

CONTROL DE MOTORES ELÉCTRICOS

Por: Jorge Antonio Polanía Puentes

Contenido

1.	TIPOS DE MOTORES	4
1.1	EL MOTOR ELEMENTAL.....	4
1.2	EL MOTOR DC.....	5
1.3	TIPOS DE MOTORES DC.....	7
1.3.1	MOTOR SHUNT O PARALELO.....	7
1.3.2	MOTOR SERIE.....	11
1.3.3	MOTOR COMPOUND.....	13
1.4	MOTOR PASO A PASO.....	14
1.4.1	FUNCIONAMIENTO.....	15
1.4.2	MODOS DE OPERACIÓN.....	18
1.5	EL MOTOR DE IMÁN PERMANENTE.....	19
1.5.1	DE NÚCLEO DE HIERRO.....	19
1.5.2	DE DEVANADO SUPERFICIAL.....	20
1.5.3	DE BOBINA MÓVIL.....	21
1.6	EL MOTOR MONOFÁSICO	21
1.6.1	MOTOR MONOFÁSICO DE INDUCCION.....	22
1.6.2	MOTOR MONOFÁSICO DE REPULSIÓN	29
1.7	EL MOTOR UNIVERSAL	31
1.8	EL MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO	32
1.8.1	MOTOR EN JAULA DE ARDILLA.....	33
1.8.3	MOTOR CON ROTOR BOBINADO.....	36
1.9	MOTOR TRIFÁSICO SINCRÓNICO.....	37
2.	CONTROL DE MOTORES.....	39
2.1	CARACTERÍSTICAS DE UN MOTOR.....	39
2.1.1	PLACA CARACTERÍSTICA.....	39
2.2	INVERSIÓN DE GIRO	40

2.3	ARRANQUE DE UN MOTOR	41
2.3.1	CARACTERÍSTICAS DE ARRANQUE	42
2.3.2	CURVAS CARACTERÍSTICAS	43
2.4	CONTROL CON CONTACTORES	45
2.4.1	ARRANQUE Y PARADA	46
2.4.2	ARRANCADORES MANUALES.....	47
2.4.3	ARRANCADORES MAGNETICOS.....	47
2.4.4	RELEVADORES Y CONTACTORES.....	48
2.4.5	ESTACIONES DE BOTONES	48
2.4.6	CONTROL DE DOS ALAMBRES	48
2.4.7	CONTROL DE TRES ALAMBRES	49
2.4.8	ESTACIONES DE BOTONES MÚLTIPLES.....	50
2.4.9	ARRANCADOR REVERSIBLE.....	50
2.4.10	ARRANCADORES ESTRELLA-TRIÁNGULO.....	51
2.4.11	ARRANCADORES DE RESISTENCIAS.....	52
2.5.	INSTALACIÓN DE MOTORES	53
2.5.1	ELECCIÓN DE FUSIBLES	53
2.5.2	ELECCIÓN DEL CONTACTOR.....	54
2.5.3	ELECCIÓN DE CONDUCTORES.....	54
2.5.4	ELECCIÓN DEL CONDUIT	54
2.5.5	ELECCION DEL INTERRUPTOR DE SEGURIDAD.....	55
3.	CONTROLES ELECTRÓNICOS	55
3.1.	USO DE DRIVER'S.....	55
3.2	EL SEMICONVERTIDOR.....	58
3.3	EL CICLOCONVERSION.....	61
3.4	EL TACO-GENERADOR.....	66
3.5	CONTROL POR PWM.....	67
3.6	CONVERTIDOR DE F-V.....	68
3.7	TACÓMETRO DIGITAL.....	70
4.	CONTROL EN LAZO ABIERTO	73
4.1	MOTOR DC POR PWM.....	73
4.2	MOTOR AC POR FRECUENCIA	75

4.3	CONTROL DE UN MOTOR PAP	77
4.4	MOTOR AC CON TACÓMETRO.....	79
5.	SIMULACIÓN DE MOTORES.....	82
5.1	INTRODUCCIÓN	82
5.1.1	TRANSFORMADOR MONOFÁSICO	82
5.1.2	TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	84
	CONEXIÓN ESTRELLA	85
	CONEXIÓN DELTA	86
5.2	MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....	87
5.2.1	PARÁMETROS	87
5.3	EL GENERADOR SHUNT.....	91
5.3.1	ECUACIONES DINÁMICAS	91
5.3.2	SIMULACIÓN.....	92
5.4	EL MOTOR SHUNT.....	97
5.4.1	ECUACIONES DINÁMICAS	97
5.4.2	SIMULACIÓN.....	99
5.5	MÉTODOS DE FRENADO	102
5.5.1	ECUACIONES DINÁMICAS	102
5.5.2	SIMULACIÓN.....	103
5.6	MOTOR UNIVERSAL.....	105
5.6.1	ECUACIONES DINÁMICAS	105
5.6.2	SIMULACIÓN.....	106
5.7	MOTOR MONOFÁSICO	110
5.7.1	ECUACIONES BÁSICAS	111
5.7.2	ECUACIONES EN ESTADO ESTACIONARIO	113
5.7.3	SIMULACIÓN.....	115
5.8	MOTOR TRIFÁSICO.....	124
5.8.1	CIRCUITO EQUIVALENTE	124
5.8.2	ECUACIONES BASE	125
5.8.3	ECUACIONES DINÁMICAS	126
5.8.4	SIMULACIÓN.....	127

1. TIPOS DE MOTORES



1.1 EL MOTOR ELEMENTAL

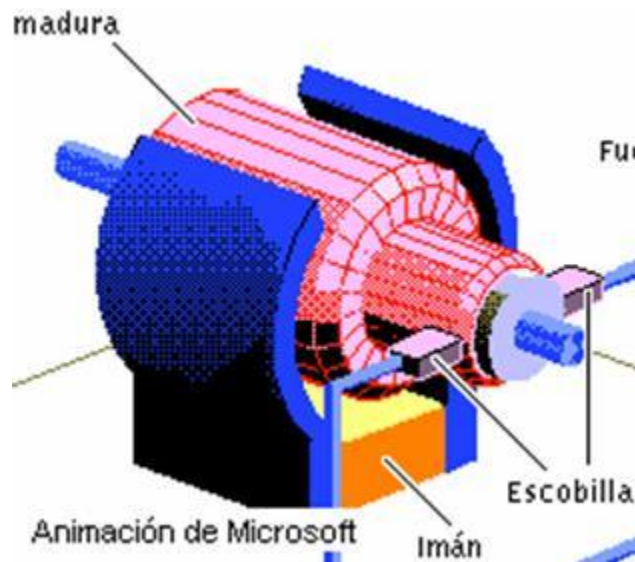
El motor eléctrico es un dispositivo electromotriz, esto quiere decir que convierte la energía eléctrica en energía motriz. Todos los motores disponen de un eje de salida para acoplar un engranaje, polea o mecanismo capaz de transmitir el movimiento creado por el motor.



Un motor eléctrico elemental dc de 2 polos tiene las siguientes partes :

- *Una armadura o rotor.*
- *Un conmutador.*
- *Escobillas.*
- *Un eje.*
- *Un Imán de campo.*
- *Una fuente de poder DC de algún tipo.*

*El funcionamiento de un motor se basa en la acción de campos magnéticos opuestos que hacen girar el **rotor** (eje interno) en dirección opuesta al **estator** (imán externo o bobina), con lo que si sujetamos por medio de soportes o bridas la carcasa del motor el rotor con el eje de salida será lo único que gire.*



1.2 EL MOTOR DC

Para cambiar la dirección de giro en un motor de Corriente Continua tan solo tenemos que invertir la polaridad de la alimentación del motor.

*Para **modificar su velocidad** podemos variar su tensión de alimentación con lo que el motor perderá velocidad, pero también perderá par de giro (fuerza) o para no perder par en el eje de salida podemos hacer un circuito modulador de anchura de pulsos (pwm) con una salida a transistor de mas o menos potencia según el motor utilizado.*

Si se aplica un voltaje en los bornes de un motor de c.c. circula por los conductores del inducido una corriente que al estar en un campo magnético se produce una fuerza que hace girar los conductores y por lo tanto al inducido, la fuerza ejercida sobre un conductor es proporcional al campo magnético y a la corriente, por lo tanto, el momento del par, llamado "par motor" se puede expresar como sigue:

$$\text{Par motor} = K\phi I_a$$

Donde I_a es la corriente del inducido.

Al girar los conductores con el inducido, cortan líneas de fuerza y en el arrollamiento se induce una fem que se opone al voltaje aplicado en los

bornes. Por esta razón, la fem inducida en un motor se llama "fuerza contra electromotriz" f.c.e.m. la corriente en el inducido es igual a:

$$I_a = (E_a - E_b) / R_a \quad \text{entonces } E_a = E_b + I_a R_a$$

Donde:

E_b = f.c.e.m.

E_a = voltaje aplicado

I_a = corriente en el inducido

R_a = Resistencia del inducido y escobillas.

El **colector** desempeña un papel muy importante en el funcionamiento de un motor de c.c. y consiste en invertir el sentido de la corriente en la espira en el instante en que están enfrentados los polos de nombre contrario. Esto hace que se invierta la polaridad del campo, con lo que hay repulsión en lugar de atracción, y la espira continúa girando. En la figura A, se observa que el polo N del campo principal repele al polo N del campo del inducido.

Al completar media revolución, figura B, el colector invierte la corriente en el inducido, por lo tanto el sentido del campo del inducido se invierte. Esta inversión hace que el polo S del campo principal y del inducido se repelen de nuevo y continúe así la rotación.

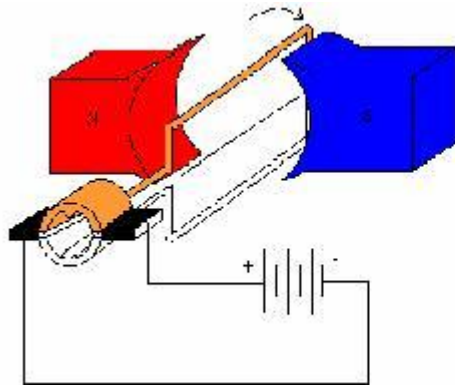


FIGURA A

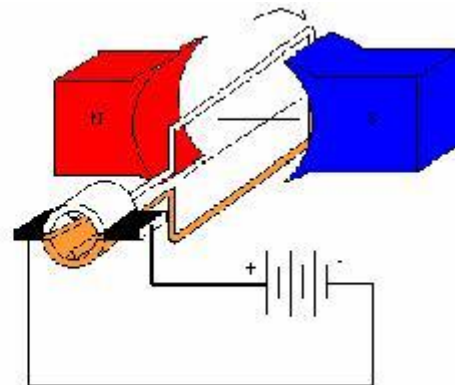


FIGURA B

En un **inducido** de varias espiras, se mantiene sobre él un par motor uniforme y continuo. Como las espiras están próximas entre sí, el campo resultante producido por el inducido permanece en la misma posición, resultando por tanto en "campo magnético estacionario".

Teoría de funcionamiento. La potencia absorbida de la red por un motor varía automáticamente, para acomodarse a la carga mecánica. Inicialmente cuando el motor parte del reposo, el inducido tendrá una corriente de $I_a = E_a / R_a$, debido a que la **f.c.e.m.** $E_b = 0$. Cuando el motor aumenta la velocidad,

la $f_{cem} = E_b$ aumentará también, por lo tanto, $I_a = (E_a - E_b) / R_a$ disminuye. El motor dejará de acelerar cuando la corriente haya descendido hasta un valor tal, que el par motor sea igual a la suma del par de rozamiento y del par de frenado ocasionado por la carga mecánica. Si la carga mecánica aumenta. La velocidad disminuye, la f_{cem} también disminuye y la I_a aumenta. Al aumentar la corriente, aumenta el par motor .

La velocidad del motor dejará de disminuir cuando el par motor se haga igual al par resistente. Si disminuye la carga, la velocidad aumenta, la f_{cem} aumenta, la corriente I_a disminuye y el par motor disminuye. El motor dejará de acelerar cuando el par motor y resistente se igualen.

ECUACIONES DEL MOTOR DE CC.

$$\begin{aligned} \text{Par motor} &= K\phi I_a \\ F_{em} &= K\phi \text{ rpm.} \end{aligned}$$

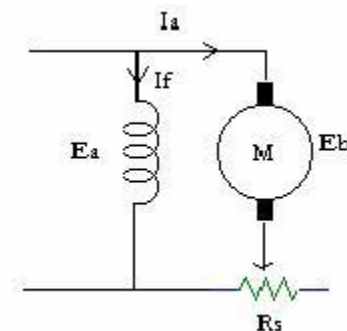
$$\begin{aligned} hp &= 2\pi \times \text{par motor} \times \text{rpm} / 33000 \\ 1 \text{ hp} &= 746 \text{ w} \end{aligned}$$

K y ϕ son constantes que dependen de la construcción y del sistema de unidad adoptado.

1.3 TIPOS DE MOTORES DC

1.3.1 MOTOR SHUNT O PARALELO

Para el motor shunt de la figura, tenemos:



$$I_f = E_a / R_f$$

$$I_a = (E_a - E_b) / R_a.$$

Inicialmente la f_{cem} es cero, debido a que el inducido está en reposo, por lo tanto, la $I_a = E_a / R_a$ que es de un valor elevado. Como la corriente es elevada, entonces el par motor también lo es, ya que $\text{par} = K\phi I_a$.

Esto hace que aumente la velocidad, por consiguiente E_b aumenta. Al aumentar E_b disminuye el **par motor** que se hace constante cuando el motor adquiere finalmente una velocidad constante.

Si se impidiese el giro del inducido, la corriente de arranque sería muy intensa, continuaría circulando y quemaría el inducido en poco tiempo. En la práctica los motores se protegen generalmente con fusibles que, al fundirse, abren el circuito antes de que se queme el inducido.

Como la corriente de arranque es elevada (varias veces el valor de la corriente nominal de carga) es necesario intercalar una resistencia R_s en serie para disminuir la corriente de arranque.

Esta resistencia se suprime paulatinamente cuando el motor adquiere velocidad. La fig 4.2. representa la corriente con y sin el reóstato de arranque.



CURVAS CARACTERÍSTICAS

Las curvas características de un motor indican como varían el par motor y la velocidad con la corriente en el inducido, siendo constante el voltaje aplicado.

$$\text{Par motor} = K\phi I_a$$

Como $E_a = \text{constante}$, entonces, I_f es también constante, por lo tanto, el flujo por polo también lo es.

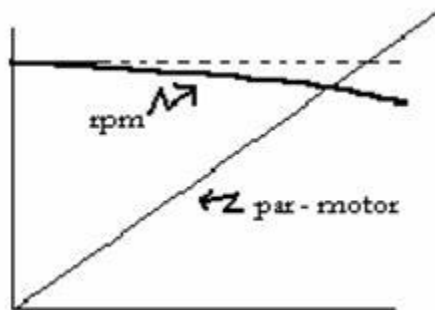
Par motor = $K\phi I_a = K \times \text{constante} \times I_a = K I_a$, que representa la ecuación de una recta que pasa por el origen.

$$Fem = E_b = K \phi \text{ rpm}$$

$$\text{rpm} = (E_a - I_a R_a) / K\phi$$

$$\text{Rpm} = \text{constante} \times (E_a - I_a R_a)$$

Como la resistencia R_a es pequeña el valor $I_a R_a$ es pequeño comparado con E_a , por lo tanto, al aumentar la corriente, disminuye muy poco la velocidad. Por lo tanto el motor shunt es un motor de velocidad constante.



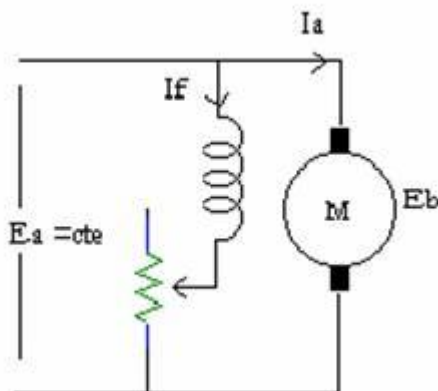
CONTROL DE VELOCIDAD

Aunque el motor shunt es de velocidad constante, su característica más importante, es la de ser un motor de velocidad regulable.

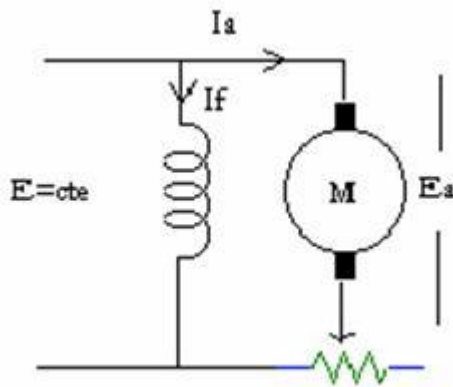
Utilizando la ecuación de la velocidad, tenemos:

$$\text{Rpm} = (E_a - I_a R_a) / K\phi$$

La velocidad se puede aumentar, disminuyendo el flujo por polo (ϕ). Para esto, es necesario colocar un reóstato en el circuito de campo, tal como se indica en la figura.



Intercalando un reóstato en el circuito del inducido podemos disminuir la velocidad nominal. Esto es debido a que al aumentar la resistencia en el circuito en el inducido el voltaje E_a disminuye.



INVERSIÓN DE GIRO

El sentido de rotación de un motor shunt se puede invertir, cambiando la dirección de la corriente, ya sea en el circuito de campo o en el circuito del inducido.

Parada del motor.

Para parar el motor se introducen todas las resistencias del reóstato de arranque antes de cortar la corriente.

Propiedades

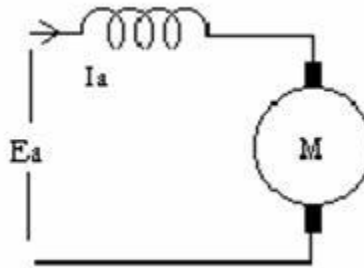
- Par de arranque débil
- No soportan grandes sobrecargas.
- Velocidad constante cualquiera sea la carga .
- No se disparan en vacío.

Utilización

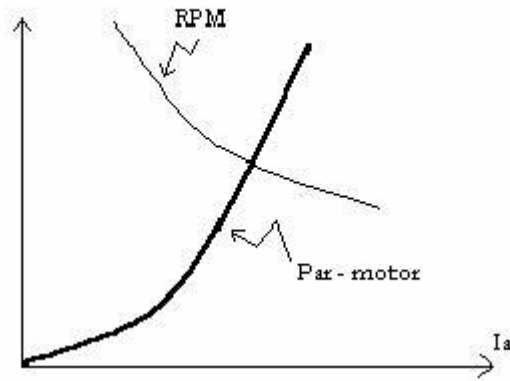
La velocidad constante de estos motores los hace adecuados para el accionamiento de máquinas - herramientas (tornos, taladros) y aparatos de elevación.

1.3.2 MOTOR SERIE

El motor serie se conecta a la red como se indica en la figura. El voltaje aplicado E_a es constante, mientras que el campo de excitación aumenta con la carga, puesto que la corriente I_a es la misma corriente de excitación.



El par producido $K\phi I_a$ es directamente proporcional al flujo ϕ y a la corriente en el inducido. Como el ϕ también aumenta con I_a , entonces, el par motor es directamente proporcional al cuadrado de I_a , por lo tanto, su curva será parabólica.



$$Par_motor = K I_a^2$$

Arranque del motor:

Como en el caso del motor shunt se debe intercalar un reóstato de arranque en serie con el inducido. Esta resistencia se reduce gradualmente cuando el motor adquiere velocidad.

Características de carga

Las curvas características se pueden obtener a partir de las fórmulas fundamentales:

Par motor = $K\phi I_a = K I_a^2$, debido a que $\phi = K I_a$

$Rpm = (E_a - I_a R_a) / K\phi = K (E_a - I_a R_a) / I_a$,

o sea, que al aumentar la corriente, disminuye la velocidad, y su curva de velocidad, se observa que para cargas ligeras, la velocidad se hace peligrosamente elevada, y por esta razón un motor serie ha de estar siempre engranado o acoplado directamente a la carga. Si un motor serie estuviera unido a la carga mediante una correa y ésta se rompiera o soltase, el motor se embalaría y probablemente se dañaría.

Inversión del sentido de rotación:

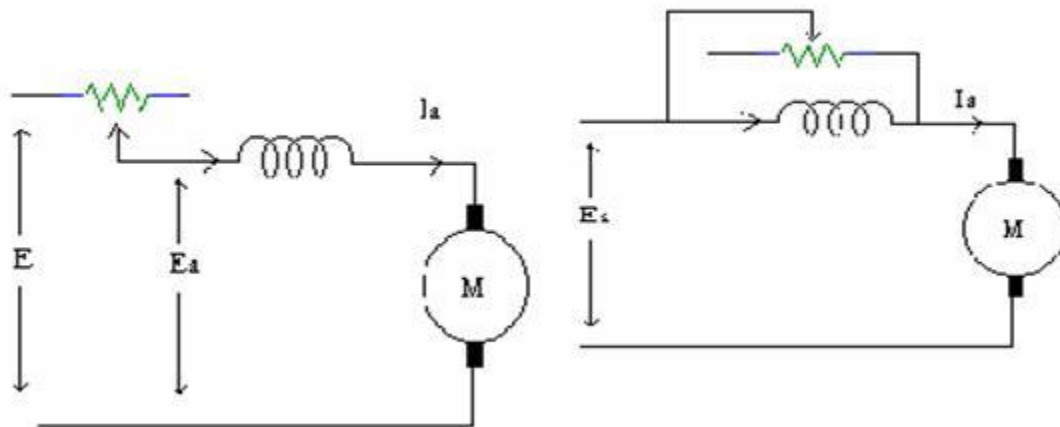
La rotación se puede invertir cambiando la dirección de la corriente, ya sea del campo en serie o del inducido.

Parada del motor:

Para parar un motor serie, es preciso introducir progresivamente las resistencias del reóstato de arranque y cortar luego la alimentación, para evitar una fuerte corriente de ruptura que sería peligrosa para los arrollamientos.

Control de velocidad:

La velocidad se puede variar, cambiando el voltaje aplicado E_a , colocando un reóstato en serie con la bobina de campo. De esta manera se disminuye la velocidad. Se puede aumentar la velocidad, disminuyendo el flujo por polo. Esto se puede realizar, colocando un reóstato en paralelo con la bobina de campo, de modo que la corriente total la solo se permita circular una parte por la bobina de excitación.



Propiedades:

- Gran par de arranque.
- Velocidad variable con la carga.
- Tendencia al aceleramiento excesivo.
- Soporta bien las sobrecargas.
- Se dispara fácilmente en vacío o cuando la carga decrece.

Utilización

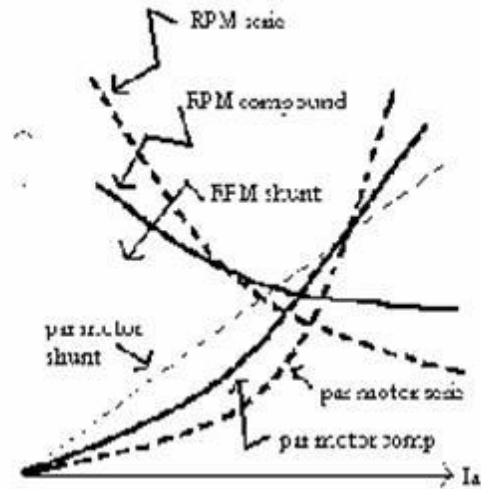
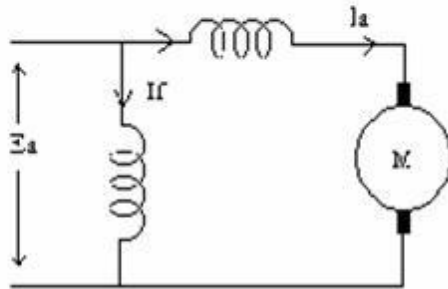
Se usa en los aparatos de elevación: Montacargas, ascensores, grúas, frenos eléctricos.

1.3.3 MOTOR COMPOUND

Comparando las ventajas de los motores serie y shunt se encuentra que:

- 1) El motor shunt tiene una velocidad más constante, pero
- 2) Un motor serie del mismo régimen de capacidad puede ejercer un par mucho mayor, cuando sea necesario, sin aumentar terriblemente la corriente.

Estas dos características pueden obtenerse en un mismo motor colocando dos bobinados de campo: Uno en serie y otro shunt, en los polos del motor, y que se llamará motor compound. Las características de velocidad y par motor para un motor compound se dan en la siguiente figura.



La velocidad de un motor compound se puede disminuir por debajo de la normal por medio de un reóstato colocado en el circuito del inducido y aumentarse por encima de la normal mediante un reóstato en el circuito de campo.

A diferencia de los motores en serie, el motor compound tiene una velocidad definida sin carga y no alcanzará velocidades destructivas si ésta se suprime.

La regulación de la velocidad es inferior a la de un motor shunt y mayor a la de uno serie. La rotación se invierte cambiando la dirección de la corriente del circuito de campo o del circuito del inducido. Puesto que si se invierte el campo shunt se debe invertir el serie, el procedimiento más sencillo es invertir la corriente en el inducido.

Si las conexiones del arrollamiento serie de un motor compound se permutan para invertir el sentido de circulación de corriente en el mismo, las bobinas serie se opondrán al flujo y este decrecerá, en lugar de crecer cuando aumente la carga. Esto obligará al motor a acelerar, en lugar de decrecer cuando aumenta la carga. Este motor se conoce con el nombre de "motor compound diferencial".

1.4 MOTOR PASO A PASO

*Los motores paso a paso (PAP), son un tipo especial de motores que permiten el **avance de su eje en ángulos muy precisos y por pasos** en las dos posibles direcciones de movimiento, izquierda o derecha. Aplicando a*

ellos una determinada secuencia de señales digitales, avanzan por pasos hacia un lado u otro y se detienen exactamente en una determinada posición.

Cada paso tiene un ángulo muy preciso determinado por la construcción del motor, lo que permite realizar movimientos exactos sin necesidad de un sistema de control por lazo cerrado.

A un motor paso a paso se le puede ordenar por medio del control, que avance cinco o diez pasos hacia la derecha, luego un determinado número de pasos hacia atrás o simplemente que no gire, lo cual permite el control de posición, velocidad, y sentido (dirección).

Este sistema a simplificado enormemente la implementación de automatismos y las aplicaciones de la robótica.

Los motores paso a paso presentan grandes ventajas con respecto a la utilización de servomotores debido a que se pueden manejar digitalmente sin realimentación, su velocidad se puede controlar fácilmente, tiene una larga vida, son de bajo costo, la interfase es sencilla y su mantenimiento es mínimo debido a que no tienen escobillas.

1.4.1 FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de los motores paso a paso se basa en el simple principio de atracción y repulsión que ocurre entre los polos magnéticos. Como ya sabemos un imán tiene dos polos llamados Norte y Sur.

El principio básico del magnetismo establece que polos iguales se repelen y polos diferentes se atraen.

Para lograr un movimiento mucho más suave, los motores paso a paso se fabrican aumentando el número de polos del estator y se les practican una serie de ranuras tanto en el rotor como en el estator. Así se logran movimientos que van hasta 1.8° por paso. Los grados de avance por paso son una de las características más importantes en este tipo de motores y generalmente está indicada en su carcasa o cuerpo.

Existen diferentes tipos de motores de pasos, de los cuales se utilizara y veremos el funcionamiento de uno ellos, el Motor de Magneto Permanente.

En la figura, se muestra un diagrama del Motor paso a paso de Magneto Permanente, el cual está construido de un rotor que incluye polos magnéticos de polaridad contraria colocados uno junto al otro. El estator contiene bobinas alineadas de tal forma que sus energización secuencial

provoca que el rotor se desplace a las posiciones de mínima reluctancia magnética.

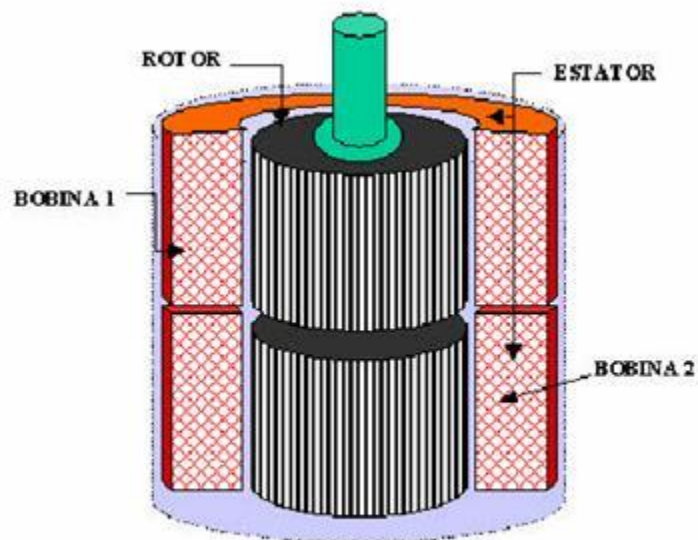


Fig. 1 Motor de imán Permanente

El número de pasos varía según sea la aplicación. Existen en el mercado desde 0.1 a 120 grados. Los ángulos más comunes son de 1.8, 2.0, 2.5, 5.0, 15 y 30 grados, que respectivamente dan 200, 180, 144, 72, 24 y 12 pasos/revolución. Estos motores son alimentados con fuentes de corriente directa y manejados con circuitos digitales.

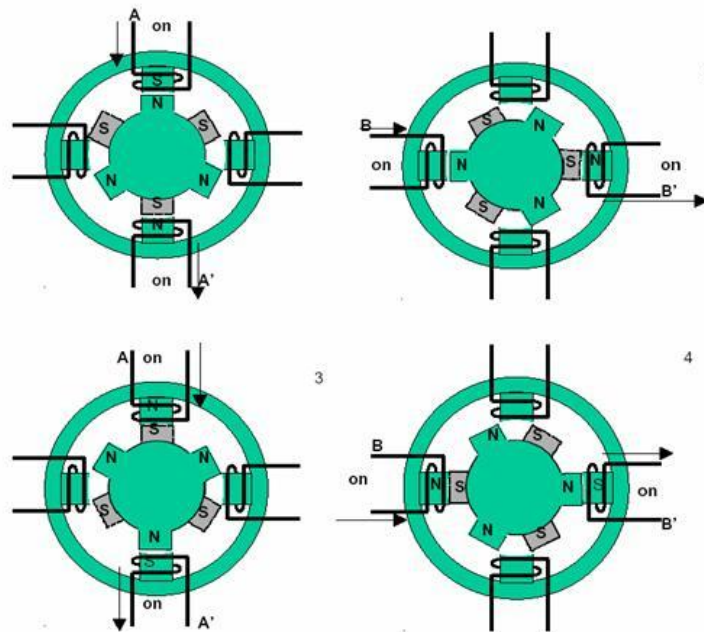


Fig. 2 Principio de funcionamiento de un motor de pasos

En la figura anterior se presenta el principio de funcionamiento. La **bobina A-A'** se energiza haciendo circular la corriente de A hacia A' por lo cual el polo inferior se polariza positivamente, atrayendo al polo sur del rotor (parte inferior del rotor), y el superior negativamente el cual atrae, al polo norte del rotor, (parte superior del rotor), de tal manera que se realiza el **primer paso**.

Para que realice un **segundo paso** en el mismo sentido consideremos, ahora, la desactivación de la bobina A-A' y la activación de las **bobinas B-B'**, al circular la corriente la bobina B polariza negativamente lo que atrae al polo positivo del rotor (N) y la bobina B' se polariza positivamente atrayendo al polo negativo (S) del rotor. Esto hace que gire un otro paso.

Para que gire un **tercer paso**, se desenergizan las bobinas B-B' y ahora volvemos a activar las bobinas A-A', pero ahora haciendo circular la corriente de A' hacia A por lo cual el polo superior se polariza positivamente, atrayendo al polo sur del rotor (parte inferior del rotor), y el inferior negativamente, el cual atrae, al polo norte del rotor (parte superior del rotor).

Siguiendo con un **cuarto paso** en el mismo sentido, sea la bobina B-B', ahora alimentada en sentido contrario, es decir haciendo circular la corriente de B' hacia B, con la bobina A-A' desactivada. El polo de la derecha se polariza positivamente atrayendo al polo sur del rotor (parte inferior del rotor), y el de la izquierda negativamente, el cual atrae, al polo norte del rotor, (parte superior del rotor).

Por último para completar el ciclo, volvamos a conectar las cuatro bobinas como al inicio por lo cual el rotor girará un cuarto de paso. Si el ciclo se vuelve repetitivo podremos observar el movimiento del rotor en sentido de las manecillas del reloj. La velocidad dependerá de la activación y desactivación de las bobinas. Como podemos observar 4 pasos fueron necesarios para que el motor gire 90 grados de su posición original, si quisiéramos que el motor gire una vuelta completa tendríamos que darle 12 pasos, es decir repetir el ciclo 4 veces.

De aquí se observa que, el número de pasos de un motor está condicionado al número de polos del imán permanente (rotor), o bien al número de bobinas, (estator). Por ejemplo, para un motor de 2 bobinas y 200 pasos se requiere que el rotor tenga 50 polos.

1.4.2. MODOS DE OPERACIÓN

*Los motores PAP tanto unipolares como bipolares pueden trabajar en dos modos de operación : **de paso completo y de medio paso.***

En el primer caso, con cada secuencia el rotor gira un determinado ángulo dado por la fabricación del motor. En el modo de medio paso, cada secuencia produce un giro en grados correspondiente a la mitad de su paso normal. En las siguientes tablas podemos observar la secuencia de señales que se deben aplicar al motor en cada caso.

PASO COMPLETO

Un motor de 200 pasos tiene esta secuencia :

T_3	T_2	T_1	T_0
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
1	0	0	0
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
1	0	0	0

MEDIO PASO

El motor recorre 400 pasos con esta secuencia :

T_3	T_2	T_1	T_0
0	0	0	1
0	0	1	1
0	0	1	0
0	1	1	0
0	1	0	0
1	1	0	0
1	0	0	0
1	0	0	1

1.5 EL MOTOR DE IMÁN PERMANENTE

En general el campo magnético de un motor de cd se puede producir por bobinas o imanes permanentes. Los motores de cd de imán permanente se pueden clasificar de acuerdo con el esquema de conmutación y al diseño de la armadura. Los motores de cd convencionales tienen escobillas mecánicas y conmutadores. Sin embargo, en una clase importante de motores de cd la conmutación se hace en forma electrónica; este tipo de motor se llama motor de cd sin escobillas.

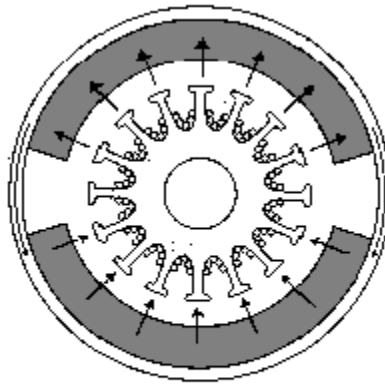
De acuerdo con la construcción de la armadura, el motor de cd de imán permanente tiene tres tipos de diseño de armadura :

- 1. de núcleo de hierro*
- 2. de devanado superficial*
- 3. de bobina móvil.*

1.5.1 DE NÚCLEO DE HIERRO

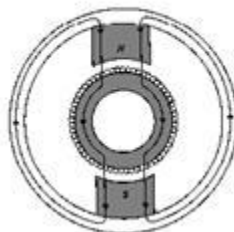
La configuración del rotor y estator de un motor de cd de imán permanente de núcleo de hierro se muestra en la Fig. (5). El material del imán permanente puede ser bario-ferrita, Alnico, o un compuesto de "tierras raras". El flujo

magnético producido por el imán pasa a través de la estructura del rotor laminado que tiene ranuras. Los conductores de la armadura están localizados en las ranuras del rotor. Este tipo de motor está caracterizado por una inercia del motor relativamente alta (ya que la parte giratoria está formada por las bobinas de la armadura), una inductancia alta, bajo costo y alta confiabilidad.



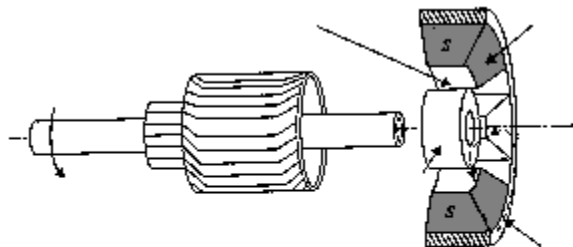
1.5.2 DE DEVANADO SUPERFICIAL

La Figura muestra la construcción del rotor de un motor de cd de imán permanente de devanado superficial. Los conductores de la armadura están pegados a la superficie de la estructura cilíndrica del rotor, la cual está hecha de discos laminados sujetos al eje del motor. Ya que en este diseño no se emplean ranuras sobre el rotor, no presenta el efecto de "rueda dentada". Puesto que los conductores están proyectados en el entrehierro de aire que está entre el rotor y el campo de imán permanente, este campo tiene menor inductancia que el de estructura de núcleo de hierro.



1.5.3 DE BOBINA MÓVIL

Los motores de bobina móvil están diseñados para tener momentos de inercia muy bajos e inductancia de armadura también muy baja. Esto se logra al colocar los conductores de la armadura en el entrehierro entre la trayectoria de regreso del flujo estacionario y la estructura de imán permanente. En este caso la estructura del conductor está soportada por un material no magnético normalmente resinas epóxicas o fibra de vidrio - para formar un cilindro hueco. Uno de los extremos del cilindro forma un eje, el cual está conectado al eje del motor. Una vista de la sección transversal de este tipo de motor se muestra en la figura abajo. Ya que se han eliminado todos los elementos no necesarios de la armadura del motor de bobina móvil, su momento de inercia es muy bajo. Como los conductores del motor de bobina móvil no están en contacto directo con el hierro, la inductancia del motor es muy baja; valores menores a 100 mH son comunes en este tipo de motor. Las propiedades de inercia e inductancia bajas hacen que el motor de bobina móvil sea una de las mejores elecciones de **actuadores** para sistemas de control de alto desempeño.



1.6 EL MOTOR MONOFÁSICO

Como la mayor parte de la energía generada, lo es bajo la forma de c.a. muchos motores están proyectados para funcionar con c.a. Los motores de c.a. pueden suplir a los de c.c., en la mayoría de los casos están menos sometidos a perturbaciones o averías. Esto es debido a que **las máquinas de c.c. trabajan en condiciones más difíciles por la acción de conmutación que requiere el uso de escobillas, porta escobillas, colector, etc.** Por el contrario, algunos motores de c.a., no utilizan ni siquiera anillos deslizantes, lo que

hace que el funcionamiento esté exento de averías durante largos periodos de tiempo.

*Los motores de c.a. son particularmente adecuados para aplicaciones de velocidad constante, ya que **la velocidad está determinada por la frecuencia** de c.a. aplicada a los bornes del motor. No obstante también se construyen motores de c.a. que tienen características de velocidad variable dentro de ciertos límites.*

*Los motes de c.a. se proyectan para un suministro de c.a. monofásica o trifásica. Tanto el motor monofásico como el trifásico funcionan basados en el mismo principio. Este principio es que la c.a. aplicada al motor genera un **campo magnético giratorio** y a su vez este campo magnético giratorio hace girar al rotor del motor.*

Los motores de c.a. se clasifican generalmente en dos tipos:

- a) **Sincrónicos***
- b) **Asincrónicos.***

*El **motor sincrónico** es un alternador al que se le hace funcionar como motor y en el cual al estator se le aplica corriente alterna y al rotor corriente continua. En el **motor asincrónico** el rotor no está conectado a fuente alguna de energía. De los dos tipos de motores de c.a. el asincrónico es el más empleado.*

Los motores monofásicos asincrónicos se clasifican en :

- a) **Motores monofásicos de inducción,***
- b) **Motores monofásicos de repulsión.***

1.6.1 MOTOR MONOFÁSICO DE INDUCCION



Los motores monofásicos de inducción poseen un bobinado único en el estator. Este bobinado está devanado generalmente en varias bobinas que se distribuyen en la periferia del estator, y genera un campo magnético único alternado a lo largo del eje de los campos.

Estando inmóvil el rotor, las alternancias del campo del estator induce corriente en el rotor. Estas corrientes producen a su vez, campos del mismo signo que el estator, que tienden a hacerlo girar 180° hasta enfrentarlo con los polos opuestos. Pero esta fuerza se ejerce a lo largo del eje del rotor y por lo tanto la fuerza de giro es igual en ambos sentidos y el rotor no se mueve. Si en estas condiciones, se da al rotor un impulso con la mano, éste se pondrá en marcha y girará en la dirección en que se le dio el impulso. Al ir aumentando la velocidad del rotor, llega a un punto en que aproximadamente cumple medio giro, es decir, 180° de rotación, por cada alternancia completa de la corriente que circula por el estator.

Si las velocidades del campo magnético giratorio y la del rotor son iguales, no se inducirá f.e.m., debido a que no habría movimiento relativo entre los campos del estator y rotor. Al no haber f.e.m., no existirá corriente inducida y por lo tanto no se inducirá el par motor, entonces se hace necesario que el rotor gire a una velocidad menor que el campo magnético giratorio del estator. Esta diferencia de velocidad se llama "resbalamiento".

Deslizamiento del rotor

Se refiere al movimiento relativo del motor con respecto a la velocidad de deslizamiento

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m$$

Donde: n_{des} es la velocidad de deslizamiento en la maquina

n_{sinc} es la velocidad de los campos magnéticos

n_m es la velocidad mecánica

Por tanto el deslizamiento del motor se define como :

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (*100\%) = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} (*100\%)$$

Frecuencia eléctrica en el motor

En el motor se induce tensiones y corrientes eléctricas que conllevan a compararlo con un transformador rotante, en el que el estator es el primario que induce un voltaje en el rotor tomado como el secundario.

