

MOTORES PASO A PASO, INTRODUCCIÓN A SU FUNCIONAMIENTO Y CONTROL EN LAZO ABIERTO

STEPPER MOTORS, INTRODUCTION TO HIS OPERATION AND OPEN LOOP CONTROL

AUTORES

Arturo Pérez París: Alumno de la Escuela Politécnica. Universidad de Alcalá
arturo.perez@arrakis.es

CURRÍCULUM VITAE

Alumno de la Escuela Politécnica de la Universidad de Alcalá de Henares (España).
Ingeniero de Soporte Técnico en Kone Elevadores

RESUMEN

En el presente artículo quisiera dar un enfoque práctico al uso de este tipo de dispositivos, cuya invención se remonta a los primeros decenios de nuestro siglo. En aquel entonces se buscaba una solución eléctrica a los relojes, con el fin de que fuesen más precisos y de que no hubiera que andar dándoles cuerda diariamente.

PALABRAS CLAVE

Motores – Principio de funcionamiento – Control en lazo abierto

ABSTRACT

In this article I would like to take a practical approach to the use of these devices, whose invention dates back to the early decades of this century. At that time it was seeking a solution to electric clocks, in order that they might be more accurate and that there was no rope to walk them daily.

KEY WORDS

Engines - Principle of operation - open-loop control

ÍNDICE

SEGUNDA PARTE: DEL CONTROLADOR DE MOTORES PASO A PASO L297.

1. Descripción del circuito
2. Descripción PIN a PIN del circuito L297

1. Descripción del circuito

Este circuito es capaz de generar 4 u 8 códigos, según el modo de funcionamiento que pre seleccionemos (paso entero, con 1 o 2 fases activas, o medio paso). Además dispone de un circuito de PWM de chopeado que realizará el control de la corriente que fluye por el motor al funcionar, cuya frecuencia de corte podrá ser definida por el usuario. Internamente y de forma esquemática, este chip será:

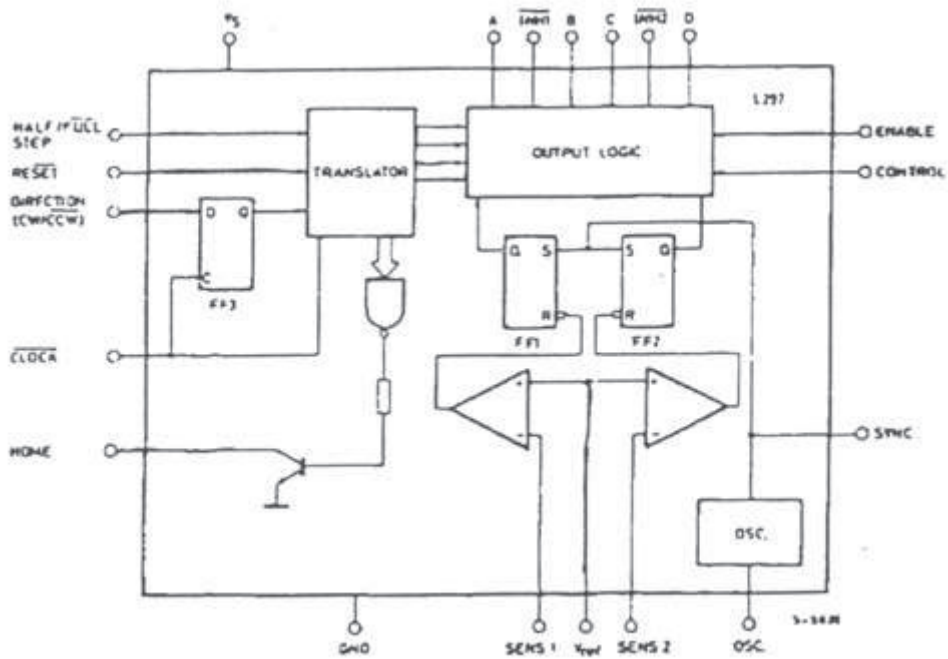


Fig.11 (Ver Ref. 3)

Debido a su arquitectura, este componente sólo necesita que le proporcionemos, además de la alimentación, una señal de reloj con la que enviará los códigos al puente en H (L298) y de ahí al motor, la dirección de giro y las señales de control diversas (inicialización, habilitación, etc).

