
Implementación del CM



4.1 Introducción

En el presente capítulo se muestra el desarrollo de la etapa de potencia, así como el diseño del control del CM y la implementación de ambas etapas. El objetivo de esta implementación fue verificar la estrategia de modulación VA expuesta en la sección 3.3. Esta modulación permite controlar los interruptores del CM generando un voltaje de salida de amplitud y frecuencia variables.

Con la estrategia de control digital diseñada se logró modificar tanto la amplitud como la frecuencia en el voltaje de salida, de tal manera que la implementación se enfoca principalmente en el control de los interruptores del CM considerando las características esenciales del CM como son corrientes de entrada senoidales y voltajes de salida de amplitud y frecuencia variables.

El uso de una carga inductiva requiere del sensado de corriente y una estrategia de conmutación más compleja detallada en la sección 2.4, por lo que como trabajo inicial se utiliza una carga resistiva, lo que permitió enfocarse en los conceptos fundamentales de operación del convertidor.

4.2 Etapa de potencia

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo 3, el CM utiliza 9 interruptores bi-direccionales que nombramos también como celdas de conmutación. Cada celda de conmutación esta constituida de dos MOSFETs IRF840 conectados en serie en configuración emisor común como se muestra en la Fig. 4.1

Los requerimientos del CM para la etapa de potencia se enlistan de manera general como sigue,

- 9 celdas de conmutación
- Drives para cada MOSFET de las celdas de conmutación.
- 9 fuentes de alimentación aislada para cada celda de conmutación
- Filtros de entrada
- Circuito de protección

Este prototipo se implementó para una carga resistiva, por lo que fue posible no incluir el uso del circuito de protección.

De la Fig. 4.1, puede verse que las celdas de conmutación S_{ua} , S_{ub} y S_{uc} , son las encargadas de generar la fase de salida U, mientras que S_{va} , S_{vb} , S_{vc} corresponden al fase de salida V, y S_{wa} , S_{wb} , S_{wc} generan la fase de salida W, de tal manera que el funcionamiento del CM puede analizarse para una fase de salida y extenderse a las demás fases, debido a que su operación es similar.

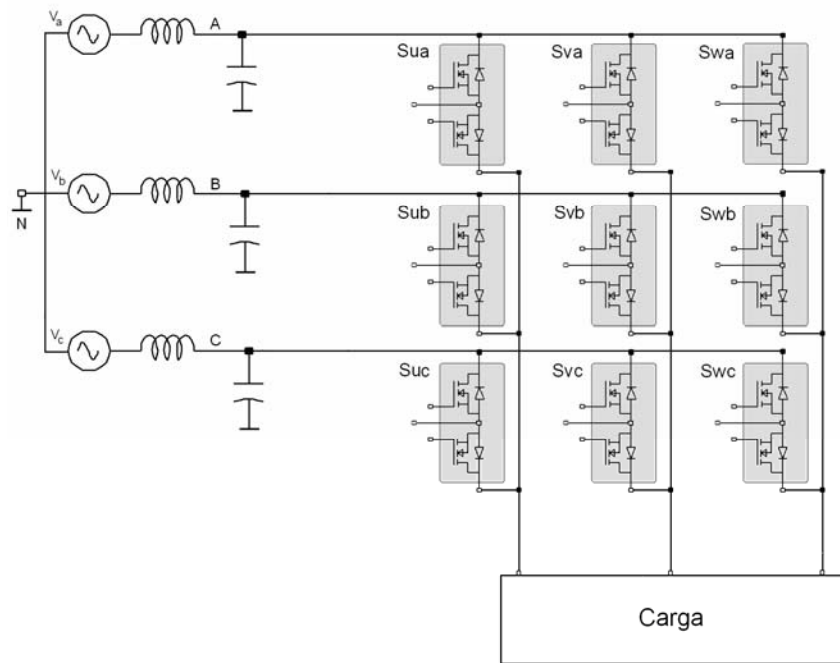


Figura 4.1 Circuito del CM.