A diferencia de un transformador normal, la frecuencia del secundario (f_r) no es necesariamente la misma del primario (f_e) para el motor.

$$\begin{array}{llll} \text{Si :} & n_m = 0 \text{ RPM} & \Rightarrow & f_r = f_e & \Rightarrow & S = 1 \\ & n_m = n_{\text{sinc}} & \Rightarrow & f_r = 0 & \Rightarrow & S = 0 \end{array}$$

$$\text{Para : } 0 \text{ Hz} < f < f_e \quad \Rightarrow \quad f_r \text{ es proporcional a } (n_{\text{sinc}} - n_m)$$

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120 \cdot f_e}{P}$$

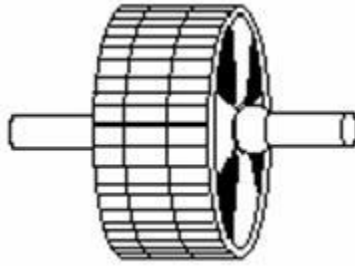
$$f_r = S \cdot f_e$$

entonces,

$$f_r = \frac{P}{120} (n_{\text{sinc}} - n_m)$$

Como hacer arrancar a mano un motor eléctrico no es muy cómodo, se han ideado medios que permitan el arranque automático. Según el modo de arranque se distinguen principalmente los motores de inducción de fase partida y los motores de arranque por condensador.

El rotor de un motor de inducción consta de un cilindro de chapas de acero o hierro al silicio, prensadas para formar un solo cuerpo. La superficie de este rotor está ranurada y por ellas se pasan barras de cobre cuyos extremos se sueldan a las coronas que son también de cobre. Este tipo de rotor se llama también rotor en **Jaula de ardilla o rotor en **corto circuito**. Actualmente, las jaulas de ardilla se construyen de aluminio fundido.**



A) MOTOR DE FASE PARTIDA

El motor de inducción de fase partida consta esencialmente de cinco partes: Estator, rotor, interruptor centrífugo, escudos y bastidor.

- **Estator:** *Consiste de dos devanados sujetos en su lugar por unas ranuras en el núcleo de acero laminado, los dos devanados consisten de dos bobinas aisladas dispuestas y conectadas para que formen dos devanados separados el uno del otro a 90° eléctricos; uno de estos devanados es el principal y el otro es el de arranque. El devanado principal es de alambre grueso y colocado en el fondo de las ranuras del estator. El de arranque es de alambre delgado y situado en lo alto de las ranuras, encima del devanado principal.*
- **Rotor:** *Lo constituye un núcleo cilíndrico hecho con piezas de acero laminado. Cerca de la superficie del rotor hay montadas unas barras de cobre unidas a dos anillos de cobre. En algunos motores el rotor es una unidad de una sola pieza colada de aluminio. El mantenimiento de este rotor es relativamente poco, ya que no hay devanados en los que puedan crearse fallas. Además tampoco hay escobillas, colectores ni conmutadores que se tengan que cuidar. Por lo general, cerca del rotor hay montado sobre el mismo eje un ventilador, que hace que circule el aire por el motor y que la temperatura de los devanados no llegue a ser excesiva.*
- **Interruptor centrífugo:** *Consta de una parte estacionaria y una parte giratoria. La parte estacionaria está montada en uno de los escudos y tiene dos contactos cuya acción es la misma que la de un interruptor unipolar de una dirección. La parte giratoria va montada en el rotor.*
- **Escudos:** *Va sujeto a la carcasa o bastidor mediante tornillos y tuercas y sirven para mantener el rotor en la posición adecuada. Cada escudo lleva un orificio para el cojinete. Los cojinetes sirven para mantener bien centrado el rotor a fin de que no haya roce con el estator y además reducir el rozamiento al mínimo.*
- **Bastidor:** *Es de hierro colado en el que el núcleo del estator está encajado en él a presión.*

Funcionamiento:

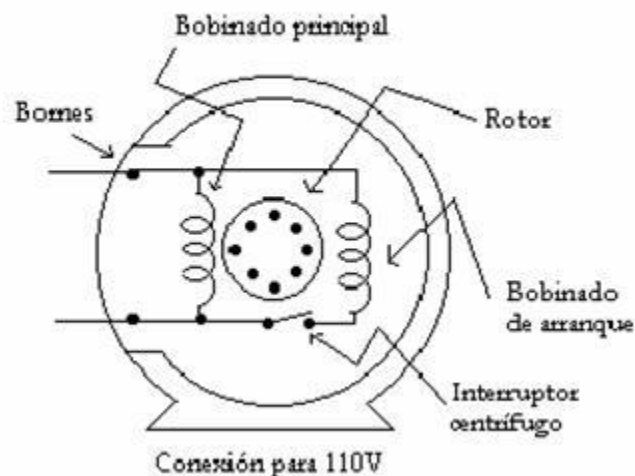
La corriente en el devanado principal está retardada 90° eléctricos con respecto al devanado de arranque. Cuando por estos devanados pasan dos corrientes desfasadas 90° se establece un campo magnético giratorio que gira a una velocidad sincrónica de polos.

$$rpm = 120 \times f/p$$

f = frecuencia en ciclos / seg. (hertz).

p = número de polos.

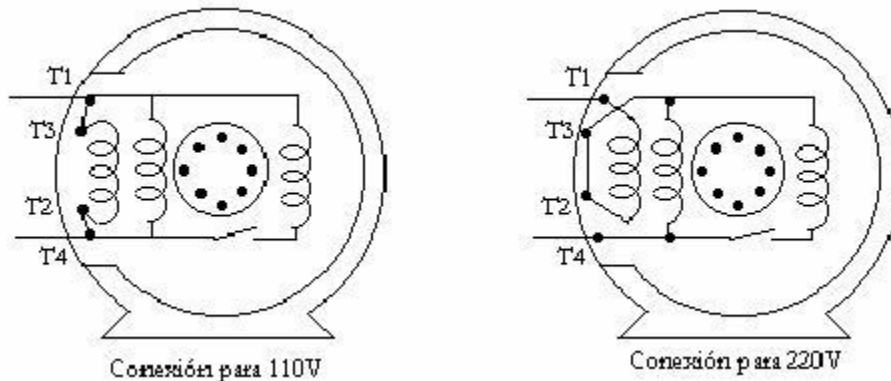
Mientras este campo rotatorio gira, se induce un voltaje en el rotor. Este voltaje inducido crea el campo magnético del rotor. El campo del rotor reacciona con el campo del estator creando así, el par torsor que hace que el rotor gire. Cuando el rotor alcanza los $\frac{3}{4}$ de la velocidad normal el interruptor centrífugo se abre desconectando el devanado de arranque. El motor sigue funcionando solamente con el devanado principal.



Si por alguna razón, el interruptor centrífugo falla y los contactos no se cierran al pasar el motor entonces el devanado de arranque quedará desconectado y cuando se active de nuevo el motor, éste no arrancará. Si se pone en marcha el motor con una carga demasiado grande, quizá no alcance una velocidad suficiente que haga que el interruptor centrífugo se abra, también si el voltaje de alimentación al motor es bajo, el interruptor puede no funcionar.

Si se invierten los conductores del devanado de arranque, se invierte el sentido del campo establecido por los devanados del estator y por lo tanto, se invierte el sentido de rotación del rotor.

Los motores monofásicos son por lo general de 110 y 220 voltios. El devanado principal tiene dos secciones y cada sección funciona a 110V. Por lo tanto, si se conecta 110V los dos devanados se conectan en paralelo y si se conecta a 220V los devanados se deben conectar en serie.



Propiedades:

- Buena regulación de velocidad.
- Par de arranque pequeño igual a 1 o 2 veces el par en marcha.
- Intensidad de arranque de 5 a 6 veces la nominal.
- Resbalamiento del 4% al 6%.
- Desfasaje entre devanados de 40 a 50 grados eléctricos.
- Se fabrican para potencias menores a 1 ½ hp.

Aplicación:

Lavadoras de ropa, bombas de agua pequeñas, bombas neumáticas etc.

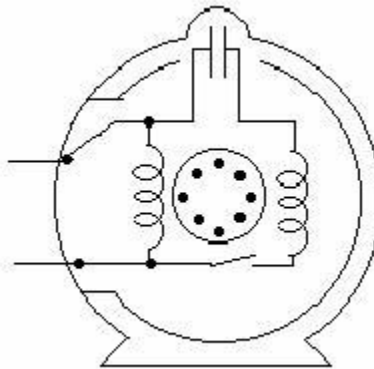
B) MOTOR DE ARRANQUE POR CONDENSADOR.

La construcción de este tipo de motor es prácticamente la misma que la de un motor de fase partida, salvo que en él hay un condensador conectado en serie con los devanados de arranque. El condensador proporciona un par de arranque mayor y además limita la corriente de arranque a un valor menor que el de fase partida.

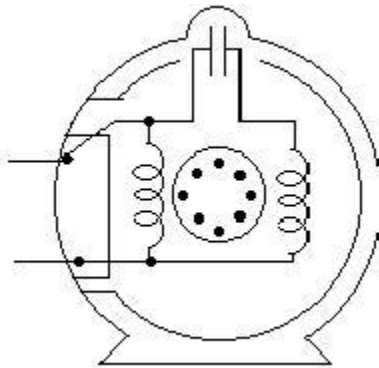
El funcionamiento de este motor es exactamente igual al de fase partida. La causa frecuente de dificultades son los condensadores defectuosos. Si el motor se arranca y se para muchas veces en un corto tiempo, es muy posible que entren en corto circuito los condensadores. Por lo tanto, este

motor se utiliza en aplicaciones domésticas e industriales en las que hay pocos arranques en cortos periodos.

El sentido de rotación se invierte, intercambiando los terminales del devanado de arranque. También funcionan para dos régimen de voltaje 110V y 220V.



Existe otra clase de motor que es el de arranque y marcha con condensador, el cual no tiene interruptor centrífugo, por lo tanto, el condensador siempre estará conectado y así el factor de potencia es del 100%.



Propiedades:

- Buena regulación de velocidad.
- Par de arranque muy fuerte igual a 3 o 4 veces al par de marcha.
- Intensidad de arranque menor que el de fase partida.
- Factor de potencia igual a 1,0.
- No están hechos para arranques y paradas frecuentes.
- Se fabrican desde 1/3 hp hasta 5 hp.
- La ventaja de los de arranque y marcha por condensador es que casi no requieren mantenimiento.
- Son los más populares donde no se usa la trifásica.

Aplicación:

Bombas unidades de refrigeración, compresores de aire y sierras.

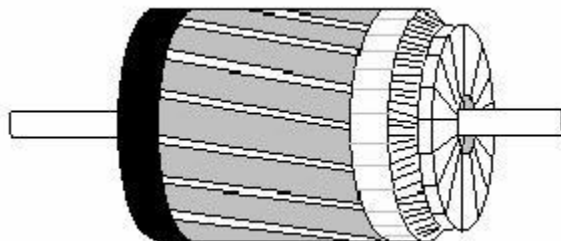
1.6.2. MOTOR MONOFÁSICO DE REPULSIÓN

Los motores con colector o de repulsión pueden dividirse en tres tipos: Motores de repulsión, motores de arranque por repulsión y marcha por inducción, y motores de inducción-repulsión.

A) MOTORES DE REPULSIÓN

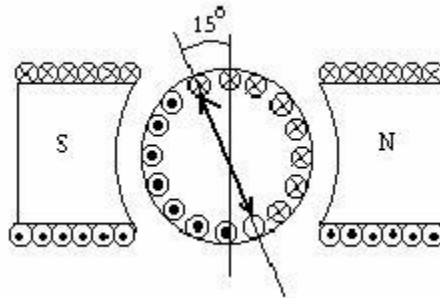
Las partes esenciales son:

- 1. Un núcleo laminado del estator con un devanado similar al de la fase partida. El estator tiene generalmente, cuatro, seis u ocho polos.**
- 2. Un rotor con ranuras en la que va colocado un devanado, similar al de un motor de c.c. El colector es de tipo axial. Fig 7.8.**
- 3. Escobillas de carbón, conectadas entre sí por medio de alambres de cobre relativamente gruesos. El porta escobillas es desplazable.**
- 4. Dos escudos en los extremos de hierro colado, que alojan los cojinetes y sujetos al bastidor del motor.**
- 5. Dos cojinetes que sostienen el eje del inducido centrado, pueden ser lisos o de balas.**



Funcionamiento:

Al conectarse a la corriente monofásica se crea un campo magnético en el estator y se induce otro campo en el inducido. Si estos dos campos están descentralizados una 15° eléctricos, entonces, se crea un par de arranque que hace que el inducido del motor gire, Así pues, la aplicación el principio de que polos iguales se repelen da al motor su nombre de motor de repulsión.



Para invertir el sentido de rotación se desplazan las escobillas a unos 15° eléctricos del centro de los polos del estator en el sentido contrario al original.

Propiedades:

- Buen par de arranque.
- Mala regulación de velocidad.
- La velocidad se puede controlar, variando el voltaje aplicado al motor.
- La rotación se invierte desplazando las escobillas 15° al otro lado del centro del polo del estator.

Aplicación:

Prensas de imprenta en las que se desea una regulación de la velocidad del miembro impulsor.

B) MOTOR DE ARRANQUE POR REPULSIÓN Y MARCHA POR INDUCCIÓN

Existen dos tipos: El de levantamiento de escobillas y el de escobillas rodantes.

El estator y el rotor son iguales al de un motor de repulsión. Se diferencia en que tiene un mecanismo centrífugo que funciona al 75% de la velocidad de régimen. En el tipo de levantamiento de escobillas al llegar al 75% de la velocidad de régimen, levanta las escobillas y el motor sigue funcionando por inducción.

En el tipo de escobillas rodantes, el mecanismo centrífugo corto--circuita las delgas del colector al llegar el inducido al 75% de la velocidad de régimen y sigue funcionando por inducción.

Propiedades:

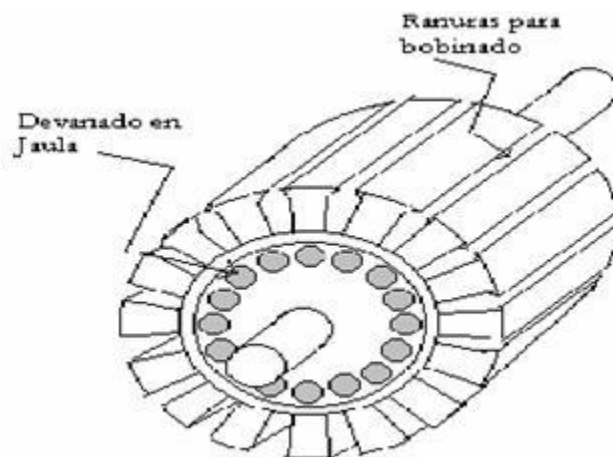
- Fuerte par de arranque.
- Buena regulación de la velocidad.
- La rotación se invierte de la misma forma que para el motor de repulsión.

Aplicación

Refrigeradores, compresores, bombas.

C) MOTORES DE INDUCCIÓN - REPULSIÓN

El funcionamiento es igual al de un motor de arranque por repulsión y marcha por inducción, sin embargo, no tiene mecanismo centrífugo. Este motor tiene un devanado en jaula de ardilla debajo de las ranuras del inducido.



Propiedades

- Buen par de arranque.
- Buena regulación de la velocidad.
- Debido a que no tiene mecanismo centrífugo tiene poco mantenimiento.
- Actualmente es el más utilizado de los motores de repulsión.

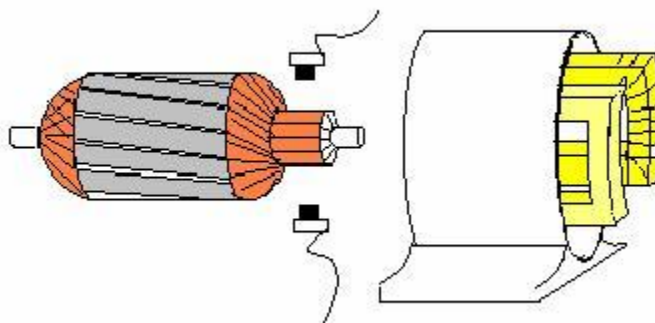
Aplicación

Aplicación similar al motor de arranque por repulsión y marcha por inducción.

1.7 EL MOTOR UNIVERSAL

Funcionan con c.a. y c.c. y son de fracción de 1 hp y son usados principalmente en aparatos electrodomésticos. El inducido es igual al de un motor de c.c. funciona a la misma velocidad con c.c. o c.a. La velocidad se puede regular por medio de reóstatos y bobinas de tomas múltiples devanadas en torno del campo. Como es un motor serie, la carga siempre debe estar conectada al motor.

La rotación se puede invertir cambiando la dirección de la corriente ya sea en el circuito de campo o en el inducido. El motor universal es el mismo motor serie de c.c. en el cual se ha alterado el diseño básico: Las pérdidas por histéresis se reducen empleando hierro al silicio laminado de alta permeabilidad; las pérdidas por corrientes parásitas se reducen al mínimo construyendo los circuitos magnéticos (estator , núcleo) con láminas de hierro - silicio especial; la reactancia del bobinado de campo se reduce empleando núcleos de polos cortos y bobinados de pocas vueltas; la reactancia del inducido se reduce utilizando bobinas compensadoras que se montan en el núcleo del estator.



Aplicación:

Licadoras, aspiradoras, batidoras, etc.

1.8 EL MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO

Los motores trifásicos son los aplicados en la industria por su gran eficiencia. **Un motor trifásico de igual potencia a uno monofásico tiene mayor eficiencia y menor tamaño.** La diferencia fundamental entre un motor trifásico y uno monofásico consiste en que en la carcasa o estator se alojan tres (3) bobinados (en estrella o triángulo) de trabajo (uno por cada fase) y además no poseen bobinado de arranque, ya que se ponen en marcha por sí solos. **Para potencias mayores a 2 hp es recomendable usar los trifásicos.**

Con respecto a los motores de gasolina o diesel, tienen las **siguientes ventajas:**

- La puesta en marcha es inmediata.
- Son más livianos (fácil transporte) y se acoplan fácilmente a cualquier clase de máquina.

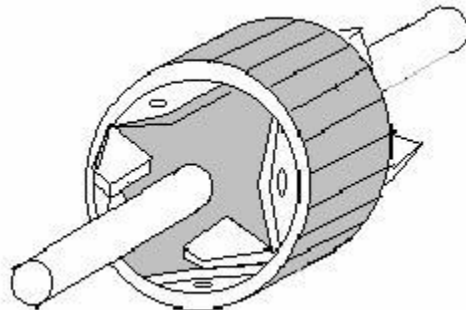
- *El arranque, parada y control es rápido y efectivo y es posible controlarlo remotamente.*
- *Tiene gran potencia de arranque.*
- *El funcionamiento y servicios de mantenimiento son seguros.*
- *Operan silenciosamente.*
- *Mantenimiento es muy poco y su vida es larga.*
- *Son compactos y ocupan un espacio muy limitado.*
- *Su costo de operación es más económico.*

Dentro de los motores sincrónicos existe el :

- a) Motor en jaula de ardilla y*
- b) Motor con rotor bobinado.*

1.8.1 MOTOR EN JAULA DE ARDILLA

Es un motor de inducción que tiene el rotor en jaula de ardilla como los monofásicos. Existen de jaula de ardilla sencilla y doble. En la figura se muestra este tipo de rotor.



A) PARTES DEL MOTOR

Las partes del motor, son las siguientes :

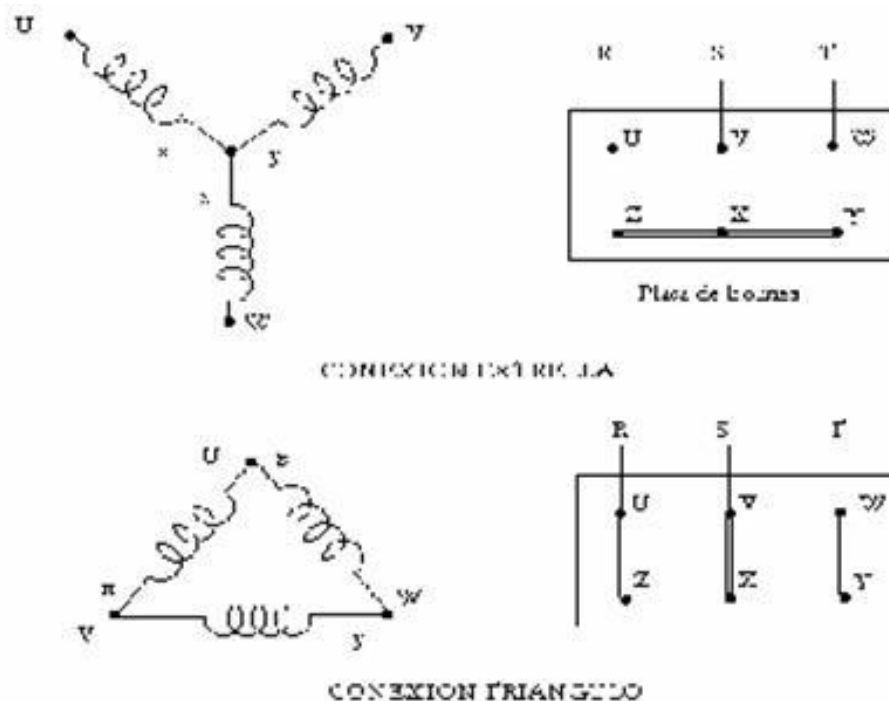
- **Carcasa** : se construye de varias formas según el tamaño del motor; la base forma parte integral de la carcasa para que el motor descansa bien asentado sobre su estructura.
- **Caja de bornes** : Se emplea para conectar los terminales de las bobinas y concentrar los conductores de alimentación.
- **Escudos** : Sirven para cerrar el motor y sostener el eje del motor por medio de sus cojinetes. Se unen a la carcasa por medio de tornillos de fijación.

- **Eje** : Es la parte donde se sostienen los componentes del rotor y además sirve para la fijación de la polea en uno de sus extremos y el ventilador en el otro.
- **Ventilador**: Viene colocado en uno de los extremos del eje y mantiene refrigerado el motor para evitar su recalentamiento.
- **Rotor**: Es sólido montado sobre el eje y es en forma de jaula de ardilla, puede ser sencillo o doble.
- **Estator**: Está formado por su núcleo y bobinado. El núcleo es laminado hecho de chapas laminadas y viene ranurado para alojar las bobinas. Las bobinas cubren el ranurado del estator y deben estar bien aisladas para asegurar el perfecto funcionamiento del motor.

B) CONEXIONES

Las conexiones básicas del bobinado del estator de un motor trifásico son en estrella o en triángulo, según las características del motor y el voltaje de la red.

En la figura se presentan estos dos tipos de conexiones y la conexión a realizar en la placa de bornes.



C) MOTOR DE DOS VELOCIDADES.

El motor de dos velocidades es con frecuencia una solución elegante y económica de problemas complejos. Según sea la naturaleza de la corriente, la relación de velocidades y las de potencias, estos motores tienen uno o dos bobinados.

Motor de un solo bobinado : *Es el más sencillo y más usado de los motores de dos velocidades, sus características son las siguientes:*

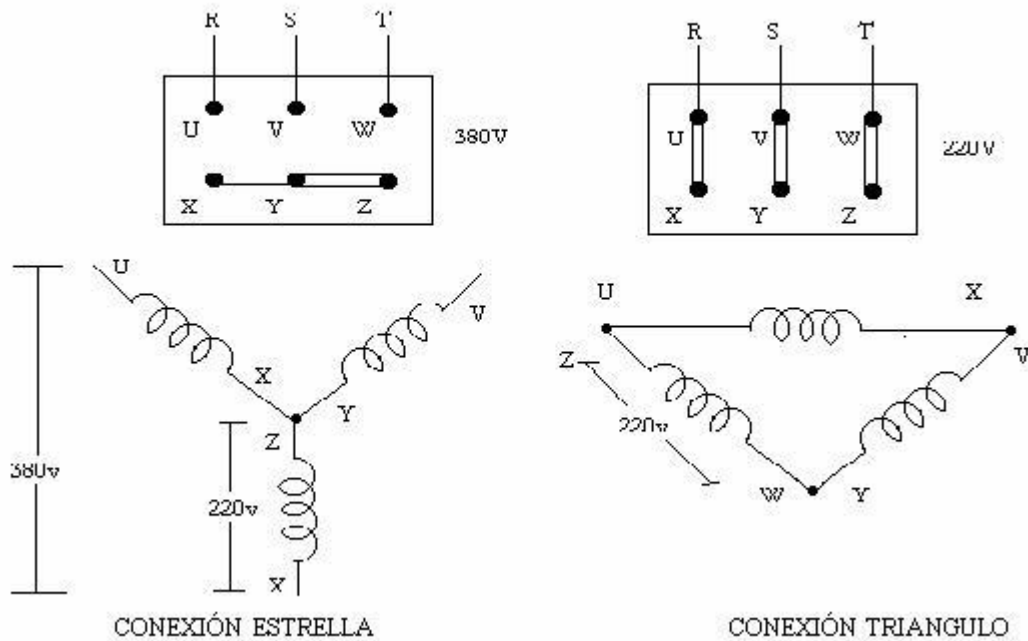
- *Velocidades en la relación de 1 a 2. Ejemplo: 3000 y 1500 rpm; 1500 y 750 rpm; 1000 y 500 rpm.*
- *Relación de potencias bien definidas para un tipo de motor y una gama de velocidades dada. Ejemplo: 4hp y 1500 rpm; 2 hp y 750 rpm.*
- *Una sola tensión de alimentación.*

Motor de dos bobinados: *Cuando la aplicación prevista requiere una relación diferente de velocidades y potencias se adopta un motor de dos bobinados, cada uno de los cuales corresponde a una polaridad y son alimentados alternativamente según la velocidad que se desee. Sus características son :*

- *Las potencias y velocidades pueden elegirse según sea su aplicación. Ejemplo: 3 hp a 3000 rpm o ½ hp a 500 rpm; 3hp a 1500 rpm o 2hp a 1000 rpm.*
- *Una o dos tensiones de alimentación*
- *Corriente de arranque mayor a la de un motor con un solo bobinado.*

Existen también motores de doble tensión cuyo bobinado de estator es doble. Ejemplo: 220V /440. Para conectar el motor a 220V sus bobinados se conectan en paralelo y para hacerlo a 440 V sus bobinados se conectan en serie.

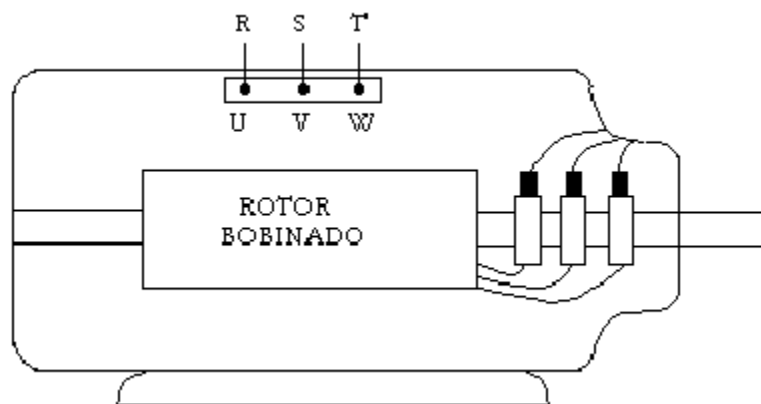
CONEXIÓN DE UN MOTOR TRIFASICO 220/380v

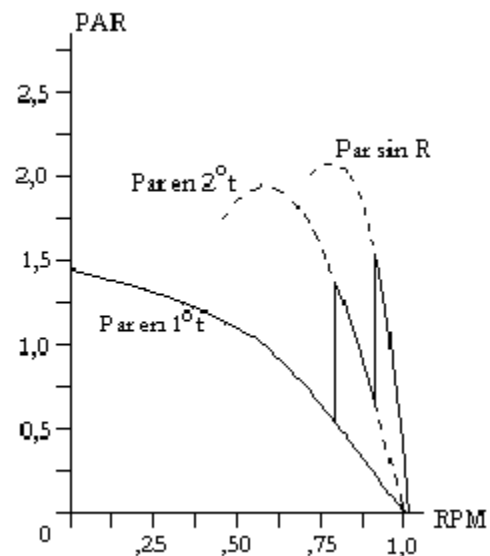
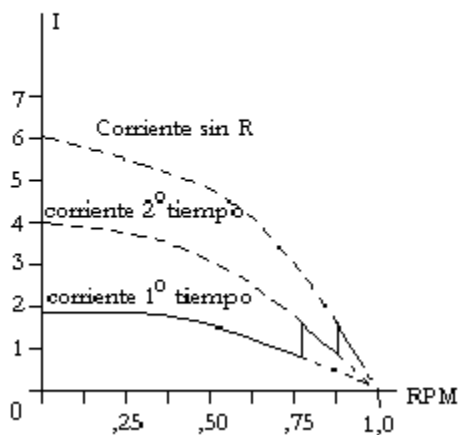
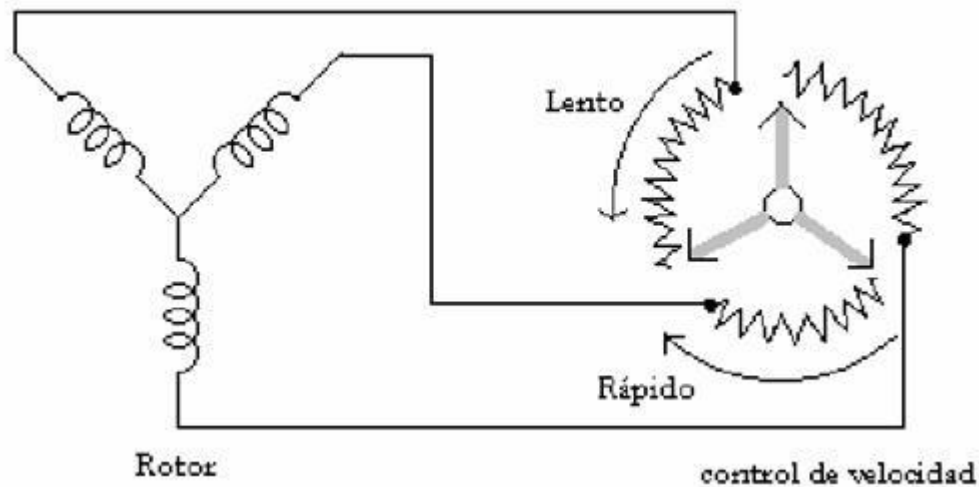


1.8.3. MOTOR CON ROTOR BOBINADO

Es un motor que tiene estator igual al de jaula de ardilla y el rotor viene bobinado en estrella cuyos terminales van conectados a tres (3) anillos colectores rozantes fijados en el eje del motor. Los anillos colectores se conectan a un control de velocidad conformado por resistencias rotatorias y hace el oficio de arrancador.

La puesta en marcha se hace en 2,3,5 tiempos, según el caso por eliminación de las resistencias intercaladas en el circuito del rotor .

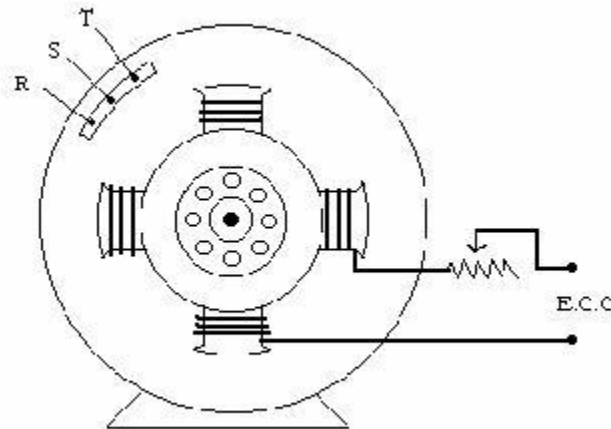




1.9 MOTOR TRIFÁSICO SINCRÓNICO

Contrario a los anteriores motores trifásicos, el motor trifásico sincrónico tiene la velocidad del rotor igual a la velocidad del campo magnético del estator, esto es, su deslizamiento es cero.

Su estator es igual al de jaula de ardilla, pero su rotor está compuesto por un bobinado de polos salientes y en su interior otro en jaula de ardilla.



Inicialmente se aplica la corriente trifásica al bobinado del estator y con el rotor en jaula de ardilla arranca funcionando como motor asincrónico, o sea, V_r menor a V_s . Luego se conecta corriente continua al bobinado del rotor de polos salientes arrastrando la velocidad del campo del estator al rotor por tener polos fijos igualando de esta forma las velocidades y volviéndose sincrónico. La c.c. es aplicada al rotor por medio de los dos anillos rozantes y sus correspondientes escobillas.

Características :

- **Velocidad rigurosamente constante y funcionamiento estable si la carga no sobrepasa cierto límite. De lo contrario, se inmoviliza rápidamente y el estator puede tomar corrientes peligrosas para su bobinado.**
- **La velocidad es función de la frecuencia de la red y del número de polos del estator.**

$$rpm = 120f/p$$
donde f = frecuencia de la red, p = No de polos
- **Colocando un reóstato en el circuito del rotor se puede sobre excitar y con ello mejorar el factor de potencia de la red. Hace las veces de un condensador y por esos se le llama condensador sincrónico.**
- **Se usa cuando se requiere una velocidad rigurosamente constante como en telares, máquinas - herramientas, etc.**

2. CONTROL DE MOTORES

2.1 CARACTERÍSTICAS DE UN MOTOR

El motor constituye el corazón de una planta industrial de cualquier empresa productiva y por tanto, todo técnico o ingeniero debe conocer sus características, su forma de arrancado y sus protecciones.

2.1.1 PLACA CARACTERÍSTICA

De las cosas importantes que se debe tener claridad es sobre el significado de los datos en la placa característica del motor.

MOTOR TRIFÁSICO EN JAULA DE ARDILLA

220 - 380v		5,38 - 9,3 AMP
PH = 3	Hz = 60	COS ϕ = 0,85
RPM = 1710	HP = 3	KW = 2,2
CODIGO: B		

Su interpretación es la siguiente:

Tensión aplicada en triángulo	= 220 V
Tensión aplicada en estrella	= 380 V
Corriente consumida en estrella	= 5,38 Amp.
Corriente consumida en triángulo	= 9,3 Amp.
Número de fases de motor	= 3 (trifásico)
Frecuencia en ciclos por segundo	= 60 Hz.
Factor de potencia del motor	= 0,85
RPM del motor con carga	= 1710
Potencia en caballos fuerza	= 3 HP
Potencia en Kilovatios	= 2,2 Kw
ipo de motor trifásico	= Jaula de ardilla, código B.

2.1.2 INTERPRETACIÓN

Con esta información se puede calcular su eficiencia, deslizamiento y par motor así:

Potencia de salida = 3 HP = 3 x 746 = 2238 W.

Potencia de entrada $= 1,73 \times E \cdot I \cos\phi$
 $= 1,73 \times 220 \times 9,3 \times 0,85 = 3008,6 \text{ W}$

Eficiencia $= 2238 / 3008,6 = 74,4\%$

Deslizamiento $= (1800 - 1710) / 1710 \times 100\% = 5,3\%$

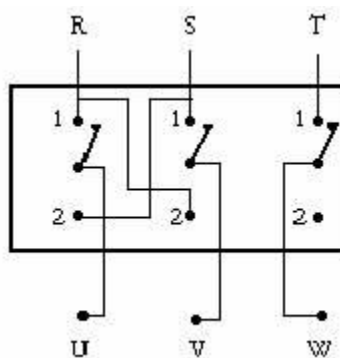
Par motor $= 746 \times \text{HP} / \text{RPM} = 746 \times 3 / 1710 = 1,31 \text{ m-kg.}$

2.2 INVERSIÓN DE GIRO

El sentido de rotación de un motor trifásico se invierte intercambiando dos fases cualesquiera en los terminales del motor.

Sentido directo	Sentido inverso
$R \rightarrow U$	$R \rightarrow V$
$S \rightarrow V$	$S \rightarrow U$
$T \rightarrow W$	$T \rightarrow W$

En la figura se diagrama el control manual de inversión pasando el conmutador de la posición 1 a la posición 2. Bien entendido es que el cambio de rotación se hace cuando el motor está parado.



2.3 ARRANQUE DE UN MOTOR

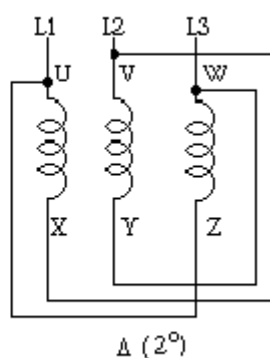
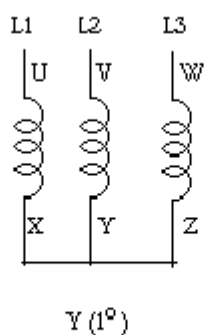
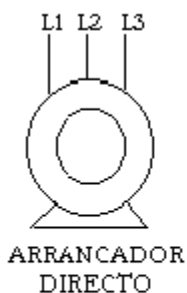
Arranque directo: El arranque de los motores de baja potencia se hace directamente conectando el estator a la red por medio de un interruptor tripolar .

Arranque estrella triángulo: Consiste en arrancar el motor en estrella que se consume menos corriente y luego pasarlo a conexión triángulo cuando la velocidad sea la nominal. Se realiza en dos tiempos.

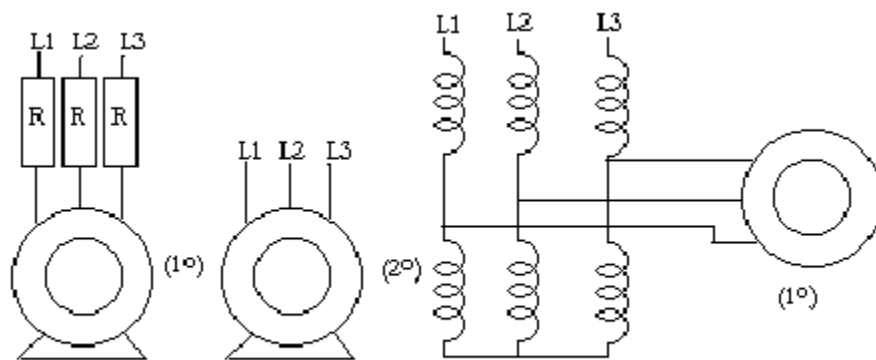
Arranque por resistencias: En el momento del arranque se insertan resistencias en serie en cada fase del estator. Luego se ponen en corto circuito tan pronto como la velocidad sea normal.

Arranque por autotransformador: El autotransformador comprende varias tomas intermedias y el arranque se realiza en tres (3) tiempos.

1. Conexión del autotransformador en estrella al motor. Se arranca a tensión reducida.
2. Se abre el punto común del bobinado del autotransformador.
3. Se desconecta el autotransformador y el motor trabaja a plena tensión.



ARRANCADOR ESTRELLA - TRIÁNGULO



ARRANCADOR POR RESISTENCIA

2.3.1 CARACTERÍSTICAS DE ARRANQUE

Las siguientes son las características según el tipo de arranque del motor:

Corriente de arranque:

Directo: 4 a 8 veces la corriente nominal.
Estrella - triángulo : 1,3 a 2,6 veces I_n .
Resistencia : 4,5 veces la I_n .
Autotransformador: 1,7 a 4 veces I_n .

Par de arranque

Directo : 0,6 a 1,5 veces del nominal.
Estrella - triángulo : 0,2 a 0,5 veces.
Resistencia : 0,6 a 0,85 Veces.
Autotransformador : 0,4 a 0,85 Veces.

Duración del arranque:

Directo : 2 a 3 segundos.
Estrella - triángulo : 7 a 12 segundos
Autotransformador: 7 a 12 segundos.

Ventajas:

Directo: Arranque simple y poco costoso.
Estrella - triángulo : Arrancador relativamente económico.
Resistencia : Posibilidad de arreglar los valores en el arranque.
Autotransformador: Buena relación par- corriente de arranque.

Inconvenientes

Directo: Corriente de arranque elevada.

Estrella- triángulo: Par de arranque débil y corte de la alimentación en el paso $Y \rightarrow \Delta$

Resistencia: Para un mismo par de arranque, la corriente de arranque por este método es mayor.

Autotransformador: Es el más costoso de los métodos de arranque.

Aplicaciones

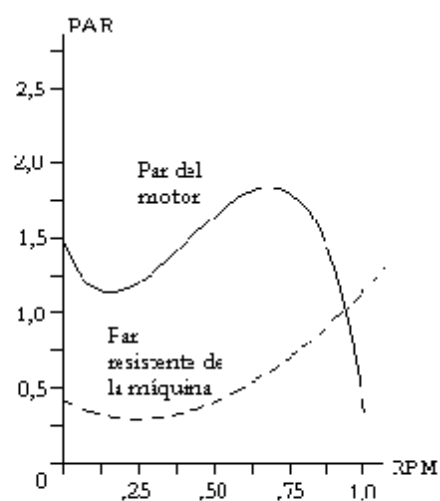
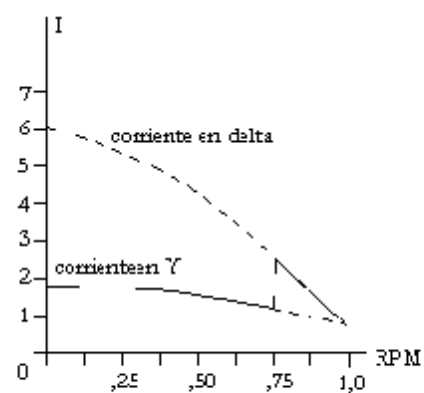
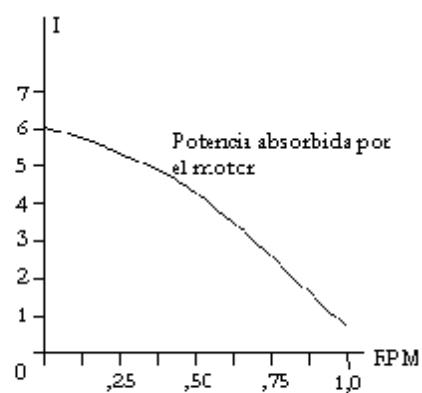
Directo: Pequeñas máquinas de igual arranque a plena carga.

