

CAPÍTULO II

ALGORITMO Y CÁLCULOS DEL VECTOR V_r

A continuación se describirá el algoritmo para calcular las proyecciones T_a , T_b y T_o sobre los *vectores activos* V_x , V_y , y *vectores nulos* V_o , en el plano α - β que sintetizan el vector de referencia V_r . El código de este algoritmo realizado en MATLAB se llama *pulsos.m*. El programa *pulsos.m* genera una tabla con los valores consecutivos de T_a , T_b y T_o . Los valores obtenidos en el capítulo II forman parte del programa de control *svpwm.asm* grabado en el μC PIC16C74B. El programa *pulsos.m* y *svpwm.asm* se localizan en el disco compacto.

La posición de V_r , es la discretización del plano α - β . Los cálculos en un sector específico son válidos para los demás sectores. El análisis del algoritmo se enfocará al sector I y con algunas modificaciones en los resultados se aplicará a los sectores restantes para cubrir el plano α - β . Fig. II.1

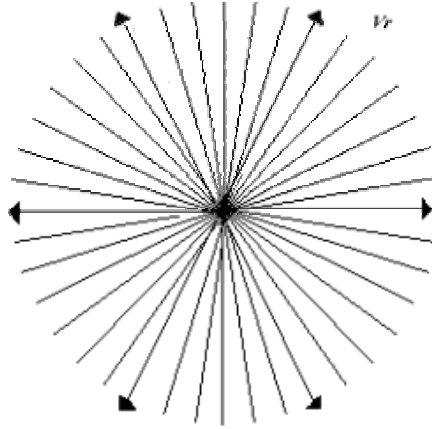


Fig. II.1: El plano α - β discretizado por las posiciones del vector V_r

Partiendo del sector I definido entre 0° y 60° por los *vectores activos* V_2 , V_3 y definiendo la posición del vector de referencia V_r por el ángulo θ_r en la Fig. II.2 serán los elementos para las explicaciones siguientes. La proyección de V_r sobre los vectores V_2 y V_3 se identifica con los vectores (T_a y T_b) e indican la fracción de tiempo que cada *vector activo* debe permanecer para generar el vector resultante V_r . Aunque el vector V_0 no se relaciona gráficamente con la proyección T_0 , este valor debe ser considerado en los cálculos [3]. La posición θ_r inicialmente es 0° y al final del sector I θ_r es 60° .

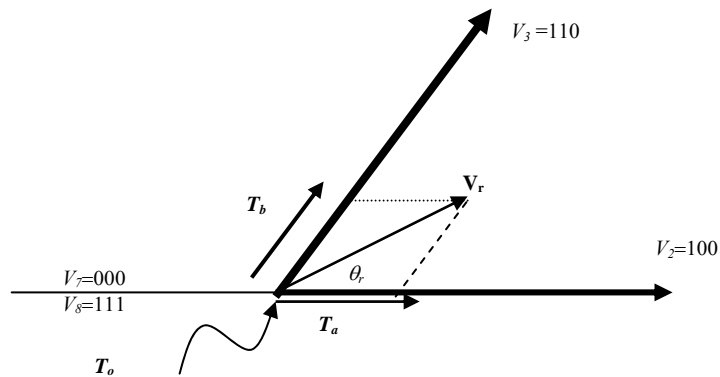


Fig. II.2: Sector I; valores de T_a , T_b y T_0 que sintetizan al vector V_r

Cálculos para las proyecciones T_a , T_b , T_o y el índice de modulación m

Del Capítulo I se aplicaron las ecuaciones II.1 que generan los valores de T_a , T_b y T_o .

$$\begin{aligned}T_a &= m \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_r\right) \\T_b &= m \sin \theta_r \\T_o &= 1 - T_a - T_b\end{aligned}\tag{II.1}$$

donde m es el índice de modulación y θ_r define la posición. En el inversor trifásico como fuente de voltaje (VSI), T_o indica cuánto tiempo el voltaje de salida del VSI es igual a cero como resultado de las topologías (7) y (8). De la ecuación II.1 el valor de la proyección T_o dependerá de m . El índice de modulación es la relación entre las amplitudes del voltaje de salida y el voltaje de alimentación, ecuación II.2; el valor límite para modulación lineal es $m = 0.866$ [3], [20].

$$m = \frac{\sqrt{3}}{V_s} * V_{rms} = 0.866\tag{II.2}$$

donde $V_s = 240$ V cd: voltaje de corriente directa que alimenta al inversor.