4.2.1 Celdas de conmutación

Cada celda de conmutación se implementó utilizando dos MOSFETs conectados en serie, se utiliza la configuración emisor común como se muestra en la Fig. 4.2,

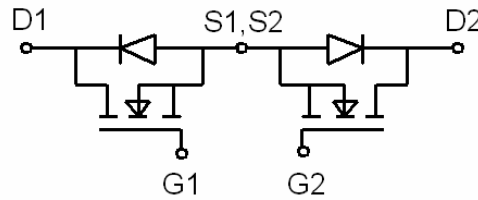


Figura 4.2 Celda de Conmutación

Se utilizó el MOSFET IRF840 para este prototipo, que soporta una corriente de Drain de 8 A y un voltaje de bloqueo de 500 V. Sus

Esta configuración requiere de una fuente aislada por cada celda, por lo que será necesario implementar nueve fuentes aisladas para el CM. Ambos MOSFETs pueden ser conmutados con respecto al mismo voltaje, el emisor común.

En la Fig. 4.3 puede observarse la conexión en común al nodo central de la celda de conmutación, aunque cada MOSFET es conmutado con drivers diferentes, estos comparten la misma alimentación sin ocasionar algún conflicto con las otras celdas del CM.

La señal de control para cada celda de conmutación es aplicada a través de un opto-acoplador, que permite aislar y proteger la etapa de control con la etapa de potencia. Cada MOSFET cuenta con un drive para su disparo.

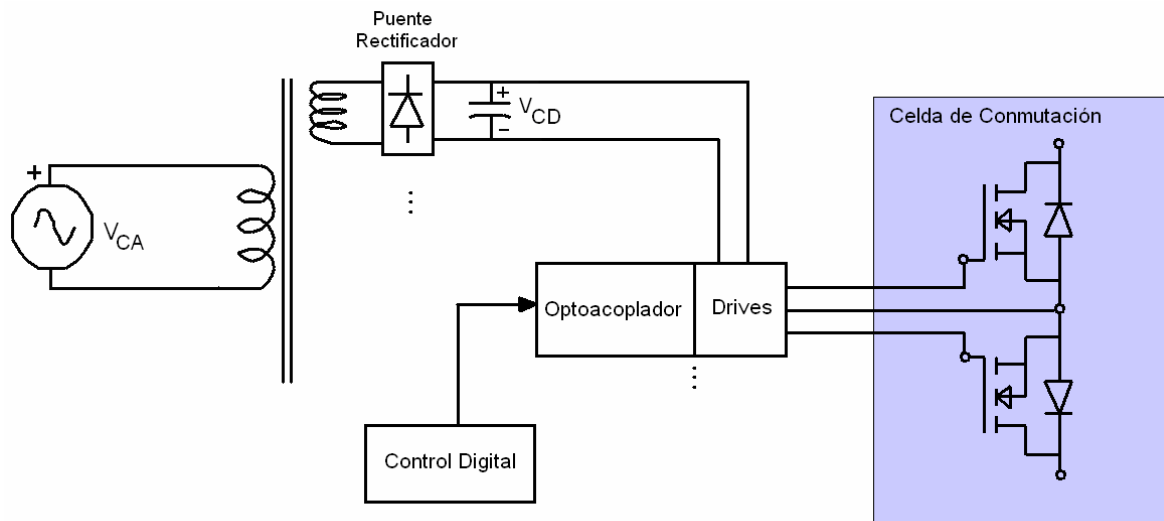


Figura 4.3 Circuito para el disparo de la celda de conmutación.