Estrella - triángulo: Máquinas de arranque en vacío, ventiladores, bombas centrífugas de poca potencia.

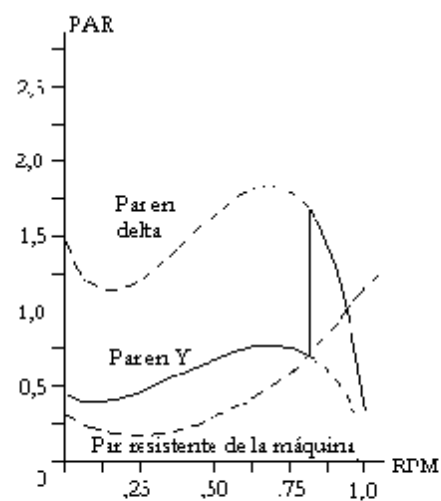
Resistencia: Máquinas de fuerte potencia o fuerte inercia donde la reducción de la corriente de arranque es un criterio importante.

2.3.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS

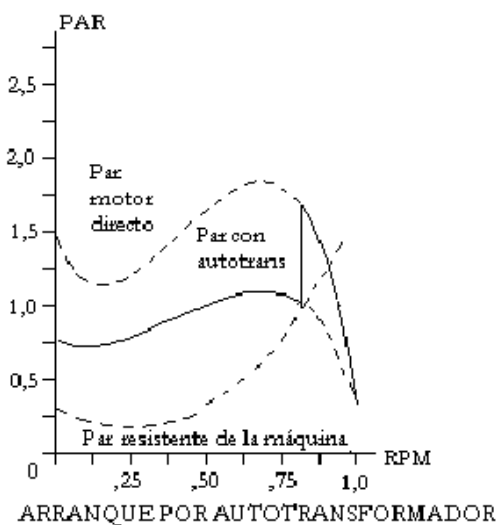
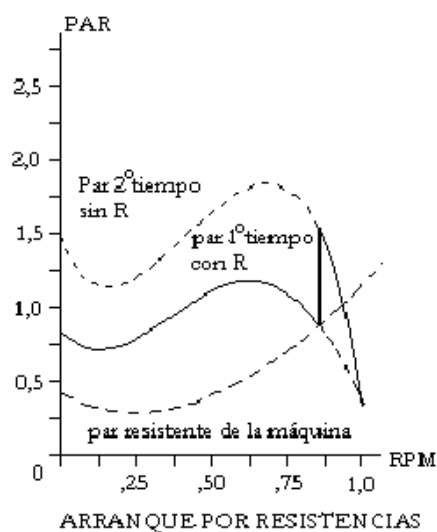
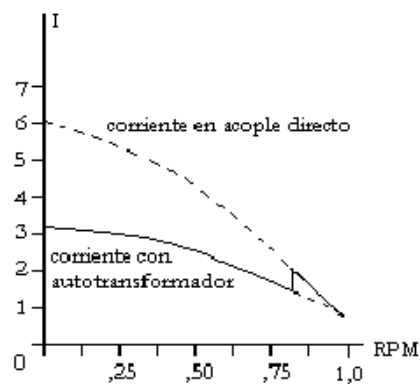
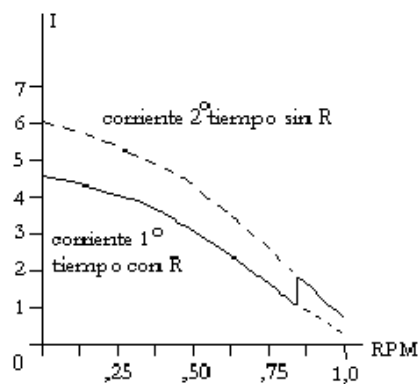
Las curvas de corriente y par en los diferentes tipos de arranque se muestran a continuación :



ARRANQUE DIRECTO



ARRANQUE ESTRELLA - TRIANGULO



2.4 CONTROL CON CONTACTORES

El control de un motor, ya sea un simple interruptor de volquete o un complejo sistema con componentes tales como relevadores, controles de tiempo e interruptores, controladores, compensadores, controla alguna operación del motor eléctrico. Por lo tanto, al seleccionar e instalar un

equipo de control para un motor se debe considerar una gran cantidad de diversos factores a fin de que aquel pueda funcionar correctamente junto a la máquina para la que se diseña.

Algunos factores a considerar son las siguientes:

Arranque, parada, inversión de rotación, marcha, control de velocidad, seguridad del operador (dispositivos pilotos), protección contra daños, mantenimiento de los dispositivos de arranque (fusibles, interruptores, cortacircuitos).

El motor se puede controlar desde un punto de lejano automáticamente usando estaciones de botones asociados con contactores (interruptores magnéticos). Si el motor se controla automáticamente pueden usarse los siguientes dispositivos:

- a) **Interruptor de flotador:** Para controlar el nivel de un tanque abriendo o cerrando unos contactos que puede accionar una bomba. También para abrir o cerrar una válvula para controlar un fluido.*
- b) **Interruptor de presión:** Controla la presión de los fluidos. Permite arrancar un compresor de aire de acuerdo a la demanda de presión de aire que exista.*
- c) **Temporizador:** Para controlar un periodo de tiempo diferido de cerrado o abierto.*
- d) **Termostato:** Interruptor que funciona por la acción de la T.*
- e) **Interruptor de límite:** Se usan para parar máquinas, equipo y productos en proceso, durante el curso.*

2.4.1 ARRANQUE Y PARADA

Se deben considerar las siguientes condiciones:

- Frecuencia del arranque y la parada.*
- Arranque liviano o pesado*
- Arranque rápido o lento. (debe ser lento e ir aumentando la velocidad).*
- Arranque y parada manual o automática.*
- Parada rápida o lenta. (la parada debe ser rápida).*
- Paradas exactas (Ej. En los ascensores).*
- Frecuencia en la inversión de rotación.*

Respecto al control de velocidad se debe considerar las siguientes condiciones:

- Velocidad constante (bomba de agua).*
- Velocidad variable (grúa)*

- Velocidad ajustable.
- Velocidad múltiple (torno revolver).

2.4.2 ARRANCADORES MANUALES

Se usan para arrancar pequeños motores monofásicos de c.a. o c.c. menores de 1 hp. Estos arrancadores tienen protección térmica contra sobrecarga. Cuando ocurre la sobrecarga la palanca se mueve automáticamente dejando los contactos abiertos. Los contactos no pueden volver a cerrarse hasta que el elevador de sobrecarga se restablezca manualmente a la posición ON.

La corriente de arranque no disparará al arrancador. El térmico es de aleación fusible, que con la sobre corriente continua eleva la temperatura del interruptor liberando el trinquete y disparando el mecanismo interruptor.

Se pueden usar arrancadores manuales del tipo de botones (start, stop) para motores de c.c. hasta 2 hp, motores monofásicos hasta 5 hp y motores trifásicos hasta 7 ½ HP.

2.4.3 ARRANCADORES MAGNETICOS

Emplean energía electromagnética para cerrar los interruptores. Se utilizan ampliamente porque se pueden controlar desde un punto alejado. Generalmente estos arrancadores se controlan por medio de una estación de botones, in interruptor del flotador o relevos de control de tiempo. Se fabrican en muchos tamaños como el 00 (10 Amp) hasta el tamaño 8 de 1350 Amp. a cada tamaño se le ha asignado cierta capacidad en hp. Los arrancadores existen de 2 polos para motores monofásicos y e 3 polos para trifásicos.

Los motores se pueden sobrecargar si el voltaje de entrada está bajo o si se abre una línea en el sistema polifásico (ya que funcionaría como monofásico). Bajo cualquier condición de sobrecarga, un motor toma una corriente excesiva que causa el sobre calentamiento.

Como el aislante del devanando del motor se deteriora cuando se somete a sobre calentamiento, existen límites establecidos para la temperatura de operación del motor. Para protegerlo contra el sobre calentamiento se emplean relevadores de sobrecarga en un arrancador para limitar cierto valor la cantidad de corriente que toma. Esta es la protección contra sobrecarga o de marcha.

Los relevadores (magnéticos o térmicos) se sobrecargan actúan para desconectar el arrancador y parar el motor cuando hay sobre corriente.

2.4.4 RELEVADORES Y CONTACTORES

Los relevadores magnéticos se utilizan como dispositivos auxiliares en los circuitos de control para interrupción, en las bobinas de los arrancadores grandes y para controlar motores pequeños u otras cargas tales como calefactores eléctricos, luces piloto o señales audibles. No proporcionan protección para sobrecarga a los motores y ordinariamente se usan en sistemas de control de dos alambres. Los contactos se usan con más frecuencia para controlar circuitos que para accionar circuitos.

Los contactores son interruptores accionados mediante electromagnetismo que proporcionan un medio seguro y conveniente para interrumpir y conectar circuitos derivados. La diferencia principal entre un contactor y un arrancador es que el primero no tiene relevadores de sobrecarga. Los contactores se emplean para interrumpir cargas como alumbrado, calefacción y para controlar motores de c.a. cuando la protección contra sobre carga se instala separadamente.

Los contactores y arrancadores tienen para la extensión del arco que se forma al abrirse los contactos unas bobinas de extensión de alambre grueso que se montan sobre los contactos en serie con la carga.

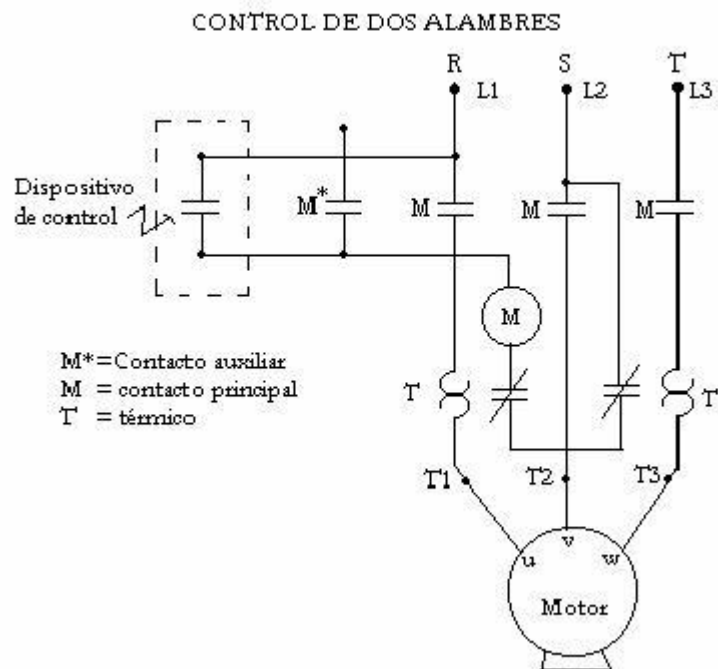
2.4.5 ESTACIONES DE BOTONES

Es un dispositivo que controla un motor al oprimir un botón. Los contactos del botón son generalmente dobles, de tal manera, que al oprimir el botón se cierra un contacto pero se abre otro. La estación de botones se puede montar directamente junto al controlador o a cierta distancia de éste si se desea. La corriente que interrumpe una estación de botones es pequeña. La estación de botones puede controlar el arranque y parada de un motor, marcha hacia delante, marcha hacia atrás, rápido o lento.

2.4.6 CONTROL DE DOS ALAMBRES

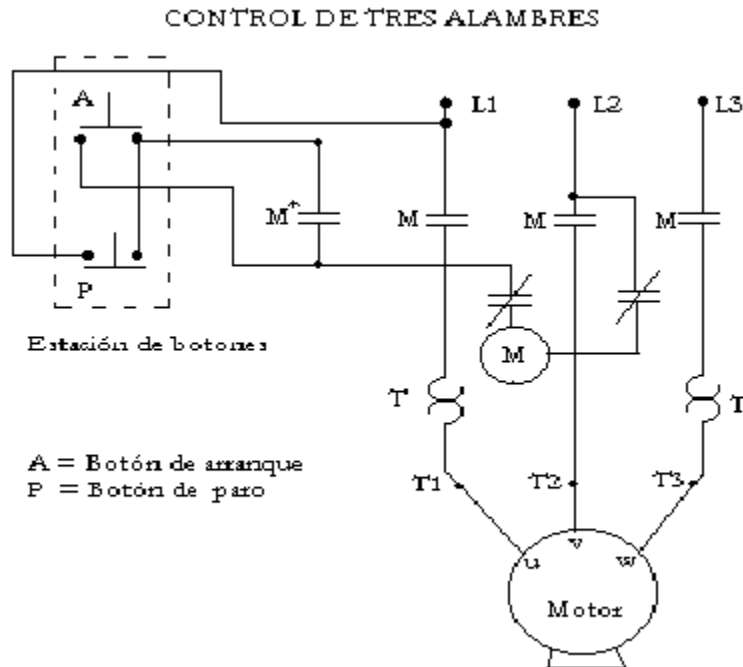
Dispositivos de control: Termostato, interruptor de flotador, interruptor de presión etc. El arrancador se desconecta cuando ocurre una falla de voltaje y se conecta tan pronto como se restablece la energía. Tiene la ventaja de que el operario no tendrá que arrancar de nuevo para la operación de la máquina. Los sopladores, extractores y ventiladores son ejemplos de aplicación. Tiene la desventaja de que los materiales en producción se

pueden dañar al arrancar repentinamente la máquina cuando se restablece la energía.



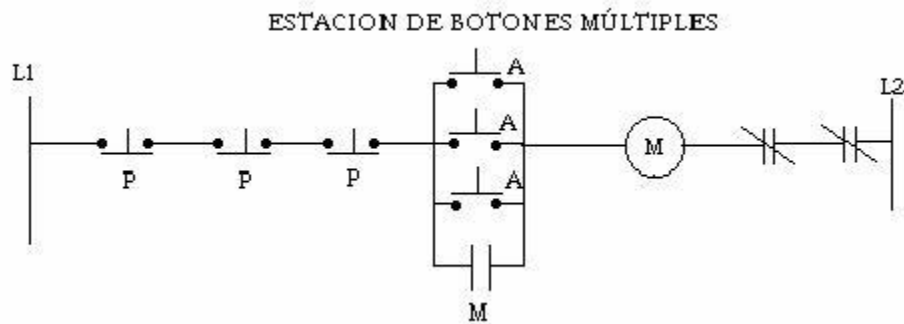
2.4.7 CONTROL DE TRES ALAMBRES

El arrancador se desconectará al ocurrir una falla de voltaje, pero no se conectará automáticamente al restablecerse la energía. Un operario tendrá que oprimir el botón de arrancar para reanudar la producción.



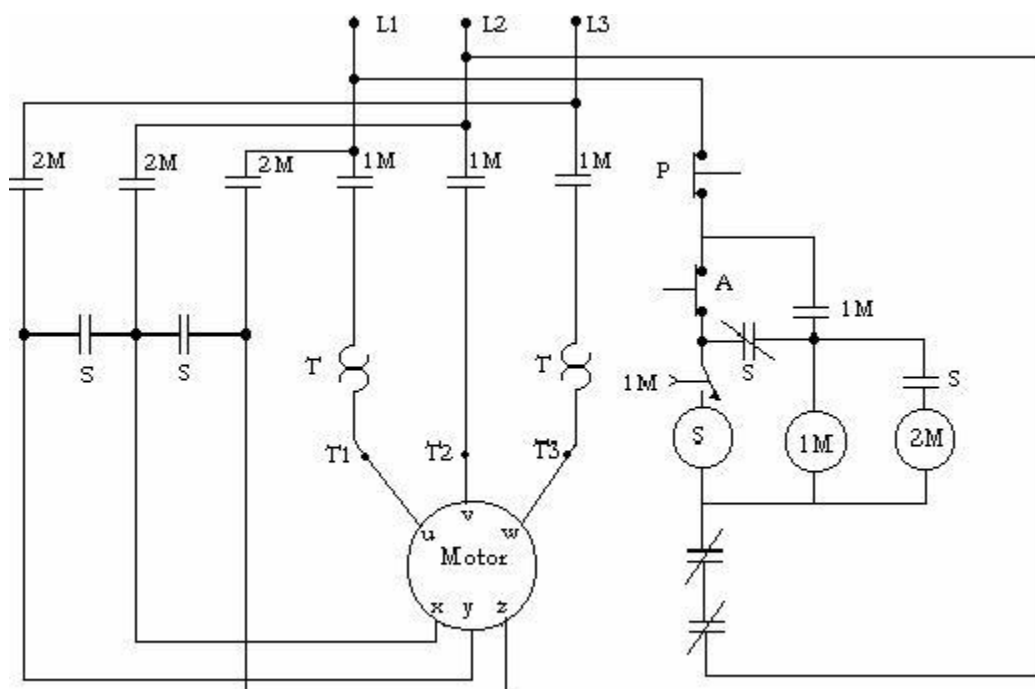
2.4.8 ESTACIONES DE BOTONES MÚLTIPLES

El circuito de control de botones de tres alambres puede extenderse mediante el uso de varias estaciones de botones para control. El motor se puede parar o arrancar desde cierto número de estaciones separadas, conectando en paralelo los botones de arranque y en serie los de parada



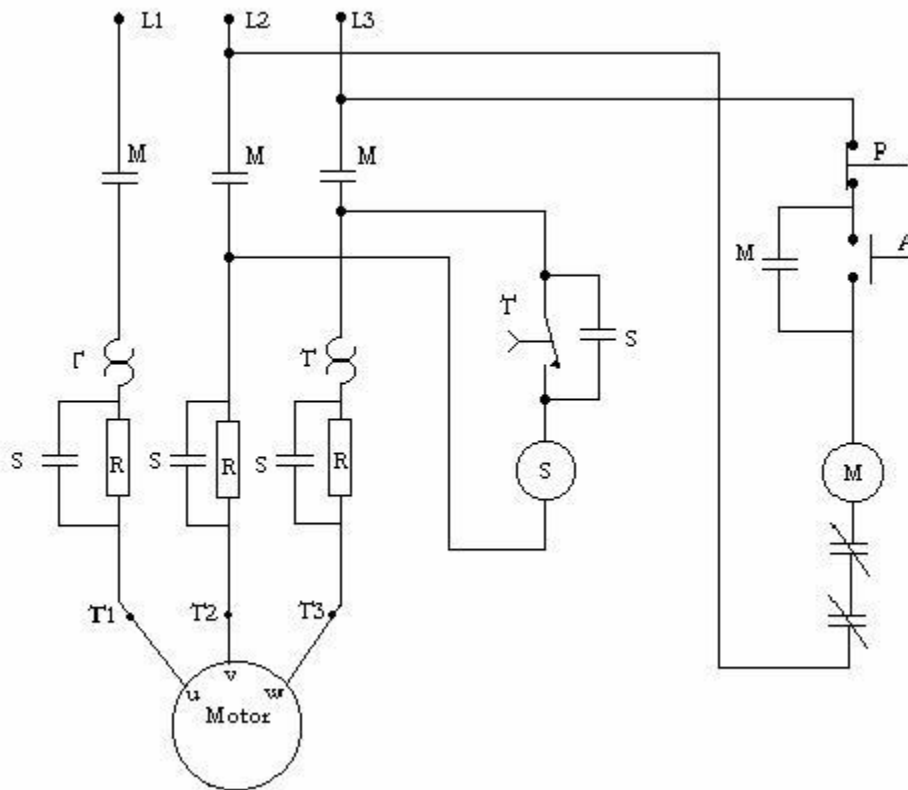
2.4.9 ARRANCADOR REVERSIBLE

Se usan para inversión de marcha de los motores trifásicos y monofásicos. Se construye usando dos contactores y una estación de botones



2.4.11 ARRANCADORES DE RESISTENCIAS

Se arranca el motor mediante la conexión de una resistencia en serie con la línea del motor. Por lo tanto, la velocidad y la corriente de arranque se reducen y las resistencias se pueden desconectar cuando el motor alcance cierta velocidad.



2.5. INSTALACIÓN DE MOTORES

Para instalar un motor se debe seleccionar:

- El fusible*
- El térmico del contactor*
- El calibre de los conductores*
- El tamaño del conduit*
- El interruptor de seguridad.*

2.5.1 ELECCIÓN DE FUSIBLES

Motor trifásico en jaula de ardilla y sincrónico.

- *Con letra de código A: Capacidad de corriente no inferior al 150% de la corriente a plena carga.*
- *Con letra de código de la B a la E: Capacidad de 250%.*
- *Con letra de código de la F a la V: Capacidad de 300%.*

Motor con rotor bobinado

- Capacidad de 150%.

2.5.2 ELECCIÓN DEL CONTACTOR

Capacidad de corriente del 125%.

Valores comerciales:

Fusibles en Amp: 15, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300, 350, 400, 450.

Térmicos en Amp: 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 125, 150, 175, 200, 225.

2.5.3 ELECCIÓN DE CONDUCTORES

Los conductores deben tener una capacidad de corriente no inferior al 125% de la corriente a plena carga.

No AWG	14	12	10	8	6	4	3	2	1	0	2/0	3/0	4/0
AMPER	15	20	30	40	55	70	80	95	110	125	145	165	195

2.5.4 ELECCIÓN DEL CONDUIT

	Diámetro en pulgadas								
No	NUMERO DE CONDUCTORES POR DUCTO								
AWG	1	2	3	4	5	6	7	8	9
14	1/2	1/2	1/2	1/2	3/4	3/4	3/4	1	1
12	1/2	1/2	1/2	3/4	3/4	1	1	1	1 1/4
10	1/2	1/2	3/4	3/4	1	1	1	1 1/4	1 1/4
8	1/2	3/4	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4
6	1/2	1	1	1 1/4	1 1/2	1 1/2	2	2	2
4	1/2	1 1/4	1 1/4	1 1/2	2	2	2	2	2 1/2
3	3/4	1 1/4	1 1/4	1 1/2	2	2	2	2 1/2	2 1/2
2	3/4	1 1/4	1 1/4	1 1/2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
1	3/4	1 1/2	1 1/2	2	2	2 1/2	2 1/2	3	3
0	1	1 1/2	2	2	2 1/2	2 1/2	3	3	3
2/0	1	2	2	2 1/2	2 1/2	3	3	3	3 1/2
3/0	1	2	2	2 1/2	3	3	3	3 1/2	3 1/2
4/0	1 1/4	2	2	2 1/2	3	3	3 1/2	3 1/2	4

2.5.5 ELECCION DEL INTERRUPTOR DE SEGURIDAD

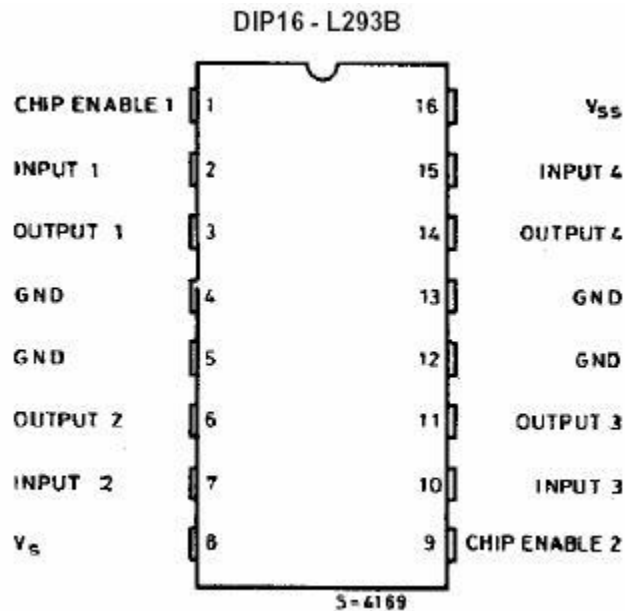
La siguiente tabla relaciona la capacidad en Amperios que debe tener un interruptor de seguridad tripolar de 220V en función de la capacidad en H.P. del motor.

AMPERIOS	CAPACIDAD EN HP	
	NORMAL	MAXIMO
30	3	7 ½
60	7 ½	15
100	15	30
200	25	50
400	50	100

3. CONTROLES ELECTRÓNICOS

3.1. USO DE DRIVER'S

Controlar motores DC utilizando microcontroladores generalmente se requiere de drivers. Uno de ellos puede ser el L293B que tiene la siguiente configuración :



Descripción: El driver L293B tiene cuatro canales capaz de proporcionar en cada una de sus salidas hasta 1 amperio y dispone de entrada de alimentación separada para cada uno de ellos.

Funcionamiento: Cada canal o driver es controlado por medio de una señal de control compatible TTL (no superior a 7V) y se habilitan de dos en dos por medio de las señales de control EN1 (canal 1 y 2) y EN2 (canal 3 y 4). En la siguiente tabla describe el comportamiento de las salidas referente a sus entradas.

ENn	INn	OUTn
H	H	H
H	L	L
L	H	Z
L	L	Z

H= Nivel Alto "1" L= Nivel Bajo "0" Z = Alta Impedancia

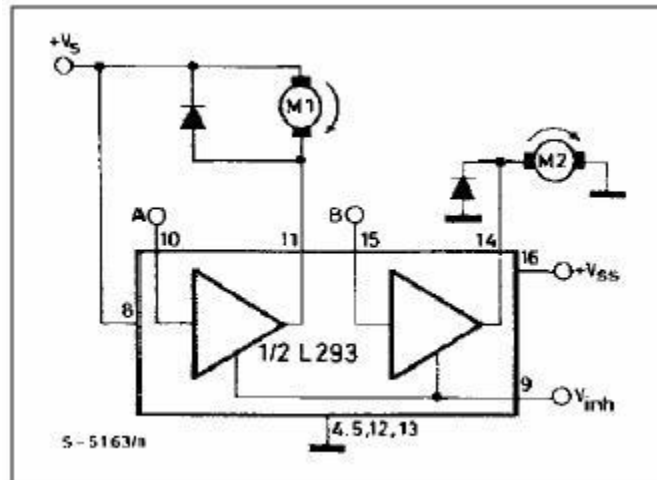
Así pues, vemos que poniendo a nivel alto la entrada de habilitación "EN" del driver, la salida de este "OUT" pasa de alta impedancia al mismo nivel que se encuentre la entrada del driver "IN" pero amplificado en tensión y en corriente, siendo esta de 1A máximo. La tensión de alimentación del circuito integrado no es la misma que se aplica a las carga conectada a las salidas

de los drivers, y para estas salidas se a de alimentar el driver por su patita número 8 (Vs), la tensión máxima aplicable a estas patitas es de 36V

Como este integrado no dispone de disipador, se recomienda hacer pasar una pista ancha de circuito impreso por las patitas de masa que junten todas estas y al mismo tiempo haga de pequeño disipador térmico, aunque para grandes cargas lo mejor es usar un disipador como el mostrado en la siguiente figura.

Aplicación práctica: Con un L293B se puede tener control bidireccional con 2 motores o control unidireccional con 4 motores.

Control Unidireccional: En la siguiente figura se presentan dos formas de conectar un motor para control unidireccional, M1 se activa al poner la entrada del driver conectado a este, a nivel bajo 0, mientras que M2 se activa al poner la entrada del driver a nivel alto 1 y se para al ponerla a nivel bajo 0.

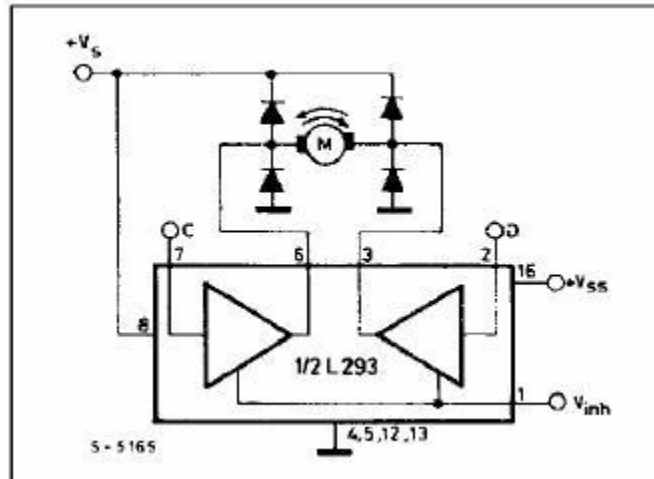


La entrada **enable** es como un interruptor general y deberá ponerse a nivel alto 1 para poder operar con los drivers que controla, o a nivel bajo 0 si se quiere desconectar el control de estos.

Vs será la tensión de alimentación necesaria para los motores.

Los **diodos 1N4007** son para proteger el circuito de los picos de arranque y parada de los motores debido a la corriente inversa inducida por estos.

Control Bidireccional: En el siguiente circuito se presenta el modo de conectar un motor para permitir controlarlo tanto hacia delante como hacia atrás.



Para tener el control de dos direcciones o bidireccional se usan **dos drivers** del L293b conectando sus salidas a los polos del motor, entonces podremos cambiar la polaridad de alimentación del motor con tan solo cambiar de estado las entradas de los drivers.

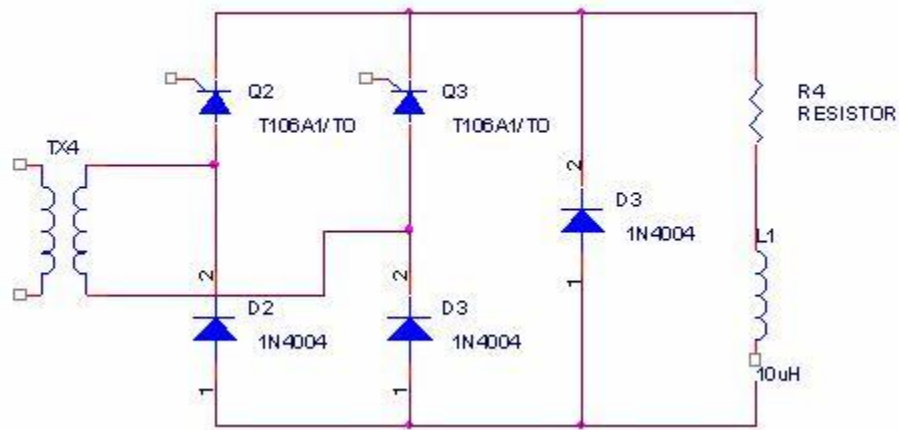
Por ejemplo, para que el motor **gire hacia la derecha** se pone la entrada C a nivel alto 1 y D a nivel bajo 0 y para hacer **girar el motor a la izquierda** se tiene que invertir las señales de entrada de tal manera, la entrada C a nivel bajo 0 y D a nivel alto 1. Los diodos son como en el caso anterior para proteger el integrado de corrientes inversas.

3.2 EL SEMICONVERTIDOR

Un control de la velocidad para un motor DC se realiza variando el ángulo de disparo de los tiristores (T1 y T2) con el fin de variar el valor de la componente dc de la señal rectificada que se aplicará al motor. Para este semiconvertidor el valor de DC de la señal de salida esta dado por la fórmula:

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Donde **V_m** es el valor pico de la señal de entrada y **α** es el valor del ángulo de disparo de los tiristores ,así podemos ver que si tenemos como **ángulo de disparo 0°** el valor DC de la señal de salida será máxima y se tendrá así la **máxima velocidad**, en caso contrario, si el **ángulo de disparo es 180°** tendremos que el valor DC de la señal será 0 (cero) y **la velocidad será nula**.



Un circuito detector de cruce por cero debe avisar al microcontrolador este momento por un pin de entrada (P1.4) y además detectar el nivel de la señal AC por otro pin de entrada (P1.3) con la señal del comparador LM339.

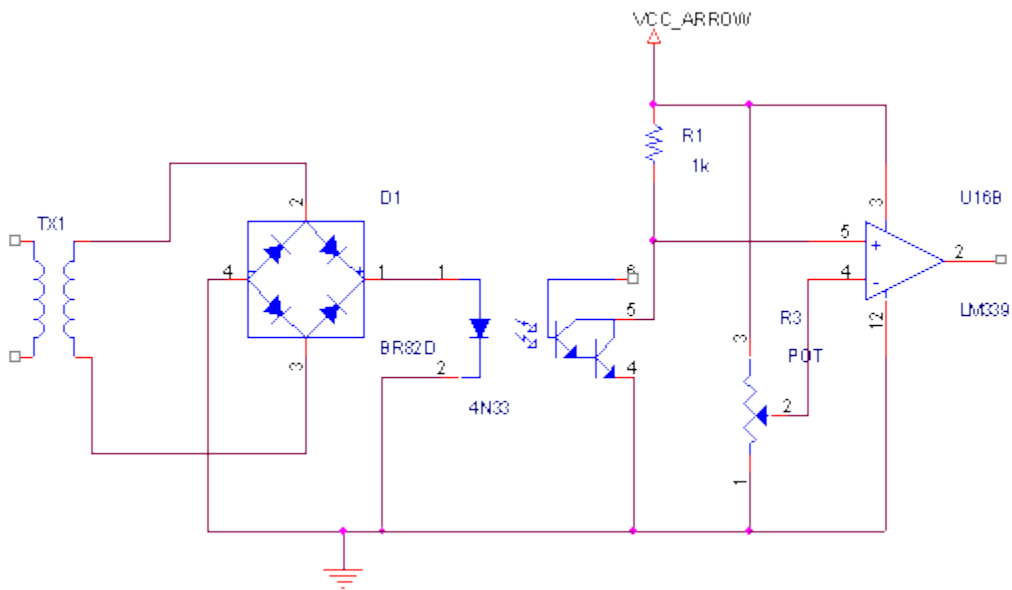


FIGURA 2

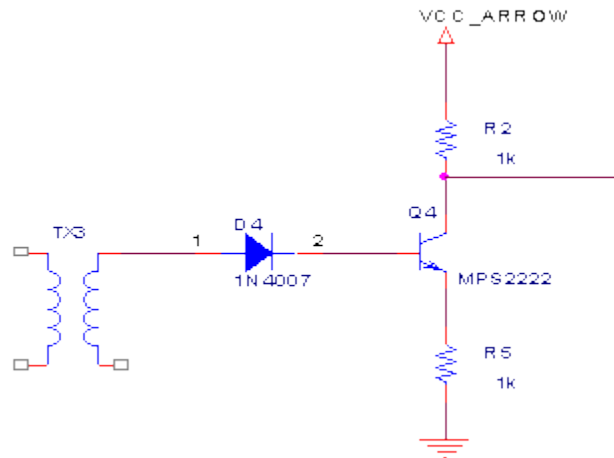


FIGURA 3

El microcontrolador debe indicar la polaridad seleccionada (P1.0) y los dos disparos a los tiristores (pines de salida P1.1 y P1.2).

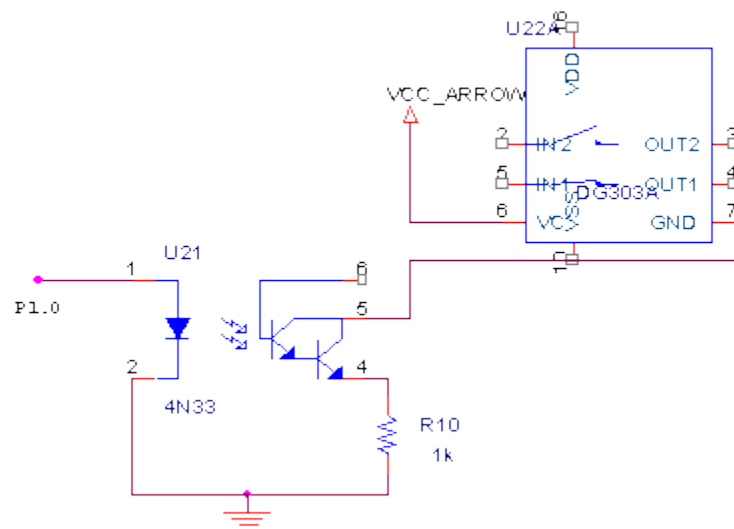


FIGURA 4

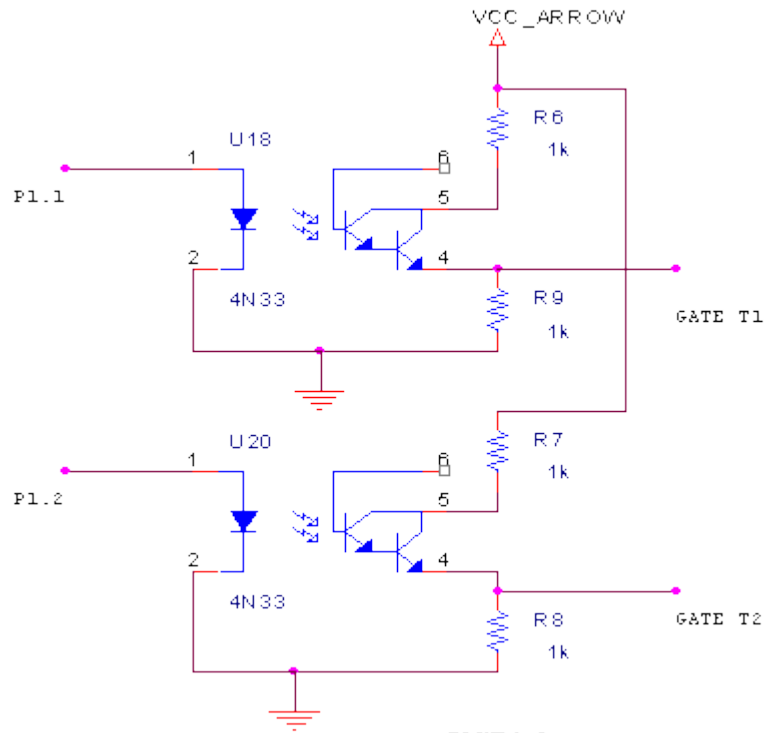


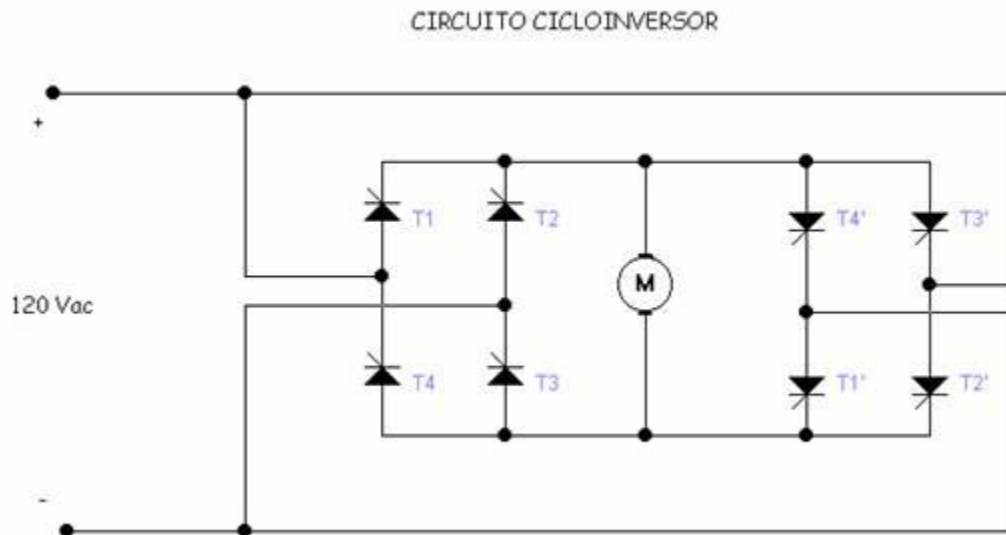
FIGURA 5

Se utilizan los tiristores T106 y diodos 1N4007, además de protección contra dv/dt con resistencias de 39Ω y condensadores de $0.1\mu F$. También se conecta una resistencia de carga de 270Ω para obtener la señal deseada y poderla transmitir al comparador de voltaje.

El circuito de disparo puede también estar basado en el uso de opto-triac para cada una de las gates como el MOC3011 con resistencia de gate de 100Ω y resistencia para el diodo de $1K\Omega$.

3.3 EL CICLOCONVERSION

Un microcontrolador genera los pulsos de disparo a los tiristores de la etapa de potencia. Este cicloinversor está diseñado para reducir la la frecuencia de la red a aproximadamente 20Hz

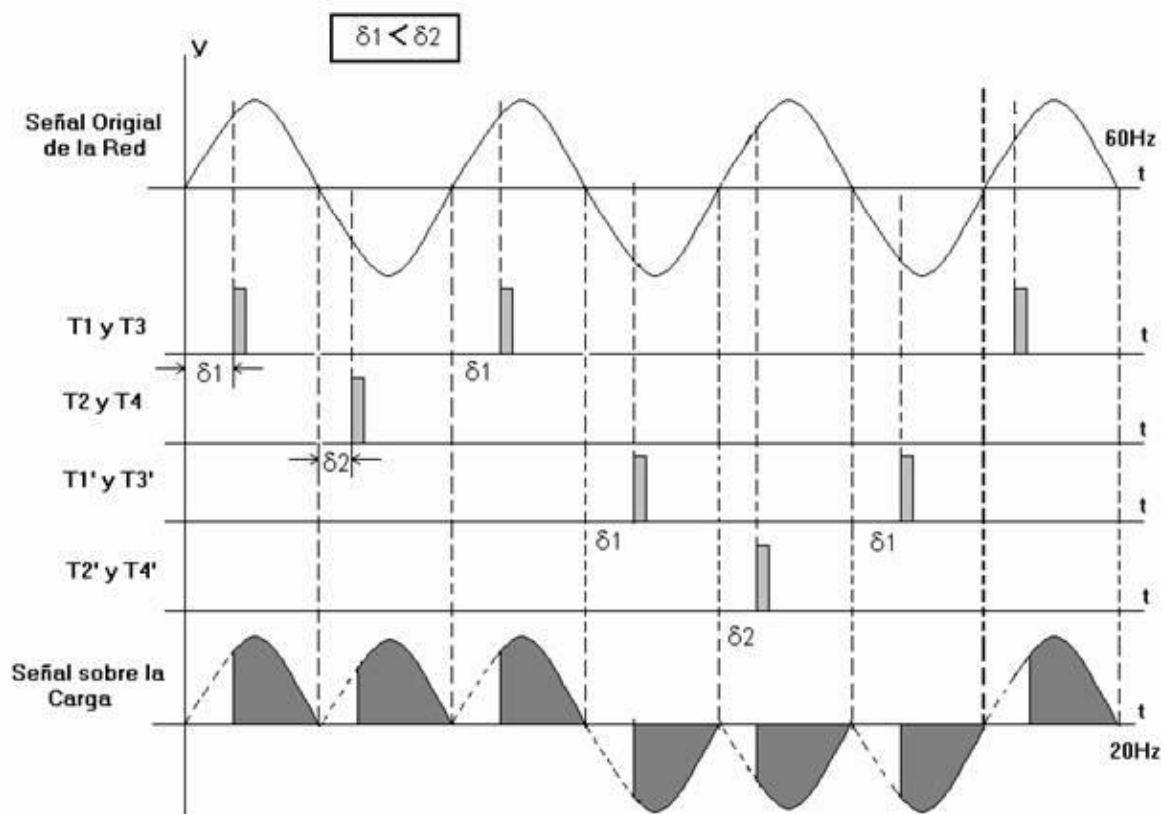


El circuito consta de un de **cruce por cero**, el cual ayudará a sincronizarse con la red para activar los tiristores en el tiempo indicado y no causar posibles daños en estos, sin embargo, se le adicionó un circuito **detector de polaridad** en el cual ayudará a que el proceso de control inicie en un semiciclo positivo y que los tiristores se disparen en inverso. Consta además de de un circuito **seleccionador** que tendrá la opción de variar los ángulos de activación, es decir, se podrá variar la velocidad del motor o en el mejor de los casos detenerlo.

