

MOTORES Paso a Paso (PAP)

INDICE:

- 1. Introducción.**
- 2. Estructura física y características.**
- 3. Conexiones.**
- 4. Secuencia de activación de las bobinas.**
- 5. Control de las bobinas.**
- 6. Caso practico con control por corriente forzada (L/nR).**
- 7. Caso practico con control PWM de corriente constante.**

1. Introducción.

La ventaja fundamental que poseen los motores PAP con respecto a otros tipos de motores es que no necesitan “en principio” un sistema de realimentación para controlar la velocidad o posición del motor. Los driver de los motores paso a paso tienen básicamente 2 entradas; una de dirección (DIR) con la que le indicamos en que sentido queremos que gire el motor y otra de reloj (CLK) por la cual introduciremos un pulso por cada paso que queramos que de el motor, esto nos permite controlar de una forma muy sencilla la posición y la velocidad del motor ya que si introducimos por la entrada de CLK, una señal cuadrada de 200Hz y estamos controlando un motor de 200 pasos/ revolución ($1,8^\circ$), el motor girará a 1 vuelta por segundo. Del mismo modo si en vez de controlar velocidad queremos controlar posición, si al mismo motor, le introducimos por el driver 200 pulsos sabremos que ha girado una vuelta. De todas formas hay que tener muy en cuenta que los motores PAP son muy sensibles a las variaciones de carga y que una variación fuerte en el par que tiene que realizar el motor, puede producir que este pierda el paso y por tanto que, al no tener realimentación, pierda la posición real del motor (esta es la razón por la que al principio de esta párrafo puse “en principio”. Si un fallo en la posición del motor puede tener consecuencias graves no tendremos más remedio que poner realimentación o irnos a un sistema de posicionamiento implementado con otro tipo de motor).

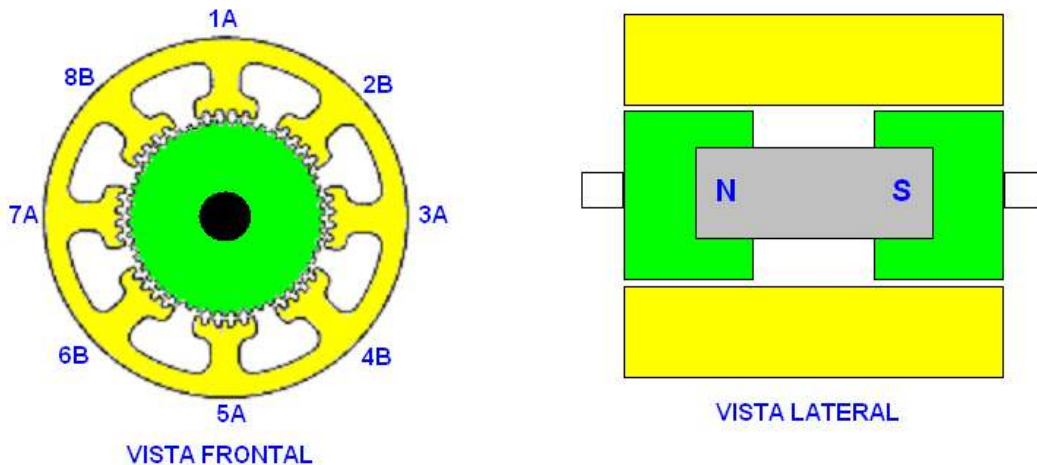
2. Estructura física y características.

El principio de funcionamiento de los motores paso a paso se basa en lo siguiente; cuando una barra de hierro o acero se suspende (es libre de rotar) dentro de un campo magnético, esta se alinea con el campo de manera que la reluctancia total del circuito sea la mínima posible. Si cambiamos la dirección del campo la barra girará con un determinado par.

Vamos a describir la estructura interna y la forma de funcionar de los motores de $1,8^\circ$ de paso híbridos de imán permanente, que son los más utilizados. En la figura inferior podemos ver, en la vista frontal, que el estator está formado de 8 polos magnéticos con 5 dientes cada uno y una bobina en cada uno de esos polos. En la vista lateral podemos observar que el rotor está formado por un imán permanente que posee una tapa en cada extremo con 50 dientes cada una (no se representan los dientes en el dibujo), estando una de estas tapas polarizada como N y la otra como S, además el tamaño de los dientes es el mismo que el del

estator pero están desfasados de tal manera que el diente en una de las tapas coincide en el otro extremo con un hueco. Los dientes del estator tienen todos igual tamaño pero están desfasados $1,8^\circ$ entre los polos.

Si pensamos en una configuración bipolar, los polos 1, 3, 5 y 7 son para la bobina A y los polos 2, 4, 6 y 8 para la bobina B. Cuando la bobina A tiene corriente positiva 1 y 5 se convierten en polos S y 3 y 7 en polos N. En estas condiciones los dientes en la terminal N del rotor son atraídos por los polos 1 y 5 mientras que los dientes en la terminal S son atraídos por los dientes en los polos 3 y 7 (los polos que se repelen se quedan en los huecos).



Las características mecánicas más importantes del PAP son:

- **Angulo de paso (Step angle):** Nos dice el ángulo que gira el eje del motor en cada paso. Los valores más habituales son $0,9^\circ$, $1,8^\circ$, $7,5^\circ$ y 15° .
- **Precisión del paso (Step angle accuracy):** Nos indica el porcentaje de error entre la posición real del eje y la posición teórica que tendría que tener.
- **Par de detención (Detent torque):** Los motor es PAP genera, sin alimentación, un par debido al imán permanente del motor que es máximo entre dos pasos. El valor dado es el valor máximo de este.
- **Par de mantenimiento:** Este nos indica el par máximo que podremos obtener del motor. El par depende de su construcción interna, la forma de los dientes y de la intensidad de campo del imán permanente. Aproximadamente la grafica de la función que relaciona el par con el ángulo girado se parece a una función seno (figura 1), en donde el pico de la función, punto donde la intensidad es igual a la nominal, sería el *par de mantenimiento*. La grafica ha de entenderse como que el motor esta en una posición estable cuando se encuentra en el cruce de la función del par con el eje X (por ejemplo en el origen), si intentamos forzar el eje a desplazarse en un sentido u otro el par del motor se opondrá a este movimiento haciendo que el eje vuelva a su posición de reposo.