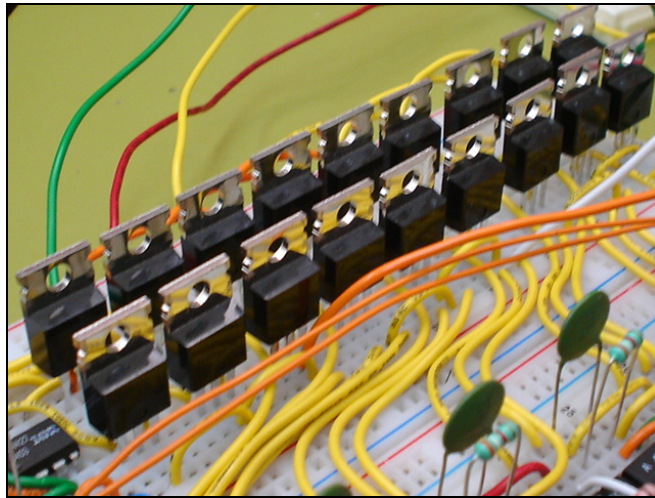


Figura 4.4 Celdas de Conmutación

4.2.2 Fuentes de CD aisladas

Las fuentes aisladas requeridas por los drivers de cada celda se implementaron con rectificador y capacitares de filtrado alimentados por un transformador de nueve devanados secundarios, como se muestra en la Fig. 4.5

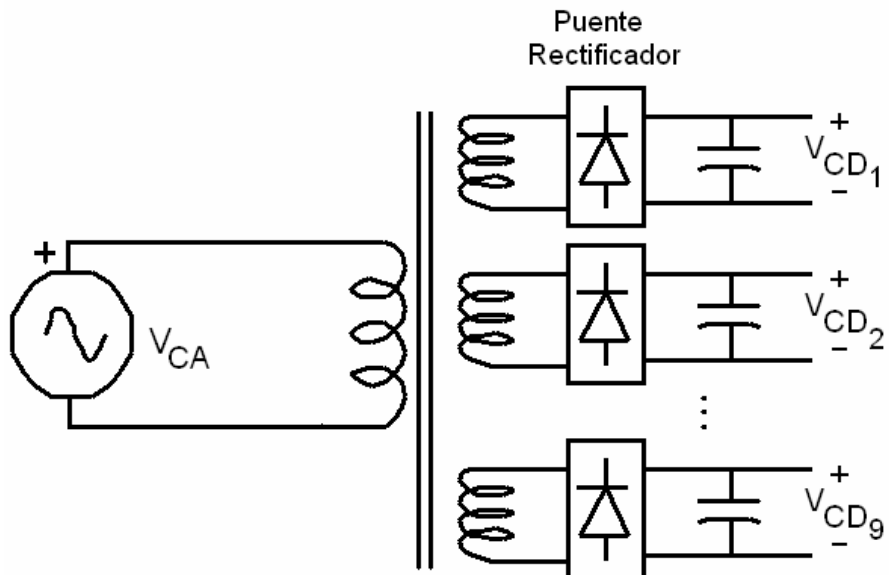


Figura 4.5 Fuentes Aisladas

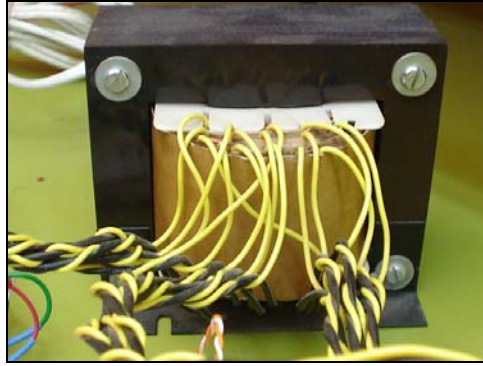


Figura 4.6 Transformador

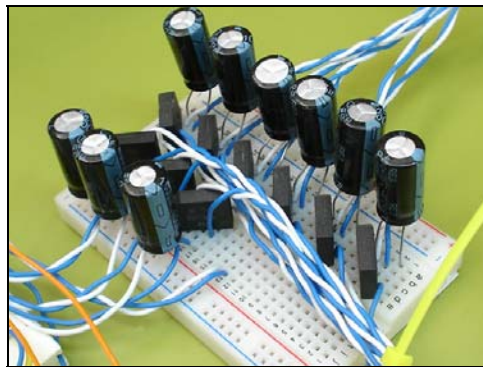


Figura 4.7 Fuentes de 10 V.

