



MOTORES PASO A PASO

1. INTRODUCCIÓN

En muchas ocasiones se hace necesario convertir energía eléctrica en energía mecánica; cuando esta última se requiere en forma de movimiento rotacional, un motor es el elemento ideal para la conversión.

En la presente práctica nos ocuparemos del estudio de un tipo muy concreto de motores: los motores paso a paso o motores P.A.P.

Éstos encuentran utilidad en aquellas aplicaciones que requieren posicionamientos con un elevado grado de exactitud y/o una *muy* buena regulación de la velocidad, presentando como mayor inconveniente su no muy elevada velocidad angular o de giro máxima. Sus principales aplicaciones se pueden encontrar en robótica, tecnología aeroespacial, gobierno de discos duros y flexibles en sistemas informáticos, manipulación y posicionamiento de piezas y herramientas en general.

El presente tema es suficientemente complejo como para justificar por sí solo toda una obra. En esta práctica nos limitaremos a exponer su principio básico de funcionamiento, tipos y uno de los muchos circuitos de control ideados para tal fin.

2. DESCRIPCIÓN BÁSICA

Los motores eléctricos, en general, basan su funcionamiento en las fuerzas ejercidas por un campo electromagnético y creadas al hacer circular una corriente eléctrica a través de una o varias bobinas. Si dicha bobina, generalmente circular y denominada estator, se mantiene en una posición mecánica fija y en su interior, bajo la influencia del campo electromagnético, se coloca otra bobina, llamada rotor, recorrida por una corriente y capaz de girar sobre su eje, esta última tenderá a buscar la posición de equilibrio magnético, es decir, orientará sus polos *N-S* hacia los polos *S-N* del estator, respectivamente. Si por algún método, cuando el rotor alcance esa posición de equilibrio el estator cambia la orientación de sus polos, aquél tratará de buscar la nueva posición de equilibrio; manteniendo dicha situación de manera continuada, se conseguirá un movimiento giratorio y continuo del rotor y a la vez la transformación de una energía eléctrica en mecánica en forma de movimiento rotacional.

Aún basado en el mismo fenómeno, el principio de funcionamiento de los motores paso a paso es más sencillo, si cabe, que el de cualquier otro tipo de motor eléctrico.

Tomemos como modelo la *Figura 1*, donde suponemos que tanto L_1 , como L_2 , poseen un núcleo de hierro dulce capaz de imantarse cuando dichas bobinas sean recorridas por una corriente eléctrica. Por otra parte, el imán M puede girar libremente sobre el eje de sujeción central.

Inicialmente, sin aplicar corriente a ninguna de las bobinas (también llamadas fases) y con M en una posición cualquiera, el imán permanecerá en reposo si no se somete a una fuerza externa.

Si se hace circular corriente por ambas fases en el sentido indicado en (a), se crearán dos polos magnéticos N en la parte interna, bajo cuya influencia M se desplazará hasta la posición indicada en dicha figura.