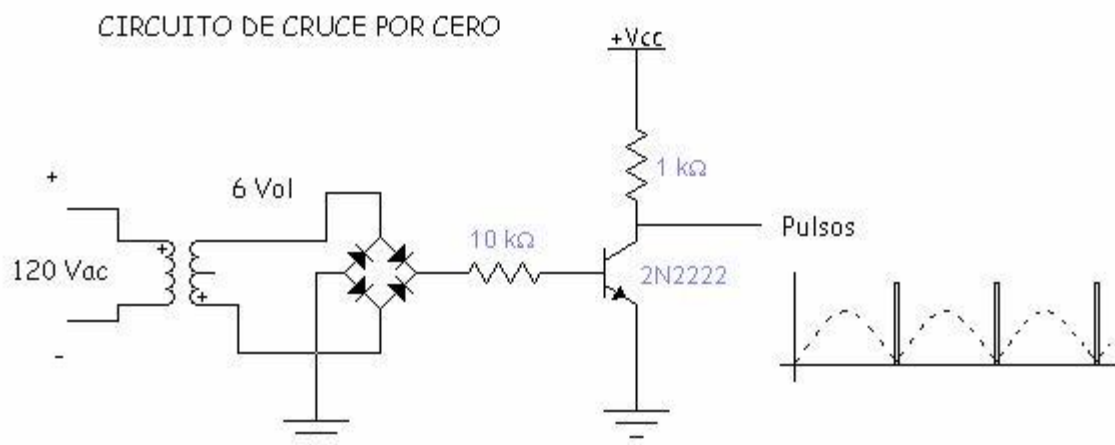
El microcontrolador tomará los pulsos generados del cruce por cero, del detector de polaridad y la señal que entrega el circuito seleccionador para procesarlos y generar la correspondiente secuencia de pulsos a la velocidad seleccionada.

El **circuito de potencia** consta de dos bloques de tiristores configurados de tal forma que al activarlos ninguno de estos me genere corto en la red. Un bloque enviará a la carga el semiciclo positivo y el otro el semiciclo negativo ya modificado. (a 20Hz)

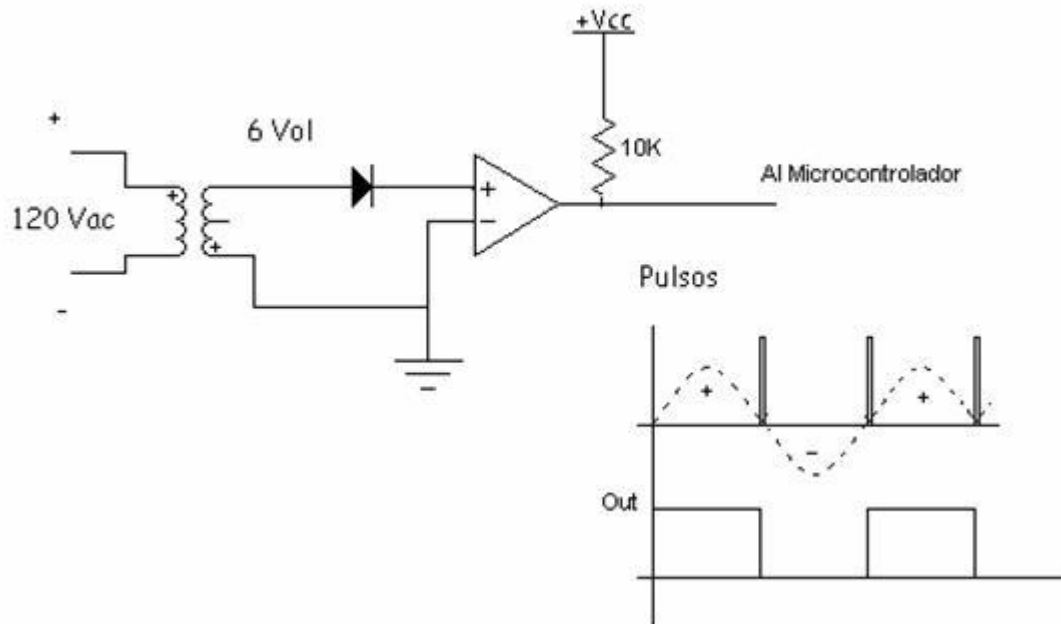
La señal resultante que caerá sobre la carga después de hacer todo el proceso de control de los tiristores es la siguiente en donde se indicará cuáles son los tiristores que estarán activos en unos tiempos determinados:



Generador de cruce por cero:



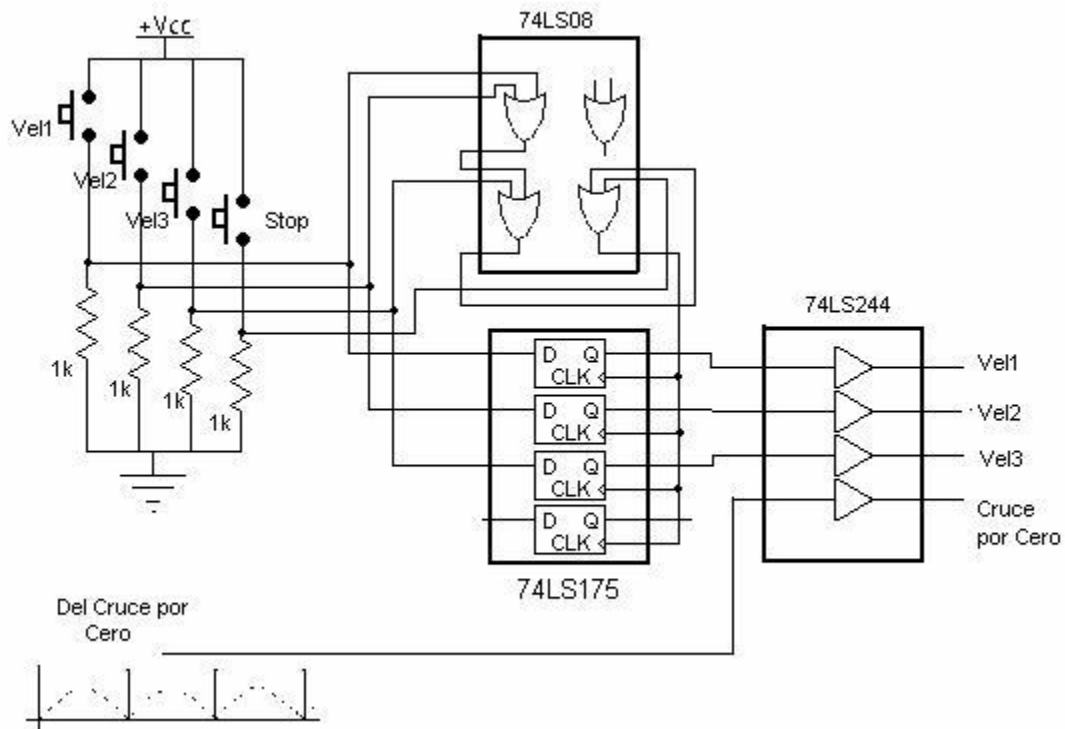
Circuito detector de polaridad:



Circuito seleccionador:

Este circuito consta de unos flip flop tipo D el cual la selección que realice se mantendrá y estará allí hasta el tiempo que determine necesario. La activación de estos flip flop se realiza por medio de una compuerta OR, teniendo como señal de entrada los pulsos que vienen de los interruptores.

Para mejorar la señal de selección que le ingresa al microcontrolador se colocó un buffer, utilizándolo también para mejorar el cruce por cero y la salida del microcontrolador a la etapa de potencia.

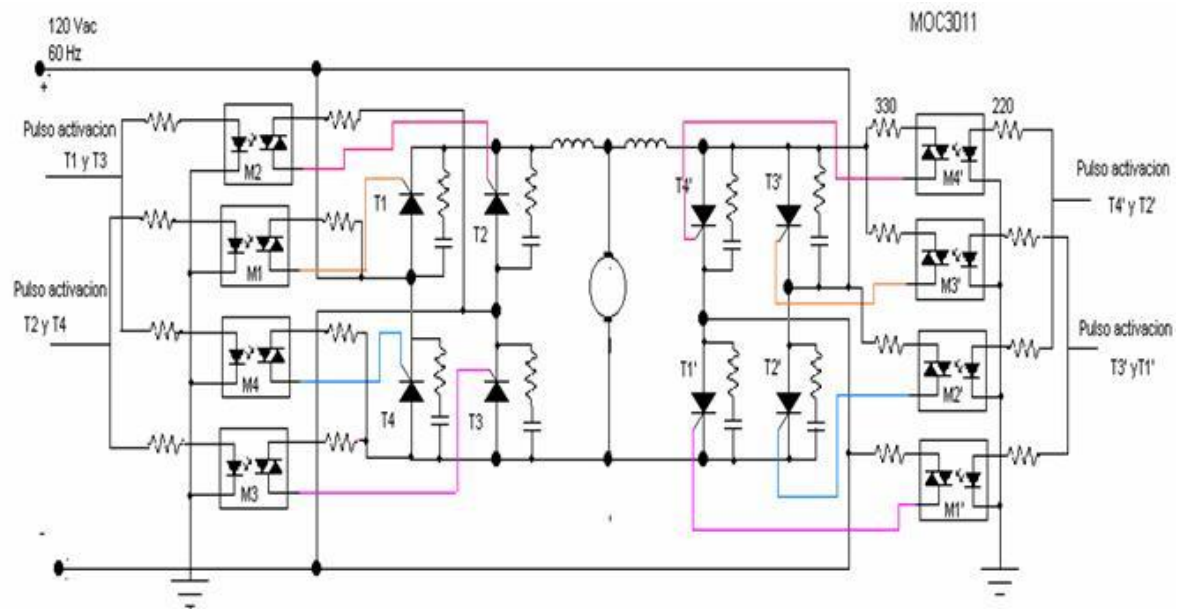


Circuito de potencia :

Este circuito consta de una etapa de desacople en la cual me aísla las señales DC de control con las AC de carga por medio del integrado MOC 3021, en el que suministrara el pulso suficiente sobre la gate del tiristor para activarlo.

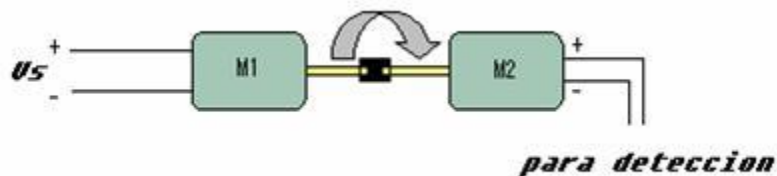
Para el circuito de potencia se utilizo tiristores que manejan hasta 10 Amperios para evitar que corrientes excesivas los destruya. Además se protegió contra el dv/dt (colocando un condensador y una resistencia en serie entre ellos y en paralelo con el tiristor) y contra el di/dt (colocando una bobina en serie con la carga) para evitar posibles daños en el circuito.

El circuito correspondiente es el siguiente:



3.4 EL TACO-GENERADOR

Consiste básicamente en un subsistema de dos motores acoplados mecánicamente, esto con un motor de iguales características al controlado, el cual fue acoplado a su eje mecánicamente comportándose como un generador, entregando a su salida un voltaje promedio D.C. proporcional a la velocidad desarrollada en el motor 1.

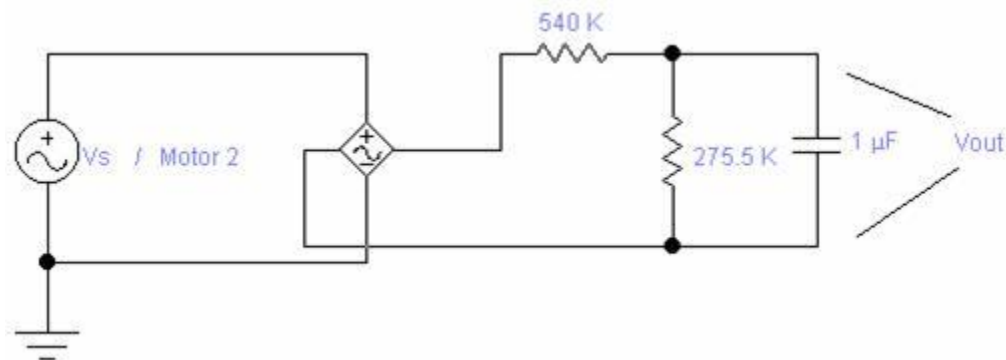


El voltaje entregado por el motor 2 es usado para enviárselo al microcontrolador y este lo convierte de A/D por medio del conversor que posee el mismo micro.. El voltaje entregado por el motor 2 debe ser acoplado al micro de manera adecuada para realizar una buena medida de las RPM del motor 1. En primer lugar para asegurar que el voltaje del motor 2 sea de tipo D.C. se pasa a través de un puente de diodos que se encarga de rectificar.

Para poder calibrar nuestro sistema se consiguió un tacómetro semi-industrial clase H con el cual se obtuvo la siguiente tabla para el motor con el tacogeneratriz :

<i>Vin (Aplicado Motor 1)</i>	<i>Vout (promedio)</i>	<i>RPM</i>
24	18	630
22	16.6	550
20	14.8	505
18	13	440
16	11.2	360
14	9.3	300
12	7.3	240
10	5.25	175
8	2.93	100
7.5	2	75

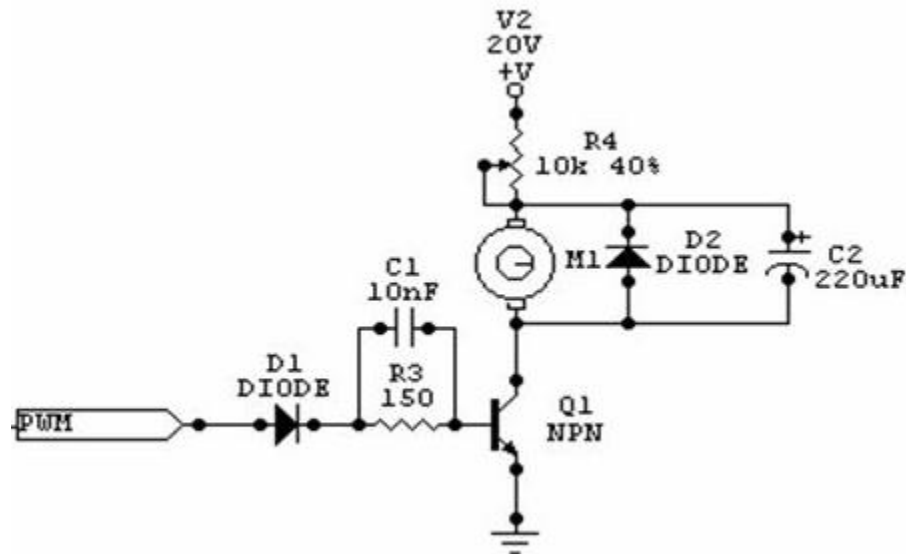
Circuito acondicionador :



3.5 CONTROL POR PWM

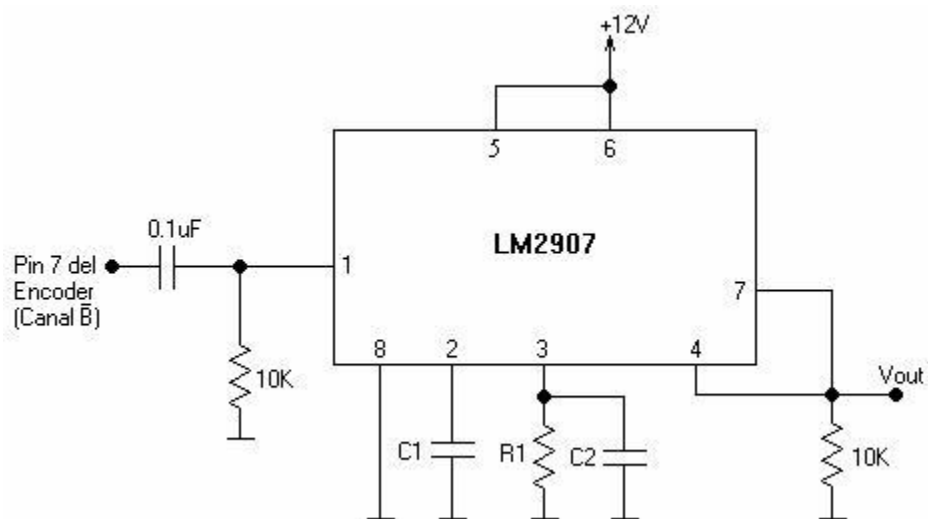
La señal PWM generada por ejemplo por un microcontrolador es aplicada al circuito de potencia, el cual consiste de un transistor BJT de conmutación de referencia ECG51 que maneja un $t_f=0.7\mu\text{s}$ y un circuito con diodo antiparalelo con el motor para facilitar la descarga inductiva soportado por un circuito RC que es un ajuste para esta compensación. Un circuito RC en

la base del BJT ayuda a la rápida conmutación y un diodo de suicheo evita las corrientes inversas para la parte digital.



3.6 CONVERTIDOR DE F-V

El **LM2907** es un convertidor frecuencia-voltaje fabricado por la National Semiconductor. Su aplicación es :



$$V_{out} = V_{cc} * f_{in} * C1 * R1$$

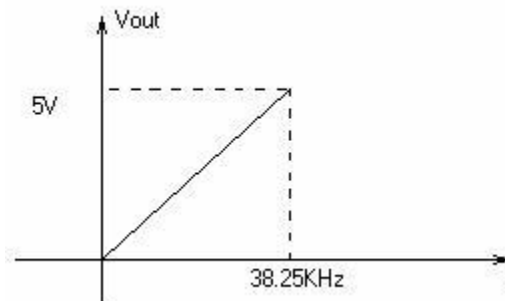
$$f_{max} = \frac{I_2}{C1 * V_{cc}}$$

$I_2 = 180\mu A$ para $V_{cc} = 12 \text{ Vol}$ (Se obtiene de las curvas de operación del PDF)

Si $f_{max} = 40 \text{ KHz}$ entonces,

$$C1 = \frac{180\mu A}{40 \text{ KHz} * 12V} = 375 \text{ pF} = 330 \text{ pF} + 33 \text{ pF}$$

Se necesita que **la característica del sensor** sea :



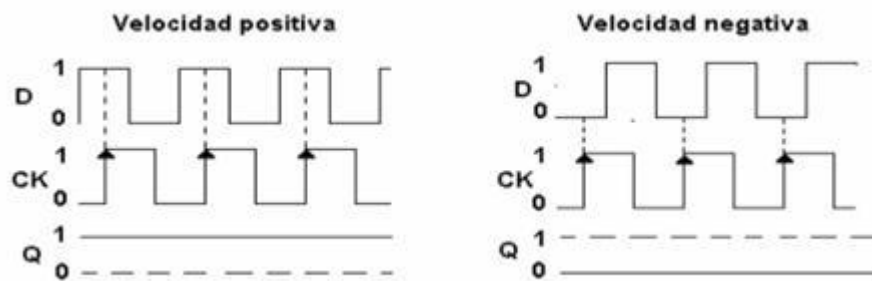
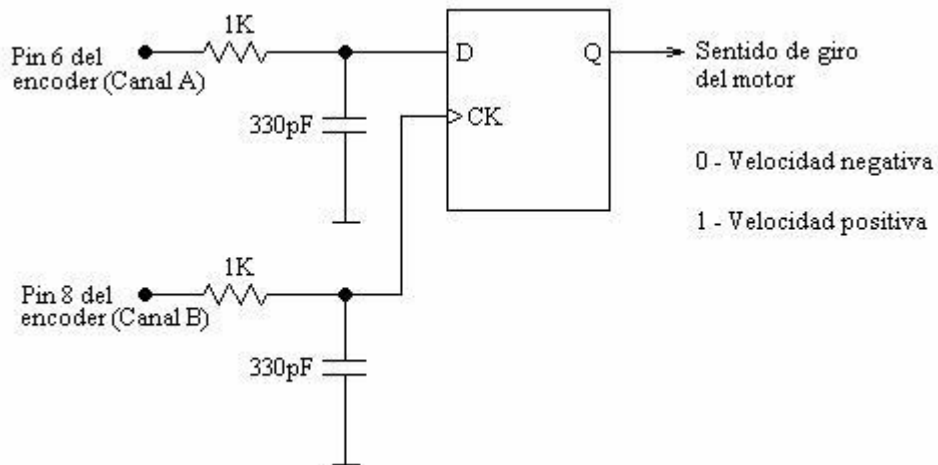
$$R1 = \frac{V_{out}}{V_{cc} * f_{IN} * C1} = \frac{5V}{12V * 38.25 \text{ KHz} * 363 \text{ pF}} = 33 \text{ K}\Omega$$

$$\frac{R1 * C1}{V_{cc} * f_{IN} * C1} \leq \tau_{max} \quad \tau_{max} = 20.43 \text{ ms}$$

$$R1 * C1 \approx 2 \text{ ms}$$

$$C2 = \frac{2 \text{ ms}}{33 \text{ K}\Omega} = 60 \text{ nF} \approx 68 \text{ nF}$$

Circuito para detectar el sentido de giro del motor:



3.7 TACÓMETRO DIGITAL

Un tacómetro Digital es una herramienta de laboratorio importante para medir velocidades de los motores con su respectiva visualización, en este caso la visualización se realiza en un LCD.

El diseño del tacómetro se realizó de tal forma que el control es total por parte del microcontrolador de tal manera que ahorramos muchos componentes, conexiones y espacio a comparación a un tacómetro digital basado en diseño lógico (contadores, decodificadores, PLL, y bastantes elementos pasivos), además de que el consumo de energía se reduce de manera significativa.

Para la medición de las RPM del motor se utiliza como sensor el optoacoplador de ranura, el cual leía el paso de unas pequeñas aspas, en total 30 ranuras, cada 30 pulsos se leía una vuelta, además de leer también realizaba la función de visualizar las RPM en un LCD.

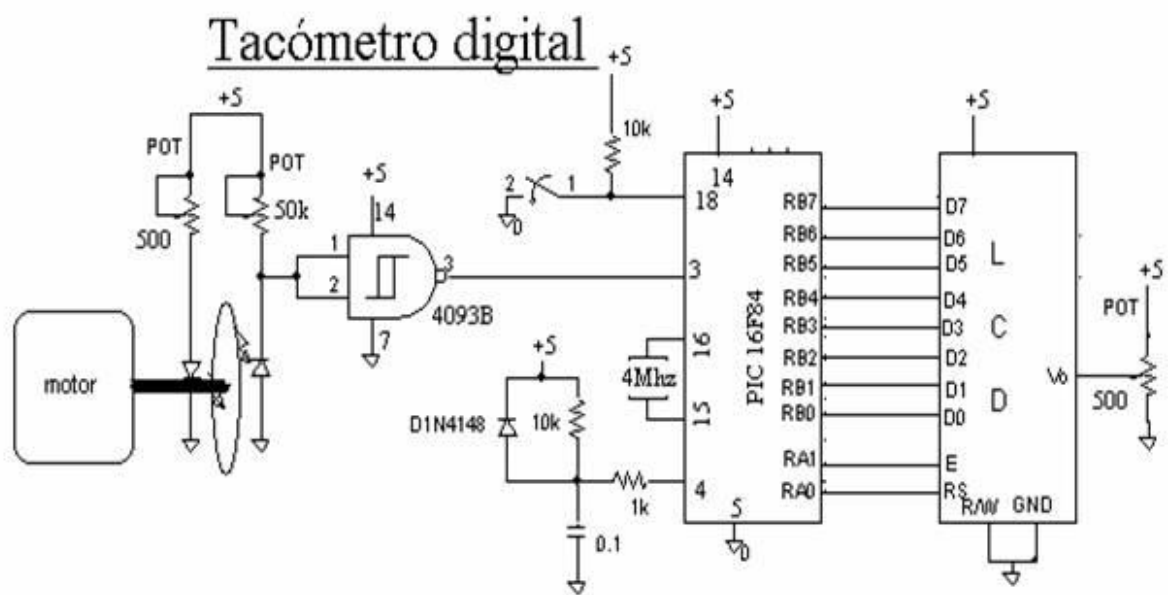
El funcionamiento se basa en la recepción de un rayo de luz que se emite desde un diodo infrarrojo implementado con un opto acoplador de ranura. En el eje del motor se acopla un disco con 30 ranuras para poder obtener datos cada 2 segundos.

Como los pulsos generados por el opto acoplador no están bien definidos, se utiliza un comparador shmitt trigger. Los pulsos generados por el opto acoplador son recepcionados por el TMR0 del PIC 16F84, el cual realiza el conteo de los pulsos.

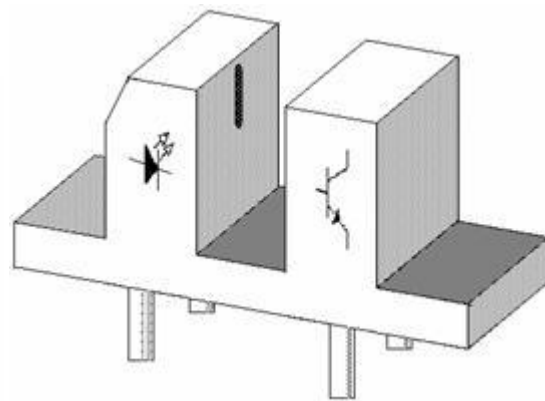
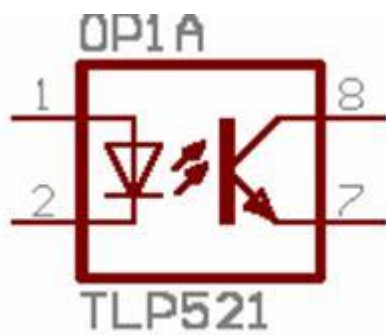
Los datos leídos por el microcontrolador son almacenados en 4 registros organizados de tal forma que en el primero de ellos se guardaran las unidades, en el siguiente las decenas, luego las centenas y por ultimo las unidades de mil.

Para lograr organizarlos de este modo se ponía a contar el TMR0 hasta diez y que luego se generara una interrupción, es decir se le sumaba al TMR0 245 y así cuando llegue a 255 se genera una interrupción habiendo contado 10 pulsos. Luego de generarse la interrupción, se incrementa el registro correspondiente a las decenas y cuando este registro pase de 9 entonces incrementa el registro centena y el de decena vuelve a cero y así sucesivamente. Cuando hallan transcurrido 2 segundos de haber empezado el conteo se toma lo que halla en los registros decena, centena y mil al igual que lo que halla hasta ese momento en el timer (se guarda en reg. unidad) para realizar el despliegue en el LCD.

El diagrama de conexión se presenta a continuación :



Optoacoplador de ranura :



4. CONTROL EN LAZO ABIERTO

4.1 MOTOR DC POR PWM

Un método de controlar la velocidad del motor es realizando variación del ancho del pulso por medio de un microcontrolador.

MANEJO DEL DRIVER

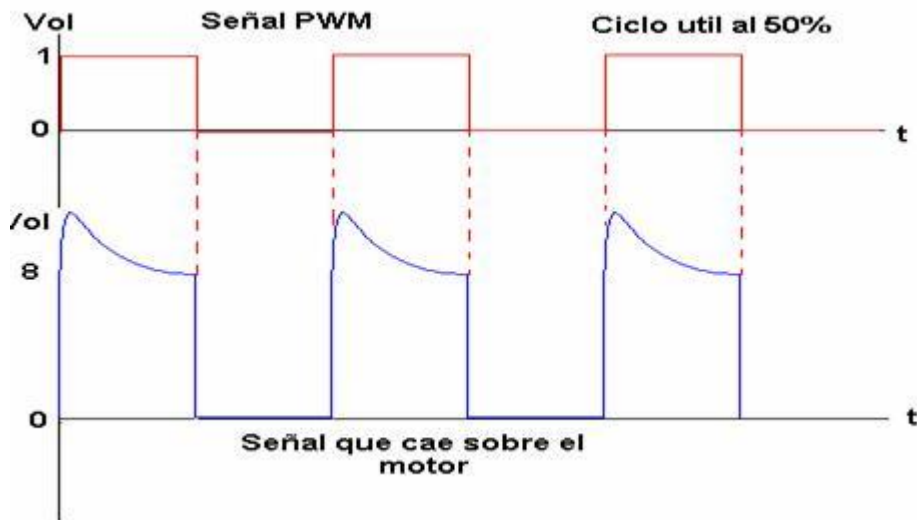


1 A	2 A	SENTIDO DE GIRO
0	0	NO GIRA
0	1	GIRO DERECHA
1	0	GIRO IZQUIERDA
1	1	INDETERMINADO

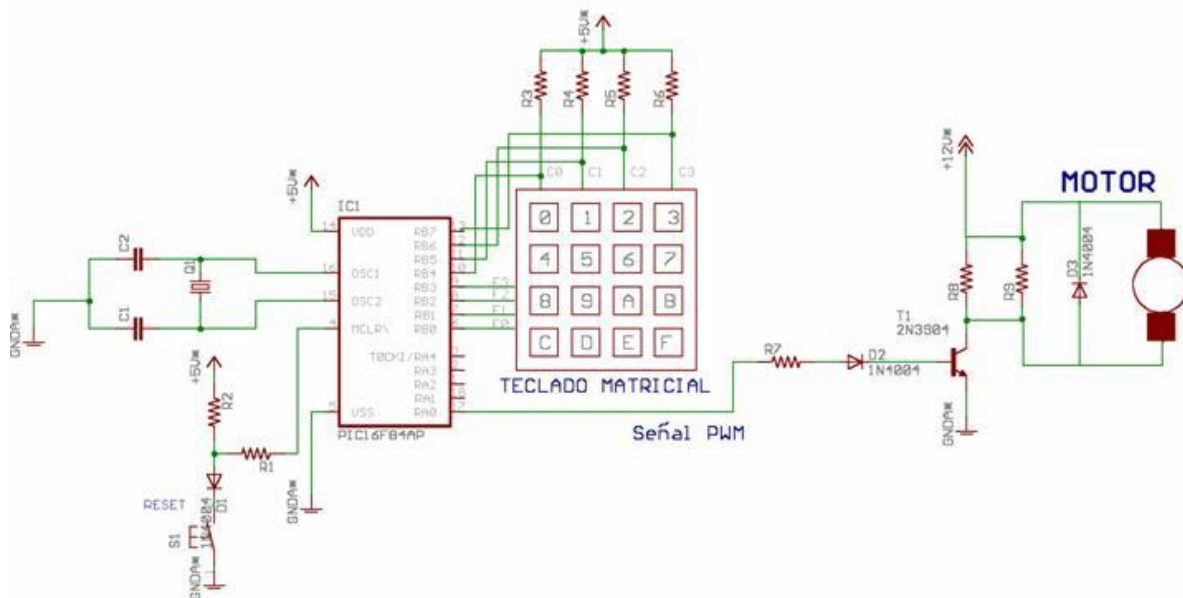
El pin 1-ZEN es el pin de control de velocidad del motor si no se tiene señal el motor gira a su máxima velocidad que es la que determina el pin 16 o la polarización del mismo, también puede enviarse a VCC.

Uno de los principales inconvenientes que se presentan es el manejo del motor ya que en la práctica estos motores no varían linealmente, de tal manera que el control realizado por el driver es ineficiente pues realiza una serie de aproximaciones que no son lineales pues el sobre pico produce un error considerable.

SEÑALES OBSERVADAS A LA ENTRADA PWM Y SOBRE EL MOTOR :



El sobre pico que aparece en la onda produce un error considerable pues el driver, lo que hace es sacar un promedio según la señal PWM enviada y darle al motor un voltaje DC según lo leído anteriormente. Con un ciclo útil al 50% debe tener una amplitud aproximada de 6 voltios para mover el motor a esta velocidad. El circuito definitivo es el siguiente :



4.2 MOTOR AC POR FRECUENCIA

La velocidad de un motor AC monofásico asincrónico. Se sabe que la variación de la frecuencia en un motor AC produce una variación de la velocidad debido a :

$$velocidad\ sincronica = \frac{60f}{pares\ de\ polos} (RPM)$$

$$velocidad\ sincronica = \frac{60(60(Hz))}{2} (RPM)$$

$$velocidad\ sincronica = 1800(RPM)$$

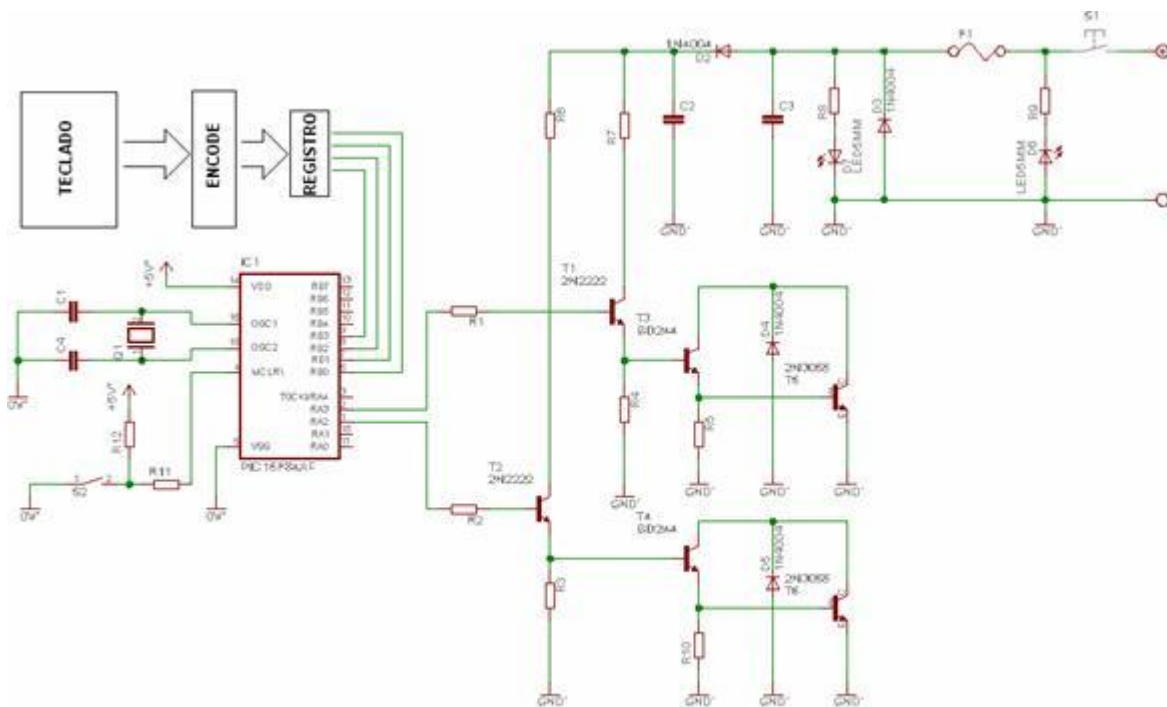
En teoría el motor debe girar a 1800 RPM, pero como es un motor asincrónico, éste nunca podrá alcanzar la velocidad de sincronismo. Por ejemplo un motor de ventilador que tiene 4 polos, una corriente de arranque de 1 amperio tiene una velocidad de 1700 RPM funcional.

MECANISMO DE CONTROL :

Uno de los mecanismos más utilizados es el de un inversor, el cual convierte la corriente continua en corriente alterna y mediante el disparo de unos transistores de potencia se puede producir la frecuencia requerida para el control del motor.

Mediante una fuente de swicheo rápido como la de las CPU se transforma la corriente de la red en DC de 12 V. Para generar una tensión alterna a partir de estos 12 V se aplica alternativamente la tensión de 12 V a los devanados de baja tensión de un transformador empleando interruptores conmutados electrónicamente.

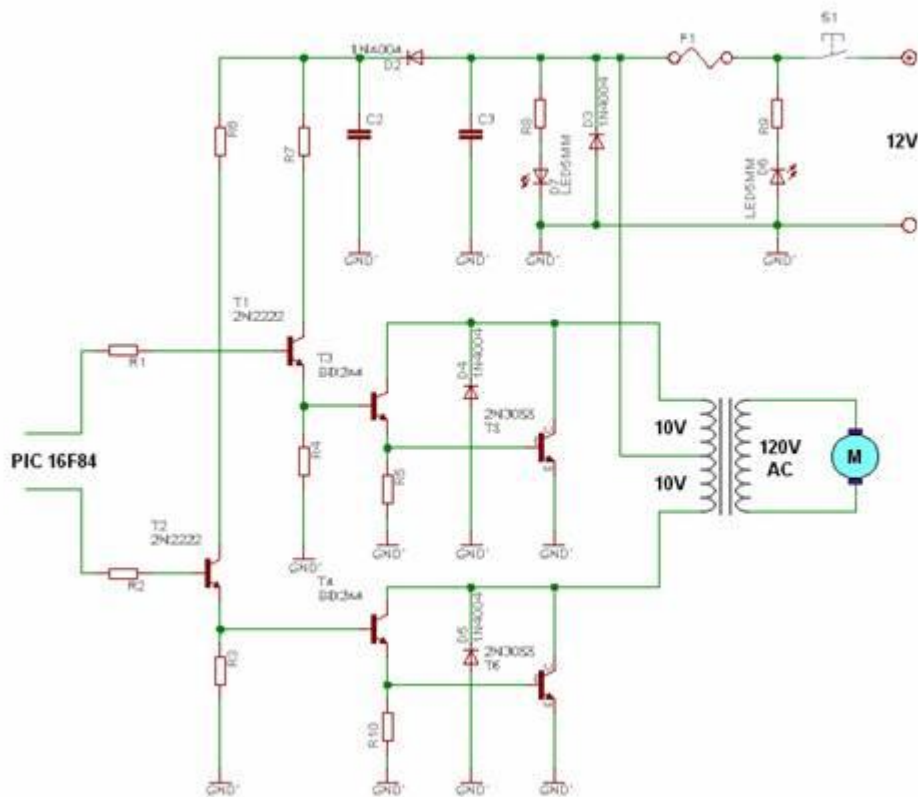
A través de las resistencias R1 y R2 los transistores 2N2222 reciben una señal proveniente del PIC 16F84 que indica la frecuencia que se necesita para una velocidad específica. Estos transistores configurados como corte y saturación son los encargados de excitar los pares darlington con resistencia de emisor para dar una mayor estabilidad al circuito (BD244 y 2N3055 complementarios). Se produce una excitación alternada en el devanado primario y se logra de esta manera una inducción de voltaje al devanado secundario de 120V, suficientes para activar el motor.



EL TRANSFORMADOR :

Para una tensión de 12 V se requiere un transformador con dos devanados primarios de 9.3 V y un secundario de 120 V. Los transformadores que normalmente se encuentran en el mercado son los de alimentación, con primario de 120 V y secundarios de 10 V.

Con un transformador de 120V/10+10V y batería de 12V con el circuito cargado al 70 %, esto es, motor a su máxima velocidad, se obtuvo una tensión de 107V, normalmente los equipos soportan sin problemas variaciones en la tensión de red del 15 %, en este caso entre 102-138 V.



4.3 CONTROL DE UN MOTOR PAP

ETAPA DE PROCESAMIENTO

Los datos de entrada (ángulo en grados) se deben convertir en movimiento del motor según el número de pasos. El motor tiene un número de pasos por vuelta $N = 48$. Es decir que cada vez que el motor se mueva 48 pasos hace un recorrido de 360 grados. Por tanto el mínimo movimiento del motor es de 7.5 grados por paso.