$V^r = V_{rms} = 120$ V cd: voltaje de salida eficaz del inversor requerido para el voltaje de fase del motor jaula de ardilla conectado en estrella.

En la ecuación II.1 aun no se conocen valores de los ángulos θ_r . Con el fin de

tener el V_r generado por un sistema trifásico con frecuencia de 60 Hz, cada sector del plano α - β se dividió en 10 intervalos Fig.II.3; sumando los intervalos de cada sector (I-VI) se tiene 60 divisiones.

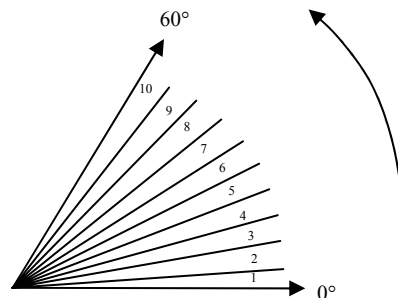


Fig. II.3: Diez divisiones para el sector I

Si repetimos los cálculos de las ecuaciones II.1 para las diez posiciones de θ_r se obtienen las variables T_o , T_a y T_b . La Tabla II.1 muestra los resultados de los cálculos:

<i>posiciones</i>	T_o	T_a	T_b
0	6.3131E-05	0.000189394	0
6	5.2739E-05	0.000176927	2.28597E-05
12	4.4536E-05	0.000162521	4.54689E-05
18	3.8611E-05	0.000146334	6.75799E-05
24	3.503E-05	0.000128545	8.89506E-05
30	3.3832E-05	0.000109347	0.000109347
36	3.503E-05	8.89506E-05	0.000128545
42	3.8611E-05	6.75799E-05	0.000146334
48	4.4536E-05	4.54689E-05	0.000162521
54	5.2739E-05	2.28597E-05	0.000176927
60	6.3131E-05	0	0.000189394

Tabla II.1: Proyecciones en el sector I para las posiciones de θ_r y $m = 0.866$

En la ecuación II.2 al cambiar el valor de la fuente de alimentación V_s se

obtienen diferentes magnitudes de m y T_o , T_a , T_b . La amplitud del voltaje de salida V_r será modificado por las variaciones en T_o , T_a , T_b . El comportamiento de los valores de T_o , T_a , T_b para dos índices de modulación $m = 0.594$ y $m = 0.866$ se graficaron para el sector I como se muestra en las Fig.II.4 y Fig.II.5. Para $m = 0.594$, la gráfica de T_o indica menor ciclo de trabajo $d\alpha$ para los pulsos de control y por lo tanto el voltaje V_r será menor; en el caso $m = 0.866$, los valores de T_o son menores respecto a T_a y T_b entonces $d\alpha$ y V_r se incrementarán. Por la influencia de m sobre el $d\alpha$ y V_r es más conveniente tener un índice de modulación mayor. Por otra parte, los valores de T_o al inicio y fin del sector en la Fig. II.5 toman el valor más grande indicando que el $d\alpha$ al inicio del sector y el $d\alpha$ al final del sector son menores respecto al resto del sector, es decir; que $d\alpha$ es inversamente proporcional a T_o .

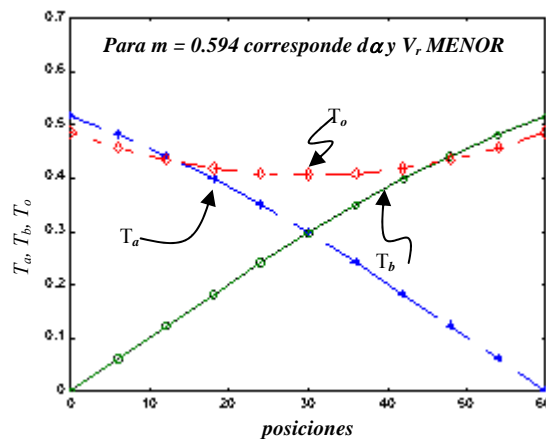


Fig. II.4: Con $m = 0.594$. T_o es mayor respecto a T_a , T_b ; se genera $d\alpha$ menor