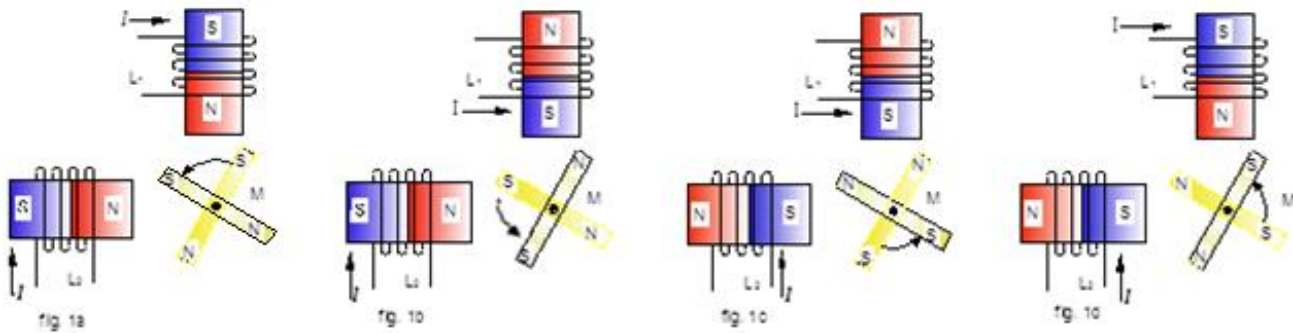


Fig.1. Principio de funcionamiento de un motor paso a paso

Si invertimos la polaridad de la corriente que circula por L_1 se obtendrá la situación magnética indicada en (b) y M se verá desplazado hasta la nueva posición de equilibrio, es decir, ha girado 90° en sentido contrario a las agujas del reloj.

Invirtiéndolo ahora la polaridad de la corriente en L_2 , se llega a la situación (c) habiendo girado M otros 90° . Si, por fin, invertimos de nuevo el sentido de la corriente en L_1 M girará otros 90° y se habrá obtenido una revolución completa de dicho imán, en cuatro pasos de 90° .

Por tanto, si se mantiene la secuencia de excitación expuesta para L_1 y L_2 y dichas corrientes son aplicadas en forma de pulsos, el rotor avanzará pasos de 90° por cada pulso aplicado.

De lo anterior podemos deducir que un motor PAP es un dispositivo electromecánico que convierte impulsos eléctricos en un movimiento rotacional constante y finito dependiendo de las características propias del motor.