ETAPA DE CONTROL DE PASOS

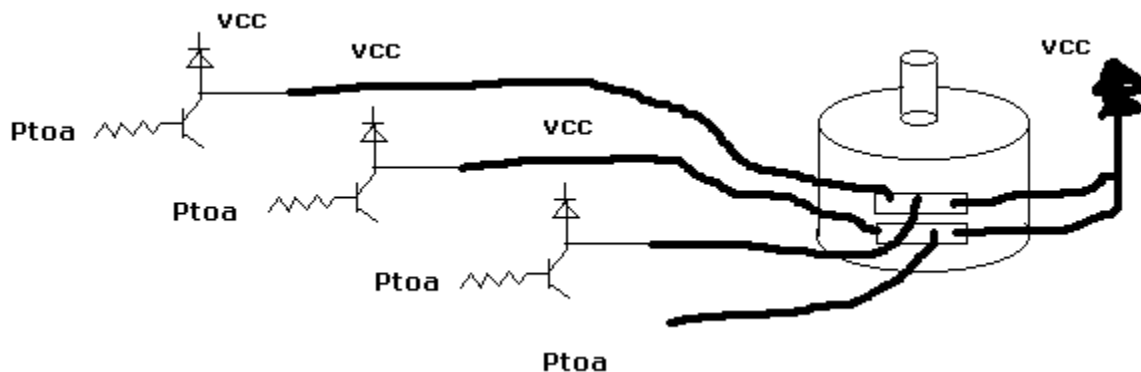
El motor de pasos se configura para moverse en un sentido o en el otro según la secuencia de pulsos que se le administren a sus terminales de bobina. El motor bipolar utilizaba una secuencia de movimiento conocida como contador en anillo, esta se explica mediante el siguiente diagrama :

B1	B2	B1''	B2''
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
1	0	0	0
0	0	0	1

Rotación hacia la izquierda
derecha

B1	B2	B1''	B2''
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1
1	0	0	0

Rotación hacia a

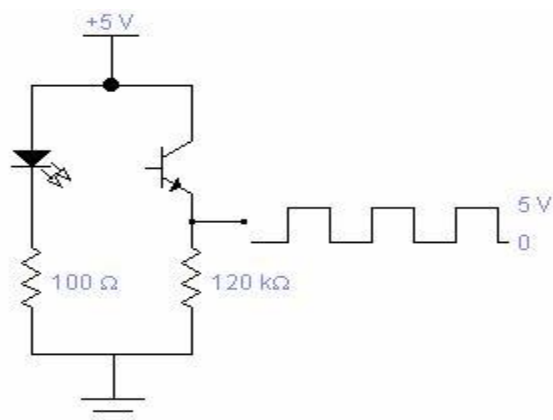
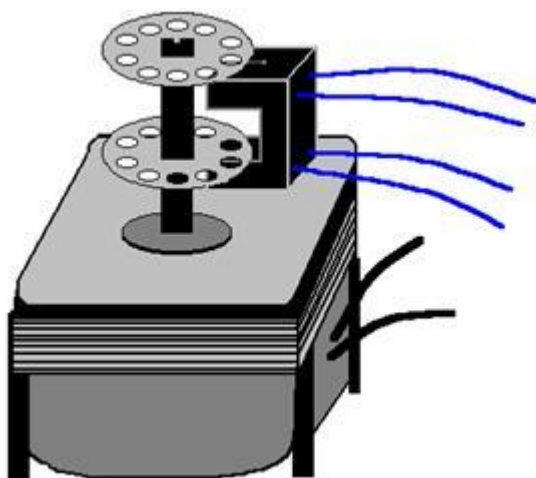


4.4 MOTOR AC CON TACÓMETRO

El control de un motor AC, por medio de un tacómetro y un teclado, controla las revoluciones por minuto dadas por el motor. Se utiliza un motor AC de 1800 rpm aproximadamente.

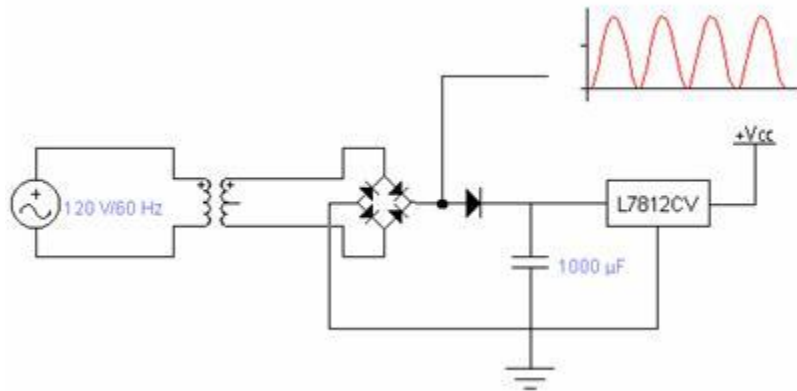
Circuito con Optoacoplador

El siguiente circuito toma los pulsos (vueltas) dadas por el motor. La salida del optoacoplador es conectada a la entrada RA4 del PIC16F84, el cual recibirá los pulsos para ser procesados y posteriormente ser visualizados como el tacómetro en el LCD.



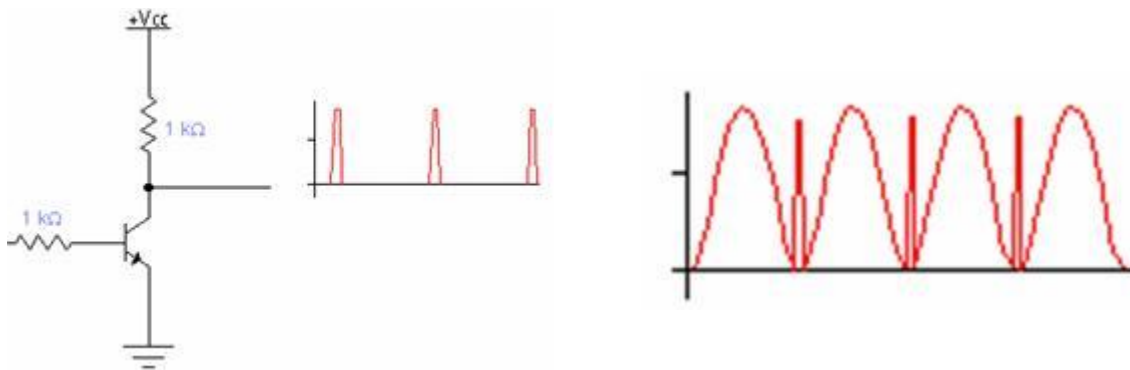
Fuente de Poder

La fuente de poder esta compuesta por un transformador 110V/18V – 12V. La señal que es obtenida del secundario del transformador es rectificada por puentes de onda completa, filtrada y regulada a través de un circuito regulador L7812CV que se ajusta a 12 voltios fijos.



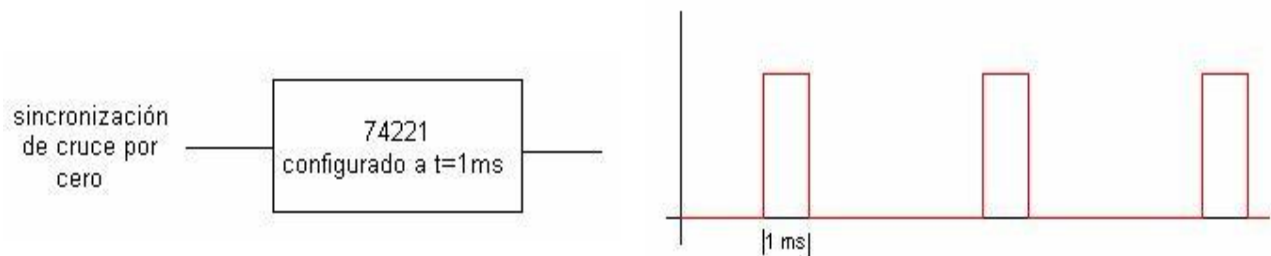
Sincronización de cruce por cero

El circuito sincronizador permite tener un punto fijo de inicio para todos los semiciclos de disparo, ya que la onda de salida debe ser periódica. Un circuito simple y muy útil es utilizar un transistor en corte y saturación como se presenta en la siguiente figura :



Ventana de Tiempo

Se requiere generar una rampa para configurar el circuito utilizando una ventana de tiempo de 1 mseg que se obtiene con un multivibrador monoestable no reactivable, LM74221

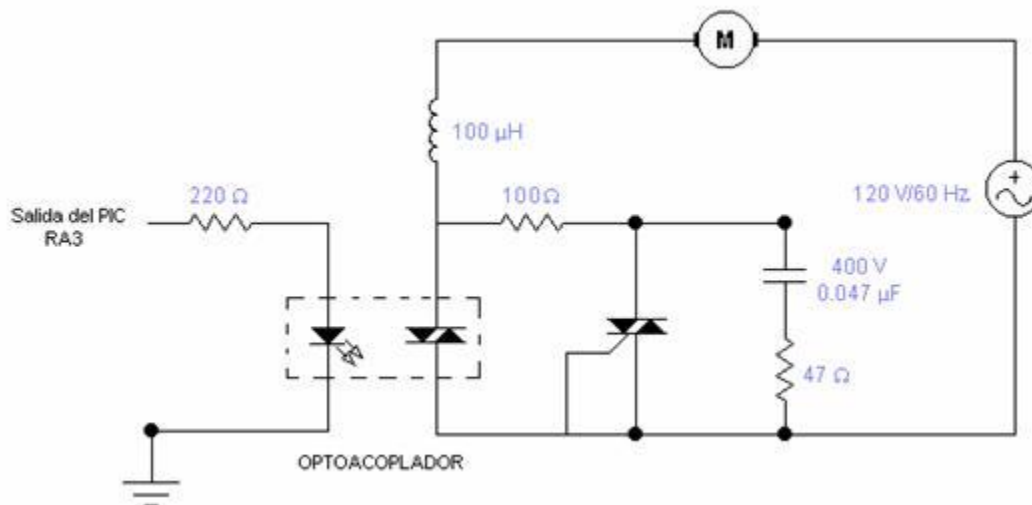


Circuito de Potencia

Los pulsos que salen del microcontrolador irán a un optoacoplador para aislar el circuito de control con el de potencia. Este optoacoplador irá conectado al dimmer para controlar la velocidad del motor AC. El circuito está formado por varios componentes importantes, el primero de ellos es el Triac, el actúa como un interruptor que se cierra cada vez que recibe un pulso en el pin llamado compuerta.

A partir de ese momento la corriente puede circular a través de sus terminales MT1 y MT2 y de esta manera se puede alimentar la carga que está conectada en el circuito. La forma de controlar la cantidad de potencia que se aplica en dicha carga consiste en hacer que el disparo o activación del triac se haga durante más o menos tiempo, así se tiene mayor o menor voltaje promedio aplicado sobre la misma.

Para controlar los tipos de activación del triac se tiene un circuito formado por resistencias y condensadores.



5. SIMULACIÓN DE MOTORES

El presente capítulo toma como referencia la teoría, los ejemplos y simulaciones que se presentan en el libro de CHE-MUN ONG. Dynamic Simulation of Electric Machinery. Using Matlab/Simulink. Prentice Hall. 1998, por considerar que es el mayor texto en esta área del conocimiento.

5.1 INTRODUCCIÓN

Para comprender el estudio de las ecuaciones dinámicas y su correspondiente simulación de los motores eléctricos, es necesario entender inicialmente la teoría básica del electromagnetismo que se estudiará de forma aplicada en los transformadores monofásicos y trifásicos.

Se tratarán a continuación las ecuaciones electromagnéticas de los transformadores monofásicos y de los transformadores trifásicos.

5.1.1 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Cuando un material magnético es colocado en un campo magnético externo H , la densidad de flujo en el material es igual a:

$$B = \mu H$$

Donde μ es la permeabilidad del material.

La fuerza magnetomotriz (F) que genera un flujo magnético (ϕ) es igual al producto del flujo por la reluctancia.

$$F = \phi R$$

El voltaje inducido en una bobina es igual a :

$$v = N \frac{d\phi}{dt}$$

El flujo que enlaza dos bobinados es igual a:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= L_{11} i_1 + L_{12} i_2 \\ \lambda_2 &= L_{21} i_1 + L_{22} i_2\end{aligned}$$

Para un transformador de dos devanados, los voltajes inducidos son :

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt}$$

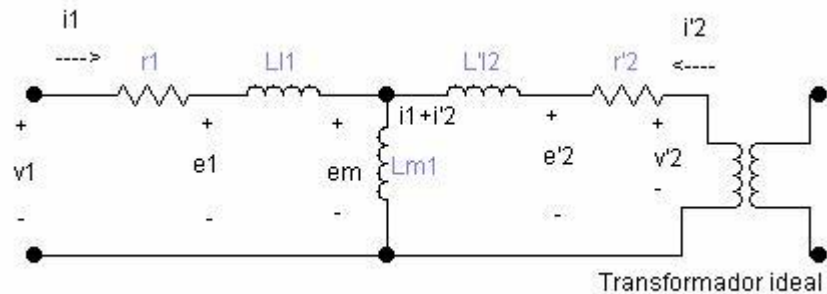
$$e_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt}$$

Los voltajes en los terminales de cada devanado son :

$$v_1 = i_1 r_1 + e_1 = i_1 r_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{m1} \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt}$$

$$v'_2 = i'_2 r'_2 + e_2 = L'_{12} \frac{di'_2}{dt} + L_{m1} \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt}$$

El circuito equivalente es :



$$r'_2 = (N1/N2)^2 r_2, \quad L'_{12} = (N1/N2)^2 L_{12}$$

Los flujos magnéticos por segundo ϕ_1 y ϕ_2 :

$$\phi_1 = w_b \lambda_1 = \phi_{l1} + \phi_m = x_{l1} i_1 + \phi_m \quad w_b : \text{frecuencia base para calcular } x$$

$$\phi'_2 = w_b \lambda'_2 = \phi'_{l2} + \phi_m = x'_{l2} i'_2 + \phi_m \quad x : \text{reactancia}$$

Las corrientes pueden ser expresadas como :

$$i_1 = \frac{\phi_{l1} - \phi_m}{x_{l1}} \quad (1)$$

$$i'_2 = \frac{\phi_{l2}' - \phi_m}{x'_{l2}} \quad (2)$$

$$\phi_m = \omega_b L_{m1} (i_1 + i'_2) = x_{m1} (i_1 + i'_2)$$

$$\frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_{m1}} + \frac{1}{x_{l1}} + \frac{1}{x'_{l2}}$$

$$\phi_m = x_M \left(\frac{\phi_{l1}}{x_{l1}} + \frac{\phi_{l2}'}{x'_{l2}} \right) \quad (3)$$

$$\phi_{l1} = \int \left\{ w_b v_1 - w_b r_1 \left(\frac{\phi_{l1} - \phi_m}{x_{l1}} \right) \right\} dt \quad (4)$$

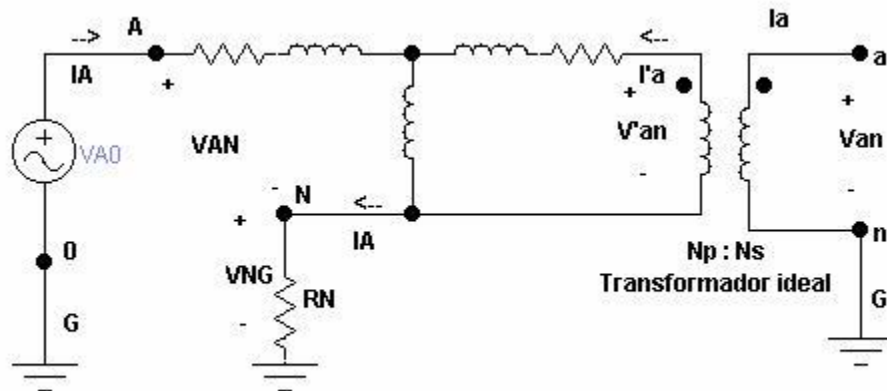
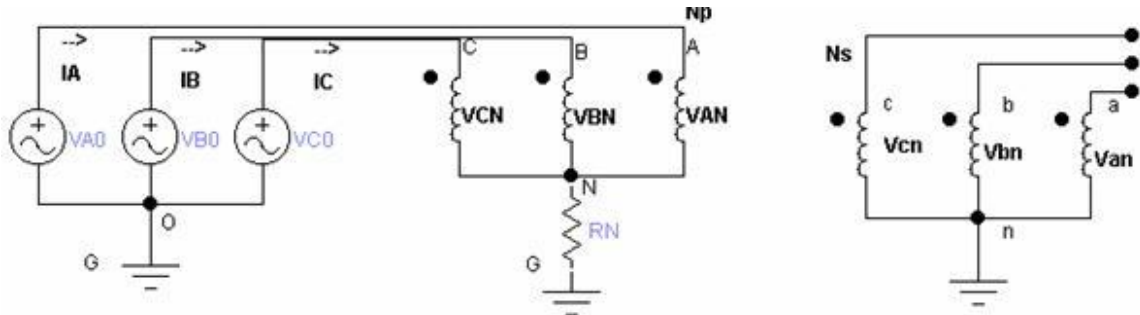
$$\phi_{l2}' = \int \left\{ w_b v'_2 - w_b r'_2 \left(\frac{\phi_{l2}' - \phi_m}{x'_{l2}} \right) \right\} dt \quad (5)$$

Las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5) definen el modelo dinámico de un transformador de dos bobinados.

5.1.2 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Los transformadores trifásicos pueden ser conectados en estrella o delta. En estrella se tienen niveles de voltaje más altos que en delta, pero en delta se tienen niveles de corrientes mayores.

CONEXIÓN ESTRELLA



UNA FASE CON DOS BOBINADOS

Voltajes de fase a neutro de la fuente :

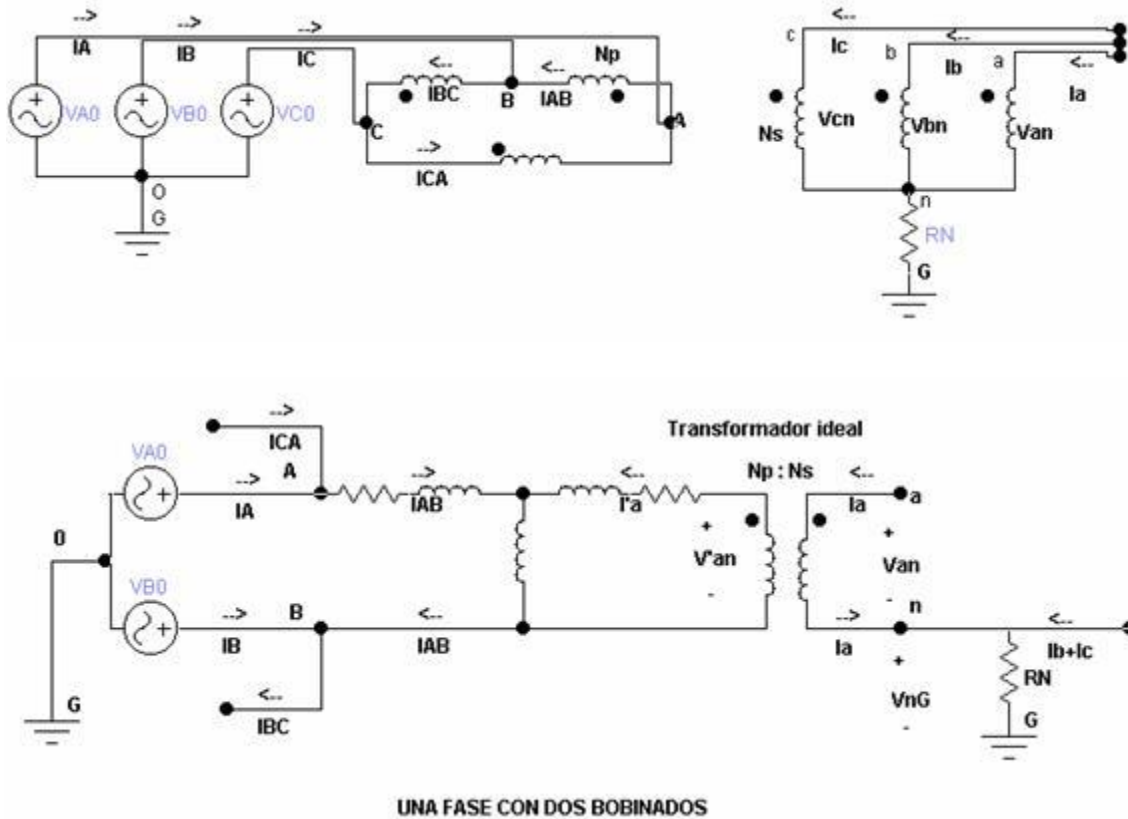
$$V_{AN} = V_{AG} - V_{NG} = V_{A0} - V_{NG}$$

$$V_{BN} = V_{BG} - V_{NG} = V_{B0} - V_{NG}$$

$$V_{CN} = V_{CG} - V_{NG} = V_{C0} - V_{NG}$$

$$V_{NG} = (i_A + i_B + i_C)R_N$$

CONEXIÓN DELTA



En conexión delta la rata de vueltas efectiva de secundario a primario es :

$$\sqrt{3} \frac{N_s}{N_p}$$

Los voltajes fasores secundarios están corridos 30° en sentido contrario al reloj respecto a los voltajes fasores del primario.

Los voltajes de entrada al primario son :

$$V_{AB} = V_{A0} - V_{B0}$$

$$V_{BC} = V_{B0} - V_{C0}$$

$$V_{CA} = V_{C0} - V_{A0}$$

Los voltajes de entrada al secundario son :

$$V_{an} = V_{an} - V_{nG}$$

$$V_{bn} = V_{bn} - V_{nG}$$

$$V_{cn} = V_{cn} - V_{nG}$$

$$\text{donde } v_{nG} = (i_a + i_b + i_c)R_n$$

Las corrientes en el primario son :

$$i_A = i_{AB} - i_{CA}$$

$$i_B = i_{BC} - i_{AB}$$

$$i_C = i_{CA} - i_{BC}$$

5.2 MÁQUINAS ELÉCTRICAS

En transformadores los devanados son estacionarios, los voltajes inducidos en los devanados son debidos a la variación del flujo en el tiempo. En las máquinas eléctricas que son rotatorias el voltaje inducido se debe al movimiento relativo entre un devanado y un campo magnético espacialmente distribuido que distribuye las bobinas en varias ranuras que son adyacentes unas de otras. Al devanado cuya función primordial es tener la energía eléctrica convertida se le llama devanado de armadura y al que provee la excitación de flujo se le llama devanado de campo. En algunos casos como en máquinas de inducción de corriente alterna el mismo devanado realiza la doble función.

5.2.1 PARÁMETROS

A) VELOCIDAD SINCRÓNICA

*En una máquina de corriente alterna, el campo magnético alterna de polaridad. Par una máquina de P polos la **relación entre los grados mecánicos y eléctricos es igual a :***

$$\theta_e = (P/2) \theta_m, \text{ o sea, } w_e = (P/2) w_m$$

*La **relación entre la frecuencia f del voltaje inducido (ciclos por segundo) y la velocidad mecánica N (revoluciones por minuto) es dado por:***

$$f = (P/2) (N/60)$$

B) VOLTAJE INDUCIDO

El voltaje inducido y el torque desarrollado dependen de la cantidad de flujo en cada polo. El flujo enlazado (λ) por una bobina de una señal cosenoidal es,

$\lambda(t) = N\phi_{\text{polo}} \cos w_e t$, donde ϕ_{polo} es el flujo por polo

$$e = \frac{d\lambda(t)}{dt} = -w_e N \phi_{\text{polo}} \sin w_e t, \quad \phi_{\text{polo}} \text{ es constante}$$

El voltaje inducido (e) es igual a:

$$e = \frac{d\lambda(t)}{dt} = -w_e N \phi_{\text{polo}} \sin w_e t, \quad \phi_{\text{polo}} \text{ es constante}$$

El valor RMS del voltaje inducido es :

$$E_{\text{rms}} = \frac{w_e N \phi_{\text{polo}}}{\sqrt{2}} = 4.44 f k_w N \phi_{\text{polo}}, \quad k_w \text{ factor del devanado}$$

El factor de devanado es debido al factor de distribución de las bobinas en las ranuras (combinaciones series y/o paralelas) y al factor de pitch o cortocircuitaje de las bobinas.

C) FUERZA MAGNETOMOTRIZ

La fuerza magnetomotriz que es generada por una corriente i en una bobina concéntrica de n vueltas es :

$$F = (n_{\text{polo}}/2) i, \text{ Amp} \cdot \text{vuelta}$$

En donde la componente fundamental de la distribución de la magnitud es,

$$F_a = (4/\pi)(n_{\text{polo}}/2) i \cos \theta_e$$

la densidad de flujo es :

$$B = \mu_0 (F/g) = (\mu_0 /g) (4/\pi)(n_{\text{polo}}/2) i \cos \theta_e, \text{ Weber/m}^2$$

Donde g es la longitud del airgap

Teniendo en cuenta el factor de devanado k_w y que el número de vueltas por fase es N_{ph} , o sea, $N_{ph} = n_{pole} (P/2)$, la densidad de flujo de la fundamental :

$$B_a = \mu_0 (F_a/g) = (\mu_0 /g) (4/\square)(n_{ph}/P)k_w i \cos \theta_e, \text{ Weber/m}^2$$

Si $N_{eff} = 2 (N_{ph} k_w/P)$, entonces,

$$B_a = (\mu_0 /g) (4/\square)(2N_{eff}) i \cos \theta_e$$

Flujo por polo :

$$\phi_{polo} = (\mu_0 /g) (4/\square)(2/P)N_{eff} LR i$$

donde L es la longitud efectiva del área del polo y R es el radio medio del airgap.

D) INDUCTANCIA

La inductancia propia de un devanado del estator de una máquina elemental con N_{effs} vueltas por par de polo es :

$$L_{ss} = (P/2)N_{effs} \phi_{polo} / i = (\mu_0 /g) (4/\square) N_{eff}^2 LR$$

El flujo enlazado por el devanado del rotor de N_{effr} vueltas efectivas debido al devanado del estator de N_{effs} vueltas efectivas, es

$$\lambda_{rs} = (\mu_0 /g) (4/\square)(N_{effr} N_{effs})LR i_s$$

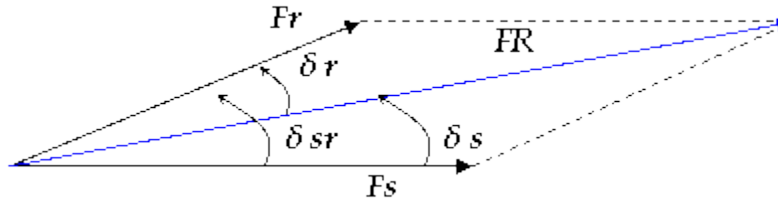
$$L_{rs} = \lambda_{rs} / i = (\mu_0 /g) (4/\square)(N_{effr} N_{effs})LR$$

$$L_{rs} = L_{sr}, \text{ y}$$

$$L_{rr} = (\mu_0 /g) (4/\square)(N_{effr}^2)LR$$

E) TORQUE

Sea F_r y F_s los valores picos de las componentes fundamentales de la fmm producidas por las corrientes del estator y rotor en el airgap y δ_{sr} el ángulo eléctrico de fase entre ellos.



$$F_R^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2 F_s F_r \cos \delta_{sr} \quad \text{(Teorema del coseno)}$$

La energía almacenada en un cilindro anular de longitud L , diámetro medio D y espesor g es

$$W_f = (\mu_0 / 4) (F_R^2 / g^2) (\pi D L g) = (\mu_0 / 4g) (\pi D L) (F_s^2 + F_r^2 + 2 F_s F_r \cos \delta_{sr}) \text{ joules}$$

El torque desarrollado por la máquina es igual al cambio de la energía almacenada respecto al cambio de la posición del rotor,

$$T = \frac{\partial W_f}{\partial \delta_{sr}} = - \frac{P \mu_0 \pi D L}{4g} F_s F_r \sin \delta_{sr} \text{ Newton - metro}$$

Como $F_s \sin \delta_{sr} = F_r \sin \delta_r$, entonces,

$$T = - \frac{P \mu_0 \pi D L}{4g} F_r F_r \sin \delta_r$$

El valor pico de la densidad de flujo es :

$$B_{pk} = \mu_0 F_R / g, \text{ entonces } F_R = B_{pk} g / \mu_0$$

$$T = - \frac{P \pi D L}{4} B_{pk} F_r \sin \delta_r$$

$$\phi_{polo} = B_m (\text{área del polo}) = \left(\frac{2}{\pi} B_{pk} \right) \left(\frac{\pi D L}{P} \right)$$

$$T = - \frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \phi_{polo} F_r \sin \delta_r$$

5.3 EL GENERADOR SHUNT

5.3.1 ECUACIONES DINÁMICAS

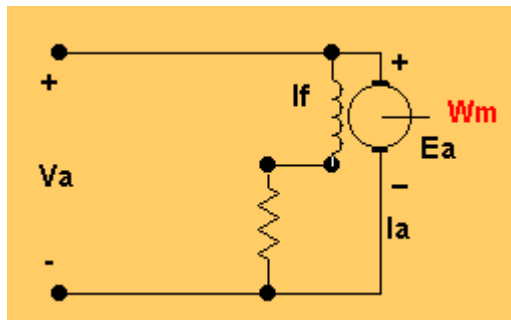
La ecuación del devanado de campo es :

$$V_f = I_f (R_f + R_{rh}) + L_f (dI_f / dt)$$

Donde R_f y R_{rh} son las resistencias del devanado de campo principal y del reóstato de campo y L_f es la inductancia del devanado de campo.

El devanado de armadura está en cuadratura con el devanado de campo. El voltaje promedio del devanado de armadura es :

$$E_a = I_a R_a + L_{aq} (dI_a / dt) + V_a + V_{brush}, \quad E_a = k_a \omega_m \phi$$



La ecuación del movimiento del motor es :

$$T_{em} + T_{mec} = J (d\omega_m / dt) + D\omega_m$$

$$T_{em} = k_a \phi (-I_a) = E_{ao} (-I_a) / \omega_{mo}$$

$$E_a / \omega_m = k_a \phi = E_{ao} / \omega_{mo} \quad (\text{circuito abierto})$$

$$E_{ao} = k_f \omega_{mo} I_f = k_g I_f$$

El valor de k_g en la velocidad de ω_{mo} puede ser determinado de la pendiente de la línea del airgap de la característica de la máquina en circuito abierto.

Reacción de armadura :

Es la corriente producida por reacción de armadura debido al campo producido por su propio devanado es

$$I_{ar} = 0.04 \cdot \text{abs}(\text{atan}(I_a)) + 0.0001 \cdot I_a.^2;$$

La caída en las escobillas puede considerarse como 1 V por escobilla, esto es, 2V para operación generador o -2V en operación motor.

*La **curva de magnetización** es la gráfica del voltaje de campo respecto a la corriente de campo en circuito abierto (resistencia de carga muy grande.*

5.3.2 SIMULACIÓN

Arranque y cargue de un generador shunt. Simular un generador shunt DC con una carga RL conectada en la armadura. Los parámetros de la máquina son 120 V, 2 Kw, 1750 rpm, voltaje de armadura de 125V, corriente de armadura 16 A, resistencia del devanado de armadura 0.24 ohms, inductancia de armadura 18 mH, resistencia de campo shunt 111 ohms, inductancia del campo shunt 10 H.

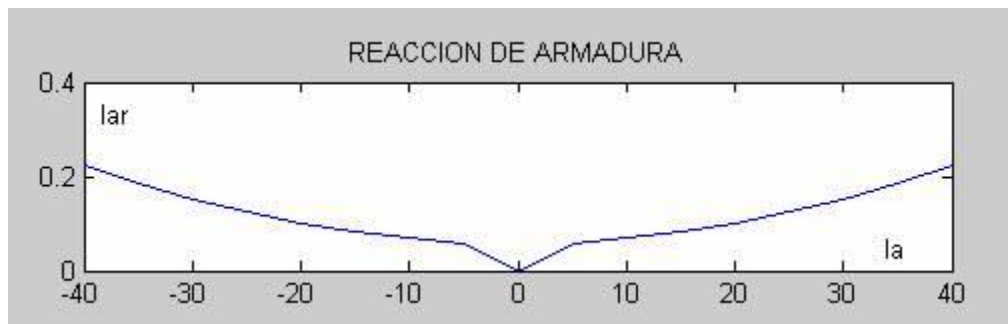
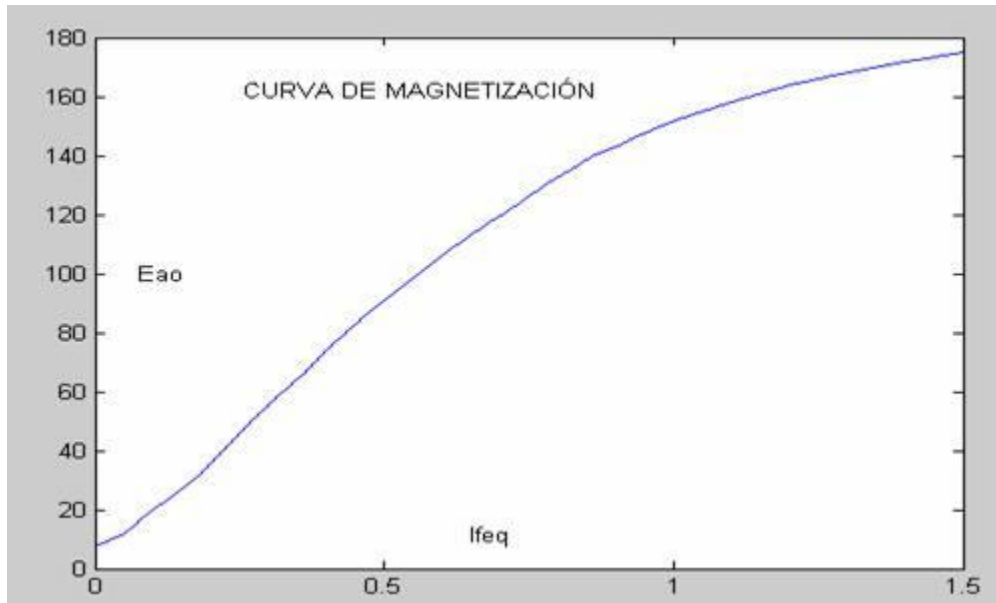
Los valores obtenidos para tener la curva de magnetización a una velocidad de 2000rpm con una resistencia de carga $R_L = 1\text{Mohms}$, fueron :

Valores de los voltajes de campo en voltios :

*[7.5 12 20 24 32 40 48 59 66 74 86 97 102.5 ...
107.5 112 117 121 125 130 135 140 143 146 152 158 164 168 172 175];*

Valores de la corriente de campo en amperios :

*[0 0.05 0.1 0.13 0.18 0.22 0.26 0.32 0.36 0.4 0.47 0.54 ...
0.575 0.61 0.64 0.68 0.71 0.74 0.78 0.82 0.86 0.9 0.93 1.0 1.1 ...
1.2 1.3 1.4 1.5];*



PROGRAMA EN MATLAB PARA EJECUTAR PARÁMETROS :

```
% Autoexcitacion de un generador shunt con una simple
% resistencia de carga
clear all
```

% Parametros del generador

```
Pnom = 2*746;
Vnom = 125;
Ianom = 16;
wmnom = -1750*(2*pi)/60;
Tnom = Pnom/wmnom;
Ra = 0.24;
Rf = 111;
Rrh = 25;    % reostato ext en el devanado de campo
Laq = 0.018;
Lf = 10;
RL = 1e6    % resistencia de carga
J = 0.8;    % Inercia del rotor en kg-m2
```

% Datos para la curva de magnetizacion en 2000 rpm

wmo = 2000*(2*pi)/60;

% Valores de voltaje de campo

SHVP1 = [7.5 12 20 24 32 40 48 59 66 74 86 97 102.5 ...

107.5 112 117 121 125 130 135 140 143 146 152 158 164 168 172 175];

% Valores de la corriente de campo

SHIP1 = [0 0.05 0.1 0.13 0.18 0.22 0.26 0.32 0.36 0.4 0.47 0.54 ...

0.575 0.61 0.64 0.68 0.71 0.74 0.78 0.82 0.86 0.9 0.93 1.0 1.1 ...

1.2 1.3 1.4 1.5];

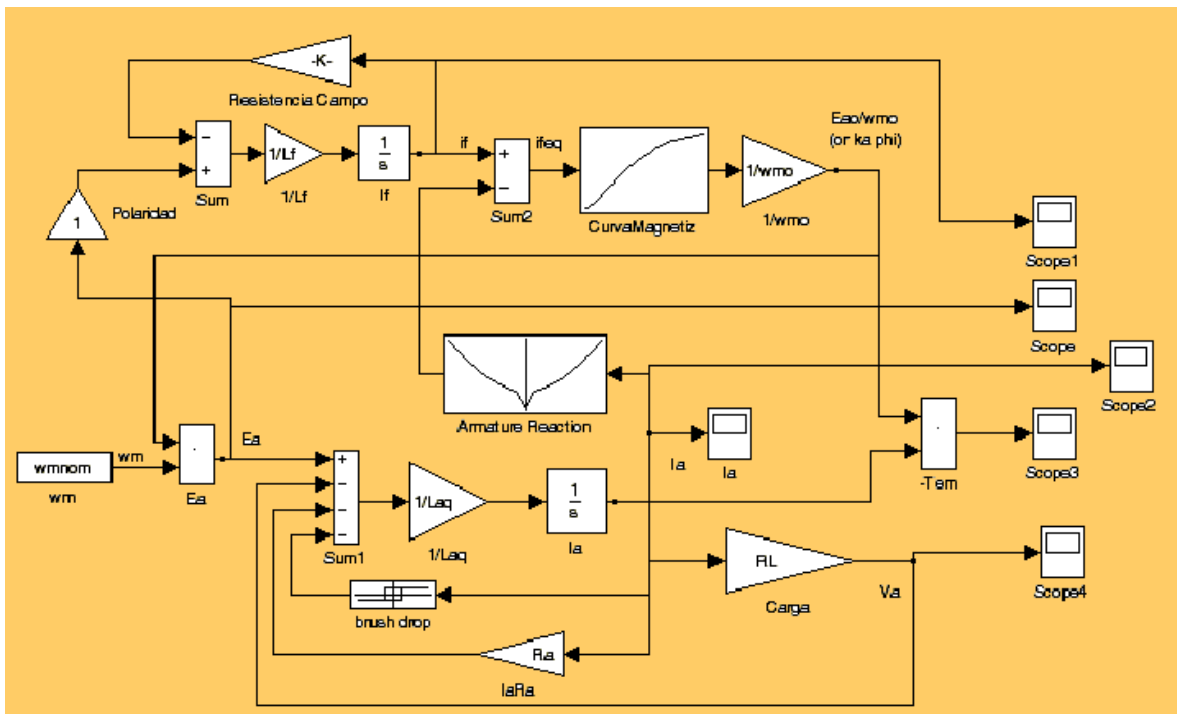
plot(SHIP1,SHVP1);

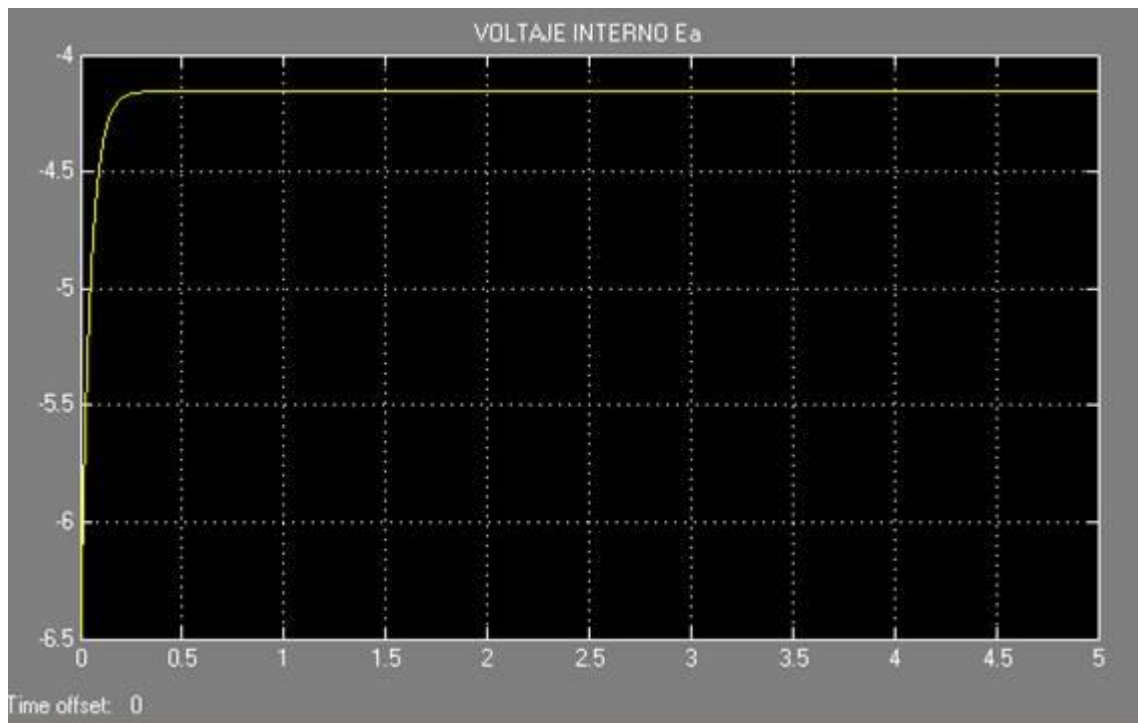
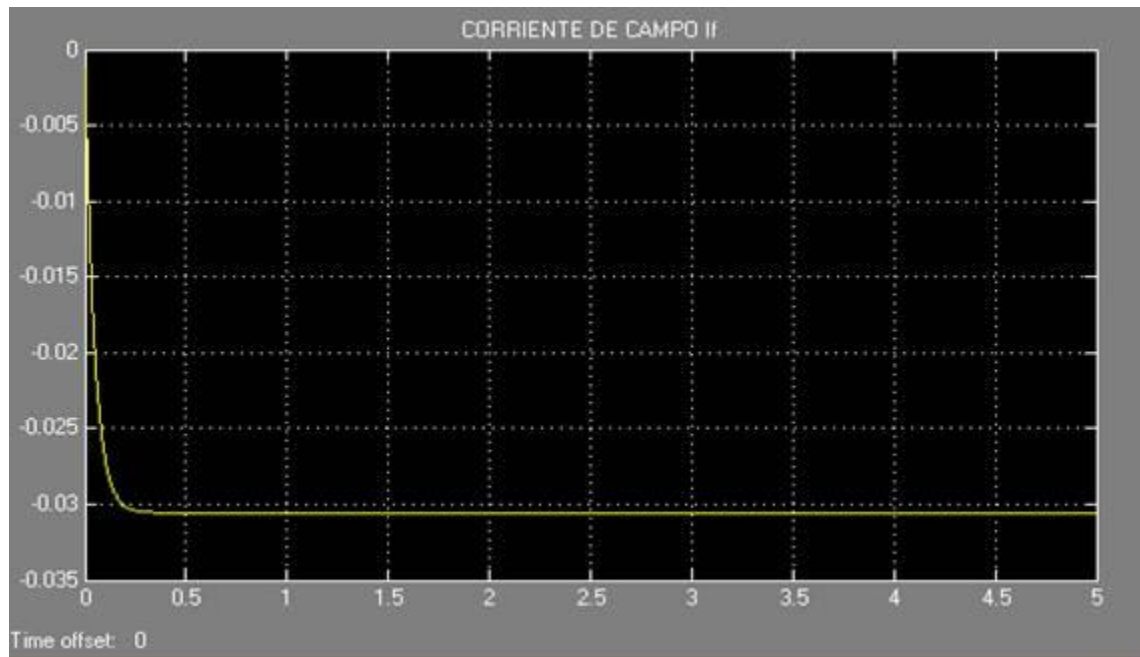
% Reaccion de armadura