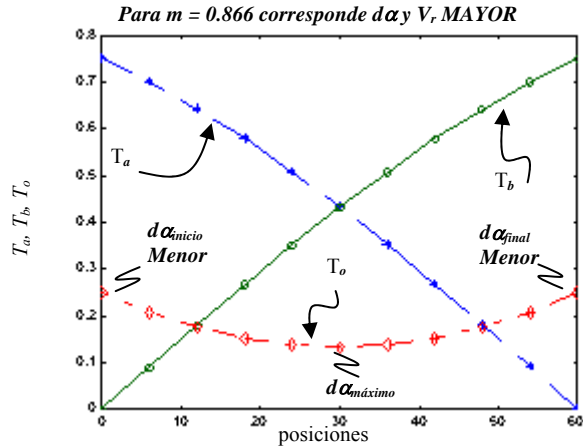


Fig. II.5: $m = 0.866$. T_o es menor respecto a T_a , T_b , se genera $d\alpha$ mayor

En la ecuación I.1 T_o , T_a , T_b definen el porcentaje del periodo de muestreo t_m para los vectores espaciales V_o , V_x , y V_y ; la variaci\u00f3n de T_o , T_a , T_b modificar\u00e1 el ciclo de trabajo $d\alpha$ para los pulsos de control Fig. II.6.

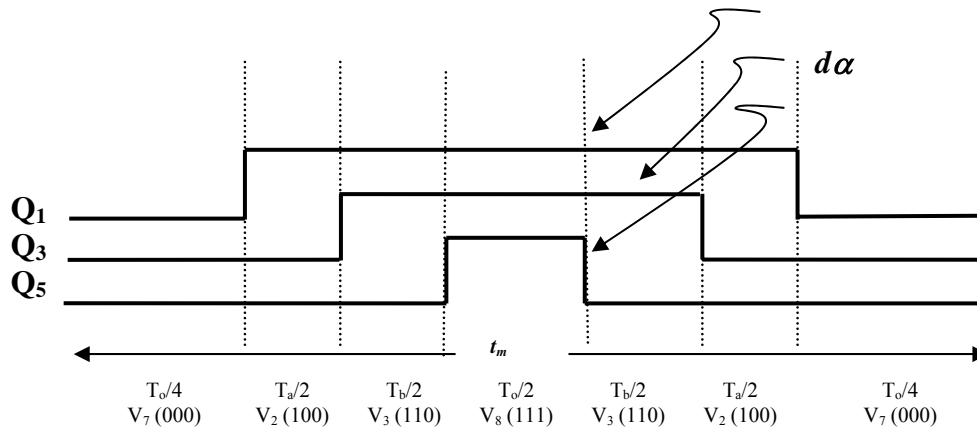


Fig. II.6: Relaci\u00f3n de las proyecciones T_a , T_b y T_o con el $d\alpha$

El comportamiento de la Fig. II.4 y Fig. II.5 se representa ahora en pulsos de

control, Fig. II.7. Comparando los dos $d\alpha$ para los índices de modulación $m = 0.594$ y $m = 0.866$, se muestra la relación inversamente proporcional entre el $d\alpha$ y T_o . El porcentaje de voltaje transferido de la fuente de alimentación hacia los voltajes de línea del sistema generado lo afecta el $d\alpha$. Para tener una mejor eficiencia de energía se utilizó el índice de modulación $m = 0.866$.