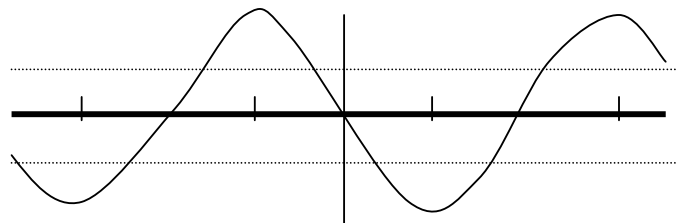


Figura 1.

El motor posee un par de fricción interno que se opone al movimiento del motor que al sumarse al par de la carga externa generan un par (ver línea punteada de figura 1) que al restarse al par del motor produce unas zonas muertas en las que el par es nulo (figura 2). La anchura de estas zonas determina el **error de posición del paso** y la precisión en la posición del eje de salida, además de limita el ángulo más pequeño de giro del motor en modo microstepping.

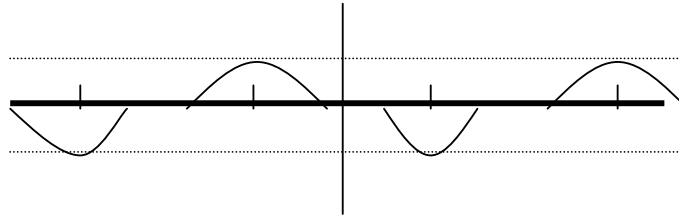


Figura 2

Cuando al motor lo hacemos girar, debido a la forma senoidal del par de mantenimiento (h), tendremos que el **par de funcionamiento** del motor, vendrá dado por la formula:

$$T_{fun} = \frac{h}{\sqrt{2}}$$

Otro aspecto a tener en consideración es la **frecuencia de resonancia** del motor. Si sujetamos un motor paso a paso en una base rígida y lo acoplamos también de forma rígida a una carga y lo hacemos funcionar a una frecuencia cercana a la de resonancia del sistema, tendremos que el motor perderá el paso. Este problema se puede tratar desde tres puntos de vista:

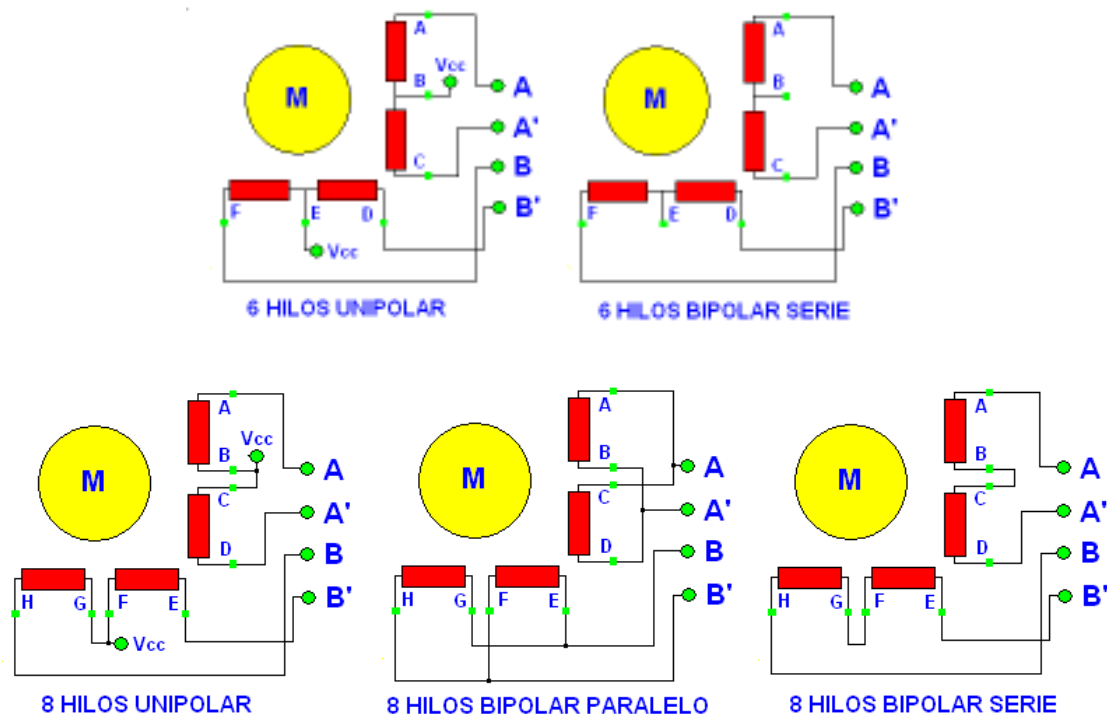
- *Controlar la resonancia en el mecanismo:* Utilizar acoplamientos y soportes del motor basados en elastómeros que absorban las frecuencias de resonancia.
- *Controlar la resonancia en el driver a bajo nivel:* Un motor resonando induce una tensión alterna en las bobinas. Mediante una bobina externa podríamos eliminar esta frecuencia indeseable.
- *Controlar la resonancia en alto nivel:* El driver evita estas frecuencias.