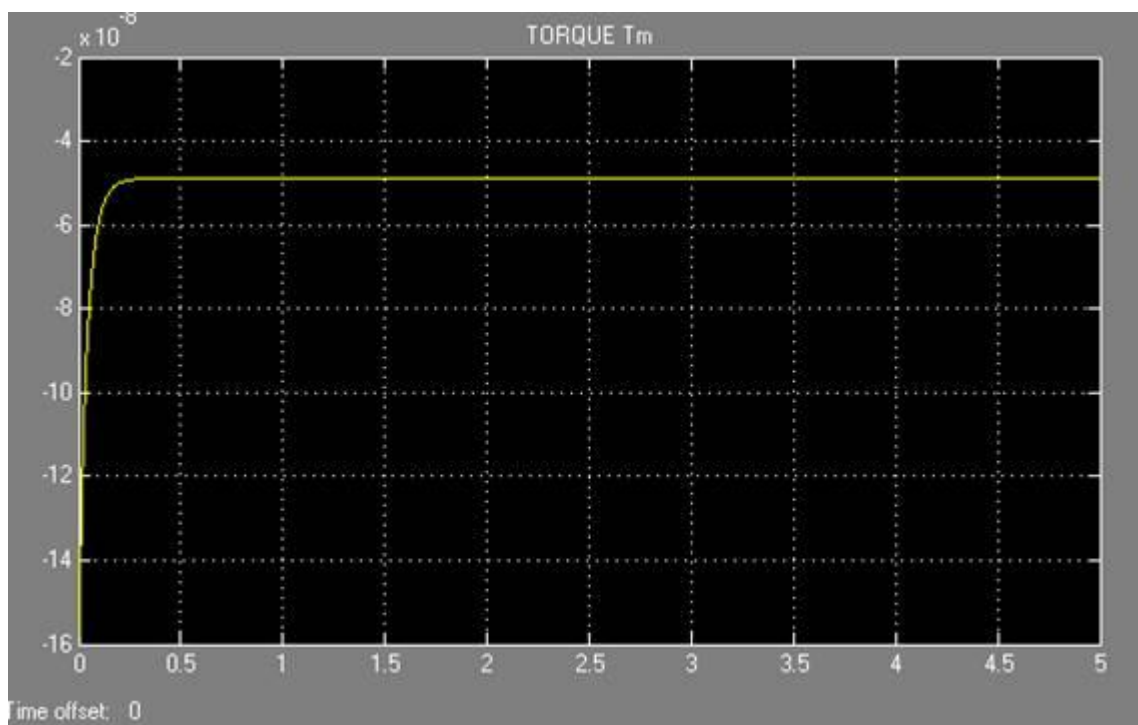
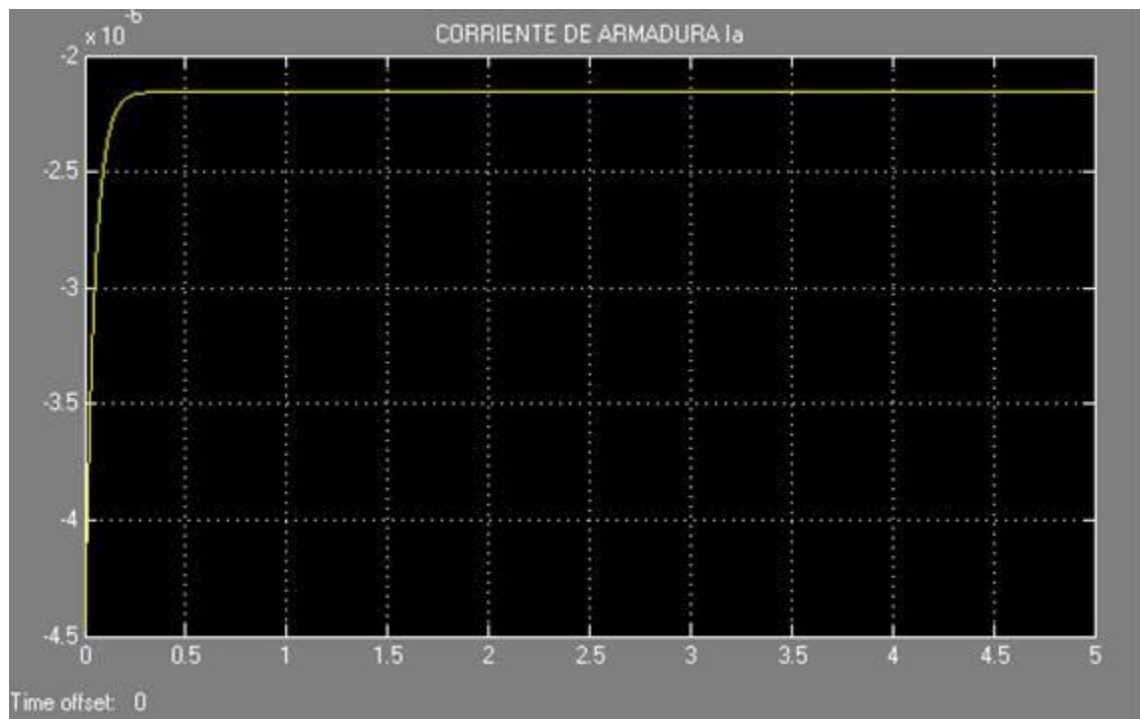
la = [-40:5:40];

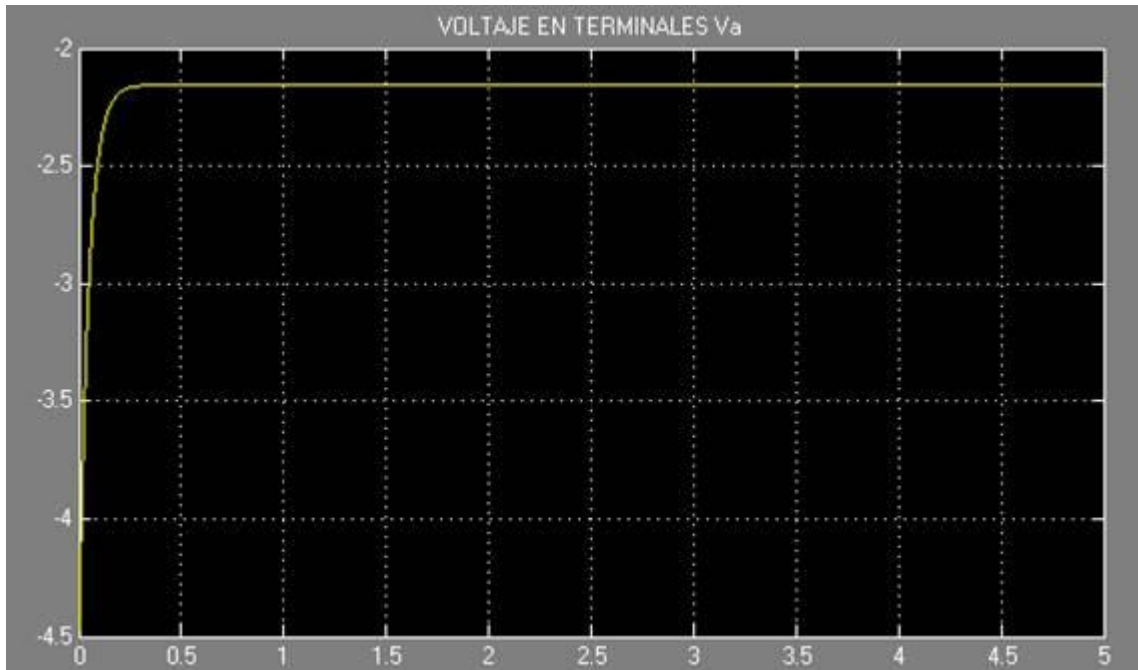
lar = 0.04*abs(atan(la)) + 0.0001*la.^2;

DIAGRAMA EN SIMULINK :









Invierta el signo de w_m y corra nuevamente la simulación. Observe el valor final de V_a . Cambie el signo de la polaridad de conexión del campo a -1. ¿Cuál es el valor final de V_a ¿ Varíe la resistencia de carga a 20, 10,5 y 4 ohms. Obtenga las gráficas de la corriente de armadura I_a , el voltaje terminal V_a y el torque electromagnético desarrollado por la máquina T_{em} para cada valor de RL.

5.4 EL MOTOR SHUNT

5.4.1 ECUACIONES DINÁMICAS

E_a es la fem proporcional al flujo y a la velocidad del motor :

$$E_a = k_a \phi w_m$$

El torque electromagnético desarrollado por el motor es :

$$T_{em} = k_a \phi I_a$$

Donde I_a es la corriente de armadura.

En reposo el rotor w_m y E_a son cero. Al arrancar se inserta la resistencia con el fin de que la corriente de armadura esté dentro de un límite seguro.

La ecuación de armadura es :

$$V_a = I_a R_t + L_{aq} (dI_a/dt) + E_a + V_{brush}$$

Donde R_t es la resistencia serie total de armadura, o sea, la resistencia de arranque y la resistencia de armadura R_a .

La ecuación del rotor es :

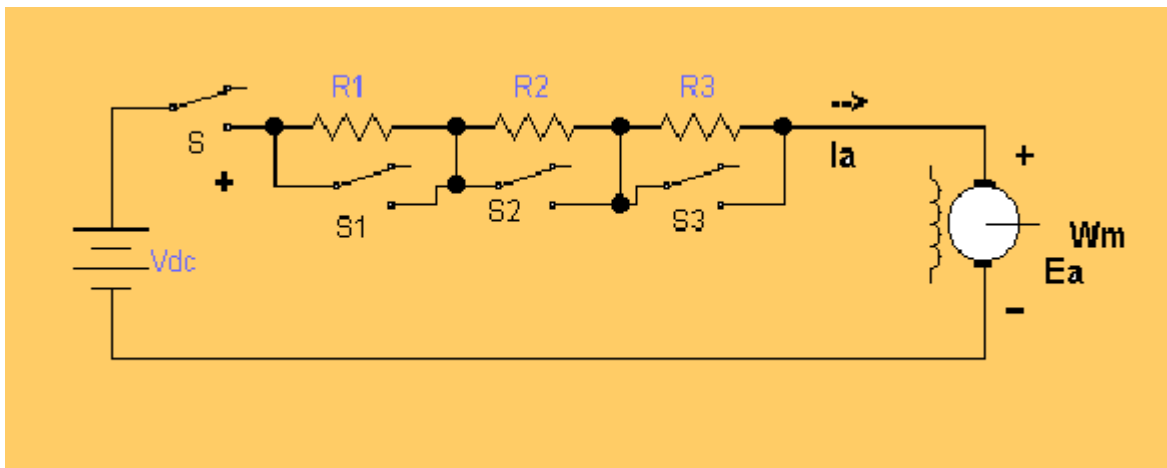
$$T_{em} + T_{mech} - D_w W_m = J (dW_m/dt)$$

Donde T_{mech} es el torque aplicado externamente en la dirección de rotación, D_w es el coeficiente de amortiguamiento y J la inercia del rotor.

Estas dos ecuaciones pueden ser re-escritas en forma integral así,

$$I_a(t) = \frac{1}{L_{aq}} \int_0^t (V_{dc} - V_{brush} - I_a R_t - E_a) dt + I_a(0) \quad \text{amperios}$$

$$W_m(t) = \frac{1}{J} \int_0^t (T_{em} + T_{mech} - D_w W_m) dt + W_m(0) \quad \text{rad/seg}$$



Los contactos $S1$, $S2$, $S3$ están inicialmente abiertos. Cuando el contacto principal S se cierra para arrancar el motor, la corriente de arranque inicial está limitada por encima a I_a^{max} . Cuando el rotor aumenta su velocidad la fuerza contraelectromotriz E_a aumenta con la velocidad reduciendo la corriente de armadura. Cuando la corriente decrece a un valor más bajo de

I_a^{min} el contacto S1 se cierra cortocircuitando R_1 aumentando nuevamente la corriente y el torque T_{em} acelerando el rotor. Como respuesta E_a aumenta decreciendo nuevamente la corriente. Cuando la corriente decrece a un valor más bajo del límite opera S2 cortocircuitando R_2 . lo mismo sucede con S3 y R_3 . Solamente queda el rotor con la resistencia del devanado de armadura y el rotor acelera a plena velocidad..

5.4.2 SIMULACIÓN

Arranque resistivo de un motor shunt con excitación independiente con parámetros 10 Kw, 220V, 1490 rpm, $R_a = 0.3$ ohms, $L_{aq} = 12$ mH, $V_{brush} = 2$ V, corriente rated de 50^a, $J = 2.5$ Kg-m², $D = 0$.

Si se requiere $I_a^{max} = 100$ A y $I_a^{min} = 60$ A, despreciando la inductancia de armadura y cerrando el contacto S,

$$E_a(0) = 0 = V_{dc} - V_{brush} - I_a^{max} (R_a + R_1 + R_2 + R_3)$$

En el instante de cortocircuitar R_1 ,

$$\begin{aligned} E_a(t_1) &= V_{dc} - V_{brush} - I_a^{min} (R_a + R_1 + R_2 + R_3) \\ &= V_{dc} - V_{brush} - I_a^{max} (R_a + R_2 + R_3) \end{aligned}$$

En el instante de cortocircuitar R_2 ,

$$\begin{aligned} E_a(t_2) &= V_{dc} - V_{brush} - I_a^{min} (R_a + R_2 + R_3) \\ &= V_{dc} - V_{brush} - I_a^{max} (R_a + R_3) \end{aligned}$$

En el instante de cortocircuitar R_3 ,

$$\begin{aligned} E_a(t_3) &= V_{dc} - V_{brush} - I_a^{min} (R_a + R_3) \\ &= V_{dc} - V_{brush} - I_a^{max} (R_a) \end{aligned}$$

Resolviendo las ecuaciones : $R_1 = 0.872 \Omega$, $R_2 = 0.523 \Omega$, $R_3 = 0.313 \Omega$

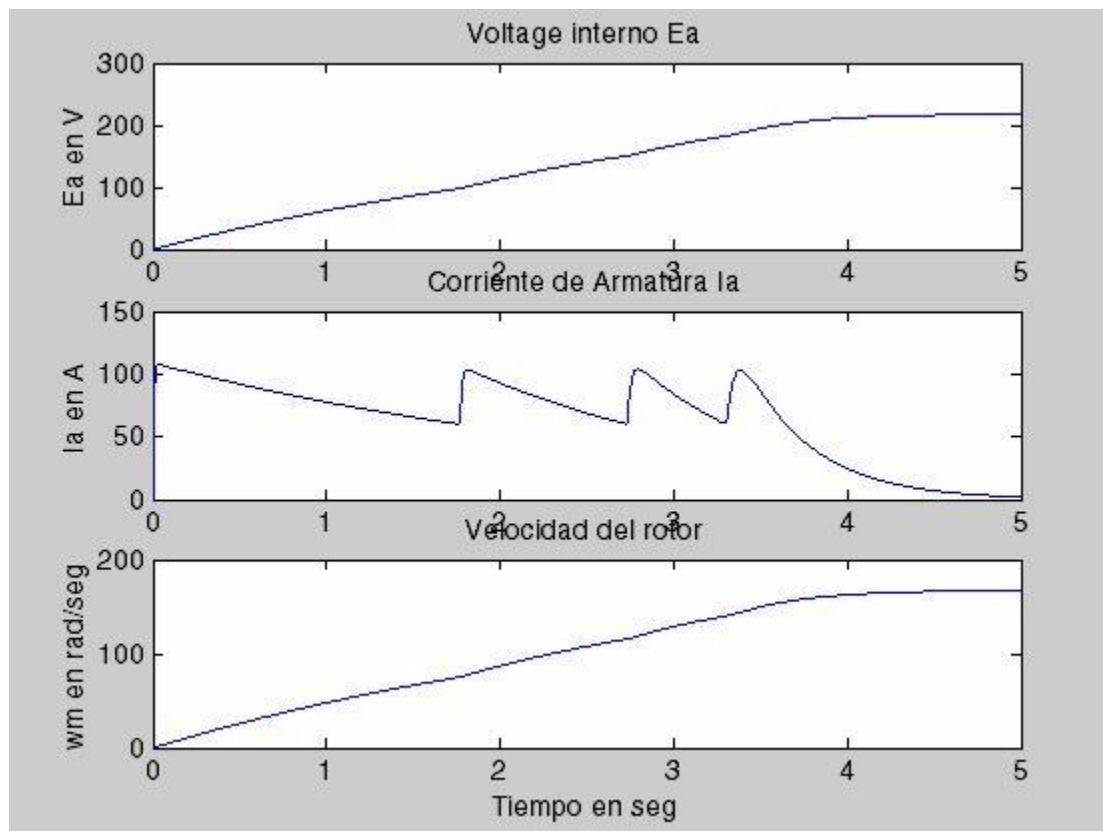
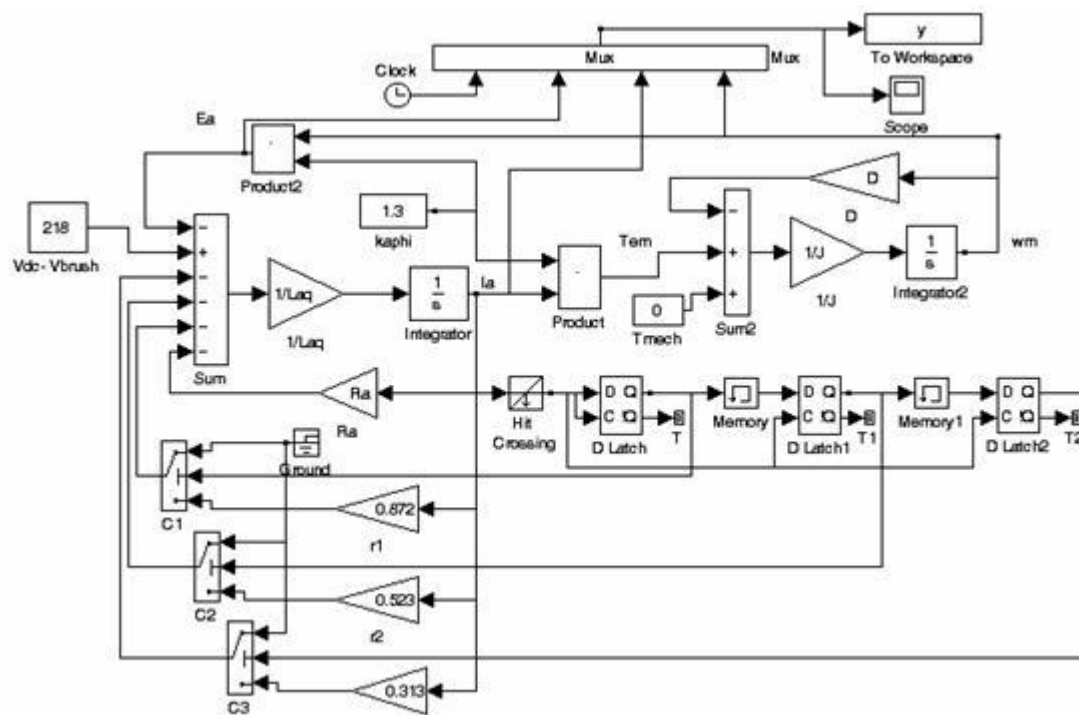
Simular el motor para $k_a \phi = 1.3$. La lógica secuencial para el arranque se implementa detectando la condición cuando I_a decrece debajo de I_a^{min} . El control de encendido de los contactos se hace a través de latches. El umbral de los contactos es de 0.5. Simule con carga de torque de $T_{mech} = 0$ y de 50 Nt-m.

PROGRAMA EN MATLAB :

% MOTOR SHUNT

```
Pnom = 10*746;  
Vnom = 220;  
Ianom = Pnom/Vnom;  
wmnom = 1490*(2*pi)/60;  
Tnom = Pnom/wmnom;  
Ra = 0.3;  
Laq = 0.012;  
J = 2.5;          % Inercia del rotor en kg*m2  
D= 0.0;          % Factor de amortiguamiento  
disp('Corra la simulacion y escriba return al aparecer la figura')  
keyboard  
clf;  
subplot(3,1,1)  
plot(y(:,1),y(:,2))  
title('Voltage interno Ea')  
ylabel('Ea en V')  
subplot(3,1,2)  
plot(y(:,1),y(:,3))  
title('Corriente de Armadura Ia')  
ylabel('Ia en A')  
subplot(3,1,3)  
plot(y(:,1),y(:,4))  
title('Velocidad del rotor')  
xlabel('Tiempo en seg')  
ylabel('wm en rad/seg')
```

PROGRAMA EN SIMULINK :



5.5 MÉTODOS DE FRENADO

5.5.1 ECUACIONES DINÁMICAS

Los métodos de frenado se harán en el segundo cuadrante del dominio torque velocidad en el cual I_a y T_{em} son invertidos. Los parámetros son : 2 Kw, 125V, 1750 rpm excitación del motor independiente, $J = 0.5 \text{ kg-m}^2$, $R_a = 0.14 \text{ ohms}$ se desprecia caída de las escobillas y reacción de armadura, corriente de armadura 16 A.

Método Plugging : Consiste en insertar simultáneamente una resistencia externa en el circuito de armadura en el momento de invertir V_a . Asumiendo que una corriente de armadura no exceda el 250%, esto es, 40 A.

$$k_a \phi = (V_a - R_a I_a) / \omega_m = (125 - 0.14 \cdot 16) / (1750 \cdot 2\pi / 60) = 0.6699 \text{ N.m /A}$$

$$T_{em} = k_a \phi I_a = 10.72 \text{ N.m}$$

$$E_a = k_a \phi \omega_m = 122.76 \text{ V}$$

El valor de la R_{ext} es de

$$E_a - (-V_a) = I_a^{max} (R_{ext} + R_a)$$

$$R_{ext} = (122.76 + 125)(2.5 \cdot 16) - 0.14 = 6.054 \Omega$$

Método dinámico : El método de cálculo de la resistencia externa es el mismo excepto que V_a durante el frenado es cero.

$$R_{ext} = (122.76)(2.5 \cdot 16) - 0.14 = 2.929 \Omega$$

Método regenerativo: El frenado se hace en el cuarto cuadrante y su operación es como en un elevador, la fuente de voltaje de armadura es controlada electrónicamente para realizar la subida y bajada con un torque de carga constante. La subida de la carga es en el primer cuadrante torque y velocidad positivos, al final de la subida la carga se mantiene un rato constante antes de poner la velocidad controlada hacia abajo.

5.5.2 SIMULACIÓN

Motor con excitación independiente :

Método Plugging y dinámico:

El torque de carga está descrito por la ecuación,

$$T_{load} = - T_{mech} = 0.01 + 3.189e^{-4} w_m^2$$

Método Regenerativo:

La velocidad de referencia w_m^* para la operación elevador la realiza un repeating sequence de la librería Source sincronizada con la velocidad w_m . El torque de carga se representa por un step con un cambio de paso de carga de torque de 0 a T_{rated} en $t=0$. Los valores de tiempo de entrada al repeating sequence son [0 30 40 50 65 75 85 95 100] y los correspondientes valores de la velocidad de salida son [0 wraise wraise 0 0 wlower wlower 0 0]. Wraise es puesto a la velocidad rated ($1750 \cdot 2\pi/60$), wlower a – la tercera parte de la velocidad rated y los límites del limitador de corriente un $\pm 120\%$ por arriba o por debajo de la corriente de armadura nominal.

PROGRAMA EN MATLAB

% Método regenerativo para un motor de excitación independiente

% Por : Chee-Mun Ong

% Parámetros de la máquina DC

*Prated = 2*746;*

Vrated = 125;

larated = 16;

wmrated = 1750(2*pi)/60;*

Trated = Prated/wmrated;

Ra = 0.14;

Rf = 111;

Rrh = 25; % reóstato del campo externo

Laq = 0.018;

Lf = 10;

D = 0; % amortiguamiento

J = 0.5; % inercia del rotor en kgm^2

wraise=wmrated

wlower=-wmrated/3

disp('Corra simulación y retorne para gráfica')

keyboard

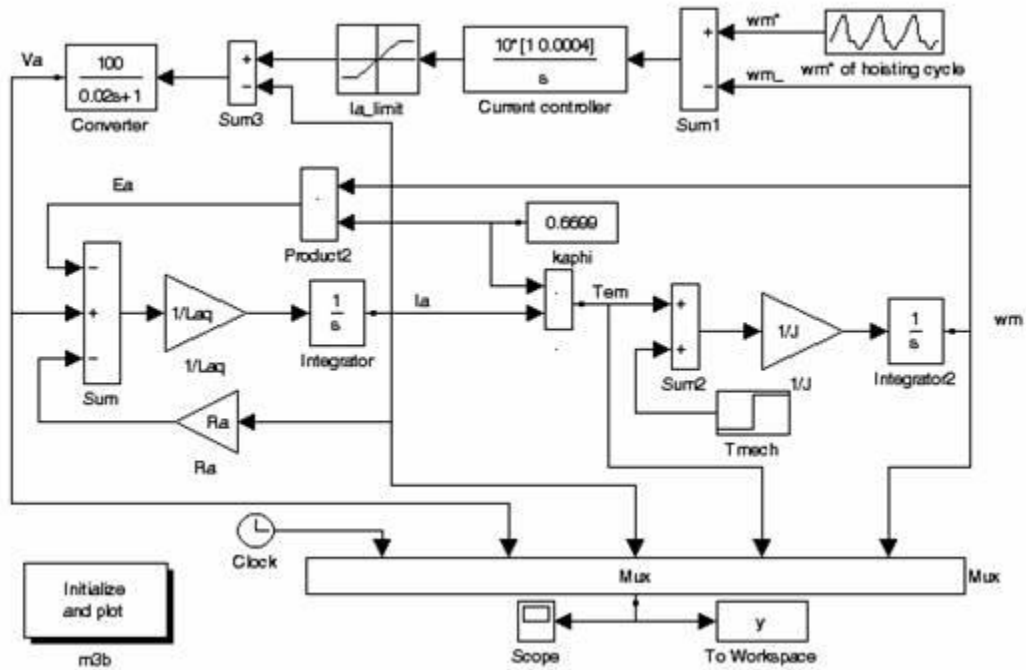
clf;

subplot(4,1,1)

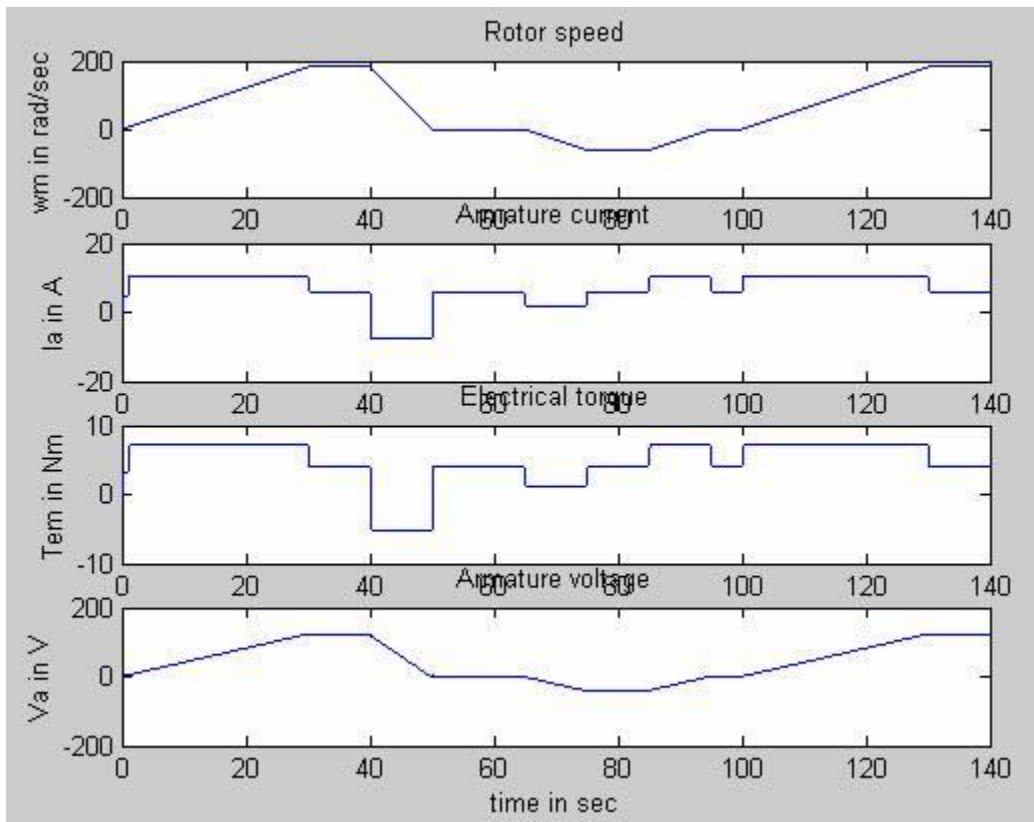
plot(y(:,1),y(:,5))

```
xlabel('tiempo en seg')
```

PROGRAMA EN SIMULINK :



Las curvas características obtenidas son las siguientes:



5.6 MOTOR UNIVERSAL

Un motor universal es un motor DC serie que está diseñado para operar con fuente AC. Las características de un motor universal son alta velocidad sin carga y alto torque de arranque.

5.6.1 ECUACIONES DINÁMICAS

Si la corriente de armadura es $I_a = I_m \cos wt$, la corriente en las bobinas si hay a mallas paralelas es

$$I_c = (1/a) I_m \cos wt$$

El flujo por polo es :

$$\Phi_{polo} = \Phi_m \cos wt$$

El torque es igual a :

$$T_{em} = (PZ/2\pi a) \phi_m I_m \cos^2 wt = K_a \phi I_a, \quad Z : \text{Número de conductores activos}$$

5.6.2 SIMULACIÓN

Simular un motor universal que tiene los siguientes parámetros : $P_{rated} = 325 \text{ W}$, voltaje terminal rated = 120 Vrms, velocidad rated = 2800 rpm, L_{aq} (armadura)= 10mH, L_{se} (serie) = 26 mH, frecuencia=60 Hz, Corriente de armadura rated= 3.5 Arms, $R_a = 0.6 \text{ ohms}$, $R_{se} = 0.1 \text{ ohm}$, J (inercia del rotor) = 0.015 Kgm².

La característica de magnetización a 1500 rpm se obtiene con los siguientes datos,

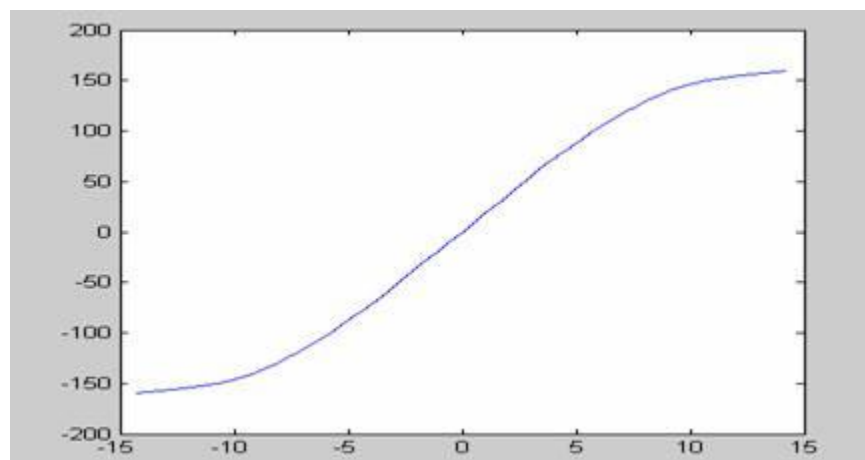
Valores del voltaje de carga :

SEVP4 = [-160 -155 -150 -145 -140 -135 -130 -125 -120 ...
 -115 -110 -105 -100 -90 -80 -70 -60 -50 -40 -30 -20 -10 0 ...
 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 105 110 115 120 125 130 135 ...
 140 145 150 155 160];

Valores de la corriente de campo principal :

SEIP4 = [-14.225 -12.275 -10.725 -9.725 -9.100 -8.600 ...
 -8.075 -7.650 -7.200 -6.850 -6.492 -6.135 -5.775 -5.112 -4.500 ...
 -3.825 -3.275 -2.783 -2.250 -1.688 -1.125 -0.542 0.0 0.542 1.125 ...
 1.688 2.250 2.783 3.275 3.825 4.500 5.112 5.775 6.135 ...
 6.492 6.850 7.200 7.650 8.075 8.600 9.100 9.725 10.725 ...
 12.275 14.225];

Curva de magnetización obtenida :



El suiche SW controla la alimentación dc o ac al circuito de armadura. La función step en T_{mech} permite cambiar el nivel de carga de torque. Primero se examinará los trasientes de arranque con un voltaje terminal de 120 V como V_a y un torque de carga igual al valor rated de 1.1084 N.m obteniéndose las gráficas de la corriente de armadura i_a , voltaje interno E_a , torque desarrollado T_{em} y velocidad del rotor w_m .

PROGRAMA EN MATLAB :

% Parámetros del Motor Universal

% Por : Chee-Mun Ong

Prated = 325;

Frated = 60;

wrated = 2*pi*Frated;

Vrated = 120; % rms voltage

Iarated = 3.5 % rms amp

wmrated = 2800*(2*pi)/60;

Trated = Prated/wmrated;

Ra = 0.6;

Rse = 0.1;

Laq = 0.010;

Lse = 0.026;

J = 0.015; % inercia del rotor kgm2

%Datos para la curva de magnetización

wmo = 1500*(2*pi)/60; % velocidad en la cual se hizo la curva de mag.

% valores del voltaje de carga para la curva de magnetización

SEVP4 = [-160 -155 -150 -145 -140 -135 -130 -125 -120 ...

-115 -110 -105 -100 -90 -80 -70 -60 -50 -40 -30 -20 -10 0 ...

10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 105 110 115 120 125 130 135 ...

140 145 150 155 160];

% Valores de la corriente de campo de la curva de magnetización

SEIP4 = [-14.225 -12.275 -10.725 -9.725 -9.100 -8.600 ...

-8.075 -7.650 -7.200 -6.850 -6.492 -6.135 -5.775 -5.112 -4.500 ...

-3.825 -3.275 -2.783 -2.250 -1.688 -1.125 -0.542 0.0 0.542 1.125 ...

1.688 2.250 2.783 3.275 3.825 4.500 5.112 5.775 6.135 ...

6.492 6.850 7.200 7.650 8.075 8.600 9.100 9.725 10.725 ...

12.275 14.225];

clf;

% borrar figura

plot(SEIP4,SEVP4);

% curva de magnetización medida en wmo

axis('square')

% corra condición inicial

```

Sw4AC = 1                % suiche = 1 para usar fuente ac
wm0 = 0                  % velocidad inicial =0

% Transferencia a teclado para arrancar simulación
disp(' presione enter y luego "return" para obtener la gráfica');
keyboard
clf;
subplot(4,1,1)
plot(y(:,1),y(:,2))
title('fuente de voltaje ac')
ylabel('Va en V')
subplot(4,1,2)
plot(y(:,1),y(:,3))
title('Voltaje interno')
ylabel('Ea en V')
subplot(4,1,3)
plot(y(:,1),y(:,4))
title('Corriente de armadura')
ylabel('Ia en A')
subplot(4,1,4)
plot(y(:,1),y(:,5))
title('Torque')
ylabel('Tem en Nm')
xlabel('tiempo en seg')
keyboard

% corra condiciones iniciales
Sw4AC = 1
wm0 = 275;                % valor inicial cerca al est-estacionario
% Transfiera a teclado para correr el paso de torque
disp('luego entre "return" para el caso de alimentación dc');
keyboard
clf;
subplot(4,1,1)
plot(y(:,1),y(:,4))
title('Corriente de armadura con fuente ac')
ylabel('Ia en A')
subplot(4,1,2)
plot(y(:,1),y(:,5))
title('Torque con fuente ac')
ylabel('Tem en Nm')

% corra condiciones iniciales
Sw4AC = 0                % Ponga suiche para uente dc
wm0 = 350;
disp('Para alimentación dc, corra paso de torque, realice simulación')
disp(' luego entre "return" para ver la gráficas');

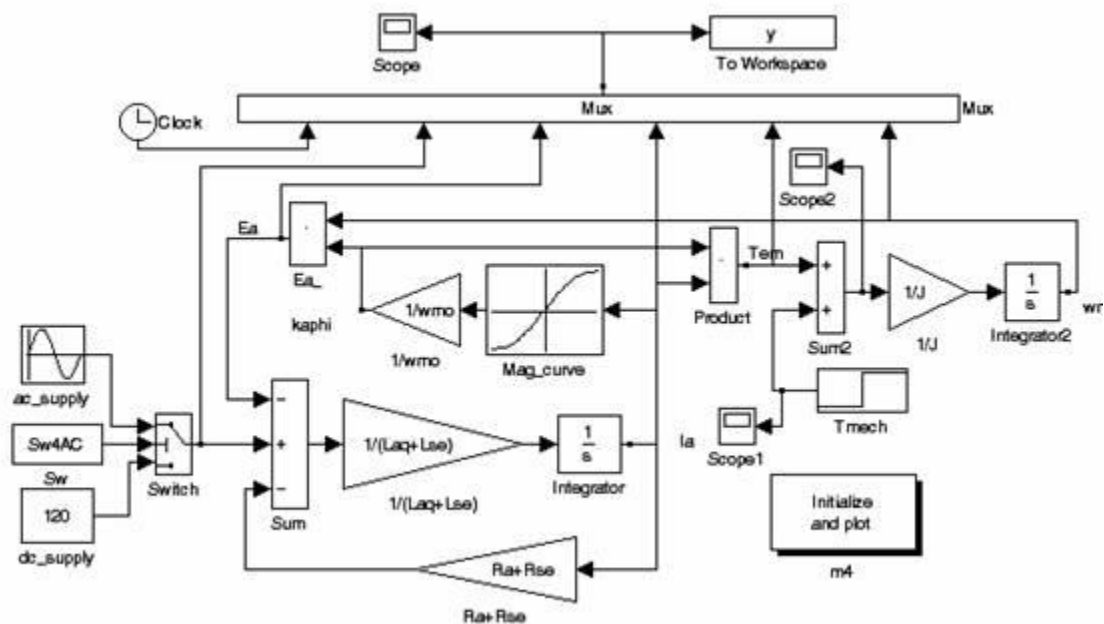
```

```

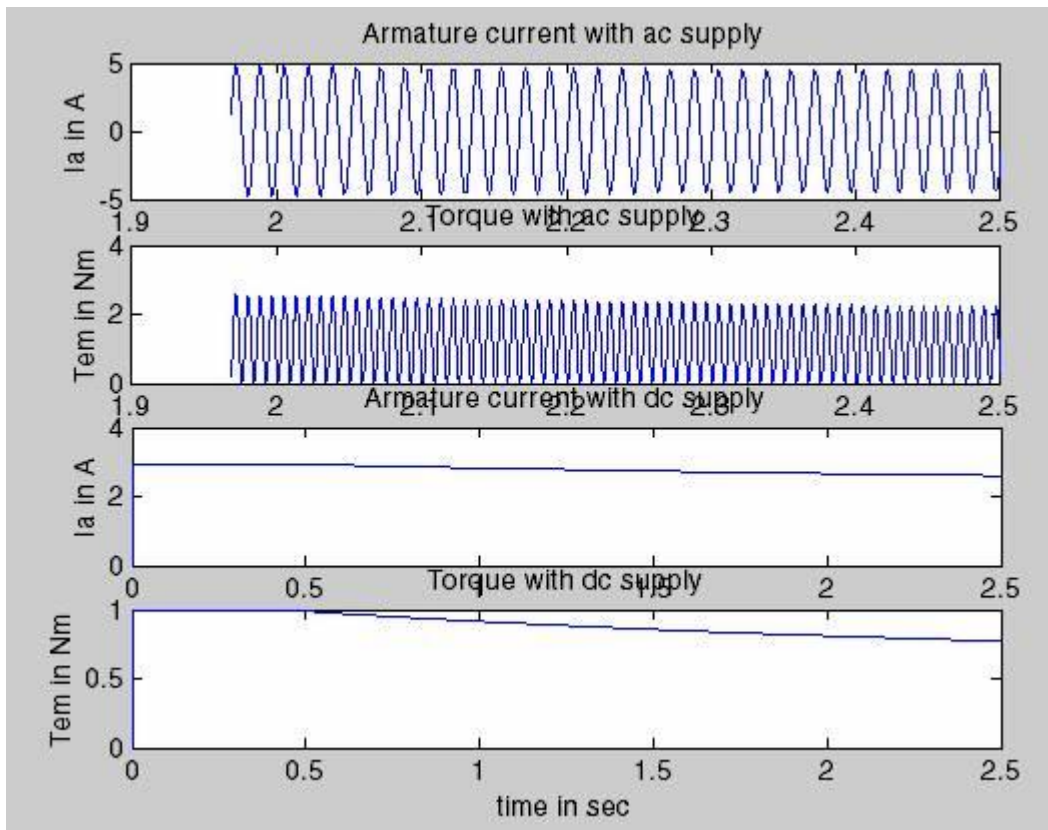
keyboard
subplot(4,1,3)
plot(y(:,1),y(:,4))
title('corriente de armadura con fuente dc')
ylabel('Ia en A')
subplot(4,1,4)
plot(y(:,1),y(:,5))
title('Torque con fuente dc')
ylabel('Tem en Nm')
xlabel('tiempo en seg');