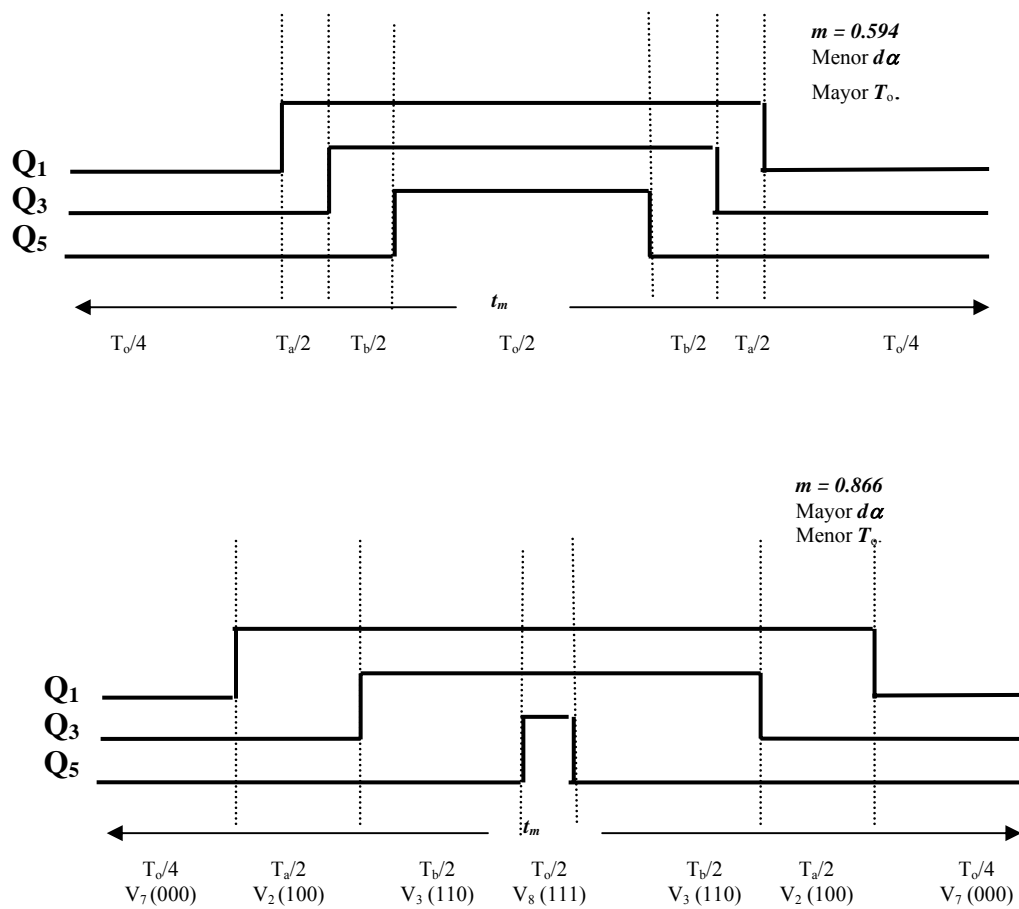


Fig. II.7 Relación de las proyecciones T_a , T_b y T_o con el $d\alpha$ y m

El $d\alpha$ para las señales de los transistores Q_1 , Q_3 , Q_5 en el un sector I con $m =$

0.866 se muestra en la Fig. II.8. En la posición 0° el ciclo de trabajo $d\alpha$ para Q_3 y Q_5 llegan a ser iguales y durante el recorrido del sector el $d\alpha$ para Q_3 aumenta al máximo; en la posición 60° el ciclo de trabajo $d\alpha$ para Q_1 y Q_3 son iguales. A la mitad del sector los $d\alpha$ aumentan siguiendo la secuencia $d\alpha_{Q5}, d\alpha_{Q3}, d\alpha_{Q1}$.

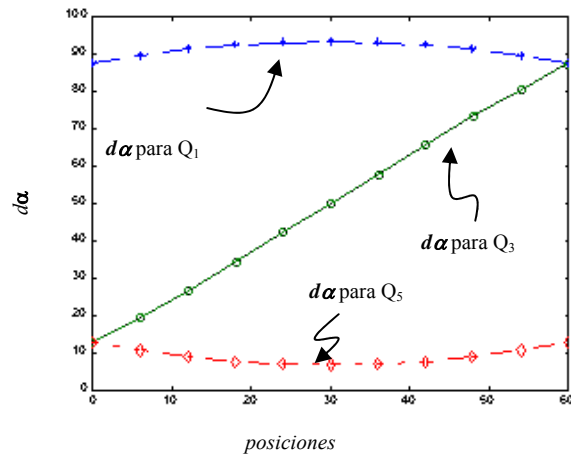


Fig. II.8: Variación del $d\alpha$ en el sector

La variación anterior de $d\alpha$ se explicará analizando con respecto a T_a y T_b en los extremos de la Fig. II.9: en $\theta_r = 0^\circ$, el vector V_r se sitúa en esa posición generando una proyección T_a sobre el eje α muy grande y la proyección T_b sobre el eje β igual a cero Fig. II.9a); para $\theta_r = 60^\circ$, T_b ahora es mayor que T_a porque el V_r se ubica en esta posición, Fig. II.9b). El programa de control en el μC utiliza los valores de T_a , T_b y T_o ; sin embargo los resultados nulos de los extremos del sector I: $\theta_r = 0^\circ$ ($T_a, T_b = 0$); y $\theta_r = 60^\circ$ ($T_a = 0, T_b$); serán modificados porque el μC consume 200ns para ejecutar la instrucción más simple [21].