Las características eléctricas de este circuito se detallan en la siguiente tabla:

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ	Max.	Unit
V_s	Supply voltage (pin 12)		4.75		7	V
I_s	Quiescent supply current (pin 12)	Outputs floating		50	80	mA
V_i	Input voltage (pin 11, 17, 18, 19, 20)	Low			0.6	V
		High	2		V_s	V
I_i	Input current (pin 11, 17, 18, 19, 20)	$V_i = L$		100		μA
		$V_i = H$			10	μA
V_{en}	Enable input voltage (pin 10)	Low			1.3	V
		High	2		V_s	V
I_{en}	Enable input current (pin 10)	$V_{en} = L$			100	μA
		$V_{en} = H$			10	μA
V_o	Phase output voltage (pins 4, 6, 7, 9)	$I_o = 10mA$ V_{OL}			0.4	V
		$I_o = 5mA$ V_{OH}	3.9			V
V_{in}	Inhibit output voltage (pins 5, 8)	$I_o = 10mA$ V_{inL}			0.4	V
		$I_o = 5mA$ V_{inH}	3.9			V
V_{sync}	Sync Output Voltage	$I_o = 5mA$ V_{syncH}	3.3			V
I_{leak}	Leakage current (pin 3)	$V_{CC} = 7V$			1	μA
V_{sat}	Saturation voltage (pin 3)	$I = 5mA$			0.4	V
V_{off}	Comparators offset voltage (pins 13, 14, 15)	$V_{ref} = 1V$			5	mV
I_b	Comparator bias current (pins 13, 14, 15)		-100		10	μA
V_{ref}	Input reference voltage (pin 15)		0		3	V
t_{CLK}	Clock time		0.5			μs
t_s	Set up time		1			μs
t_H	Hold time		4			μs
t_R	Reset time		1			μs
t_{RCLK}	Reset to clock delay		1			μs

Fig.12 (Ver Ref. 3)

Este chip se usa normalmente con puentes en H como el L298 para las actividades de control en lazo abierto de motores paso a paso. En realidad realiza una doble función el L297, a saber:

Generar los códigos de funcionamiento necesarios para los giros del motor.

Realizar una regulación de la corriente por las bobinas del motor, mediante un circuito de chopeado que le permite al motor funcionar a mayor velocidad, independientemente de la $t = L / r$ propia del motor:

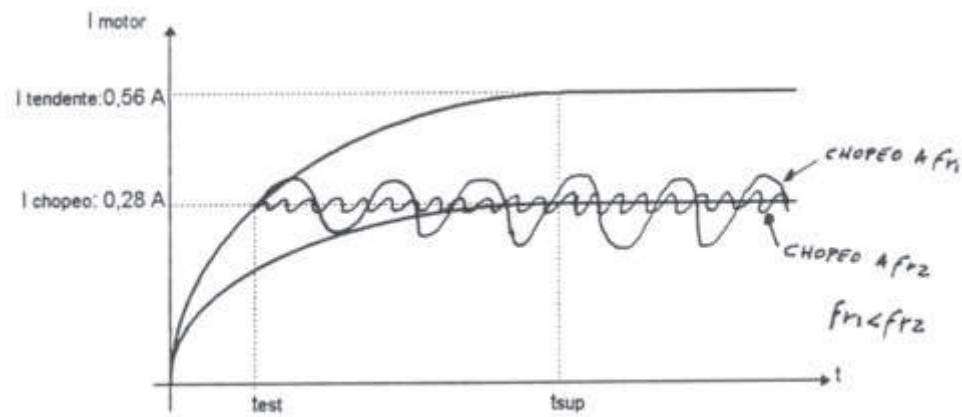


Fig.13

Como se aprecia en la gráfica, básicamente el chopeado consiste en aumentar la tensión de alimentación del motor para que éste alcance la corriente de regulación (I_{reg}) lo más rápidamente posible. Una vez alcanzada, se cortará y se conectará de forma que se mantenga ese valor de la corriente. Si no se empleara este método los tiempos de reacción serían enormes.