Una cuestión muy importante a la hora de diseñar un sistema es que los motores PAP se han de **acelerar y decelerar** de la misma forma que los motores normales, para esto hay que tener en consideración el par del motor, el par del sistema a mover y la inercia total del conjunto. Aplicando la siguiente formula podremos saber la aceleración máxima que podrá tener el conjunto:

$$\alpha_{max} = \frac{T_{motor} - T_{Sistema}}{I_{total}}$$

3. Conexiones.

Los motores PAP disponen internamente de 2 bobinas A y B que ha su vez están divididas en otras dos bobinas. Según el cableado de estas bobinas externamente tenemos 6 u 8 hilos. En las figuras siguientes se representa como se conectan las bobinas según su configuración y número de hilos:



La mayoría de los PAP llevan 8 hilos ya que , como se aprecia en las figuras superiores, permite las tres configuraciones de bobinas posibles.

Las bobinas se pueden configurar para trabajar de tres formas diferentes:

1. **Unipolar:** En esta configuración cada una de las dos bobinas que forman las bobinas A y B son excitadas independientemente, de tal forma que si queremos magnetizar el polo A como S meteremos en A corriente positiva y dejaremos A' sin conectar y si lo queremos como N meteremos corriente en A' y dejaremos A sin conectar. A este tipo de conexión se le suele llamar 4 fases-unipolar. En esta forma de conexión solo una de las bobinas del par, se activa cada vez, con lo que las pérdidas en forma de calor disminuyen y podemos llevar la intensidad nominal al máximo permitido, que es valor que se da en las especificaciones del fabricante. Debido a que solo se activan dos bobinas de N espiras, el flujo total a través del motor será aproximadamente $\phi=2NI$.
2. **Bipolar Serie:** En esta configuración, las dos bobinas que forman las bobinas A y B se conectan en serie pudiendo alimentar cada hilo de tres formas diferentes; a Vcc, a GND o desconectada, esto se realiza con dos transistores en configuración de medio puente. Debido a que las dos bobinas llevan corriente, la disipación de corriente es mayor y por tanto tenemos que reducir la intensidad máxima que circula por la bobina. Siendo I la intensidad nominal unipolar, la intensidad para conexión bipolar será:

$$I_{Bipolar} = \frac{I}{\sqrt{2}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

El flujo total será de $\phi=4NI_{bipolar}$, que es mayor que en la configuración unipolar y por tanto dará más par. El inconveniente de este formato es que al poner las dos bobinas en serie duplicamos la inductancia por fase, aumentando la constante de tiempo y por tanto disminuyendo la velocidad máxima.

3. **Bipolar Paralelo:** En esta configuración, las dos bobinas que forman las bobinas A y B se conectan en paralelo pudiendo alimentar cada hilo de tres formas diferentes; a Vcc, a GND o desconectada, esto se realiza con dos transistores en configuración de medio puente. En esta configuración, las dos bobinas van alimentadas con $I_{bipolar}$, siendo el flujo total $\phi=4NI$ igual que en la configuración serie, pero al ir las bobinas de cada fase en paralelo reduciremos a la mitad la inductancia y por tanto el tiempo de subida, obteniendo velocidades mucho más altas que con la configuración bipolar serie. El inconveniente es que el driver tiene que generar el doble de intensidad por cada fase.

4. Secuencia de activación de las bobinas.

Para que el motor gire de forma adecuada se tiene que seguir una secuencia concreta de activación de las fases. En la tabla siguiente aparece la forma correcta de activación para un motor conectado en forma monopolar:

Nº Paso	Full Step				Half Step			
	A	A'	B	B'	A	A'	B	B'
1	1	0	0	1	1	0	0	1
2	1	0	1	0	1	0	0	0
3	0	1	1	0	1	0	1	0
4	0	1	0	1	0	0	1	0
5					0	1	1	0
6					0	1	0	0
7					0	1	0	1
8					0	0	0	1

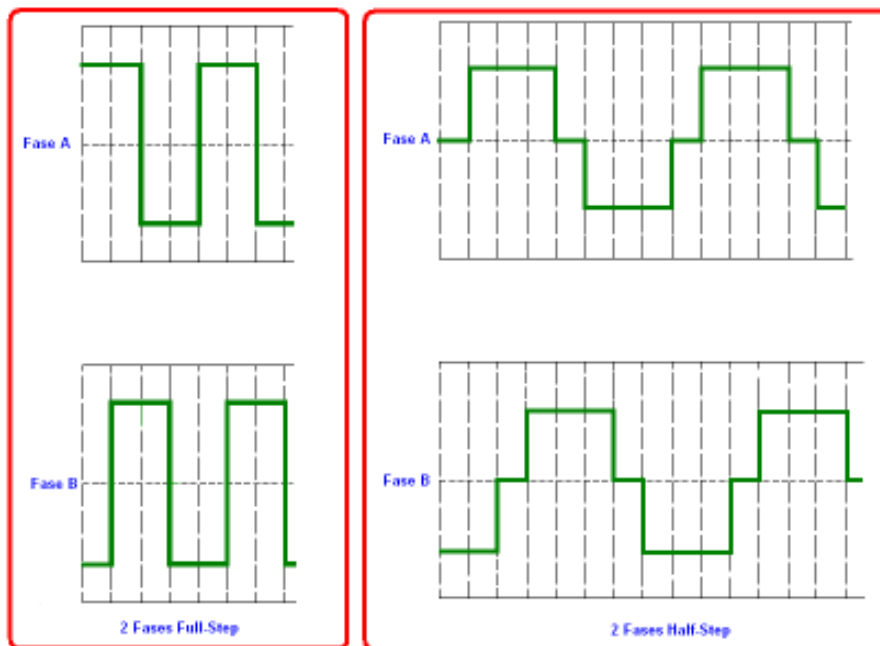
La secuencia de activación en modo bipolar deriva de la unipolar de tal forma que si, por ejemplo, en unipolar activábamos en el par A-A' la bobina A y dejábamos A' desactivada, en bipolar lo que haremos será hacer que la corriente en la bobina valla de A a A' (a esto llamaremos corriente en dirección +), si por el contrario, en unipolar activamos A' y dejamos A desactivada, lo que haremos en bipolar es hacer que la corriente valla desde A' a A (a esto llamaremos corriente en dirección -). Según esto la tabla de control bipolar es la siguiente:

Nº Paso	Full Step		Half Step	
	A-A'	B-B'	A-A'	B-B'
1	+	-	+	-
2	+	+	+	Desactivada
3	-	+	+	+
4	-	-	Desactivada	+
5			-	+
6			-	Desactivada
7			-	-
8			Desactivada	-

En la tabla aparecen dos columnas, la columna Full Step muestra la secuencia para que el motor (en el caso de $1,8^\circ$) de 200 pasos por revolución. Si seguimos la secuencia de la columna Half Step duplicaremos el número de pasos por vuelta, pasando de 200 pasos/ rev. a 400 pasos/ rev. El modo Half Step, al disminuir el paso, reduce los problemas de ruidos pero también disminuye el par del motor debido a que algunas de las bobinas están desactivadas en algunos pasos de la secuencia.

La siguiente grafica presenta la tensión en cada una de las bobinas para la configuración bipolar:

Secuencia de activación de los Motores PAP



Se puede reducir todavía más el paso mediante el uso del micropaso. Para utilizar este método tenemos que poder controlar la intensidad de cada fase. La utilización del micropaso suaviza el giro del motor reduciendo el ruido y la resonancia.

5. Control de las bobinas.

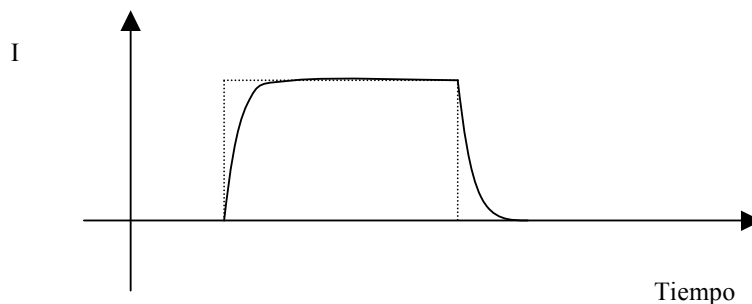
Como hemos visto, el motor está formado por varias bobinas que han de ser activadas y desactivadas secuencialmente, sin embargo, la característica fundamental de la bobina es que esta intenta oponerse a las variaciones de intensidad mediante variaciones de tensión, lo que se expresa matemáticamente como:

$$V_L = -L \frac{di}{dt} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Si resolvemos la ecuación para un circuito con una tensión de alimentación V y una resistencia de carga (si la hay) más resistencia interna de la bobina igual a R , tendremos que la carga de la bobina vendrá dada por la ecuación:

$$I_L = \frac{V}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad I_L = I_f (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \tau = \frac{L}{R} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Esto significa que desde el momento en que activamos una bobina hasta que esta alcanza su corriente nominal pasará un periodo de tiempo (τ se denomina constante de tiempo y representa el tiempo de carga a un 63% del nominal, para calcular el tiempo al 95% se utiliza el valor 3τ), esto lo podemos ver más claramente en la gráfica inferior, en la que se representa la intensidad teórica (la señal rectangular) y la real, en la que los frentes se curvan debido a los retrasos en la carga y descarga de la bobina.



Tenemos que tener en cuenta que el par del motor depende directamente de la corriente que circula por la bobina, de tal forma que en estos flancos de subida y bajada el par del motor disminuye e incluso se anula, pudiendo producir pérdidas de paso y una limitación considerable de la velocidad máxima. Es por esto por lo que es tan importante minimizar lo más posible estos flancos.

El sistema más sencillo de excitar las bobinas de un PAP es utilizar **Voltaje constante**. Este consiste en alimentar las bobinas a su tensión nominal (suele venir en las características del motor), tensión que hace que a través de la resistencia de la bobina pase la intensidad nominal, por ejemplo, un motor de 1A de intensidad nominal por fase y 20 oh de resistencia en la bobina tendrá una tensión nominal de trabajo de 20v ($V=RI=20*1=20$). A velocidades bajas este sistema funciona bien, puesto que la parte transitoria de subida y baja de tensión en la conmutación producida por la bobina, no es significativa en todo el periodo del pulso, pero la velocidad máxima queda muy limitada y por tanto es el sistema menos utilizado.

Si estudiamos la ecuación 3, podemos ver que si aumentamos el parámetro I_{fo} disminuimos τ podremos reducir el tiempo de carga de la bobina. Los métodos más utilizados para conseguirlo son:

- **Con corriente forzada (L/nR):** Con este método reducimos τ mediante el uso de una resistencia externa que al sumarse a la resistencia de la bobina hace que $\tau=L/R$ disminuya. El valor de esta resistencia suele estar entre 2 y 10 veces la resistencia de la bobina, lo que implica aumentar la tensión de alimentación entre 2 y 10 veces. El principal inconveniente es la cantidad de potencia disipada por esta resistencia (ver caso practico).
- **Control PWM con intensidad constante:** En este método utilizamos un control de ancho de pulso para inyectar más o menos tensión en la bobina y así, regular la intensidad en ella. La realimentación del nivel real de corriente en la bobina lo realizamos mediante un sensor de corriente, que en su forma más sencilla es una resistencia. Este sistema es el más complejo pero nos da los mejores resultados en cuanto a rendimiento energético y velocidad máxima. Este sistema no es aconsejable en conexiones monopares por que las bobinas activas, al trabajar en frecuencia, generan tensiones inducidas en las bobinas que no lo están.