```

PROGRAMA EN SIMULINK :

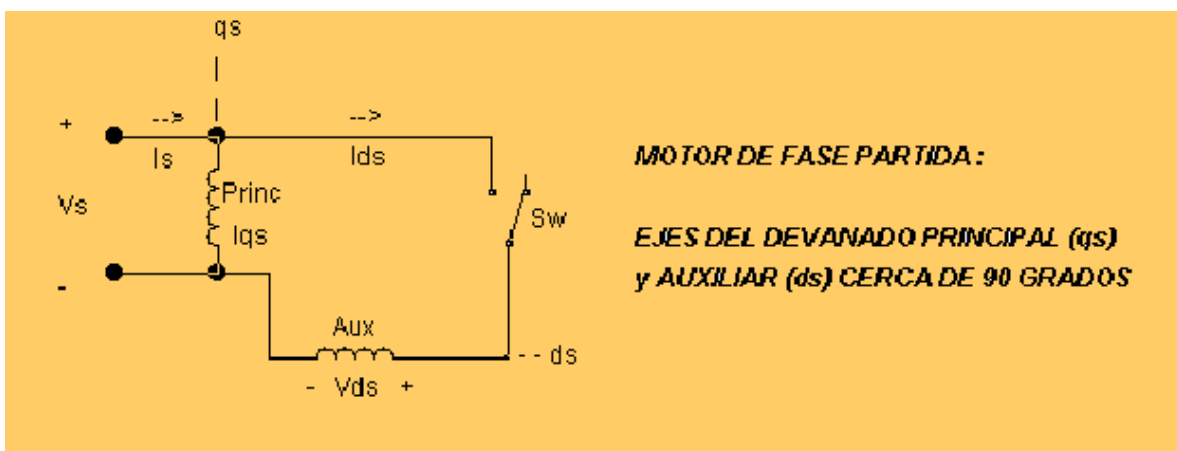


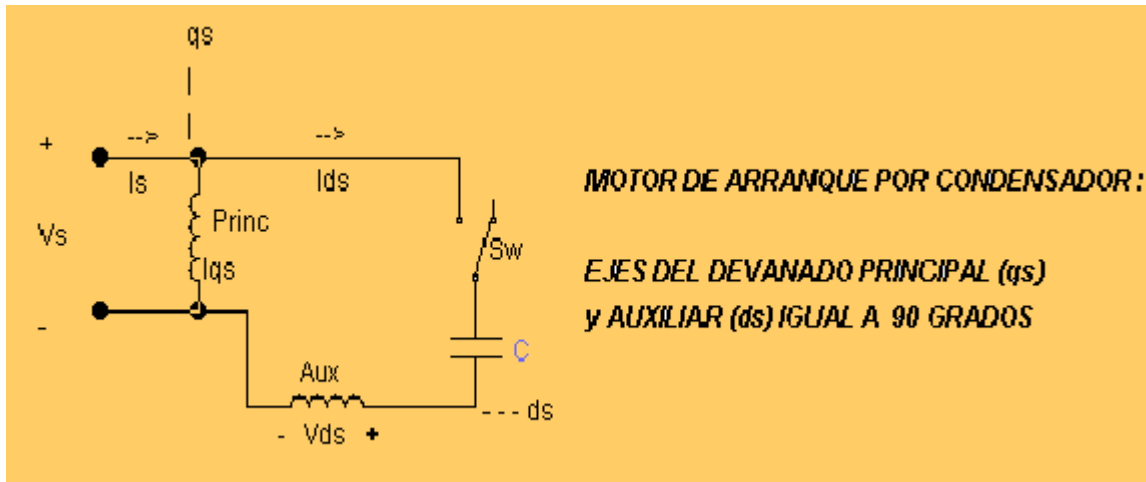
Las curvas características son :



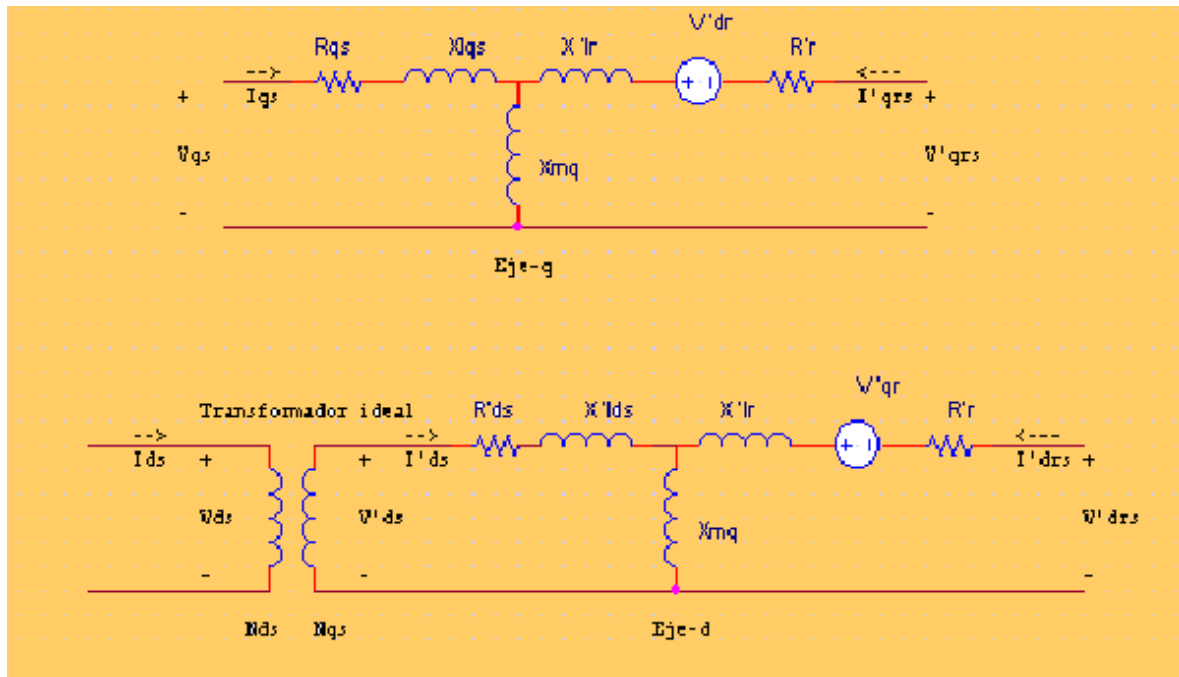
5.7 MOTOR MONOFÁSICO

Los motores monofásicos de inducción se encuentran como de fase partida, arranque por condensador y arranque y marcha por condensador. El rotor es en jaula de ardilla.





El circuito equivalente es el siguiente :



$$V'_{dr} = \phi'_{dr} \frac{\omega_r}{\omega_b}, \quad V'_{qr} = \phi'_{qr} \frac{\omega_r}{\omega_b}, \quad I'_{ds} = \frac{N_{ds}}{N_{qs}} I_{ds}$$

5.7.1 ECUACIONES BÁSICAS

Frecuencia base mecánica :

$$\omega_{bm} = 2 \cdot \omega_b / P$$

Torque base :

$$T_b = S_b / \omega_{bm}$$

Impedancia base :

$$Z_b = V_{rated} * V_{rated} / S_b$$

Voltaje de fase :

$$V_m = V_{rated} * \sqrt{2}$$

Voltaje de base rms :

$$V_b = V_m$$

Coeficiente de torque :

$$T_{factor} = P / (2 * \omega_b)$$

Resistencia y reactancia del devanado auxiliar respecto al principal :

$$r_{pds} = (N_q / N_d)^2 * r_{ds}$$

$$x_{plds} = (N_q / N_d)^2 * x_{lds}$$

$$x_{Mq} = 1 / (1/x_{mq} + 1/x_{lqs} + 1/x_{plr})$$

$$x_{Md} = 1 / (1/x_{mq} + 1/x_{plds} + 1/x_{plr})$$

Constante de inercia del rotor en segundos :

$$H = J * \omega_{bm} * \omega_{bm} / (2 * S_b)$$

Motor de fase partida :

$$\begin{array}{ll} Z_{pcstart} = 0 + j * \epsilon_{ps}, & Z_{pcrun} = 0 + j * \epsilon_{ps} \\ Capstart = 0, & Caprun = 0 \text{ (banderas)} \\ W_{rswbbywb} = w_e & \text{(velocidad del rotor al desconectarse el condensador)} \end{array}$$

Motor de arranque por condensador :

$$\begin{array}{ll} Z_{pcstart} = (N_q / N_d)^2 * Z_{cstart}, & Z_{pcrun} = 0 + j * \epsilon_{ps} \\ Capstart = 1, & Caprun = 0 \text{ (banderas)} \\ W_{rswbbywb} = 0.75 w_e & \end{array}$$

Motor de marcha por condensador :

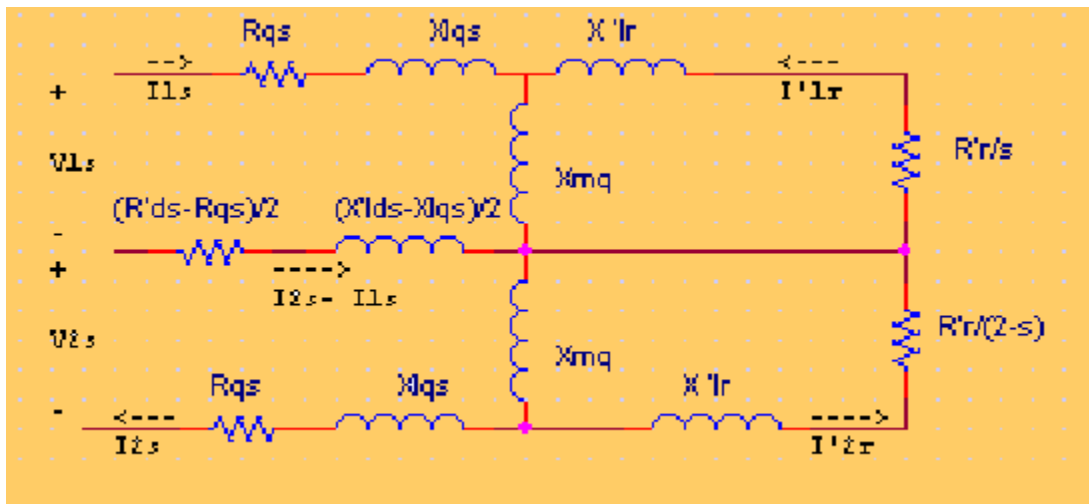
$$\begin{aligned} Z_{pcstart} &= (N_q/N_d)^2 * Z_{cstart}, & Z_{pcrun} &= (N_q/N_d)^2 * Z_{crun} \\ Capstart &= 0, & Caprun &= 1 \text{ (banderas)} \\ W_{rswbbywb} &= 0.75 \text{ we} \end{aligned}$$

Para las tres configuraciones :

$$\begin{aligned} R_{crun} &= \text{real}(Z_{pcrun}), & X_{crun} &= \text{imag}(Z_{pcrun}) \\ C_{run} &= -1/\omega_b X_{crun} \\ R_{cstart} &= \text{real}(Z_{pcstart}), & X_{cstart} &= \text{imag}(Z_{pcstart}) \\ C_{start} &= -1/\omega_b X_{cstart} \\ Z_{qs} &= R_{qs} + jX_{lqs} \\ R_{pds} &= (N_q/N_d)^2 R_{ds}, & X_{lpds} &= (N_q/N_d)^2 X_{lds} \text{ (referidas al principal)} \end{aligned}$$

5.7.2 ECUACIONES EN ESTADO ESTACIONARIO

El circuito equivalente en estado estacionario es el siguiente :



Si s_1 es deslizamiento positivo y s_2 es deslizamiento negativo :

$$\omega_r = 2 \omega_e (1-s_1)/P \quad \text{donde } P \text{ es el número de polos}$$

$$Z_{p1r} = R_{pr}/s_1 + jX_{plr}, \quad Z_{1s} = j(X_{mq} * Z_{p1r}) / (Z_{p1r} + jX_{mq})$$

$$Z_{p2r} = R_{pr}/s_2 + jX_{plr}, \quad Z_{2s} = j(X_{mq} * Z_{p2r}) / (Z_{p2r} + jX_{mq})$$

$$Z_{11} = Z_{qs} + Z_{1s} + Z_{cross} \quad Z_{22} = Z_{qs} + Z_{2s} + Z_{cross}$$

Donde,

$$Z_{cross} = 0.5(R_{pds} + \text{real}(Z_{pcstart}) - R_{qs}) + j \cdot 0.5(X_{lpds} + \text{imag}(Z_{pcstart}) - X_{lqs})$$

$$Z_{mat} = \begin{vmatrix} Z_{11} & -Z_{cross} \\ -Z_{cross} & Z_{22} \end{vmatrix}$$

$I_{12} = Z_{mat}^{-1} V_{12}$, donde V_{12} se obtiene de :

$$V_{12} = V_{rated} + j0, \quad V_{pds} = (N_q/N_d) V_{qs}$$

$$T(\text{transformación}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ 1 & j \end{vmatrix} \quad V_{12} = T * \begin{vmatrix} V_{qs} \\ V_{pds} \end{vmatrix}$$

$$I_{qd} = T^{-1} \begin{vmatrix} I_{1s} \\ I_{2s} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{qd}(1) \\ I_{qd}(2) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_q \\ I_d \end{vmatrix}$$

La potencia total de entrada compleja es igual a :

$$S_{in} = \begin{vmatrix} V_{qs} \\ V_{pds} \end{vmatrix} * \text{conj}(I_{qd}) \quad P_{in} = \text{real}(S_{in})$$

El torque promedio es igual a :

$$T_{prom} = \frac{P}{2\omega_e} \left(|I_{p1r}|^2 * \frac{R_{pr}}{s_1} - |I_{p2r}|^2 * \frac{R_{pr}}{s_2} \right)$$

La potencia promedio es :

$$P_{prom} = T_{prom} * \omega_r$$

La eficiencia es :

$$Eff = (P_{prom} / P_{in}) * 100$$

5.7.3 SIMULACIÓN

Parámetros de un motor de inducción monofásico de 1/4 hp, 110 volts, de arranque y marcha por condensador : $S_b = 186.5$ en VA, $Prated = 186.5$ en W, número de polos $P = 4$, $frated = 60$ Hz, relación de vueltas del devando principal al auxiliar $N_q/N_d = 1/1.18$, resistencia del devanado principal $R_{qs} = 2.02$, reactancia $X_{lqs} = 2.79$, resistencia del auxiliar $R_{ds} = 7.14$, reactancia $X_{lds} = 3.22$, reactancia del rotor respecto al dev. principal $X_{plr} = 2.12$, resistencia del rotor respecto al principal $R_{pr} = 4.12$, reactancia magnetizante respecto al principal $X_{mq} = 66.8$, inercia del rotor $J = 1.46e-2$ kg m², amortiguamiento del rotor $D_{omega} = 0$, impedancia del condensador de arranque $Z_{cstart} = 3 - j*14.5$, impedancia del condensador de marcha $Z_{crun} = 9 - j*172$, cambio de la velocidad del rotor de arranque a marcha $w_{rsw} = 0.75*w_b$ rev/min

PROGRAMA EN MATLAB :

% Motor Monofásico de Inducción

% Por : Chee-Mun Ong

% a) Corra este programa de parámetros del motor de ¼ hp

Sb = 186.5; % 1/4 hp en VA
Prated = 186.5; % 1/4 hp potencia de salida en W
Vrated = 110; % voltaje rms en V
P = 4; % número de polos
frated = 60; % frecuencia en Hz
*wb = 2*pi*frated; % frecuencia base eléctrica*
we = wb;
*wbm = 2*wb/P; % frecuencia base mecánica*
Tb = Sb/wbm; % torque base
*Zb = Vrated*Vrated/Sb; % impedancia base en ohms*
*Vm = Vrated*sqrt(2); % voltaje de fase*
Vb = Vm; % voltaje rms de base
*Tfactor = P/(2*wb); % expresión de coeficiente de torque*

% 1/4 hp, 4 pole, 110 volts capacitor start, capacitor run,

% single-phase induction motor parameters in engineering units from

% Krause, P. C. , "Simulation of Unsymmetrical Induction

% Machinery," IEEE Trans. on Power Apparatus,

% Vol.PAS-84, No.11, November 1965.

% Copyright 1965 IEEE

Nq2Nd = 1/1.18; % Nqs/Nds relacion de vueltas de prin a aux
rqs = 2.02; % resistencia del devanado principal
xlqs = 2.79; % reactancia del devanado principal
rds = 7.14; % resistencia del devanado auxiliar
xlds = 3.22; % reactancia del devanado auxiliar
% resistencia del devanado auxiliar referido al devanado principal

```

rpds=(Nq2Nd^2)*rds;
% reactancia del devanado auxiliar referido al devanado principal
xplds=(Nq2Nd^2)*xlds;
% reactancia del rotor referido al devanado principal
xplr = 2.12;
% resistencia del rotor referido al devanado principal
rpr = 4.12;
% reactancia de magnetización referido al devanado principal
xmq = 66.8;
xMq = 1/(1/xmq + 1/xlqs + 1/xplr);
xMd = 1/(1/xmq + 1/xplds + 1/xplr);
J = 1.46e-2; % inercia del rotor kg m2
H = J*wbm*wbm/(2*Sb); % constante de inercia del rotor en seg
Domega = 0; % coeficiente de amortiguamiento del rotor
zcstart = 3 - j*14.5; % condensador de arranque
zcrun = 9 - j*172; % condensador de marcha
wrsw = 0.75*wb; % velocidad del rotor de arranque a marcha en rpm

% b) Corra el siguiente programa de simulación del motor monofásico
clear all
disp('entre el nombre del archivo de los parámetros sin .m')
disp('Ejemplo: psph')
setX = input('entre el archivo de los parámetros ','s')
eval(setX);

% Cálculo de la curva velocidad torque
Vqs = Vrated + j*0; % voltaje fasor rms del dev. princ.
Vpds = Nq2Nd*(Vrated + j*0); % rms aux wdg voltage referred to main wdg
T = (1/sqrt(2))*[ 1 -j; 1 j ]; % transformación
V12 = T*[Vqs; Vpds]; % transformando qds a secuencia

disp('Seleccione la opción con o sin condensador')
opt_cap= menu('Tipo de máquina ? ','sin condensador','con condensador de
arranque solamente','con condensador de arranque y marcha')
if (opt_cap == 1) % Maquina de fase partida, sin cond.
disp('Maquina de fase partida')
zpcstart = 0 +j*eps; % zcstart referida al dev princ
zpcrun = 0 +j*eps; % zcrun referida al dev princ
zC = zpcstart;
Capstart = 0; % ponga bandera
Caprun = 0; % ponga bandera
wrswbywb = we; % veloc de rotor al descon cond de
arranque
end
if (opt_cap == 2) % Maquina con cond de arranque
disp(' Maquina con condens de arranque')
zpcstart = (Nq2Nd^2)*zcstart; % zcrstart referida al dev princ

```

```

zpcrun = 0 +j*eps; % zcrun referida al dev princ
zC = zpcstart;
Capstart = 1; % poner bandera
Caprun = 0; % poner bandera
wrsbywb = 0.75; % veloc del rotor al descon cond de
arranque
end
if (opt_cap == 3) % Maquina con cond de marcha
disp(' Maquina con condens de marcha')
zpcstart = (Nq2Nd^2)*zcstart; % zcstart referida al dev princ
zpcrun = (Nq2Nd^2)*zcrun; % zcrun referida al dev princ
zC = zpcrun;
Capstart = 0; % poner bandera
Caprun = 1; % poner bandera
wrsbywb = 0.75; % velocidad del rotor de arranque a marcha
end

Rcrun = real(zpcrun); % resistencia referida al cond de marcha
Xcrun = imag(zpcrun); % reactancia referida al cond de marcha
Crun = -1/(wb*Xcrun); % capacitancia referida al cond de marcha
Rcstart = real(zpcstart); % resistencia referida al con de arranque
Xcstart = imag(zpcstart); % reactancia referida al cond de arranque
Cstart = -1/(wb*Xcstart); % capacitancia referida al cond de arranque

zqs = rqs + j*xlqs; % impedancia interna del dev princ
zcross = 0.5*(rpds + real(zC) - rqs) + j*0.5*(xplds + imag(zC) - xlqs);

% vector de valores de deslizamiento
s = (1:-0.02:0);
N=length(s);
for n=1:N
s1 = s(n); % deslizamiento positivo
s2 = 2-s(n); % deslizamiento negativo
wr(n)=2*we*(1-s1)/P; % veloc mecanica del rotor en rad/seg
if abs(s1) < eps; s1 = eps; end;
zp1r = rpr/s1 + j*xplr;
z1s = j*xmq*zp1r/(zp1r + j*xmq);
if abs(s2) < eps; s2 = eps; end;
zp2r = rpr/s2 + j*xplr;
z2s = j*xmq*zp2r/(zp2r + j*xmq);
z11 = zqs + z1s + zcross;
z22 = zqs + z2s + zcross;
zmat = [ z11 -zcross; -zcross z22 ];
I12 = inv(zmat)*V12;
I1s = I12(1);
I2s = I12(2);
Iqd = inv(T)*[I1s; I2s];

```

```

Sin =[Vqs Vpds]*conj(Iqd);
Pin = real( Sin);
anglq(n) =angle(Iqd(1))*180/pi;
angld(n) =angle(Iqd(2))*180/pi;
maglq(n) =abs(Iqd(1));
magld(n) =abs(Iqd(2));
lp1r = -j*xmq*I1s/(zp1r + j*xmq);
lp2r = -j*xmq*I2s/(zp2r + j*xmq);
Tavg(n)=(P/(2*we))*(abs(lp1r)^2*rpr/s1 - abs(lp2r)^2*rpr/s2);
Pavg(n)=Tavg(n)*wr(n);
if abs(Pin) < eps; Pin = eps; end;
eff(n)=100*Pavg(n)/Pin;
end % fin de for

N=size(wr);
subplot(3,2,1)
plot(wr,Tavg,'-')
xlabel('Velocidad del rotor en rad/seg')
ylabel('Torque en Nm')
subplot(3,2,2)
plot(wr,Pavg,'-')
xlabel('Velocidad del rotor en rad/seg')
ylabel('Potencia desarrollada en Watts')
subplot(3,2,3)
plot(wr,maglq,'-')
xlabel('Velocidad del rotor en rad/seg')
ylabel('|Iqs| en A')
subplot(3,2,4)
plot(wr,magld,'-')
xlabel('Velocidad del rotor en rad/seg')
ylabel('|Ipds| in A')
subplot(3,2,5)
plot(wr,eff,'-')
xlabel('Velocidad del rotor en rad/seg')
ylabel('Porcentaje de eficiencia')
subplot(3,2,6)
plot(wr,anglq,'-')
hold on
plot(wr,angld,'-')
xlabel('Velocidad del rotor en rad/seg')
ylabel('Iqs y Ipds angulo en grados')
hold off

disp('Displaying steady-state characteristics ')
fprintf('Impedancia del cond %.4g %.4gj Ohms\n', real(zC), imag(zC))
disp('Entre "return" para proceder con la simulacion');
keyboard

```

```

% Transfiera a teclado para simulacion
disp('Seleccione la carga durante la corrida')
opt_load = menu('Con carga? ','Sin carga','Con pasos de cambios en carga')

```

```

% Poner condicione iniales para simulink en ceros

```

```

Psiqso = 0;
Psipdso = 0;
Psipqro = 0;
Psipdro = 0;
wrbywbo = 0;

```

```

% Poner repeating sequence en Tmech

```

```

if (opt_load == 1) % Sin carga
    tstop = 2; % tiempo de simulacion
    tmech_time = [0 tstop];
    tmech_value = [0 0];
end
if (opt_load == 2) % Paso de cambio en la carga
    tstop = 2.5; % tiempo de simulacion
    tmech_time = [0 1.5 1.5 1.75 1.75 2.0 2.0 2.25 2.25 2.5];
    tmech_value = [0 0 -Tb -Tb -Tb/2 -Tb/2 -Tb -Tb 0 0];
end

```

```

disp('Corra la simulacion ')
disp('cargue a frecuencia fija')
disp('entre " return" para ver graficas');
keyboard

```

```

% Converta valores anteriores al actual

```

```

Vds = y(:,3)/Nq2Nd;
Ids = y(:,8)*Nq2Nd;
Vcap = y(:,4)/Nq2Nd;
Psids = y(:,7)/Nq2Nd;

```

```

h1=gcf;
subplot(5,1,1)
plot(y(:,1),y(:,2),'-')
ylabel('Vqs in V')
subplot(5,1,2)
plot(y(:,1),Vds,'-')
ylabel('Vds in V')
subplot(5,1,3)
plot(y(:,1),y(:,9),'-')
axis([-inf inf -1 1])
ylabel('Tmech in Nm')
subplot(5,1,4)

```

```

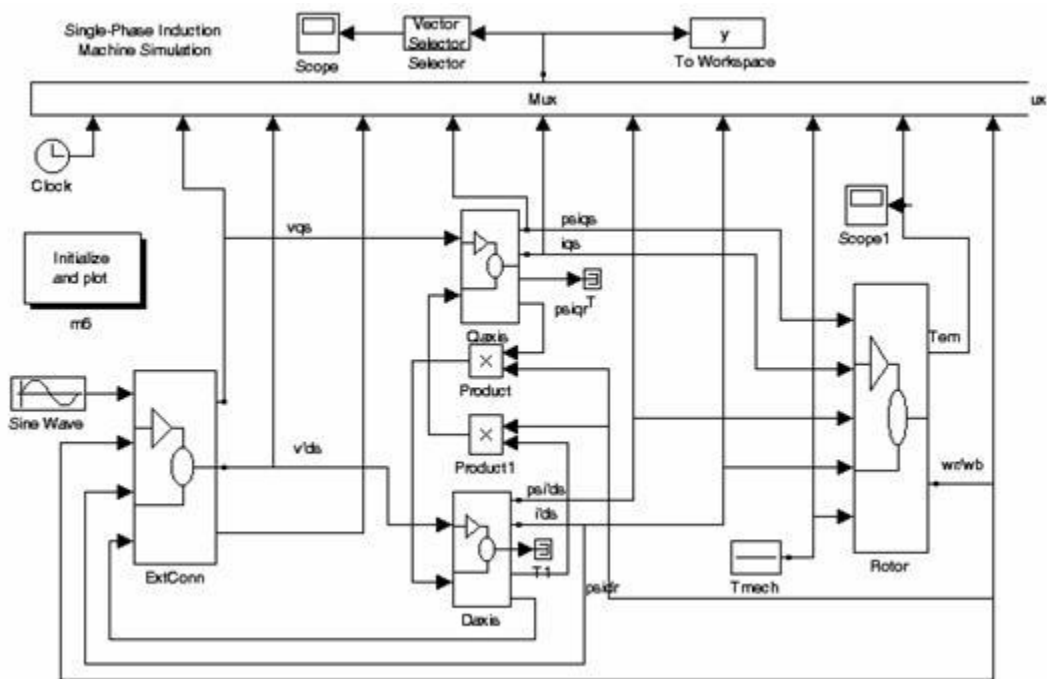
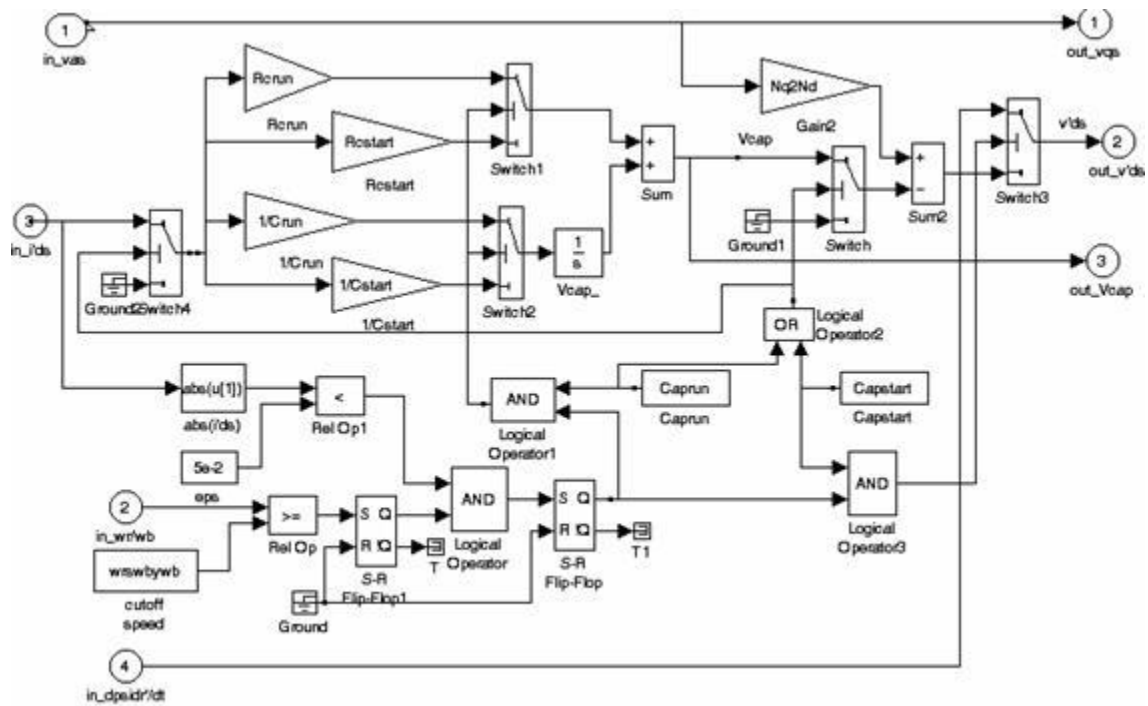
plot(y(:,1),y(:,10),'-')
ylabel('Tem in Nm')
subplot(5,1,5)
plot(y(:,1),y(:,11),'-')
xlabel('Time in sec')
ylabel('wr/wb in pu')
h2=figure;
subplot(5,1,1)
plot(y(:,1),Vcap,'-')
ylabel('Vcap in V')
subplot(5,1,2)
plot(y(:,1),y(:,5),'-')
ylabel('Psiqs in V')
subplot(5,1,3)
plot(y(:,1),y(:,6),'-')
ylabel('Iqs in A')
subplot(5,1,4)
plot(y(:,1),Psids,'-')
ylabel('Psids in V')
subplot(5,1,5)
plot(y(:,1),lds,'-')
xlabel('Time in sec')
ylabel('lds in A')

disp('Salve las graficas en Figs. 1, and 2')
disp('ante de digitar return para salir');
keyboard;
close(h2);

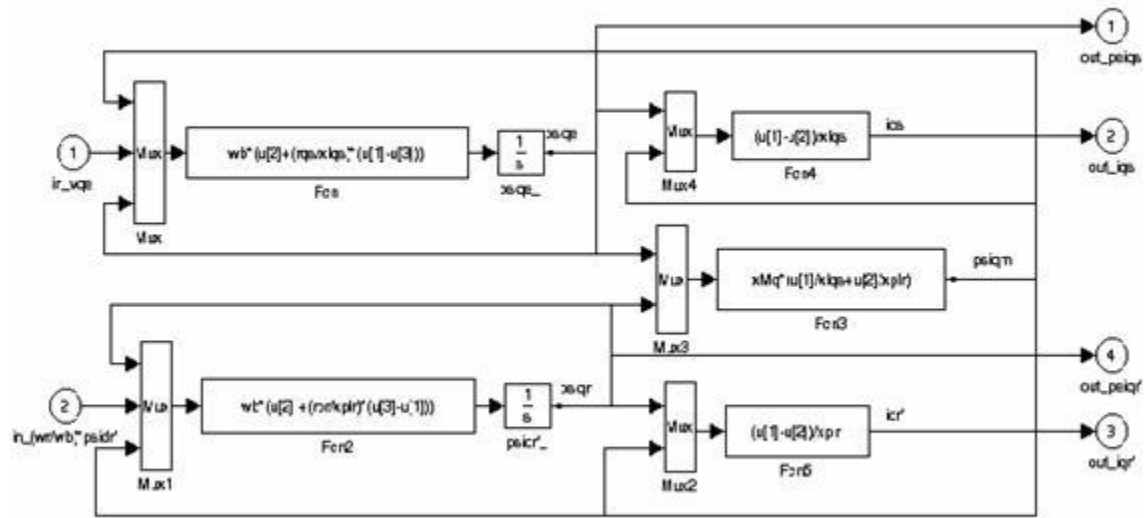
```

PROGRAMA EN SIMULINK :

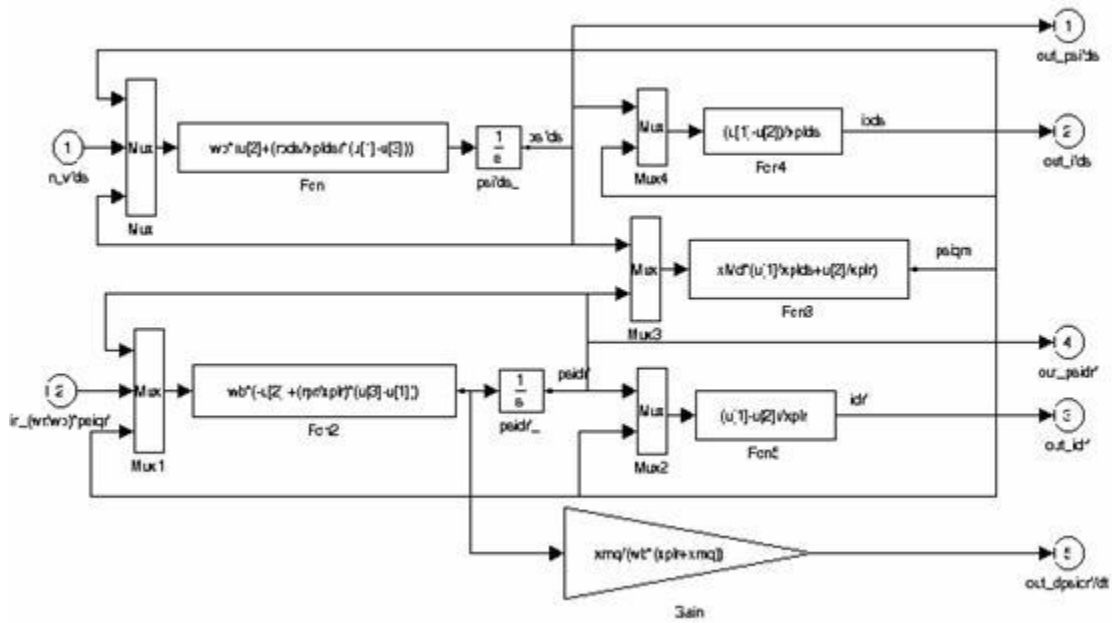
ExtConn:



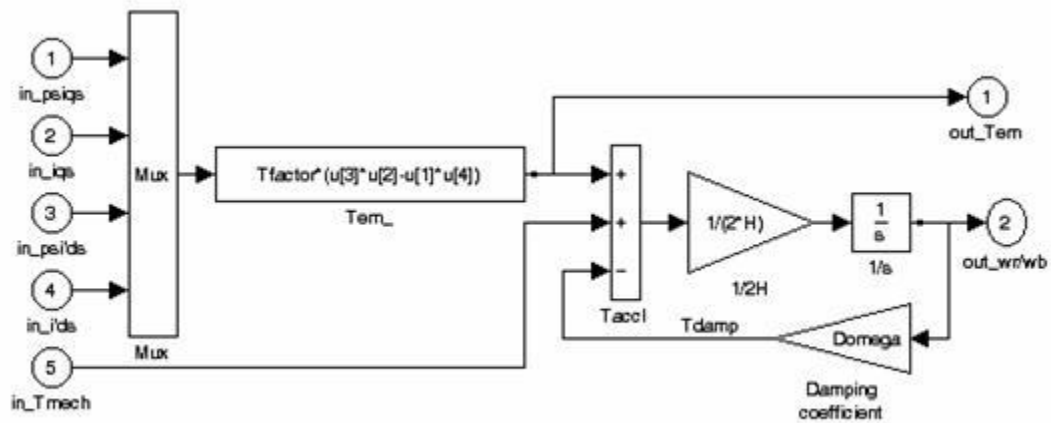
Qaxis :



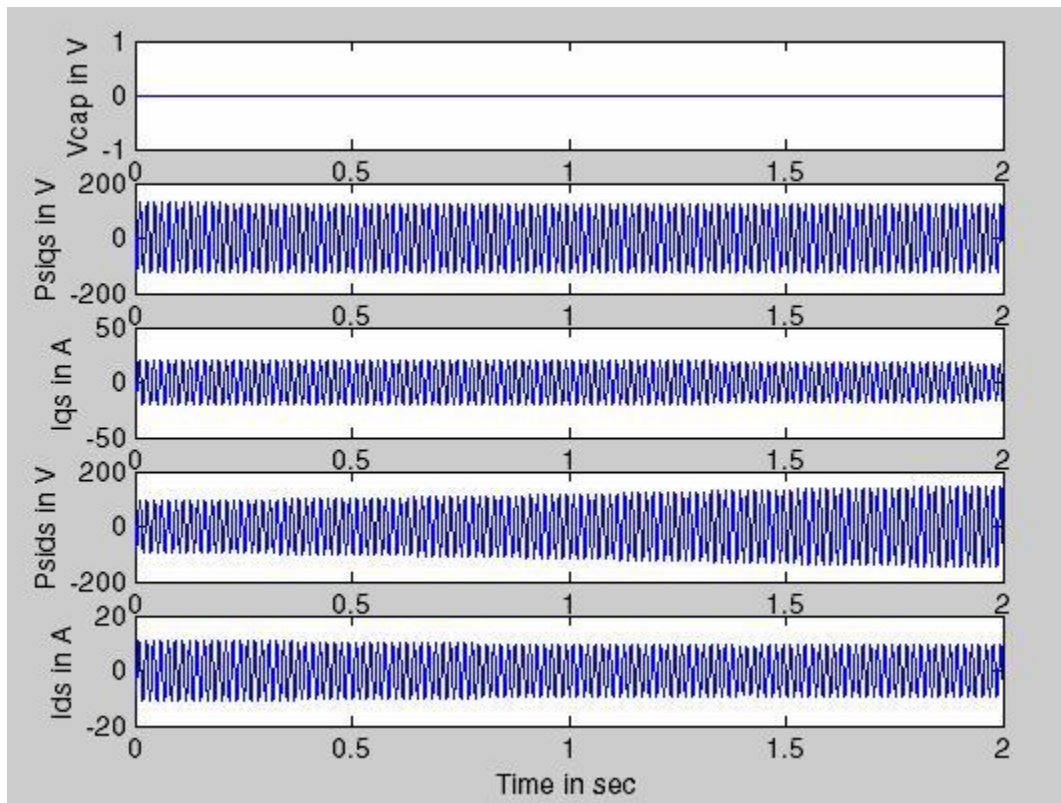
Daxis :

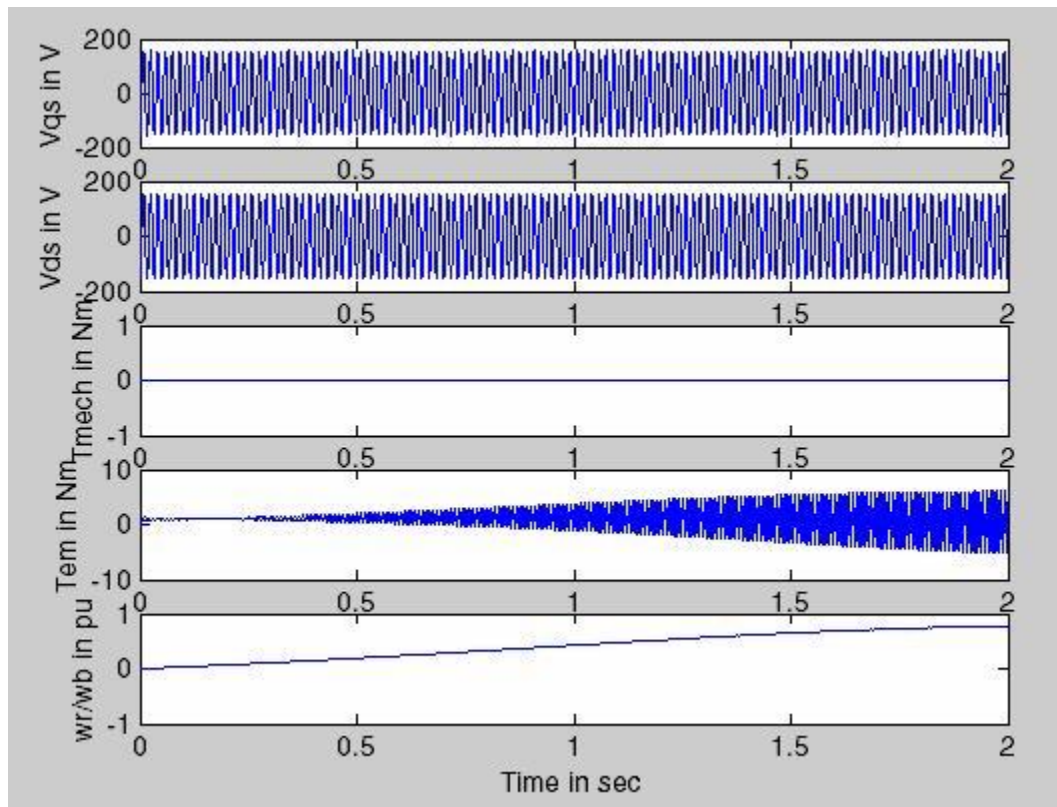


Rotor :