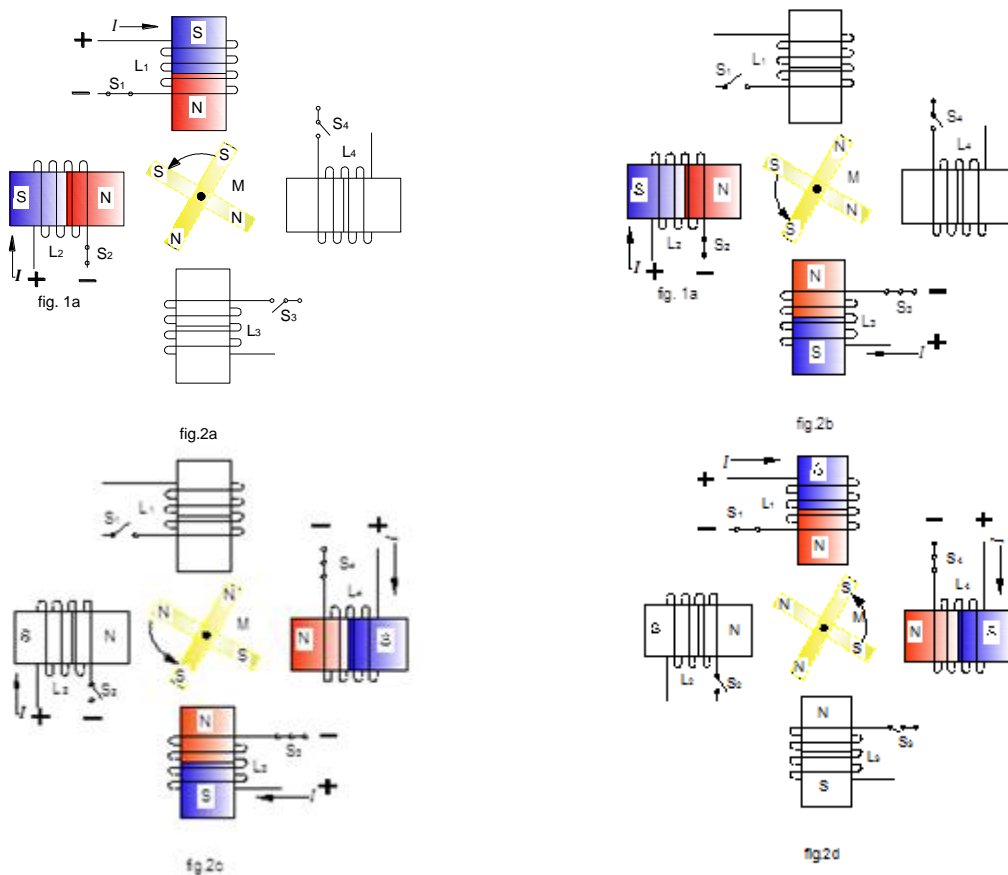


Fig.2. Principio básico de un motor PAP unipolar de cuatro fases



El modelo expuesto recibe el nombre de bipolar ya que, para obtener la secuencia completa, se requiere disponer de corrientes de dos polaridades, presentando, tal circunstancia un inconveniente importante a la hora de diseñar el circuito que controle a dicho motor. Una forma de paliar este inconveniente es la representada en la *Figura 2*, obteniéndose un motor unipolar de cuatro fases, puesto que la corriente circula por las bobinas en un único sentido. Si inicialmente se aplica la corriente a L_1 y L_2 cerrando S_1 y S_2 (*Fig 2a*), se generarán dos polos N que atraerán al polo S de M hasta encontrar la posición de equilibrio entre ambos. Si se abre posteriormente S_1 y se cierra S_3 (*Fig 2b*), por la nueva distribución de polos magnéticos, M evoluciona hasta la situación representada en dicha figura.

Siguiendo la secuencia representada en (c) y (d), de la misma forma se obtiene avances del rotor de 90° habiendo conseguido, como en el motor bipolar de dos fases, hacer que el rotor avance pasos de 90° por la acción de impulsos eléctricos de excitación de cada una de las bobinas. En uno y otro caso, el movimiento obtenido ha sido en sentido contrario al de las agujas del reloj; ahora bien, si la secuencia de excitación se genera en orden inverso, el rotor girará en sentido contrario, por lo que se deduce que el sentido de giro en los motores PAP es reversible en función de la secuencia de excitación y, por tanto, se puede avanzar o retroceder al rotor un número determinado de pasos según las necesidades de posicionamiento.

El modelo del motor PAP estudiado, salvo su valor didáctico, no ofrece mayor atractivo desde el punto de vista práctico, precisamente por la amplitud de sus avances angulares.

Una forma de conseguir motores PAP de paso más reducido es la de aumentar el número de bobinas del estator pero ello llevaría a un aumento de costo y del volumen y a pérdidas muy considerables en el rendimiento del motor, por lo que esta solución no es viable. Hasta ahora y para conseguir la solución más idónea, se recurre a la mecanización de los núcleos de las bobinas y el rotor en forma de hendiduras o dientes creándose así micrópilos magnéticos (tantos como dientes) y estableciendo las situaciones de equilibrio magnético con avances angulares mucho menores siendo posible conseguir motores de más de 200 pasos.

Desde el punto de vista de su construcción existen tres tipos de motores paso a paso:

- *De imán permanente*: es el modelo visto anteriormente: el rotor es un imán permanente en el que se mecanizan un número de dientes limitado por su estructura física. Ofrece como principal ventaja que su posicionamiento no varía aun sin excitación y en régimen de carga, debido a la atracción entre el rotor y los entrehierros del estator.
- *De reluctancia variable*: los motores de este tipo poseen un rotor de hierro dulce que, en condiciones de excitación del estator y bajo la acción de su campo magnético, ofrece la menor resistencia a ser atravesado por su flujo en la posición de equilibrio. Su mecanismo es similar al del imán permanente y su principal inconveniente radica en que en condiciones de reposo (sin excitación), el rotor queda en libertad de girar y, por tanto, su posicionamiento en régimen de carga dependerá de su inercia y no será posible predecir el punto exacto de reposo.
- *Híbridos*: son combinaciones de los tipos anteriores; el rotor suele estar constituido por anillos de acero dulce dentado en un número ligeramente distinto al de estator y dichos anillos montados sobre un imán permanente dispuestos axialmente.

Desde el punto de vista mecánico, es importante conocer algunas de las principales características que se definen sobre un motor PAP:

- *Par dinámico o de trabajo (working torque)*: depende de sus características dinámicas y es el momento máximo que el motor es capaz de desarrollar sin <<perder>> paso, es decir, sin



dejar de responder algún impulso de excitación del estator y dependiendo, evidentemente, de la carga. Generalmente se ofrecen, por parte del fabricante, curvas denominadas de arranque sin error (*pull-in*) y que relaciona el par en función del número de pasos.