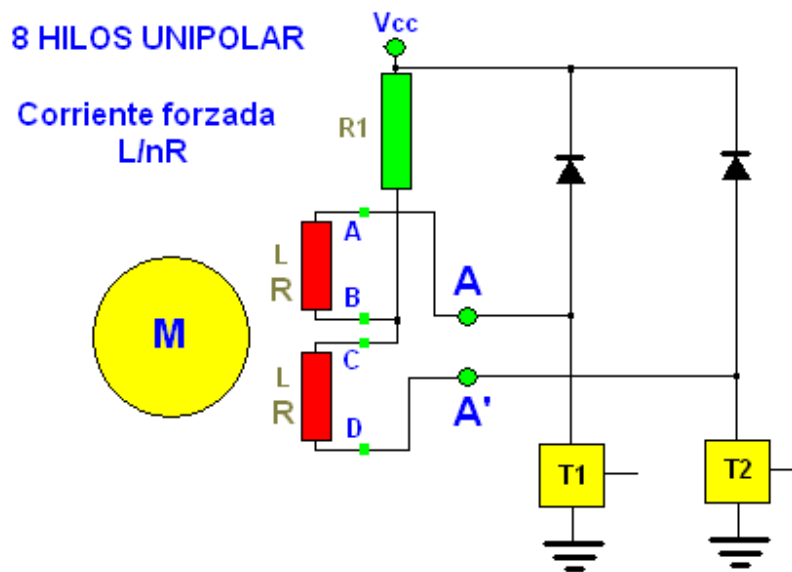
6. Caso practico con control por corriente forzada (L/nR).

Vamos a aplicar lo estudiado a realizar dos controladores (uno unipolar y otro bipolar) para un motor PAP con las siguientes características dadas por el fabricante:

Característica	Valor
Voltaje nominal (V)	12 v
Corriente nominal (A)	0,16 A
Resistencia por bobina (Ω)	75 Ω
Inductancia por bobina (mH)	36 mH

Par Detención (mNm)	4 mNm
Par de mantenimiento (mNm)	70 mNm
Precisión del ángulo de paso (%)	5%
Angulo paso	1,8°

Corriente forzada (L/nR) en configuración unipolar: Este método consiste en aumentar en un factor “n” la resistencia de carga de la bobina para reducir τ en un factor $1/n$. Normalmente el valor de n esta entre 2 y 10. Para este ejemplo utilizaremos el valor de 2, lo que implicara que τ se reducirá a la mitad ($\tau=L/2R$). Si aumentamos R, también tendremos que aumentar la tensión de alimentación en el mismo factor para mantener la intensidad nominal del motor. El esquema básico es el siguiente:



El diodo evita que se generen altas tensiones que puedan destruir el transistor. Estos se pueden conectar en la configuración que se indica o bien en paralelo con la bobina.

Pasemos a realizar los cálculos del circuito:

- **Calculo de R1:** El valor de R1 viene dada por la formula:

$$R1 = (n - 1)R$$

Como hemos decidido que $n=2$ tendremos que $R1=(2-1)R=R=75\Omega$.

- **Calculo de Vcc:** El valor de Vcc vendrá dado por la formula:

$$V_{cc} = V_{Nominal} + I_{Nominal} \cdot R1$$

Como $V_{nominal} = 12v$, $I_{nominal} = 0,16A$ y $R1 = 75\Omega$ tendremos que $V_{cc} = 12 + 0,16 \cdot 75 = 24v$.

- **Calculo de la potencia de R1:** La potencia disipada por la resistencia, que es el mayor problema con el que nos encontramos a la hora de utilizar este sistema, vendrá dada por la siguiente formula:

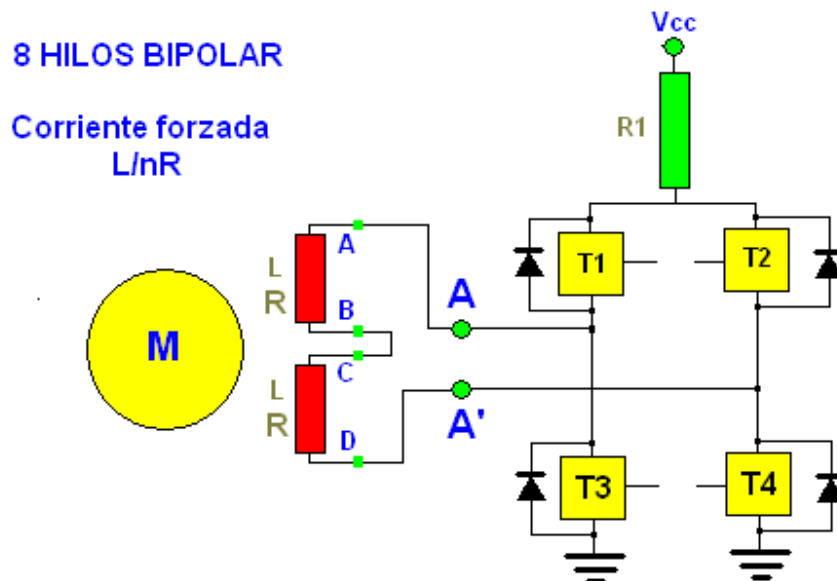
$$P = I_{\text{Nominal}}^2 \cdot R1$$

Para este caso la potencia de la bobina será de $P=(0,16)^2 \cdot 75=1,92\text{W}$. Esta potencia disipada es la misma que la potencia que disipa el motor por lo que el rendimiento del sistema será solo del 50%.