4.2.3 Filtro de Entrada

Se diseñaron tres filtros de entrada, uno por fase, para reducir el rizo ocasionado por la frecuencia de conmutación, los filtros se sintonizan a una frecuencia de corte menor que la frecuencia de conmutación, para asegurar reducir el rizo. Cabe señalar que los elementos utilizados no necesitan almacenar energía, y al trabajar con la frecuencia de conmutación, estos son de menor tamaño. Se obtiene el valor del capacitor tomando en cuenta la resistencia e inductancia inherentes de la línea. La Fig. 4.8 muestra la configuración utilizada para los filtros de las tres fases de entrada, que como se menciona en [24], es la mejor alternativa considerando tamaño y costo de cada filtro.

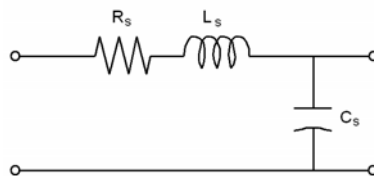


Figura 4.8 Filtro de Entrada

Para en Filtro LC de entrada, su función de transferencia esta dada por

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (4-1)$$

Donde

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_s C_s}} \quad (4-2)$$

$$Q = R_s \sqrt{\frac{C_s}{L_s}} \quad (4-3)$$

ω_0 = frecuencia de corte

Q = factor de calidad

En base estudios ya realizados [24], [27] se tomaron en cuenta los siguientes valores para los parámetros característicos de la línea.

$R_s = 0.1 \text{ ohm}$

$L_s = 0.62 \text{ mH}$

Se diseñaron los filtros de entrada para una frecuencia de conmutación de $f_s = 20 \text{ kHz}$. Despejando a C_s de (4-2) y sustituyendo los valores anteriores, se obtuvo un valor para los capacitores de:

$C_s = 10.21 \text{ uF}$

Se utilizaron capacitores de película de polipropileno de 10 uF para el CM.



Figura 4.9 Filtro de Entrada

4.3 Etapa de Control

Esta etapa se encarga de generar los pulsos de control que gobiernan a los interruptores del CM de acuerdo a la técnica de modulación empleada y a los requerimientos de voltaje y frecuencia de los voltajes de salida. Un diagrama general se muestra en la Fig. 4.10

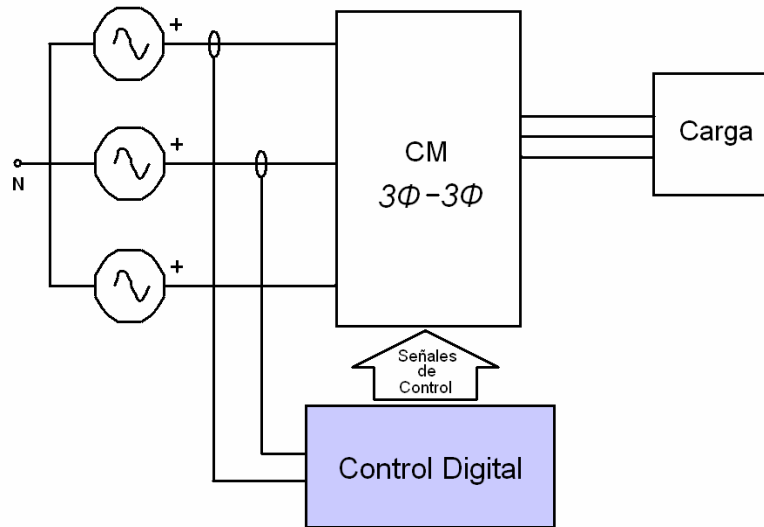


Figura 4.10 Etapa de Control

Las principales funciones de la etapa de Control se enlistan de la manera siguiente

- Adquisición de los valores instantáneos de los voltajes de entrada.
- Cálculo de los ciclos de trabajo para los interruptores del CM.
- Generación de las señales de control para cada fase de salida.
- Generación de los tiempos muertos en las señales de control.