- *Par de mantenimiento (Holding Torque)*: es el par requerido para desviar, en régimen de excitación, un paso al rotor cuando la posición anterior es estable; es mayor que el par dinámico y actúa como freno para mantener un rotor en una posición estable dada.
- *Par de detención (Detent Torque)*: es un par de freno que, siendo propio de los motores de imán permanente, es debido a la acción de rotor cuando los devanados estáticos están desactivados.

Según lo anterior, las características principales que se definen a un motor PAP son:

Numero de pasos por vuelta: es la cantidad de pasos que ha de efectuar el rotor para realizar una revolución completa; evidentemente

$$NP = \frac{360^\circ}{\alpha}$$

Donde NP es el número de pasos y α el ángulo de paso.

- *Frecuencia de paso máxima*: es el máximo número de pasos por segundo que el rotor puede efectuar obedeciendo a los impulsos de control.
- *Momento de inercia del rotor*: es un momento de inercia asociado que se expresa en gramos por centímetros cuadrados.
- *Par de mantenimiento de detención y dinámico*: definidos anteriormente y expresados en miliNewton por metro (mN.m).-

3. FUNCIONAMIENTO

En el apartado anterior hemos realizado una genérica y somera descripción de los motores PAP sin ocuparnos del modo de controlar las secuencias o pulsos de excitación, trataremos de aclararlo en el presente apartado y mostrar un ejemplo concreto.

En primer lugar, veamos algunas peculiaridades en régimen normal de trabajo.

4. OSCILACIONES

Aunque el tiempo de desplazamiento entre una posición de equilibrio y otra consecutiva se considera constante (y de hecho lo es para cada régimen de trabajo), tomando un desplazamiento único se observa que, partiendo de la posición de equilibrio con velocidad inicial nula, en el momento de la excitación máxima la velocidad aumenta y la aceleración disminuye hasta que se alcanza la siguiente posición de equilibrio en que la aceleración es nula y la velocidad máxima. Debido al efecto de inercia del rotor, éste sobrepasa dicha posición hasta alcanzar otra velocidad nula y aceleración negativa, produciendo una inversión del sentido de giro momentánea hasta que de nuevo alcanza velocidad nula y aceleración positiva, consiguiendo el reposo absoluto. Esto da como resultado un movimiento oscilante amortiguado, como se muestra en la gráfica 1a desde la posición 0 a la 1, repitiéndose el proceso de la posición 1 a la 2 si el tiempo entre la aplicación de los pulsos es suficientemente largo.

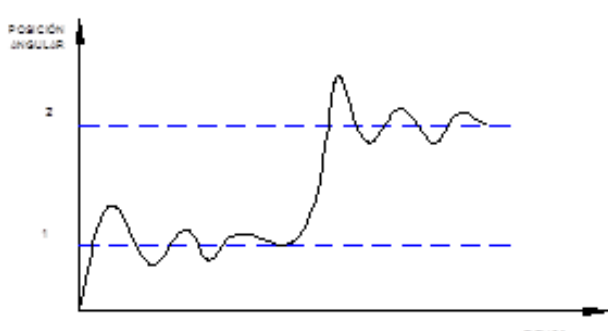


Gráfico 1.a. Oscilaciones producidas en un motor PAP.

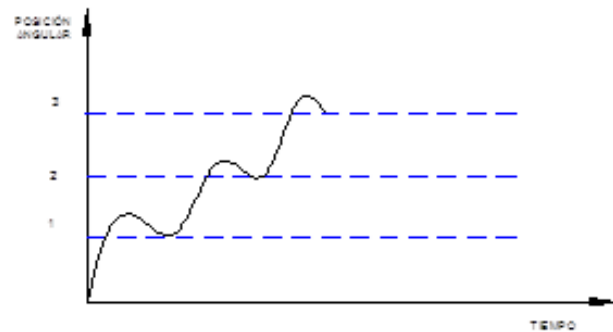


Gráfico 1.b. Motor en régimen de sobrevelocidad

Si una vez alcanzada la posición 1 al inicio de la oscilación se aplicara el siguiente pulso de excitación, el rotor entrará en un nuevo impulso de desplazamiento en busca de la posición 2.-