Para cada bobinado el circuito a implementar sería:

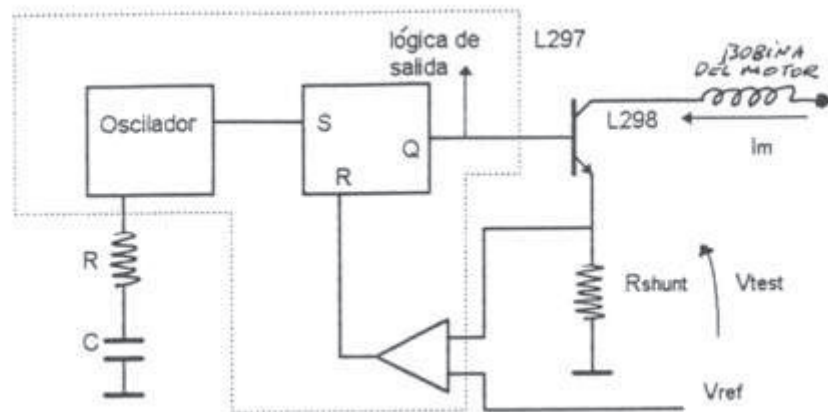


Fig.14

Mediante V_{ref} y calculando adecuadamente R_{shunt} controlaremos la corriente I_m que circulará por el motor, así haciendo:

$$V_{test} = V_{ref}$$

$$I_m = I_{max}$$

que es la que circulará por el motor (es función de si usamos 1 ó 2 fases del motor).

$$R_{test} = V_{test} / I_m$$

$$P_{total} \text{ del motor } \rightarrow P_{max} = R \cdot I_m$$

donde R es la resistencia que presenta cada devanado

En función de las fases activas:

$$1 \text{ fase } \rightarrow I_m = (P_{max}/R)^{1/2}$$

$$2 \text{ fases } \rightarrow I_m = ((P_{max}/2)/R)^{1/2}$$

Siendo así la justificación teórica del cálculo de lo que en los esquemas se denomina R_{sense} o para nosotros la R_{shunt} donde verificamos el valor de la corriente que circula por los devanados del motor para su regulación posterior.

En dos de las diferentes formas de trabajo con el motor (paso completo con una o dos fases activas y medio paso) se generan las señales $INH1^*$ e $INH2^*$ por el L297. Éstas se conectarán directamente al L298, obviamente a los correspondientes pines (6 y 11), con el fin de deshabilitar las correspondientes secciones del puente en H (dejarlos en

alta impedancia) y con ello permitir una rápida circulación de la Im de las bobinas del motor cuando están desenergizadas.

El pin de CONTROL determinará que el subcircuito de chopeado actúe sobre las salidas A, B, C y D o las INH1* e INH2* en función de la forma de uso del motor, respecto de la recirculación de la corriente por el puente (de forma rápida o lenta). Los modos de trabajo, como ya se vio, son tres (aunque aquí sólo se han visto dos), donde el avance de las posiciones del motor (códigos emitidos) se hará en el paso del estado bajo al estado alto de la señal CLOCK*.

La primera posición (o posición índice) es la que hace ABCD=0101, que será al activar el pin de RESET*. El sentido de giro del motor se determinará mediante el pin CW/CCW* (clockwise/counter clockwise) que dará, con un nivel "H" en dicho pin vueltas en sentido horario, y con un nivel "L" vueltas en sentido antihorario.