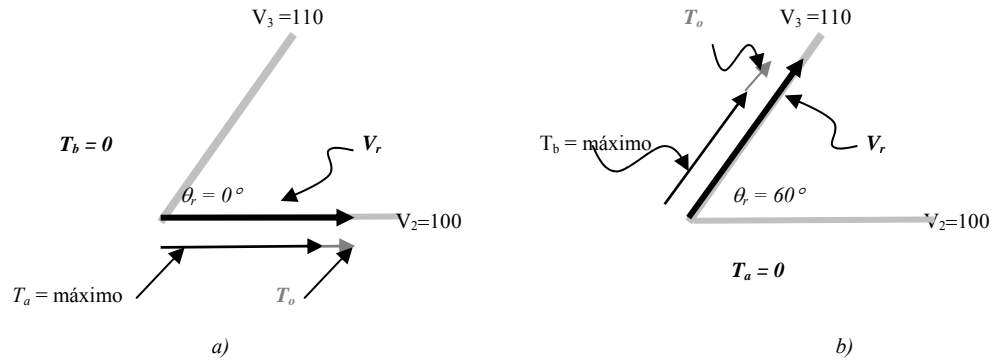


Fig. II.9: Magnitud de T_a , T_b y T_o para sector I. a) posición de V_r para $\theta_r = 0^\circ$; b) posición de V_r para $\theta_r = 60^\circ$

Generación de la modulación simétrica

Para la técnica SVPWM con menor distorsión armónica total (THD) [1] se generan tres pulsos simétricos respecto al centro del periodo de muestreo t_m , este esquema se llama *modulación simétrica*. La simetría es importante resaltarla porque de esta depende el manejo de los datos T_a , T_b y T_o anteriormente calculados.

Para lograr la simetría del patrón Fig. II.10, los datos T_a y T_b se dividen en dos; y T_o en cuatro para formar el periodo total t_m por lo tanto la suma de los siete valores: $T_o/4$, $T_a/2$, $T_b/2$, $T_o/2$, $T_b/2$, $T_a/2$ y $T_a/4$ será igual a t_m . La Tabla D1^t resume todos los datos “divididos”.