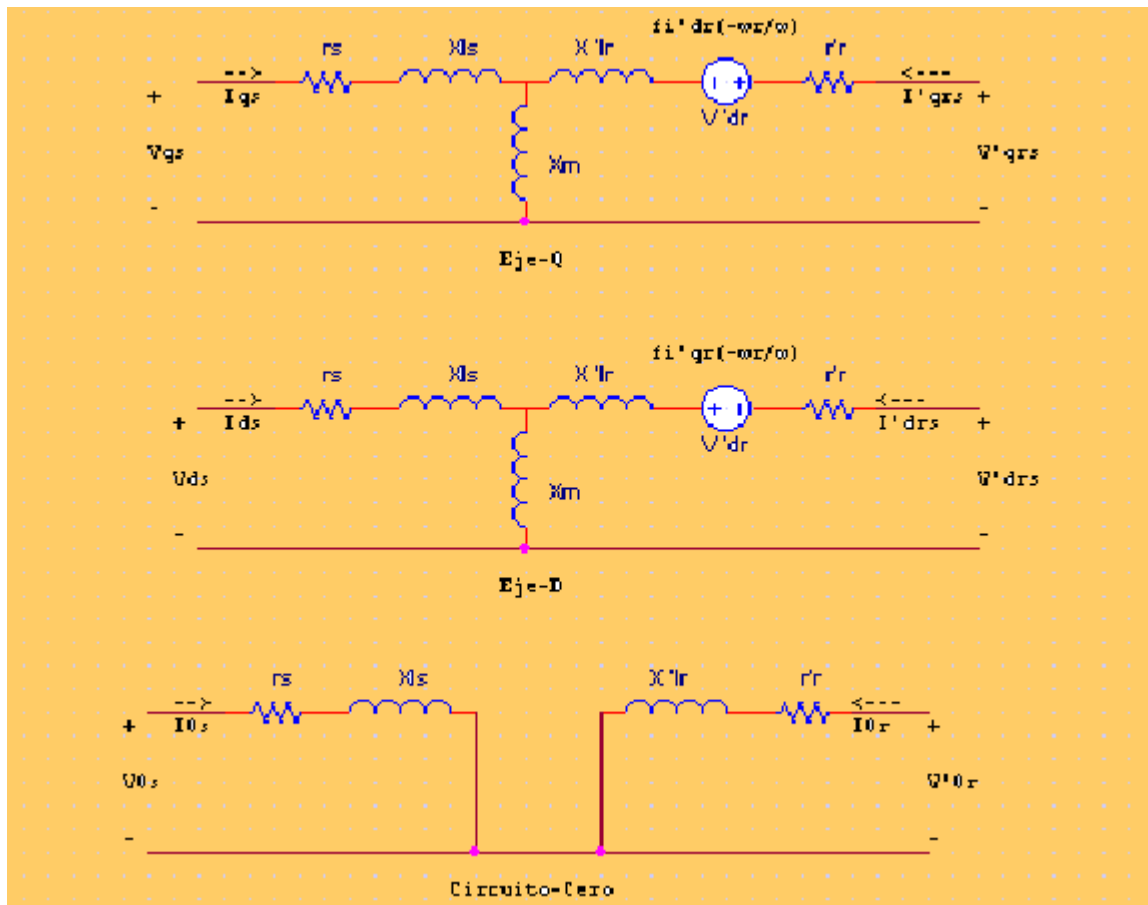
Curvas características :





5.8 MOTOR TRIFÁSICO

5.8.1 CIRCUITO EQUIVALENTE



5.8.2 ECUACIONES BASE

Potencia nominal en vatios es :

$$P_{nom} = \sqrt{3} I_{nom} * V_{nom} * P_f$$

Frecuencia mecánica : $\omega_m = 2 \pi / P$ P : número de polos

$\omega = 2 \pi f$ frecuencia eléctrica

Torque y factor de torque : $T = P_{nom} / \omega_m$ $T_{factor} = 3 P / 4 \omega$

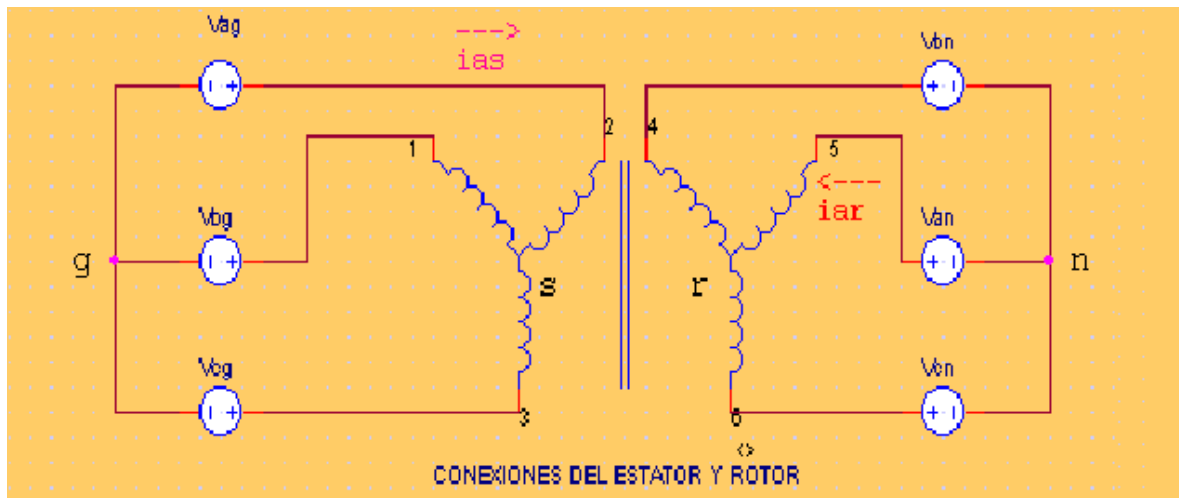
Impedancia : $Z = V_{nom}^2 / P_{nom}$

Voltaje de fase $V_f = \sqrt{2/3} V_{nom}$:

Constante de inercia del rotor en seg : $H = J \omega^2 / 2 P_{nom}$

Reactancia:
$$X_M = \frac{1}{\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X'_{lr}}}$$

5.8.3 ECUACIONES DINÁMICAS



Transformaciones $abc \rightarrow qds$:

$$v_{ds} = \frac{v_{cg} - v_{bg}}{\sqrt{3}}$$

$$v_{qs} = \frac{2}{3} \left(v_{ag} - \frac{v_{bg} + v_{cg}}{2} \right)$$

$$v_{bs} = \frac{v_{ag} + v_{bg} + v_{cg}}{3} - v_{sg} \quad v_{sg} = \frac{1}{C_{sg}} \int (i_{as} + i_{bs} + i_{cs}) dt,$$

Transformaciones $qds \rightarrow abc$:

$$i_{as} = i_{qs} + i_{os} \quad i_{bs} = -\frac{i_{qs} + \sqrt{3}i_{ds}}{2} + i_{os}$$

$$i_{cs} = -\frac{i_{qs} - \sqrt{3}i_{ds}}{2} + i_{os} \quad i_{os} = \frac{w}{x_{ls}} \int (v_{os} - r_s i_{os}) dt$$

Ecuaciones en el Eje-Q :

$$i_{qs} = \frac{\psi'_{qs} - \psi_{mq}}{x_{ls}} \quad \psi'_{qs} = w \int \left[v_{qs} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq} - \psi'_{qs}) \right] dt$$

$$i'_{qr} = \frac{\psi''_{qr} - \psi_{mq}}{x'_{lr}} \quad \psi'_{qr} = w \int \left[\frac{wr}{w} \psi'_{dr} + \frac{r'r}{x'_{lr}} (\psi_{mq} - \psi'_{qr}) \right] dt$$

Ecuaciones en el Eje-D :

$$i_{ds} = \frac{\psi'_{ds} - \psi_{mq}}{x_{ls}} \quad \psi'_{ds} = w \int \left[v_{ds} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq} - \psi'_{ds}) \right] dt$$

$$i'_{dr} = \frac{\psi''_{dr} - \psi_{mq}}{x'_{lr}} \quad \psi'_{dr} = w \int \left[-\frac{wr}{w} \psi''_{dr} + \frac{r'r}{x'_{lr}} (\psi_{mq} - \psi'_{dr}) \right] dt$$

Ecuaciones del rotor :

$$T_{em} = T_{factor} (\psi'_{ds} i_{qs} - \psi'_{qs} i_{ds})$$

$$\frac{wr}{w} = \frac{1}{2H} \int (T_{em} + T_{mec} - T_{damp} \Omega) dt$$

Ecuaciones del cero :

5.8.4 SIMULACIÓN

PROGRAMA EN MATLAB :

EJEMPLO :

Simular un motor trifásico de inducción de 1 hp con fuente de entrada de 60 Hz y ángulos de fase de 0°, - 120° y +120°. $wf = 2\pi f = 120\pi$

Encontrar : a) Corriente de estator (de línea), ias
 b) voltaje de fase de estator a neutro, vas
 c) Torque desarrollado Tem
 d) relación w_r / w

Solución :

Señal de entrada :

$$\begin{aligned}v_{ag} &= V_f \cos(120^\circ) \\v_{bg} &= V_f \cos(120^\circ - 2\pi/3) \\v_{cg} &= V_f \cos(120^\circ + 2\pi/3)\end{aligned}$$

Parámetros del motor :

Los parámetros del motor trifásico de 1 hp
 están en el siguiente programa :

```
Sb = 750;           % VA nominal
Pnom = 750;        % potencia nominal en W
Vnom = 200;        % voltaje de línea nominal en V
pf = 0.8;          % factor de potencia
Inom = Sb/(sqrt(3)*Vnom*pf); % corriente nominal en rms
P = 4;             % numero de polos
f = 60;            % frecuencia en Hz
w = 2*pi*f;        % frecuencia eléctrica en rad/seg
we = w;
wm = 2*w/P;        % frecuencia mecánica
T = Sb/wm;         % torque
Z = Vnom*Vnom/Sb;  % impedancia en ohms
Vf = Vnom*sqrt(2/3); % voltaje de fase
V = Vf;
Tfactor = (3*P)/(4*w); % factor de torque
rs = 3.35;         % resistencia en el estator en ohms
Ls = 6.94e-3       % inductancia del estator en henrios
xls = w*Ls;        % reactancia del estator en ohms
xplr = xls;        % reactancia del rotor
Lm = 163.73e-3     % inductancia magnetizante del estator en henrios
xm = Lm*w;         % reactancia magnetizante del estator
rpr = 1.99;        % resistencia del rotor
xM = 1/(1/xm + 1/xls + 1/xplr);
J = 0.1;           % inercia del rotor en kg-m2
H = J*wm*wm/(2*Sb); % rotor inertia constant in secs.
Domega = 0;        % coeficiente de amortiguamiento del rotor
```

Resultados:

$I_{nom} = 2.7 \text{ A}$, $w = 377 \text{ rad/sg}$, $w_m = 188.5 \text{ rad/sg}$, $T = 3.97 \text{ N-m}$
 $Z = 53.33 \text{ ohms}$, $V_f = 163.3 \text{ V}$, $H = 2.3687 \text{ sg}$

Condiciones iniciales :

En $t = 0$,
 $\psi_{qs} = 0$ % flujo total del estator en el eje Q
 $\psi'_{qr} = 0$ % flujo total del rotor en el eje Q
 $\psi_{ds} = 0$ % flujo total del estator en el eje D
 $\psi'_{dr} = 0$ % flujo total del rotor en el eje D
 $w_r / w = 0$ % velocidad pu del rotor

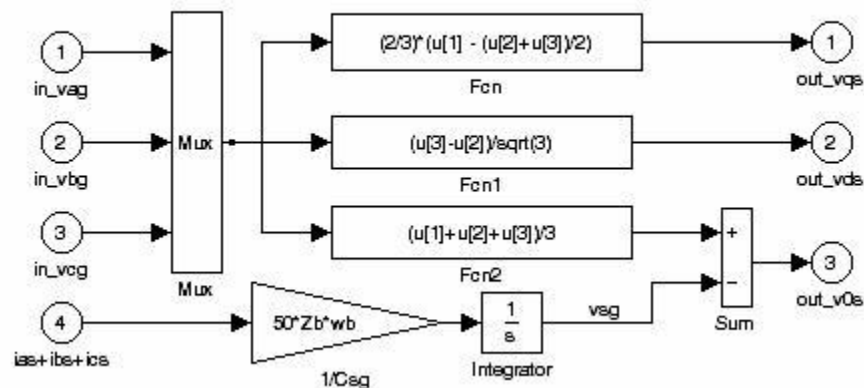
Carga mecánica :

$T_{mec_tiempo} = [0 \ 0.8 \ 0.8 \ 1.2 \ 1.2 \ 1.6 \ 1.6 \ t_{paro}]$;
 $T_{mec_valor} = [0 \ 0 \ -0.5 \ -0.5 \ -1. \ -1. \ -0.5 \ -0.5] * T$;

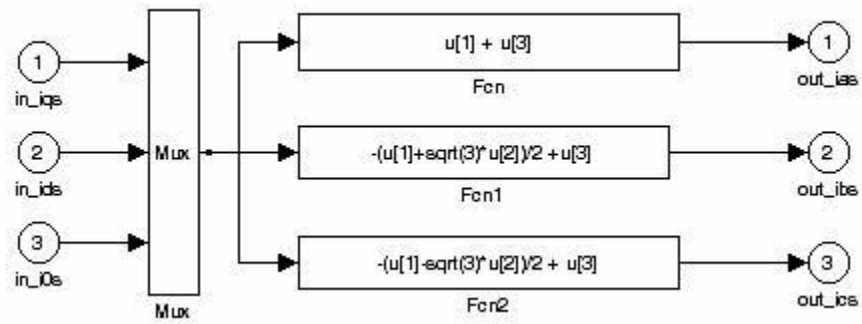
Tiempo de simulación :

Corra la simulación para $t = 1 \text{ seg}$ y $t = 3 \text{ seg}$, con carga y sin carga

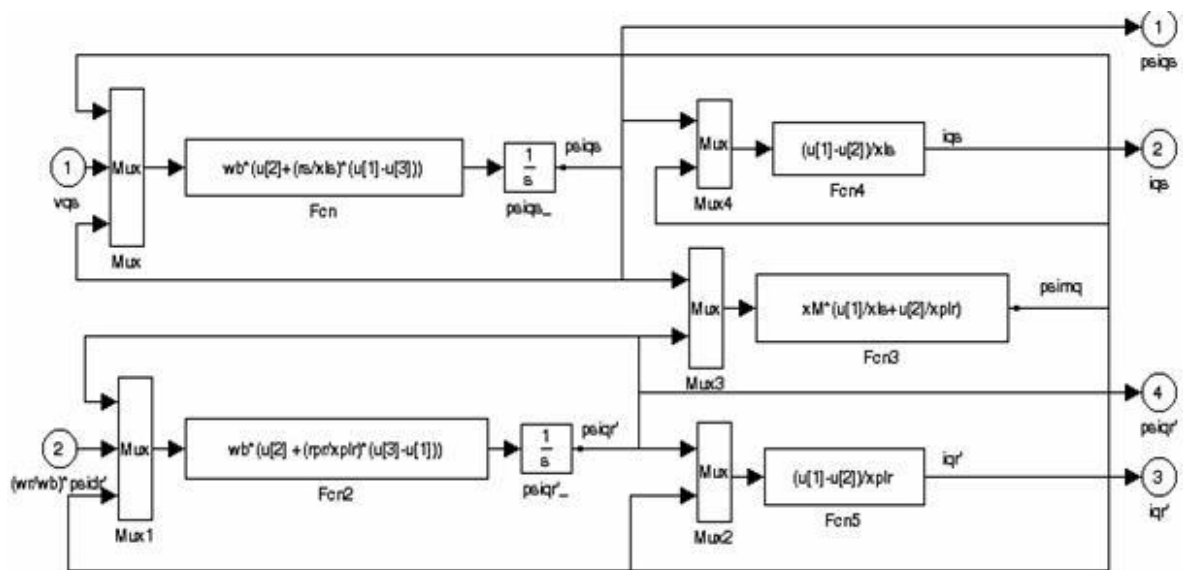
Transformaciones abc → qds :



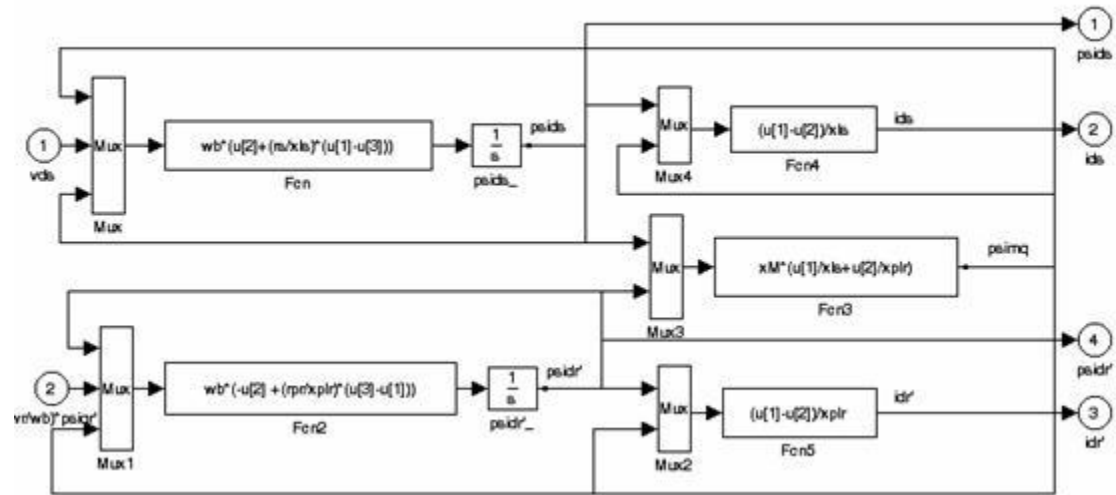
Transformaciones qds → abc :



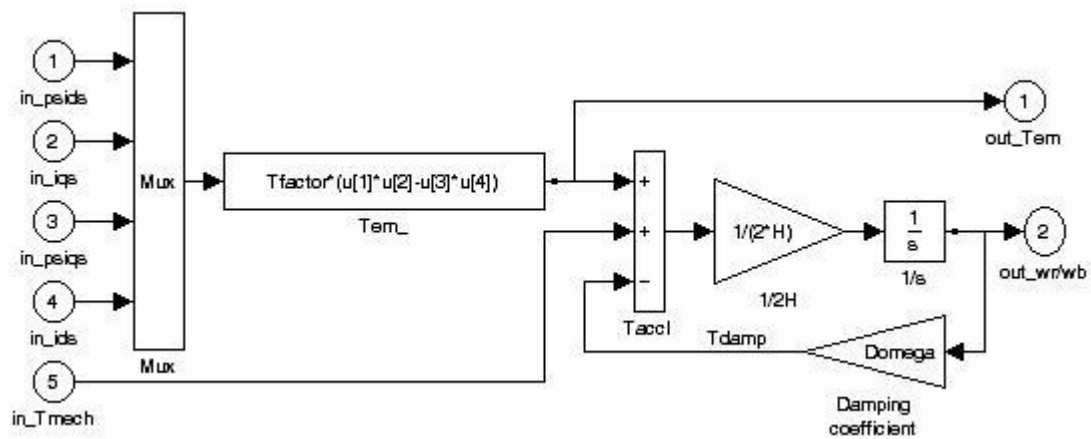
Eje-Q :



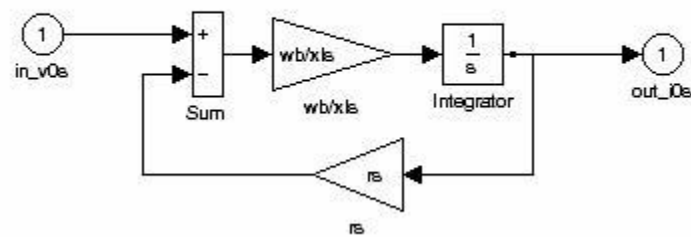
Eje_D :



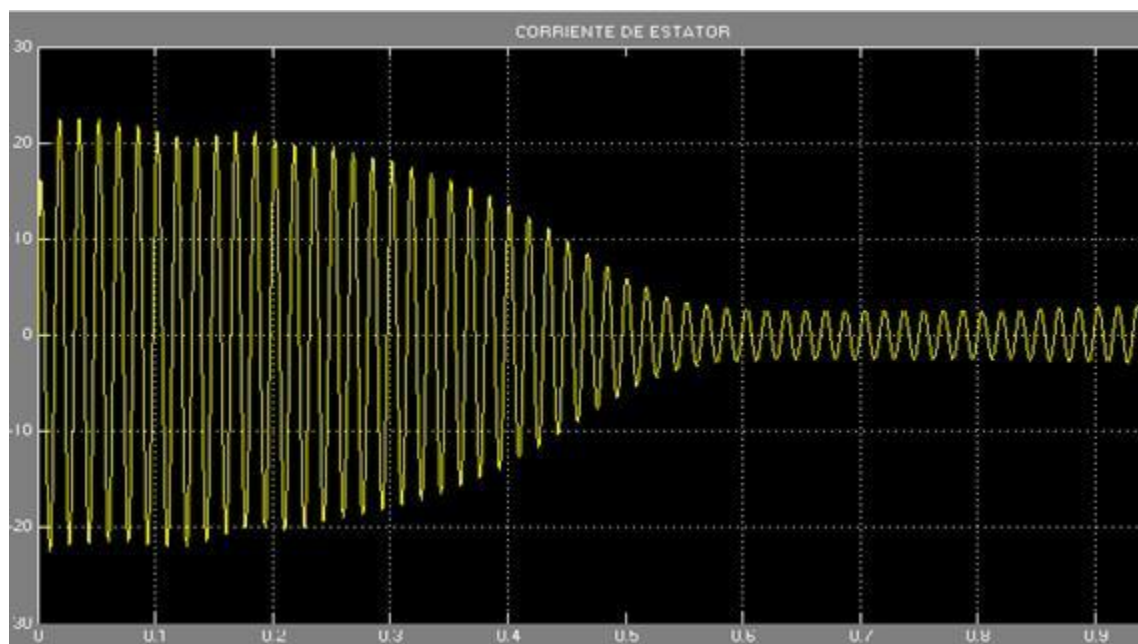
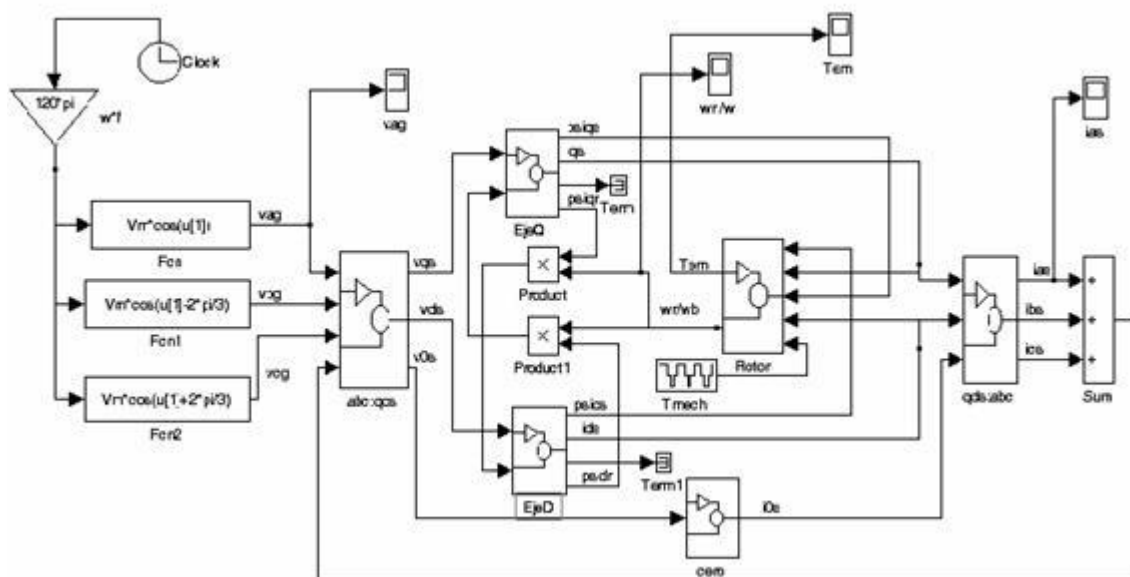
Rotor :

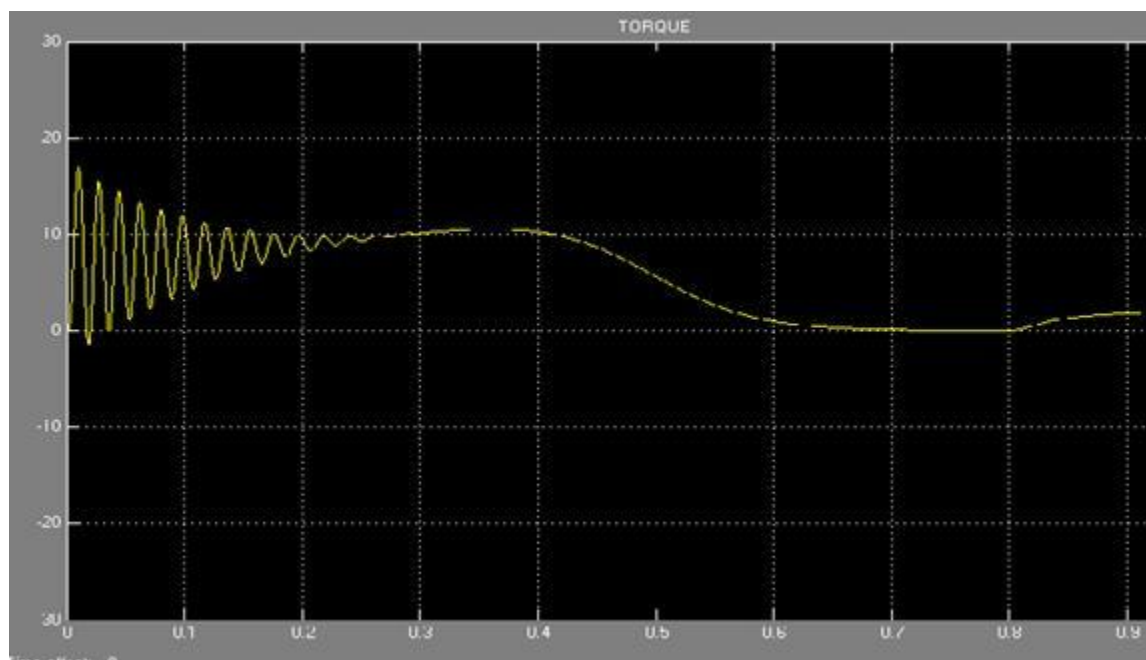
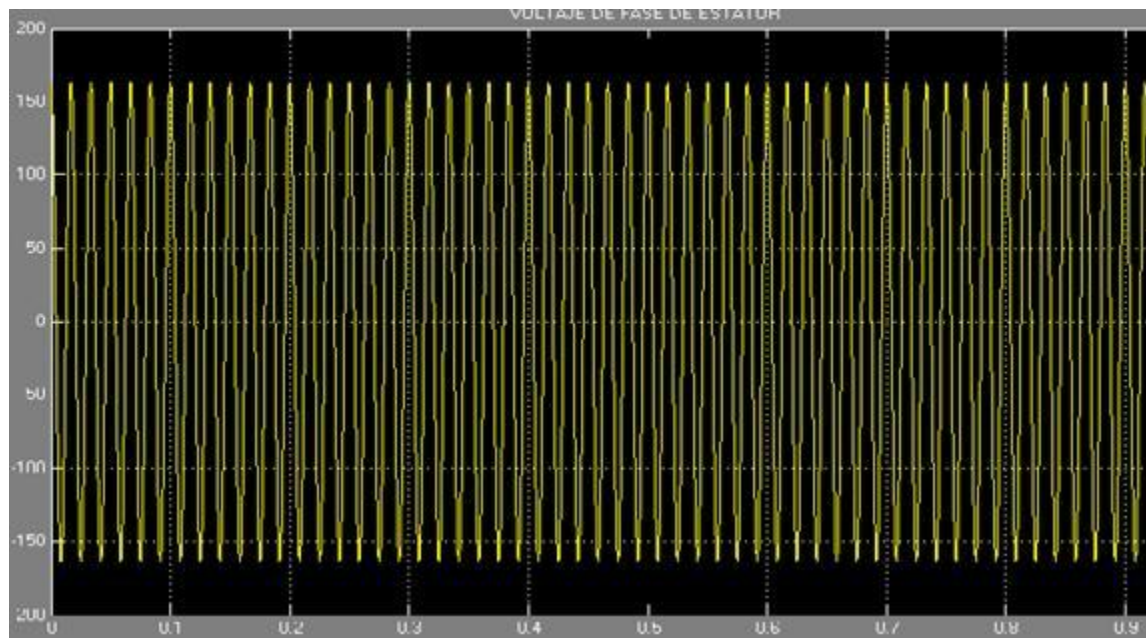


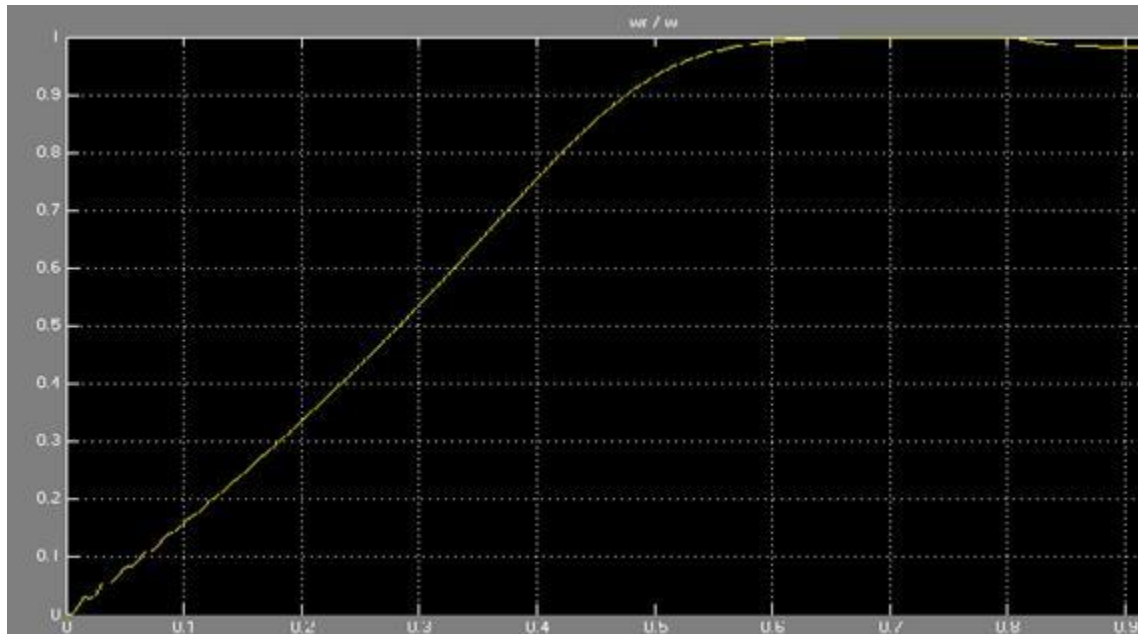
Transformación de cero :



Simulación del motor trifásico :







EJEMPLO :

Obtener el modelo lineal de un motor trifásico de 20 hp y encontrar :

- La función de transferencia $\Delta(wr/w) / \Delta T_{mec}$ y $\Delta(wr/w) / \Delta v_{qs}$
- la respuesta al paso unitario para $T_{mec} = 0$ y $T_{mec} = -T$

Parámetros del motor :

```

Sb = 20*746;           % potencia nominal en VA
Vnom = 220;            % voltaje de línea nominal en V
pf = 0.853;            % factor de potencia
Inom = Sb/(sqrt(3)*Vnom*pf); % corriente rms nominal
P = 4;                % número de polos
f = 60;               % frecuencia nominal en Hz
w = 2*pi*f;           % frecuencia eléctrica
we=w;
wm = 2*w/P;           % frecuencia mecánica
T = Sb/wm;            % torque
Z=Vnom*Vnom/Sb;       %base impedance in ohms
Vf = Vnom*sqrt(2/3);  % voltaje de fase
V=Vf;
Tfactor = (3*P)/(4*w); % factor de torque
snom=0.0287;          % deslizamiento
Nnom = 1748.3;         % velocidad en rpm
wmnom=2*pi*Nnom/60;   % velocidad en rad/seg
Tnom = Sb/wmnom;       % torque
ias= 49.68;           % corriente de fase en rms
  
```

```

rs = 0.1062;           % resistencia del estator en ohms
xls = 0.2145;          % reactancia del estator en ohms
xplr = xls;            % reactancia del rotor en ohms
xm = 5.8339;           % reactancia magnetizante del estator en ohms
rpr = 0.0764;          % resistencia del rotor en ohms
xM = 1/(1/xm + 1/xls + 1/xplr);
J = 2.8;               % inercia del rotor en kg- m2
H = J*wm*wm/(2*Sb);    % constante de inercia en seg
Domega = 0;            % coeficiente de amortiguamiento del rotor

```

Resultados :

```

Inom = 45.9 A,      w = we = 377 rad/seg;      T = 79.15 Nm
Vf = 179.6 V;      Tnom = 81.49 Nm,          H = 3.33.seg

```

Subsistema del motor trifásico :

```

Variables de salida (y) : [iqs; ids; Tem; wr /w]
Variables de entrada (u) : [vqse; vdse; Tmec]
Variables de estado (x) : [ψds; ψ'dr; ψqs; ψ'qr; wr /w]

```

Condiciones iniciales :

```

y0 = [ 0; 0; 0; 0; 1]
u0 = [Vf; 0; 0]
x 0= [ψds0; ψ'dr0; ψqs0; ψ'qr0; wr /w0]

```

Programa en Matlab :

```

psiqso = Vf;
psipqro = Vf;
psidso = 0;
psipdro = 0;
wr_wo = 1
x0 = [psidso; psipdro; psiqso; psipqro; wr_wbo];
y0=[0; 0; 0; 1];
index = 0;
Tmec = input (' Entre Torque externo : Tmec = ');
u = [Vm; 0; Tmec];
x = x0;
y = y0;
iu = [1; 2; 3];           % las variables de entrada son fijas
ix = [ ];                 % las variables de estado pueden variar
iy = [ ];                 % las salidas son libres
% Usar la función trim para determinar el punto de operación del estado
% estacionario deseado.
[x, u, y, dx] = trim ('MotorTrif ', x, u, y, ix, iu, iy);

```

```

x0= x;                                % almacena estado estacionario para usarlo
después
y0 = y;                                % en incremento de la carga

% Usar la función linmod de Matlab para determinar la representación en el
% espacio de estados en el punto de operación escogido. MotorTrif.mdl
%       $dx/dt = A x + B u$ 
%       $y = C x + D u$ 
[A, B, C, D] = linmod('MotorTrif ', x, u);

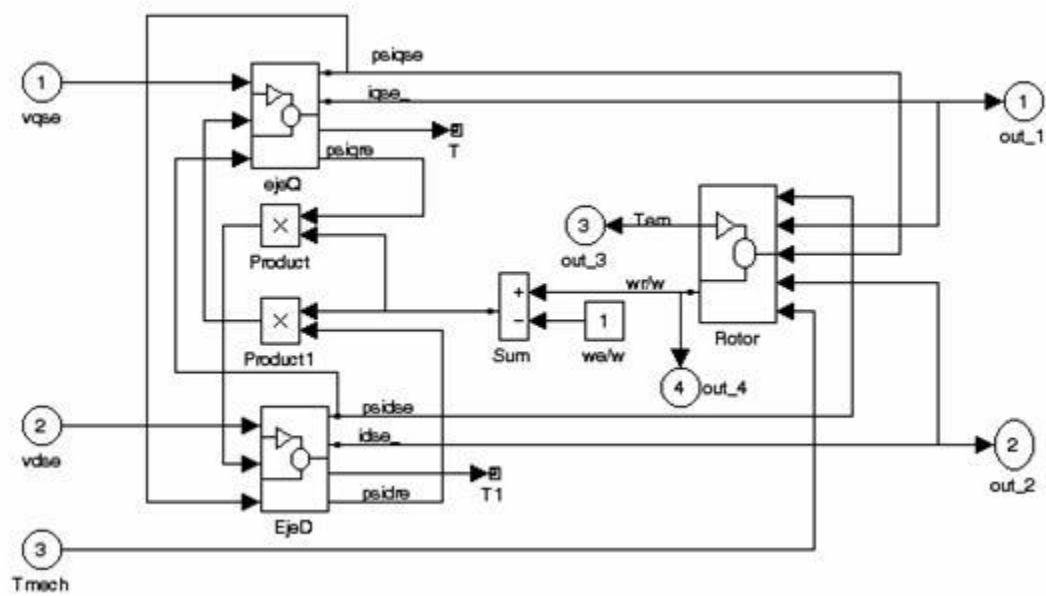
% (a) Para la función de transferencia  $(\Delta w_r/w_b)/\Delta T_{mec}$ 
bt=B(:,3);                            % selecciona tercera columna de la entrada
ct=C(4,:);                            % selecciona cuarta fila de la salida
dt=D(4,3);                            % selecciona cuarta fila tercera columna

% Use Matlab ss2tf para determinar la función de transferencia
% del sistema en el punto de operación escogido.
% Para desplegar la función de transferencia
[numt, dent] = ss2tf(A,bt,ct,dt,1);
Glzt = tf (numt,dent);

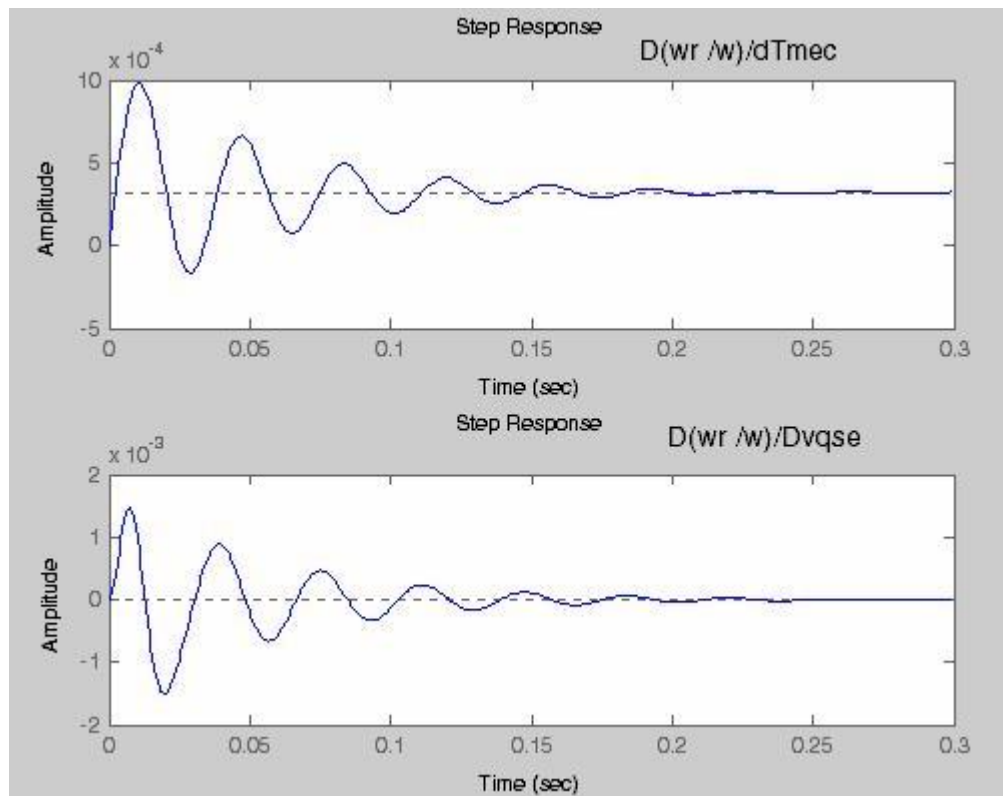
% (b) Para la función de transferencia  $\Delta(w_r/w_b) / \Delta v_{qse}$ 
bv=B(:,1);                            % selecciona primera columna de la entrada
cv=C(4,:);                            % selecciona cuarta fila de la salida
dv=D(4,1);                            % selecciona cuarta fila primera columna
[numv,denv] = ss2tf(A,bv,cv,dv,1);
Glzv = tf (numv,denv);

```

Simulink : MotorTrif.mdl



Respuesta al paso : a) sin carga $T_{mec} = 0$



BIBLIOGRAFÍA

- [1] MathWorks. *The Student Edition of Matlab*. Prentice Hall. 1992**
- [2] MathWorks. *Matlab User's Guide*. Prentice Hall. 1992**
- [3] K. OGATA. *Dinámica de Sistemas..* Prentice Hall. 1987**
- [4] C. PÉREZ. *Matlab y sus Aplicaciones en las Ciencias y la Ingeniería*.
Prentice Hall. 2002**
- [5] B. DORF. *Sistemas de Control Moderno*. Addison-Wisley.1999**
- [6] J.R. COGDELL. *Fundamentos de Máquina Eléctricas*. Prentice Hall. 2002**
- [7] A. SMITH. *Curso Básico de Motores Eléctricos*. Glem. 1980**
- [8] G. ENRIQUEZ. *ABC de las instalaciones Eléctricas*. Limusa. 1985**
- [9] J. F. McPARTLAND. *Cómo diseñar sistemas eléctricos*. Diana. 1980**
- [10] DELMAR. *Manual de Electricidad . Tomo 1*. Diana. 1971**
- [11] DELMAR. *Manual de Electricidad . Tomo 2*. Diana. 1971**
- [12] DELMAR. *Manual de Electricidad . Tomo 3*. Diana. 1971**
- [13] CHE-MUN ONG. *Dynamic Simulation of Electric Machinery*
Using Matlab/Simulink. Prentice Hall. 1998**
- [14] Jeffrey B. Burl. *Linear Optimal Control*. Addison - Wesley. 1999**
- [15] B. FRIEDLAND. *Control System Design. An Introduction to*
State-Space Methods. Prentice Hall. 1986**
- [16] GRACE, LAUB, LITTLE and THOMSON. *Control Systems*
Toolbox For Use with Matlab. MathWorks. 1990**