Los modos de funcionamiento del motor se determinarán en función del pin HALF/FULL, así el modo medio paso se ejecutará al poner dicho terminal a nivel "H":

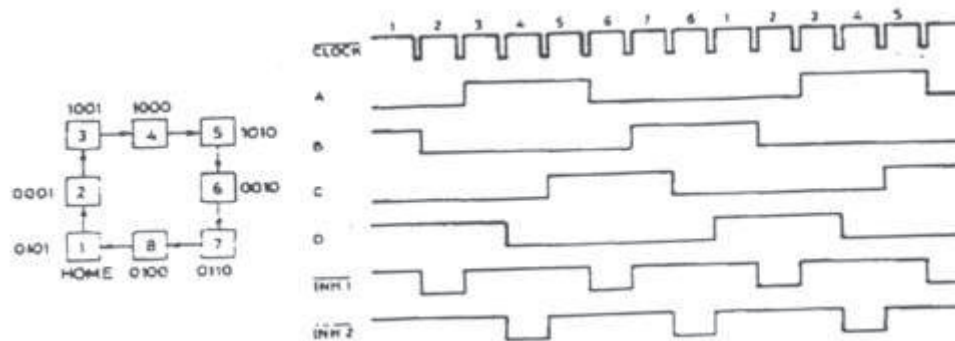


Fig.15 (Ver Ref. 3)

El modo paso completo con 2 fases activas será ejecutable cuando el pin HALF/FULL* esté a nivel "L", quedando las salidas INH1* e INH2* a nivel H:

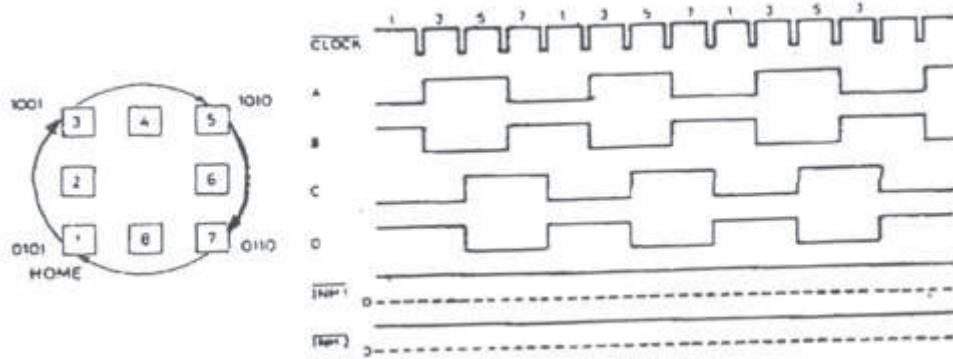


Fig.16 (Ver Ref. 3)

Por último, el modo paso completo con una sola fase activa será ejecutable al llevar a nivel "L" el pin HALF/FULL*, cuando el chip se encuentre generando una posición par (2,4,6 u 8):

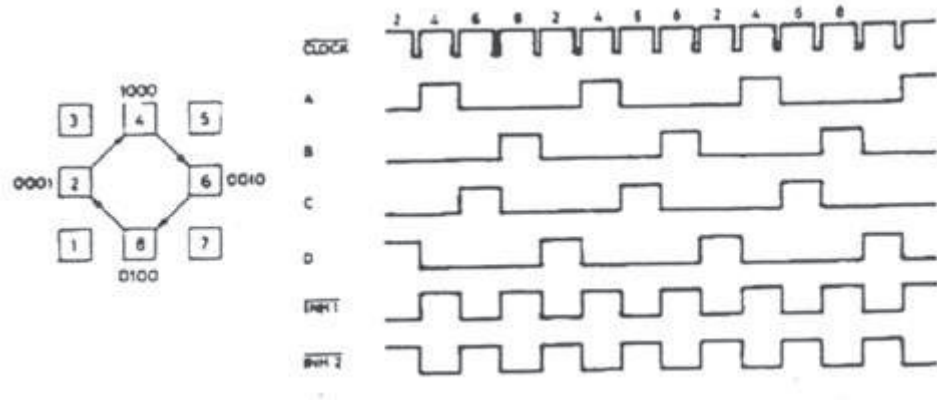


Fig.17 (Ver Ref. 3)