^t Consultar el apéndice D para ver esta información

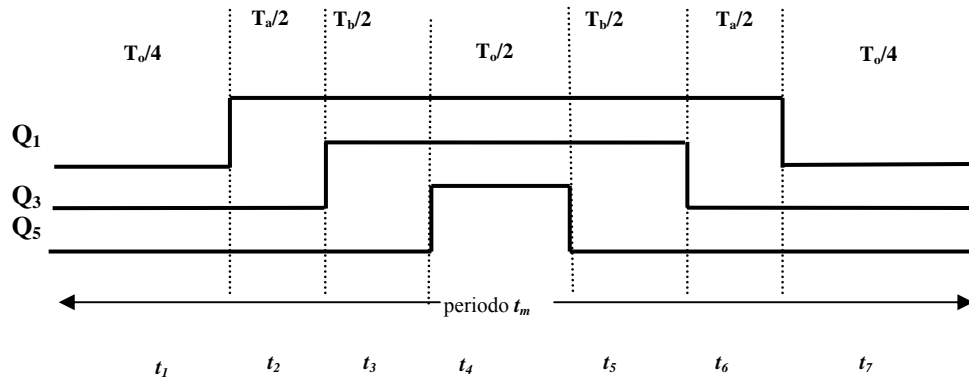


Fig. II.10: Pulsos de control simétricos respecto al centro del periodo t_m

Cada dato de la Tabla D2^t representa una localidad de memoria para el programa de control *svpwm.asm* en el microcontrolador (μC) y por lo tanto tiempo de lectura, para reducir el tiempo de lectura se disminuyó el número de datos de la Tabla D2^t de la siguiente manera: para el periodo de muestreo t_m de las gráficas en la Fig. II.11 los intervalos t_1 y t_7 están limitadas por $T_o/4$, y el *vector nulo* sintetizado es V_7 ; para el periodo de muestreo t_{m+1} , en el intervalo t_{1+1} correspondiente al $\theta_r = 6^\circ$ las gráficas también inician con $T_o/4$ sintetizando el V_7 ; como los dos intervalos: t_1 para $\theta_r = 0^\circ$ y t_{1+1} para $\theta_r = 6^\circ$ tienen la misma magnitud; entonces el valor de $T_o/4$ para t_m se sumó con el t_{m+1} de $T_o/4$. En la Fig. II.11 la suma $T_o/4 + T_o/4$ en este caso es diferente de $T_o/2$ porque el $T_o/4$ para la posición $\theta_r = 6^\circ$ ha tomado un valor diferente al de la posición $\theta_r = 0^\circ$. Tabla D1^t; así el valor unificado se representan como T_u y el intervalo se identifica como t^* . En las siguientes secciones los valores de T_u indican los tiempos al inicio de cada t_m que

^t Consultar el apéndice D para ver esta información

sintetizan el V_7 y T_o se referirá al tiempo que sintetiza el V_8 . Este mismo proceso se realizó con todos los valores de la Tabla D1^t.

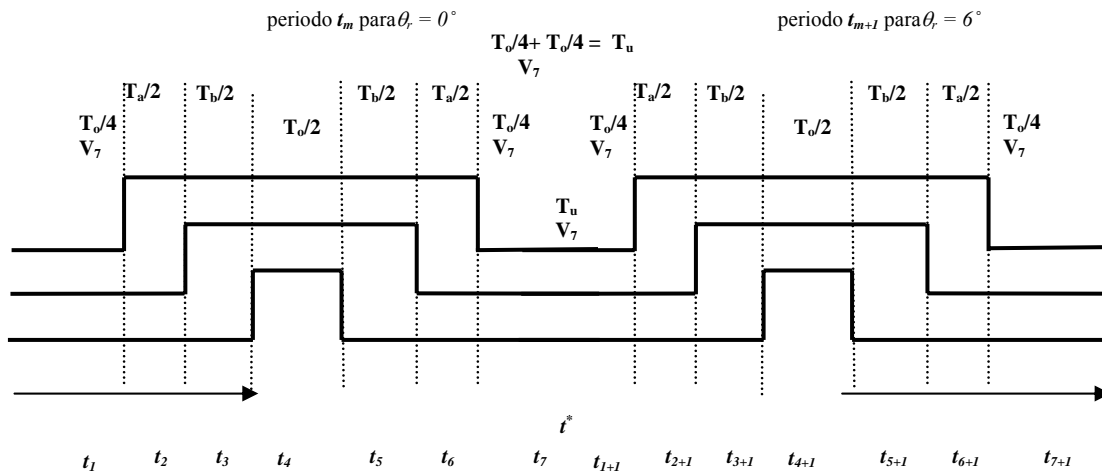


Fig. II.11: Unificación de los tiempos T_o para reducir el tiempo de lectura

Desnormalización de los tiempos en base a la frecuencia f_o de 60 Hz

Hasta ahora los valores T_u , T_a , T_b y T_o han sido calculados tomando el periodo de muestreo t_m igual a la unidad. Después de recorrer todos los sectores del plano α - β , la suma de T_u , T_a , T_b y T_o debe ser equivalente al periodo de la señal fundamental $t_o = 1/f_o = 0.016667$ y $f_o = 60$ Hz. Para lograr la equivalencia fue necesario desnormalizar respecto a las siguientes constantes: periodo de la señal fundamental t_o , el número total de sectores $n_s = 6$ y entre el número de posiciones en un sector $n_a = 10$; el resultados de este valor se llamó *coefnor* y representa el periodo de muestreo desnormalizado (t_{md}) de los pulsos. Al ser *coefnor* < 1 la frecuencia de los pulsos f_{md} después de la desnormalización aumentó. Las ecuaciones en (II.3) y (II.4) indican los cálculos realizados. Las variables T_u^* , T_a^* , T_b^* y T_o^*

^t Consultar el apéndice D para ver esta información

representan los valores desnormalizados de T_u , T_a , T_b y T_o , respectivamente. La Tabla D2^t resume estos valores.

$$\begin{aligned} T_o^* &= T_o * coefnor; \\ T_a^* &= T_a * coefnor \\ T_b^* &= T_b * coefnor \end{aligned} \quad (II.3)$$

$$\begin{aligned} coefnor &= t_{md} = \frac{t_o}{n_s * n_a} \\ coefnor &= t_{md} = \frac{0.016667}{6 * 10} = 2.77^{-4} \\ f_{md} &= \frac{1}{t_{md}} = 3600Hz \end{aligned} \quad (II.4)$$

