERHART. Magnetic Control of Industrial Motors - (I-II).
John Wiley. New York. 1961

KOSOW IRWING. L . Electric Machineng and Control
Prentice-Hall. INC.
New Jersey. 1964.

LANGSDORF ALEXANDER. Principles of Direct-Courrent Machines.
International Student Edition.
Tokyo. 1959.

MANUELES DELMAR. Control de Motores Eléctricos.
Serie Electricidad. Ed. Reverté. S.A.
Barcelona-México-Buenos Aires. 1960.

MC. INTYRE. A.C. Motors-Control Fundamentals.
Mc. Graw Hill.

PEEK R.L. AND H. N. WAGAR. Switching relay design.
D. Van Nostraund Co. 1955. Canadá.