2. Descripción PIN a PIN del circuito l297.

El pin SYNC es la salida del oscilador de chopeo. Esta salida permitirá sincronizar varios L297 en cascada eliminando el ruido de oscilación por masa y, de paso, ahorrándonos componentes en un sistema en el que usemos varios L297 en cascada, a saber:

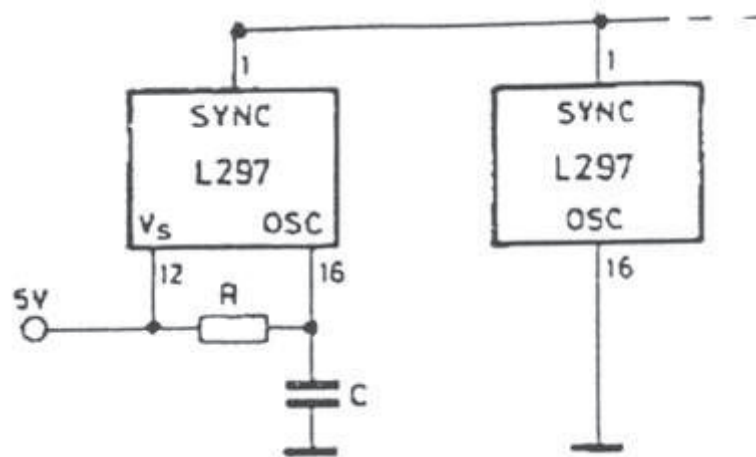


Fig.18

El pin HOME es también una salida (en colector abierto, ya que el transistor dará circuito abierto cuando el pin esté activo) que será activa cuando ABCD=0101.

Los pines INH1* e INH2* activas a nivel bajo inhiben el control de un bobinado (A y B para el primero y C y D para el segundo).

Cuando usamos el puente en H de forma bipolar, estos pines podrán usarse para asegurar una rápida recirculación de la corriente en los devanados cuando éstos se encuentran en un proceso de desenergización. También pueden ser usados por el subcircuito de chopeado para regular la corriente por los devanados, siempre y cuando el pin CONTROL se encuentre a nivel bajo. Este pin (CONTROL) es una entrada que define la activación del chopeo. A nivel bajo, el chopeo actúa por INH1*

e INH2* como se dijo y cuando el nivel es alto la acción de regulación de corriente por chopeado se hará por los pines ABCD.

Los pines SENS1 y SENS2 nos permitirán fijar la referencia que determinará la corriente de paso en los devanados mediante una resistencia de shunt p.e.

El pin ENABLE a nivel "H" hará que INH1*,INH2*, A, B, C y D permanezcan a nivel bajo, o sea deshabilita el L297.

El terminal OSC mediante una red RC determinará la frecuencia de chopeo mediante la relación:

$$fr=1/(0,69 \cdot Ro \cdot C)$$

El pin CW/CCW es una entrada con la que determinaremos un sentido dextrógiro si se pone a nivel "H" o levógiro si lo ponemos a nivel "L".

El pin CLOCK* determinará la velocidad con la que daremos los pasos en función de la frecuencia de entrada de la señal que le introducimos.

El pin HALF/FULL determinará el modo de trabajo del motor; así si está a nivel "H" trabajará a medio paso, y si está a nivel "L", lo hará a paso completo, seleccionándose si es a 1 ó 2 fases activas en función de si estamos (en medio paso) en posición par o impar (en el cambio a paso completo). Por último, el pin RESET puesto a nivel "L" repondrá en los devanados la posición inicial ABCD=0101 (home).