Corriente forzada (L/nR) en configuración bipolar: Este método es básicamente igual que el anterior en cuanto a como reducimos τ mediante la resistencia. La diferencia consiste en que en vez de activar en cada paso uno u otra bobina, lo que hacemos es controlar la dirección de la circulación de la corriente de tal forma que si activamos T1 y T4 y desactivamos T2 y T3 la corriente circulara de A a A' y si activamos T2 y T3 y desactivamos T1 y T4 la corriente ira de A' a A. Esta configuración se llama de puente en H (H-Bridge) y las combinaciones posibles de activación de los 4 transistores son las siguientes:

- **Activamos T1 y T4:** Esto hace que la corriente fluya desde Vcc hacia tierra a través de R1 y L.
- **Activamos T2 y T3:** Esto hace que la corriente fluya desde Vcc hacia tierra a través de R1 y L, pero invirtiéndose la polaridad en L.
- **Caída rápida de corriente:** Si desactivamos todos los transistores, la corriente fluye rápidamente a través de los diodos.
- **Caída lenta de la corriente:** Si activamos un par de transistores (T1 y T2 por ejemplo) la corriente circulará en un bucle con una impedancia muy pequeña, por lo la caída de intensidad será lenta.

El esquema de la conexión con las bobinas en serie seria el siguiente.



Los diodos se utilizan para eliminar los picos de tensión que las bobinas pueden generar en los transistores

En el esquema las bobinas están conectadas en serie, pero también se podrían haber conectado en paralelo. Vamos a realizar los cálculos de R1 y Vcc para las dos configuraciones.

Bobinas en serie: Si ponemos las bobinas en serie, la resistencia de las bobinas, al estar en serie, pasara a ser $R_{eq}=R+R=2R$, la tensión nominal de las dos bobinas en serie tendrá que ser de $2V_{\text{nominal}}$ y la

corriente nominal se reducirá en base a la ecuación 1. Esto se hace para limitar el ratio de temperatura del motor ya que ahora las 2 bobinas están siempre con corriente. Pasemos a realizar los cálculos:

- **Calculo de R1:** El valor de R1 viene dada por la formula:

$$R1 = (n - 1)2R$$

Como hemos decido que n=2 tendremos que $R1=(2-1)2R=2R=150\Omega$.

- **Calculo de Vcc:** El valor de Vcc vendrá dado por la formula:

$$V_{cc} = 2V_{No\ min\ al} + \frac{I_{No\ min\ al}}{\sqrt{2}} \cdot R1$$

Como $V_{nominal} = 12v$, $I_{nominalBipolar} = 0,11A$ y $R1 = 150\Omega$ tendremos que $V_{cc} = 24 + 0,11 \cdot 150 = 40,5v$.

- **Calculo de la potencia de R1:** La potencia disipada por la resistencia, que es el mayor problema con el que nos encontramos a la hora de utilizar este sistema vendrá dada por la siguiente formula:

$$P = \left(\frac{I_{No\ min\ al}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot R1$$

Para este caso la potencia de la bobina será de $P=(0,11)^2 \cdot 150 = 1,85W$. Como vemos la potencia disipada en la resistencia, con respecto a la configuración unipolar, a disminuido un poco, pero la tensión necesaria para hacer funcionar el circuito se a multiplicado prácticamente por 2 y el rendimiento es prácticamente el mismo (50%). La ventaja de este método es que al estar las cuatro bobinas activas el motor tiene más par.

Bobinas en paralelo: Si ponemos las bobinas en paralelo, la resistencia de las bobinas, al estar en paralelo, pasara a ser $R_{eq}=R/2$, la tensión nominal de las dos bobinas en paralelo será la misma que en monopolar y la corriente nominal vendrá dada por la ecuación 1, pero multiplicada por 2, ya que las bobinas están en paralelo. Pasemos a realizar los cálculos:

- **Calculo de R1:** El valor de R1 viene dada por la formula:

$$R1 = (n - 1) \frac{R}{2}$$

Como hemos decido que n=2 tendremos que $R1=(2-1)R/2=R/2=37,5\Omega$.

- **Calculo de Vcc:** El valor de Vcc vendrá dado por la formula:

$$V_{cc} = V_{No\ min\ al} + 2 \frac{I_{No\ min\ al}}{\sqrt{2}} \cdot R1$$

Como $V_{nominal} = 12v$, $I_{nominalParalelo} = 0,22A$ y $R1 = 37,5\Omega$ tendremos que $V_{cc} = 12 + 0,22 \cdot 37,5 = 20,25v$.

- **Calculo de la potencia de R1:** La potencia disipada por la resistencia, que es el mayor problema con el que nos encontramos a la hora de utilizar este sistema vendrá dada por la siguiente formula:

$$P = \left(2 \cdot \frac{I_{\text{Nominal}}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot R1$$

Para este caso la potencia de la bobina será de $P=(0,22)^2 \cdot 37,5=1,82W$. Como vemos la potencia disipada en la resistencia, con respecto a la configuración bipolar serie es igual, tenemos que la alimentación necesaria es muy parecida a la monopolar y tenemos la ventaja de que al poner las bobinas en paralelo la inductancia se divide por 2 obteniendo por tanto una τ menor, lo que producirá una mejora en el par a alta velocidad.

7. Caso practico con control PWM de corriente constante.

Vamos a aplicar el control PWM de corriente constante al motor del ejemplo anterior. Sus características eran:

Característica	Valor
Voltaje nominal (V)	12 v
Corriente nominal (A)	0,16 A
Resistencia por bobina (Ω)	75 Ω
Inductancia por bobina (mH)	36 mH
Par Detención (mNm)	4 mNm
Par de mantenimiento (mNm)	70 mNm
Precisión del ángulo de paso (%)	5%
Angulo paso	1,8°