Según se muestra en la gráfica 1b y si esta situación se repitiera el motor entraría en el llamado régimen de <<sobrevelocidad>>, estado donde se eliminan las excitaciones pero en el que no es posible la inversión de giro y la detección brusca sin antes disminuir su velocidad. Evidentemente, cuando dicho fenómeno se presenta se hace necesario disponer de algún procedimiento para solucionar esos problemas, y así se recurre al:

- *Amortiguamiento mecánico*, que emplea dispositivos de fricción. Bien sea viscosa o seca. Sus principales inconvenientes son reducir la frecuencia máxima de trabajo y añadir una carga parásita.
- *Amortiguamiento eléctrico*, basado en modificar las características de construcción, los materiales empleados o el desplazamiento de los devanados respecto del rotor.
- *Amortiguamiento electrónico*, considerado como el más adecuado sin apenas modificar las características par-velocidad de trabajo. Consiste en alimentar, durante un corto período y simultáneamente, a dos devanados, reduciendo la velocidad del rotor en las proximidades de la posición de equilibrio. También puede conseguirse suprimiendo momentáneamente la alimentación de la fase excitada en el momento en que el rotor pasa por primera vez la posición de equilibrio y volviéndola a alimentar posteriormente, con lo que el rotor queda bloqueado en esa posición.

5. MODOS DE ALIMENTACIÓN

De acuerdo con sus características la alimentación requiere ciertas consideraciones a tener en cuenta según los distintos métodos:

- *A tensión fija*: cuando un motor PAP se alimenta a tensión constante, el par decrece al aumentar la frecuencia de paso; ello debido al aumento de las fuerzas contraelectromotrices, produciéndose simultáneamente una pérdida de potencia útil por el retardo que sufre el aumento de corriente hasta alcanzar su valor máximo.
- *A corriente constante*: si el inconveniente anterior se trata de paliar con un aumento de la tensión de alimentación, la corriente de excitación aumentará creando problemas de disipación de calor, llegando incluso a la destrucción del motor. El sistema de corriente constante mantiene la corriente media a un valor fijo, mediante <<chopeado>> (troceado) de la corriente de entrada, conectando y desconectando la alimentación. Este método es muy adecuado en aplicaciones que requieren aceleraciones rápidas o cambios de frecuencia.
- *A dos niveles de tensión*: (Bi level) consistente en aplicar una tensión elevada durante los avances de paso para, una vez sacado del reposo el rotor, disminuir la tensión a un nivel



considerablemente más bajo; con ello consigue una reducción de la potencia disipada y un aumento del par en el <<arranque>>. Este método es ideal para aquellas aplicaciones donde la separación entre pasos sea elevada, reduciendo, por tanto la potencia consumida y pudiendo conservar el par de mantenimiento.

6. MODOS DE FUNCIONAMIENTO

Existen dos formas de hacer funcionar los motores PAP atendiendo al avance del rotor bajo cada impulso de excitación:

- *Paso completo (Full step)*: el rotor avanza un paso completo por cada pulso de excitación y para ello su secuencia ha de ser la correspondiente a la expuesta en el apartado anterior (para un motor como el de la *figura 2*) y representada de forma resumida en la *tabla 1* para ambos sentidos de giro e indicando con las << X >> los interruptores que deben estar cerrados.

Paso	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
1	X			X
2			X	X
3		X	X	
4	X	X		
1	X			

a) Sentido Horario

Paso	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
1	X	X		
2		X	X	
3			X	X
4	X			X
1	X	X		

b) Sentido Antihorario

Tabla 1. Secuencia de excitación de un motor PAP en paso completo

- *Medio paso (Half step)*: con este modo de funcionamiento el rotor avanza medio paso por cada pulso de excitación, presentando como principal ventaja una mayor resolución de paso, ya que disminuye el avance angular (la mitad que en el modo de paso completo). Para conseguir tal cometido, el modo de excitación consiste en hacerlo alternativamente sobre dos bobinas y una de ellas, según se muestra en la *Tabla 2*. para ambos sentidos de giro.