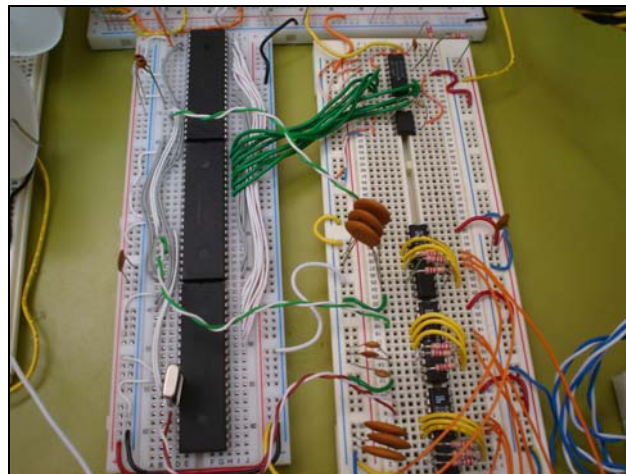


Figura 4.11 Etapa de Control

4.3.1 Adquisición de los valores instantáneos de los voltajes de entrada.

Debido a que es necesario conocer la magnitud de los voltajes de entrada para poder operar el CM, independientemente de la técnica de modulación, la primera etapa del control fue sensar los voltajes de entrada, mostrada en la Fig. 4.12.

Para obtener la magnitud de los voltajes de entrada, se utilizaron transformadores con relación 20:1, se sensaron sólo dos fases de entrada, la tercera se obtuvo digitalmente mediante la diferencia.

Después de obtener los voltajes sensados por los transformadores, estos fueron acondicionados con el uso de amplificadores operacionales para ajustar las señales leídas a un rango de voltaje de 0 a 5V, voltajes que maneja el convertidor Analógico-Digital (AD) del microcontrolador, para posteriormente ser manipulados de forma digital.

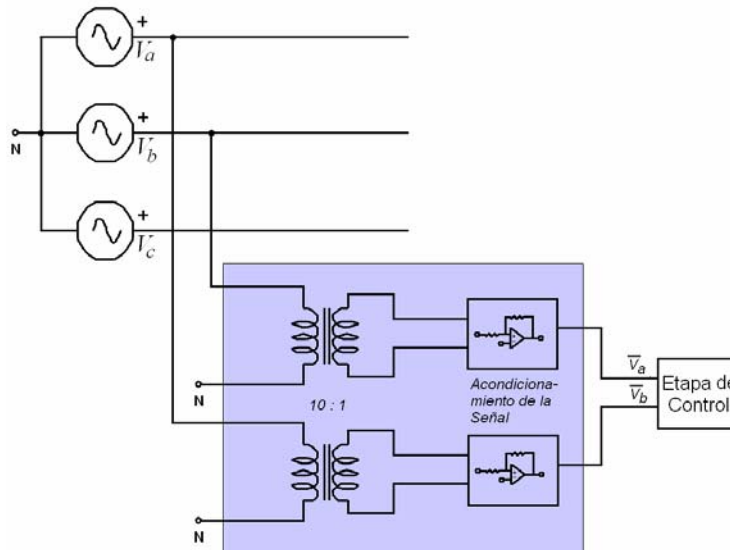


Figura 4.12 Circuito para sensar el voltaje de entrada.