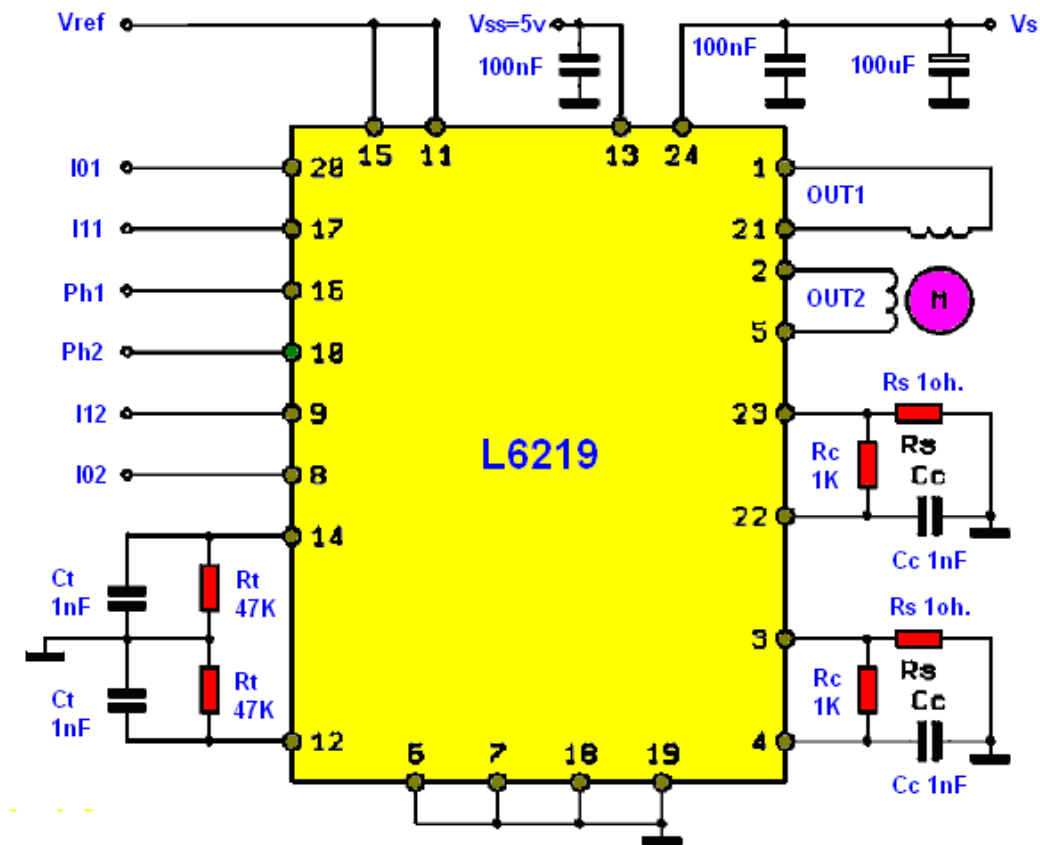
Lo mejor es utilizar un circuito integrado comercial para implementar el control PWM, en nuestro ejemplo vamos a utilizar el L6219 de SGS-THOMSON MICROELECTRONICS (puedes encontrar el datasheet en www.st.com), este integrado es capaz de controlar un motor PAP de hasta 750mA por fase y con un voltaje de alimentación de hasta 46v. Uno de los principales atractivos de este integrado es la posibilidad de poder seleccionar, mediante 2 líneas (I0,I1), entre 4 niveles de corriente en cada fase, lo que nos permite trabajar con una resolución de paso entero, medio paso y cuarto de paso.

Describamos las terminales y la función de los componentes que tiene:

Pines	Nombre	Función
1,2	OUTA	Aquí conectaremos una de las bornas de cada una de las fases del motor PAP. Observemos que no necesitamos conectar los diodos de protección de los transistores, porque estos ya están integrados en el chip.
5,21	OUTB	Aquí conectaremos la otra borna de cada una de las fases del motor PAP.
13	Vss	Alimentación de la lógica del circuito 5v.
24	Vs	Alimentación del motor entre 10v y 46v.
6,7	GND	Conexión a masa.
18,19	GND	Conexión a masa.
12,14	RC	Aquí pondremos una red RC paralela para fijar el tiempo de corte de los transistores, el valor de $t_{off}=1.1RtCt$, un valor adecuado es $Rt=47K$ y $Ct=1nF$.
3,23	SENSE RESISTOR	Aquí pondremos una resistencia (R_s en el diagrama) que sirve como sensor de corriente. Esta suele tener un valor pequeño para intentar disipar la mínima potencia. En el diagrama utilizamos una resistencia de 1oh, de tal manera que la tensión generada por la resistencia será igual a la corriente que circula por ella según la ecuación $V=RI \rightarrow V=1I \rightarrow V=I$. La potencia disipada será $P=I^2R$.

4,22	COMPARATOR INPUT	La tensión generada en SENSE RESISTOR se realimentan en el integrado a través de estos pines. Como, debido a la conmutación de los transistores, la tensiones generada en Rs tienen picos de tensión, antes de introducirlas las hacemos pasar por un filtro paso bajo formado por la resistencia Rc y el condensador Cc.															
11,15	REFERENCE VOLTAGE	El voltaje aplicado a este pin fija la tensión de referencia de los comparadores que determinan la corriente máxima de las bobinas. Esta también depende del valor de Rs y del estado de las entradas INPUT0 e INPUT1.															
8,20	INPUT0	Ver INPUT1.															
9,17	INPUT 1	La combinación de valores lógicos de INPUT1 e INPUT0 controla la corriente en la bobina según la siguiente tabla: <table border="1" style="margin: 5px auto;"> <thead> <tr> <th>I0</th> <th>I1</th> <th>Corriente en la fase</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>Fase desactivada ($I_L=0$).</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>Corriente a 1/3 de su valor máximo ($I_L=1/3*I_{max}$).</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>Corriente a 2/3 de su valor máximo ($I_L=2/3*I_{max}$).</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>Corriente a su valor máximo ($I_L=I_{max}$).</td> </tr> </tbody> </table> <p>El valor de la corriente máxima es $I_{max}=V_{ref}/10R_s$.</p>	I0	I1	Corriente en la fase	1	1	Fase desactivada ($I_L=0$).	0	1	Corriente a 1/3 de su valor máximo ($I_L=1/3*I_{max}$).	1	0	Corriente a 2/3 de su valor máximo ($I_L=2/3*I_{max}$).	0	0	Corriente a su valor máximo ($I_L=I_{max}$).
I0	I1	Corriente en la fase															
1	1	Fase desactivada ($I_L=0$).															
0	1	Corriente a 1/3 de su valor máximo ($I_L=1/3*I_{max}$).															
1	0	Corriente a 2/3 de su valor máximo ($I_L=2/3*I_{max}$).															
0	0	Corriente a su valor máximo ($I_L=I_{max}$).															
10,16	PHASE	Se utilizan para indicar la dirección de la corriente en cada fase del motor. Un nivel lógico alto hace que la corriente fluya de OUTA a OUTB.															