Paso	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
1	X			X
2				X
3			X	X
4			X	
5		X	X	
6		X		
7	X	X		
8	X			
1	X			X

a) Sentido Horario

Paso	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
1	X	X		
2		X		
3		X	X	
4			X	
			X	X
				X
	X			X
	X			
1	X	X		

b) Sentido Antihorario

Tabla 2. Secuencia de excitación de un motor PAP en medio paso



Según la *Figura 2*, al excitar dos bobinas consecutivas del estator simultáneamente, el rotor se alinea con la bisectriz de ambos campos magnéticos; cuando desaparece la excitación de una de ellas, extinguiéndose el campo magnético inducido *por* dicha bobina,, el rotor queda bajo la acción del único campo existente, dando lugar a un desplazamiento mitad.

Sigamos, por ejemplo, la secuencia presentada en la *Tabla 2b*: En el paso 1, y excitadas las bobinas L_1 y L_2 de la *Figura 2* mediante la acción de S_1 y S_2 , el rotor se situaría en la posición indicada en la *Figura 2a*; en el paso 2, S_1 se abre, con lo que solamente permanece excitada L_2 , y el rotor girará hasta alinear su polo S con el N generado por L_2 . Supuesto que este motor tenía un paso de 90° , en este caso sólo ha avanzado 45° . Posteriormente, y en el paso 3, se cierra S_3 , situación representada en la *Figura 2b*, con lo que el rotor ha vuelto a avanzar otros 45° . En definitiva los desplazamientos, siguiendo dicha secuencia, son de medio paso.

7. CIRCUITO DE CONTROL

De lo expuesto hasta ahora, podemos deducir que un motor PAP requiere de una determinada secuencia para funcionar correctamente, aparte de unas peculiaridades de alimentación; sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones se pretende que un motor PAP avance pasos en función de una serie de pulsos de control u órdenes de mando a razón de un pulso, un paso o un pulso medio paso, además de otras señales que indiquen sentido de giro, inhibición, etc.

En general, el esquema de aplicación de un motor PAP podría corresponder al diagrama de bloques de la *Figura 3*, donde se puede apreciar que las señales de mando atacan al circuito de control, quien genera la secuencia adecuada para excitar al motor.

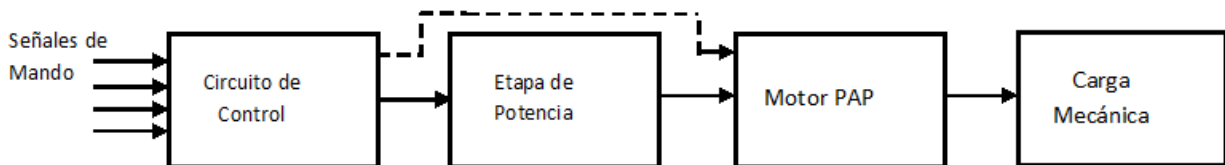
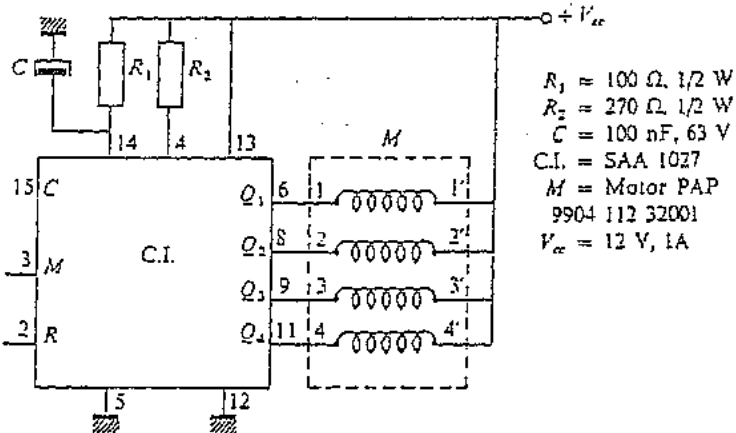
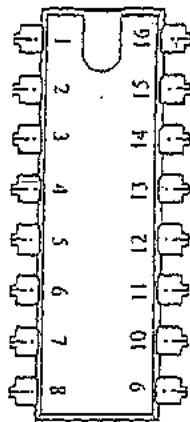


Figura 3. Organización de una aplicación con motor PAP.