El circuito que montaremos será tal que permita controlar un motor en modo bipolar, a saber:

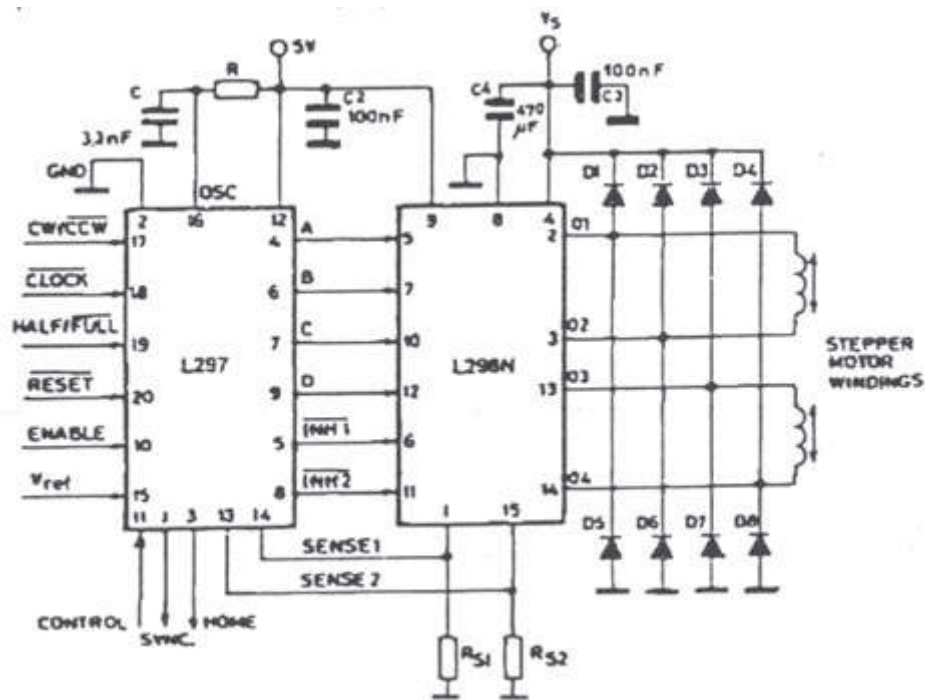


Fig.19

Como preliminares partiremos de los siguientes datos de partida:

Frecuencia inicial de test de la señal de reloj del L297: 100Hz.

Las señales de control CW/CCW y HALF/FULL se seleccionan manualmente.

Diodos rápidos para el puente en H: $t_{rr} < 200\text{ns}$.

Vref inicial para control del chopeado: 1v.

Resistor de la red RC que precisa el oscilador de chopeo: RV de 47KW .

El diseño del sistema vendrá dado por:

Del motor:

$P_{max} = 7.5\text{w}$

$R=46\text{W}$

Cable blanco: toma intermedia del bobinado.

$$I_{max} \text{ 1 bobinado activo} = (7.5w/46W)^{1/2} = 0.4A$$

$$I_{max} \text{ 2 bobinados activos} = ((7.5w/2)/46W)^{1/2} = 0.28A$$

Del L297:

V_{ref} : 0-3v para nuestra práctica tomaremos p.e. 1v.

$$R_{shunt} = V_{ref} / I_{max} \text{ motor} = 3,9W .$$

El efecto de variar la frecuencia del oscilador de choqueo es el de regular fehacientemente la corriente que entregaremos a las bobinas del motor, con la velocidad de circulación hacia ellas superior a la que por si mismas, por t , alcanzarían. Veamos el circuito equivalente que interviene:

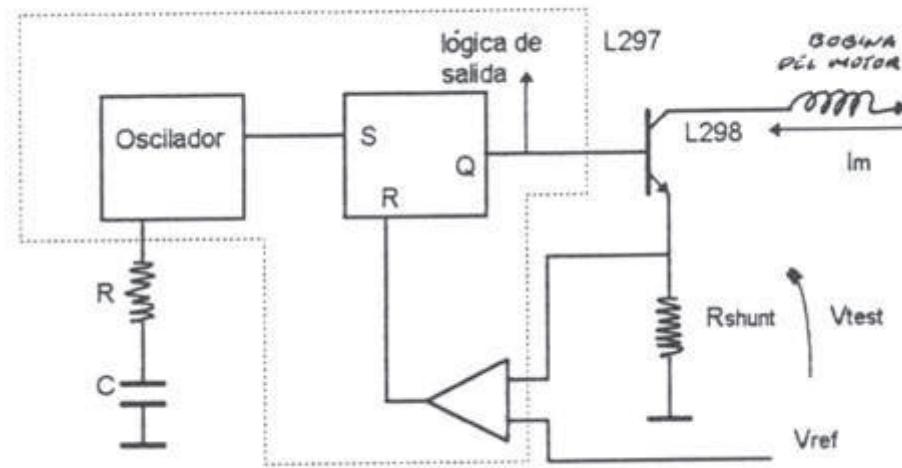


Fig.20

Si $V_{test} \geq V_{ref}$ resetearemos el flip-flop, cortando el transistor. A la par, la señal cuadrada del generador seteará el FF saturando el transistor, así se tendrá:

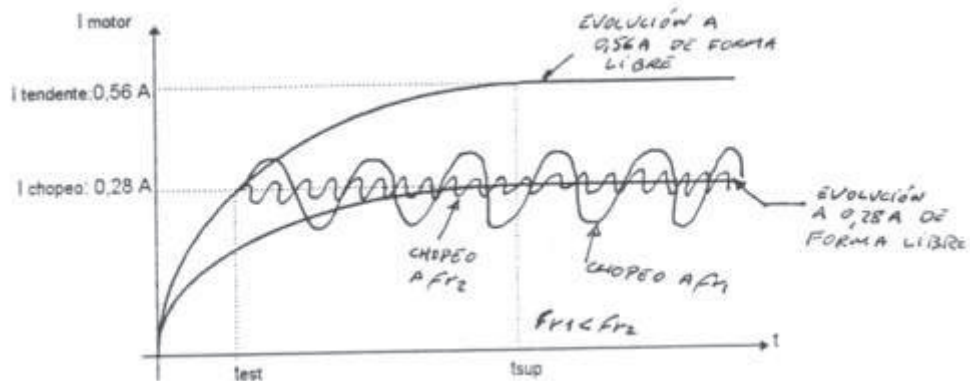


Fig.21

Aumentar la frecuencia de chopeo supone mejorar la regulación de la corriente por los bobinados del motor, en principio; mas en la práctica se observa que a partir de una frecuencia deja de regular adecuadamente. Fijando $V_{ref}=1v$, $C=3.3nF$ obtenemos la siguiente tabla:

R_o	Fr.chopeo	Rango de tensiones	Observaciones
0	1 Khz..	0,2 a 0,5	
11K75	9 Khz.	0,3 a 0,5	Hay regulación.
23K5	18 Khz.	0,4 a 0,5	
35K25	35 Khz.	0,3 a 0,6	
47K	Continua.	1,1	No hay regulación.

Este fenómeno se produce al aumentar la frecuencia de chopeo en exceso, haciendo que no le de tiempo al transistor de potencia del L298 a conmutar. De hecho, en sus hojas características nos dan como frecuencia máxima de conmutación de 25 a 40 Khz.

La variación de V_{ref} conlleva "per se" el control del nivel de tensión en R_{shunt} y con ello la corriente que circulará por los devanados del motor (o sea, valor de I_{reg} fijado anteriormente). Con esto y fijando una frecuencia de choqueo adecuada, con $V_{ref}=1v$ de 18Khz (condiciones iniciales de diseño) se comenzó la experiencia de variar V_{ref} desde 0 hasta 2v:

Vref	Fr. Choqueo	Actividad
0	18 Khz.	Nula.
0,25	18 Khz.	Nula.
0,5	30 Khz.	Giro.
0,75	30 Khz.	Giro.
1	18 Khz.	Giro.
1,5	5 Khz.	Giro.
2	1 Khz.	Giro.

Lo que aquí se refleja es $V_{ref} < V_{test} \rightarrow R=L \rightarrow Q=L \rightarrow trt$ cortado ya que sobrepasa el motor la consigna: para 0v y 0.25v no hay movimiento, pues en el R_{shunt} se alcanzan rápidamente estos valores y no le da tiempo a la bobina a activarse.