El diagrama inferior esta sacado del datasheet del integrado y en él se puede observar la configuración habitual de utilización de este integrado.



Aquí también podemos configurar las bobinas en paralelo o en serie, Estudiemos los casos por separado:

Bobinas en serie: Si ponemos las bobinas en serie tendremos los siguientes valores:

- **Intensidad máxima (I_{max}):** La intensidad máxima de la bobina en configuración bipolar es:

$$I_{max} = \frac{I_{Nominal}}{\sqrt{2}}$$

Para ajustar la intensidad por fase en el integrado con una $R_s=1\Omega$, tenemos que calcular el valor de V_{ref} según la fórmula dada anteriormente por el fabricante:

$$I_{max} = \frac{V_{ref}}{10R_s} \Rightarrow V_{ref} = 10R_s \cdot I_{max}$$

Como $I_{max}=0,11A \rightarrow V_{ref}=10*1*0,11=1,1v$. Ponemos generar esta tensión con un potenciómetro de 1K alimentado entre 0 y 5v, fijando la tensión en el cursor a 1,1v.

- **Tensión de alimentación (V_{ss}):** Como la intensidad que circula por las bobinas está limitada por el integrado, la norma para fijar la tensión de alimentación, es cuanto más mejor (esta no podrá superar la tensión máxima admitida por el integrado que es de 46v). Esto se debe a que como nuestra intención es intentar cargar la bobina lo más rápido posible, si analizamos la Ecuación 3 de carga de la bobina, podemos ver, que a más I_f más rápido se cargara la bobina, lo que significa que teniendo la misma resistencia de las bobinas, si aumentamos la tensión de alimentación la intensidad final aumentará. En cuanto a la tensión mínima de alimentación, como tenemos las dos bobinas en serie la tensión mínima para excitar las bobinas a su tensión nominal bipolar será $V_{min} = 2R \cdot I_{NominalBipolar} = 2*75*0,11 = 16,5v$. Lo ideal es como mínimo duplicar la tensión, pero con 24v sería suficiente.

Bobinas en paralelo: Si ponemos las bobinas en paralelo tendremos los siguientes valores:

- **Intensidad máxima (I_{max}):** Como las bobinas están en paralelo la intensidad por fase, será el doble de la intensidad para la configuración serie por lo que $I_{max}=0,22A$. Utilizando las mismas ecuaciones anteriores tendremos que para $R_s=1\Omega$ e $I_{max}=0,22A \rightarrow V_{ref} = 10*1*0,22 = 2,2v$. Ponemos generar esta tensión igual que antes, con un potenciómetro de 1K alimentado entre 0 y 5v, fijando la tensión en el cursor a 2,2v.
- **Tensión de alimentación (V_{ss}):** Respecto a la tensión de alimentación seguimos la misma pauta de antes; cuanto más mejor. En cuanto a la tensión mínima de alimentación para esta configuración, como tenemos las dos bobinas en paralelo la resistencia de cada fase será la mitad de la resistencia de una fase (al estar en paralelo la resistencia equivalente es $R/2$) y por tanto, la tensión mínima para excitar las bobinas a su tensión nominal bipolar será $V_{min} = (R/2) \cdot I_{max} = 37,5*0,22 = 8,25v$. Como vemos la configuración paralelo tiene dos ventajas con respecto a la configuración serie; la primera es que la tensión necesaria para hacer funcionar el circuito es menor, por lo que con la misma tensión que en la configuración serie, conseguiremos una I_f más alta y por tanto reducir el tiempo de descarga de la bobina, y la segunda es que al estar las bobinas en paralelo la inductancia se divide por dos, lo que ayuda aun más a reducir el tiempo de carga. La desventaja es que necesitamos corrientes el doble de altas y por tanto el circuito electrónico ha de ser mucho más robusto y caro.

Una ventaja que tiene este integrado es su capacidad para controlar la intensidad por fase, lo que nos permite disminuir el tamaño del paso hasta $\frac{1}{4}$ de su valor original ($1,8^\circ/4=0,45^\circ$). Para hacer esto, tendremos que hacer la secuencia de fases utilizando las líneas I0 e I1, que controlan la su intensidad. La tabla siguiente indica la secuencia de fases para paso completo, medio paso y cuarto de paso.

Full	½	¼	Fase 1	I01	I11	Ph1	Fase 2	I02	I12	Ph2
	1	1	0	1	1	-	100	0	0	1
		2	33	0	1	1	100	0	0	1
1	2	3	66	1	0	1	66	1	0	1
		4	100	0	0	1	33	0	1	1
	3	5	100	0	0	1	0	1	1	-
		6	100	0	0	1	33	0	1	0
2	4	7	66	1	0	1	66	1	0	0
		8	33	0	1	1	100	0	0	0
	5	9	0	1	1	-	100	0	0	0
		10	33	0	1	0	100	0	0	0
3	6	11	66	1	0	0	66	1	0	0
		12	100	0	0	0	33	0	1	0
	7	13	100	0	0	0	0	1	1	-
		14	100	0	0	0	33	0	1	1
4	8	15	66	1	0	0	66	1	0	1
		16	33	0	1	0	100	0	0	1

El diagrama de abajo representa la tensión en cada fase para cuarto de paso.