En muchas aplicaciones, el propio circuito de control es incapaz de controlar el nivel de corriente suficiente para gobernar el motor, en cuyo caso se hace necesario añadir una etapa de potencia que consiga su excitación. El sistema o dispositivo que se desee «arrastrar» o desplazar está representado por la carga mecánica, acoplada de alguna forma al rotor.



Curso:



- $R_1 = 100 \Omega, 1/2 W$
- $R_2 = 270 \Omega, 1/2 W$
- $C = 100 nF, 63 V$
- C.I. = SAA 1027
- $M = \text{Motor PAP}$
9904 112 32001
- $V_{cc} = 12 V, 1A$

a) Encapsulado y patillaje b) Esquema de conexionado

Figura 4. Circuito integrado SAA 1027

Dentro de la gran variedad de motores PAP y de circuitos integrados de control, en la presente práctica presentamos un motor PAP unipolar de cuatro fases, cuyo control es factible mediante un C.I. Este circuito integrado se caracteriza, fundamentalmente, por su simplicidad y escasa necesidad de componentes externos; en la Figura 4a se representa su encapsulado y en la 4b el diagrama de conexiones.

Las conexiones externas que presenta este circuito integrado son las siguientes:

- Una entrada de pulsos C conectada al pin 15.
- Una entrada de sentido de giro M conectada al pin 3.
- Una entrada de habilitación R conectada al pin 2.
- Cuatro salidas Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 para conectar a cada una de las fases del motor.
- Una entrada de alimentación (típica de 12 V) por el pin 14 a través de una resistencia de 100 Ω

Entre el pin 4 y la fuente se intercala una resistencia en función del motor utilizado que, para este caso y tipo, será de 270 Ω , 1/2 W. Además, se incluyen cuatro diodos internos, de efecto volante, conectados a cada salida para derivar los picos de corriente que se generan al cortar la alimentación a cada fase.

La Gráfica 2 muestra la secuencia de salidas según las señales de control aplicadas.

En esta gráfica se puede apreciar que, aplicada una secuencia de pulsos al pin 15, la salida permanece inalterable ($Q_1 = Q_3 = 0$ nivel bajo. $Q_2 = Q_4 = +V_{cc}$ nivel alto) mientras la entrada R esté a nivel bajo. Una vez que R se sitúe a nivel alto, la entrada M determina el sentido de rotación; en la misma gráfica, cuando M esté a nivel bajo (0) el sentido de rotación es el de las agujas del reloj y cuando lo esté a nivel alto (+ V_{cc}) el sentido es el antihorario. Los cambios en la salida sólo se producen cuando se presenta el flanco de subida en la entrada C.

Las entradas de control admiten tensiones máximas de hasta 18 V y no es estrictamente necesario alcanzar ese nivel para que lo tome como nivel alto; asimismo, tampoco ha de ser cero el valor de dichas entradas para interpretarlo como nivel bajo. De esta forma, cualquier tensión superior a 7,5 V representará, un nivel alto y cualquier otra tensión igual o menor a 4,5 V será tomada como un nivel bajo. La Tabla 3 presenta, de forma resumida, el funcionamiento del SAA 1027.