A partir de 0.5v y 0.75v ya hay movimiento con más o menos dificultad (se escuchan incluso chirridos en el motor) y vemos que el choqueo entra en acción, ya que le da tiempo a la corriente a circular por los devanados y con ello, llegar y sobrepasar la consigna dando movimientos torpes al rotor.

Para 1v el funcionamiento es el normal y para tensiones mayores (1.5 y 2v) la situación se invierte, o sea:

$V_{ref} > V_{test} \rightarrow R=H \rightarrow Q=H$

Lo que viene a decirle al motor que puede consumir más corriente (no como para 0, 0.25, 0.5, 0.75, donde obligábamos al motor a consumir corrientes ridículas y para los 2 primeros casos insuficiente para producir movimiento) , apreciándose cómo interviene cada vez menos el chopeo, pues no hace falta regular excesivamente la corriente por los devanados.

De toda esta experiencia, también nos damos cuenta de que los terminales INH1* y INH2* , al ser activadas (a nivel bajo) , inhiben el chopeado del bobinado por los pines A,B,C y D , ya que éste se realizará

a través de los mencionados INH1* e INH2*.en el puente en H , que es el L298 , haciendo que se produzca una recirculación rápida de las corrientes residuales en los devanados por medio de los diodos hacia la fuente de alimentación . Si no conectamos INH1* e INH2 del L297 al L298, el chopeado se realizará por medio de A,B,C y D, realizándose la recirculación de corrientes residuales de los bobinados de forma lenta;

o sea, por disipación en el propio puente. Para hacer que esto sea posible, INH1* e INH2* del L297 se dejarán al aire y los del L298 los llevaremos a +5v.

Todas las medidas aquí realizadas están sujetas a errores, debidos en parte a la instrumentación (variaciones que introducen en el circuito a la hora de realizar las medidas). Estas en principio podrán considerarse despreciables, ya que los más importantes provienen de los ruidos ambientales tales como los fluorescentes, otros

motores, capacidades parásitas, etc. susceptibles de ser corregidos mediante buenos filtros en la alimentación del circuito y una buena implementación en la placa de pistas de masa que intenten emular el comportamiento de la caja de Faraday, evitándose de la mejor forma posible, la intrusión de señales indeseables que impedirían la buena marcha de nuestro sistema. Otros errores son los derivados de la mala toma de datos a la hora de medir. Estos se subsanan con la repetición de los mismos, su posterior verificación y aproximación, si esto fuese necesario por existencia de discrepancias ostensibles entre las diferentes tomas.

Por último me gustaría hacer mención de las grandes posibilidades que ofrecen este tipo de circuiterías. Desde las más sencillas como podría ser un reloj analógico, pasando por maquinaria de uso gráfico (léase trazadores, impresoras o aerográficos automáticos) y terminando por aplicaciones robóticas tanto industriales como domésticas, médicas, militares, etc., debido sobre todo a la precisión en su control sobre

las capacidades ofrecidas por otros tipos de motores o actuadores de movimiento. Sólo reseñar sus limitaciones con respecto a la frecuencia máxima de las señales que les podemos aplicar, muy bajas aún,

que sobrepasadas, provocan su colapso o mal funcionamiento. Además también se aprecian excesivos calentamientos aun estando parados. Todos estos son, intuyo, defectos que podrán subsanarse con el avance de la tecnología al cabo del tiempo.

Bien, hasta aquí la segunda parte de este artículo. Espero encontrarles en la siguiente, donde abordaremos nuevas cuestiones sobre el control en lazo abierto de motores paso a paso. Hasta entonces, y siguiendo la tradición que me he marcado en esta revista:

Espero que el presente escrito haya resultado del gusto del lector; si no hubiera sido así, desde aquí hago propósito de enmienda para que el próximo salga mejor. Si por el contrario le gustó (al más puro estilo "shakespeariano"), quedemos como amigos y volvamos a encontrarnos dónde a la diosa fortuna más la complazca.

BIBLIOGRAFÍA

Ref. 3: Hojas de Características SGS