Ajuste de T_u^* , T_a^* , T_b^* Y T_o^* para el ciclo de reloj del μC PIC16C74B

Para generar los tiempos indicados por los valores T_u^* , T_a^* , T_b^* y T_o^* en el μC se programaron *tiempos de espera* d_i ; para el PIC16C74B un tiempo de espera es igual a un ciclo de reloj de **200ns**. Entonces fue necesario convertir la información de T_u^* , T_a^* , T_b^* y T_o^* en ciclos de reloj representados por T_u' , T_a' , T_b' y T_o' ecuaciones II.5 y II.6.

$$\begin{aligned} cristal &= 20MHz && \text{Cristal del Microcontrolador} \\ fosc &= \frac{cristal}{4} && \text{Frecuencia de oscilación} \quad (II.5) \\ cic\ log &= \frac{1}{fosc} = 200ns && \text{Ciclo de reloj} \end{aligned}$$

^t Consultar el apéndice D para ver esta información

$$\begin{aligned}
T'_u &= \text{round}\left(\frac{T_u^*}{\text{cic log}}\right) \\
T'_a &= \text{round}\left(\frac{T_a^*}{\text{cic log}}\right) \\
T'_b &= \text{round}\left(\frac{T_b^*}{\text{cic log}}\right) \\
T'_o &= \text{round}\left(\frac{T_o^*}{2 * \text{cic log}}\right)
\end{aligned}
\tag{II.6}$$

Resultados para T'_u , T'_a , T'_b y T'_o **normalizados** al ciclo de reloj del μC PIC16C74B.

<i>posiciones</i>	T'_u	T'_a	T'_b	T'_o
0	158	473	0	158
6	145	442	57	132
12	122	406	114	111
18	104	366	169	97
24	92	321	222	88
30	86	273	273	85
36	86	222	321	88
42	92	169	366	97
48	104	114	406	111
54	122	57	442	132
60	145	0	473	158

Tabla II.2: T'_u , T'_a , T'_b y T'_o representados en ciclos del μC PIC16C74B

Los valores de la Tabla II.2 muestran el número de ciclos de reloj que el μC debe realizar antes de la siguiente conmutación de la Fig. II.11. Como se indicó en el Capítulo I los valores en las posiciones extremas $\theta_r = 0^\circ$ y $\theta_r = 60^\circ$ son irrealizables para el μC . También fue necesario comparar contra el número de instrucciones de programa necesarias en el μC para generar la lectura de los datos. Los valores menores al número mínimo de instrucciones $n_{min} = 90$ se ubican en las posiciones 0° , 6° , 54° y 60° la Tabla II.2

en la columnas T_a' y T_b' . Fueron cambiados 0 y 57 por 96 y 105 respectivamente. Al variar el número de instrucciones se cambia el periodo de muestreo t_m ; para mantener el mismo t_m en las posiciones 0° , 6° , 54° y 60° se modificó el número de instrucciones en las columnas: T_a' y T_b' según correspondía. Para mostrar los cálculos del **nuevo valor**, la Tabla II.3: ilustra los cambios.

<i>posiciones</i>	Número de ciclos		<i>valor de ajuste</i>
	anterior	<i>nuevo valor</i>	
0°	$T_b' = 0$	$T_b' = 96$	$T_a' = 473-96=377$
6°	$T_b' = 57$	$T_b' = 105$	$T_a' = 442-105=337$
54°	$T_a' = 57$	$T_a' = 105$	$T_b' = 442-105=337$
60°	$T_a' = 0$	$T_a' = 96$	$T_b' = 442-96=377$

Tabla II.3: Ajuste para los renglones que fueron modificados.

El **valor de ajuste** es el resultado de restar a la columna correspondiente T_a' ó T_b' el **nuevo valor** realizable para el μC . La Tabla II.4 resume los cambios sobre los renglones involucrados.

<i>posiciones</i>	T_a'	T_b'
0	$473-96=377$	96
6	$442-105=337$	105
54	105	$442-105=337$
60	96	$473-96=377$

Tabla II.4: Valores ajustados en las columnas para mantener el t_m de los pulsos de control.