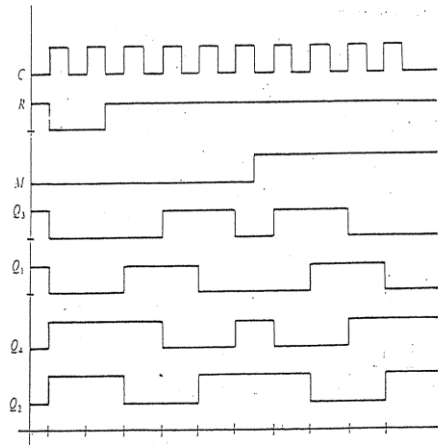




Gráfico 2. Diagrama de tensiones del C.I. SAA 1027

	Pin						
	15	12	13	6	8	9	11
Nivel	H	L	X	L	H	L	H
Sentido de rotación		L	H	antihorario			
		L	L	horario			


 Flanco de Subida
 H = HIGH (nivel alto)
 L = LOW (nivel bajo)
 X = No importa el nivel

Tabla 3. Funcionamiento del C.I. SAA 1027

8. CONSIDERACIONES GENERALES

El SAA 3027 está ideado para controlar motores PAP de pequeña potencia; no obstante, cuando se requiere controlar motores que absorban una corriente superior a 500 mA, se puede intercalar entre las salidas del C.I. y cada una de las fases un sencillo amplificador de corriente (buffer), o bien circuitos integrados destinados a tal fin.

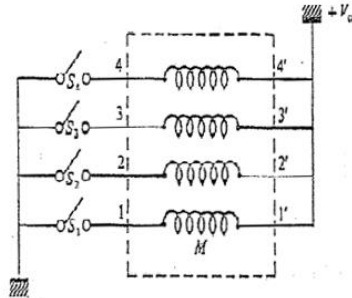
Las salidas son activas a nivel bajo, ya que según la disposición de la *Figura 4*, la alimentación queda aplicada a las fases del motor cuando existe un nivel bajo en las salidas del C.I.

9. PROCESO OPERATIVO

- 1) Conectar el circuito de la *Figura 5*. Fijar un disco de cartón o plástico al eje del motor, haciendo una marca para poder observar los desplazamientos.



2) Cerrar y abrir los interruptores según la secuencia de la *Tabla 4a*



M: Motor PAP 9904 112 32001
 $S_1 = S_2 = S_3 = S_4$; Interruptor
 $V_{cc} = 12\text{ V} ; 500\text{ mA}$

Figura 5. Circuito de prueba del motor PAP

S_1	S_2	S_3	S_4	Sentido de Giro
A	C	C	A	
A	C	A	C	
C	A	A	C	
C	A	C	A	

(a)

S_1	S_2	S_3	S_4	Sentido de Giro
A	C	C	A	
A	C	A	C	
C	A	A	C	
C	A	C	A	

(b)

S_1	S_2	S_3	S_4	Sentido de Giro
A	C	C	A	

S_1	S_2	S_3	S_4	Sentido de Giro
A	C	C	A	

Tabla 4. Secuencia de excitación del motor PAP

A	C	A	A	
A	C	A	C	
A	A	A	C	
C	A	A	C	
C	A	A	A	
C	A	C	A	
A	A	C	A	

(c)

A	C	A	A	
A	C	A	C	
A	A	A	C	
C	A	A	C	
C	A	A	A	
C	A	C	A	
A	A	C	A	

(d)

- 3) Repetir las secuencias hasta que se complete una revolución del motor, determinar el ángulo de paso y el modo de funcionamiento.
- 4) Repetir los apartados anteriores para las tablas 4b, 4c y 4d
- 5) Conectar el circuito de la figura 4b. Conectar la patilla 15 del C.I. a un generador con salida cuadrada (12 V p.p. 1 Hz). Completar la tabla 5



Curso:
**ELECTROTECNIA
Y MÁQUINAS
ELÉCTRICAS**

U.N.C.
Fac. de Ingeniería

2013

Pin	Nivel	Estado del motor	Sentdo de giro	Modo de funcionamiento
2	L			
3	H			
2	H			
3	L			
2	H			
3	H			

H = 12 V

L = 0 V

- 6) Aumentar la frecuencia del generador hasta 200 Hz. Observar en el osciloscopio, simultáneamente, la señal de control y una de las salidas. Determinar el instante del cambio de nivel en la salida con respecto a la señal de control.