4.3.2 Cálculo de los ciclos de trabajo

Se utilizó el microcontrolador PIC16F877 fabricado por MicroChip para calcular los ciclos de trabajo del CM. Este modelo posee varias características que hacen un dispositivo muy versátil, eficiente y práctico para ser empleado en esta aplicación.

Algunas de las características principales por las cuales se utilizó son las siguientes:

- Amplia memoria para datos y programa.
- Convertidor Analógico-Digital de 8 canales con una resolución de 10 bits.
- Dos canales de salida PWM de 10 bits.
- Memoria reprogramable: La memoria en este PIC es la que se denomina FLASH; este tipo de memoria se puede borrar electrónicamente (esto corresponde a la "F" en el modelo).

- Set de instrucciones reducido (tipo RISC), pero con las instrucciones necesarias para facilitar su manejo.

La modulación AV fue la técnica implementada en el prototipo, expuesta en el capítulo 2, donde los ciclos de trabajo para los interruptores están definidos como

$$m_{jk} = \frac{t_{jk}}{T} = \frac{1}{3} \left[1 + \frac{2V_j V_k}{V_{im}^2} \right] \quad \text{para } k=a,b,c \text{ y } j=u,v,w$$

Para implementar esta función en el microcontrolador se programaron rutinas optimizadas de multiplicación y división con el mínimo de instrucciones posibles por operación. Los valores de los voltajes de entrada V_k se obtienen de la etapa anterior de adquisición de datos, mientras que los voltajes V_j , que son los requerimientos para los voltajes de salida, se obtienen internamente por medio de tablas programadas en el microcontrolador.

El diagrama de flujo de la Fig. 4.13 muestra las funciones del microcontrolador para la generación de la señales de control.

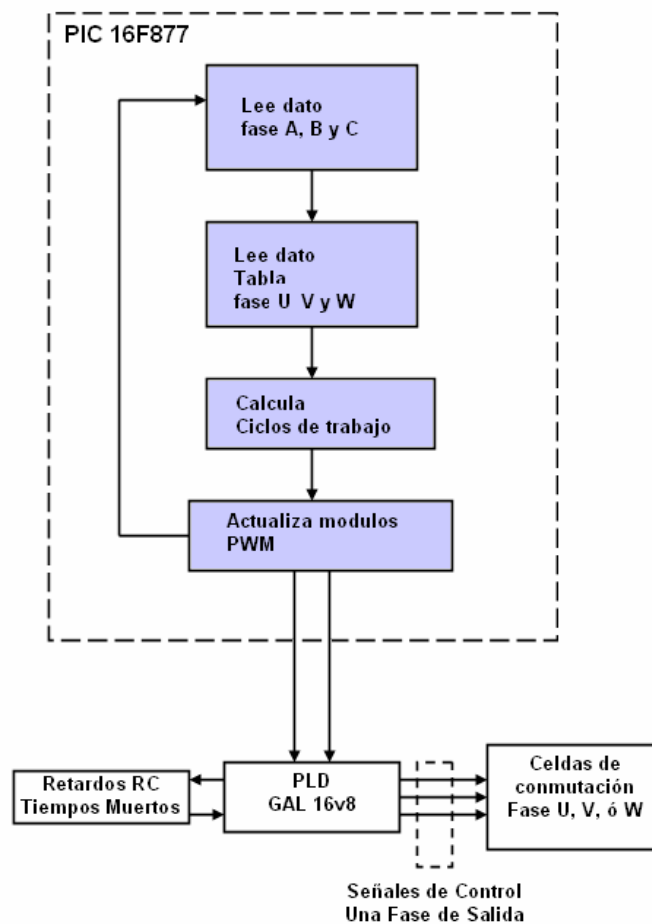


Figura 4.13 Funciones del Microcontrolador.

4.3.3 Generación de las señales de control y tiempos muertos.

Una vez obtenido el ciclo de trabajo para operar los interruptores del CM, este se actualiza en las señales de control que son generadas por los módulos PWM internos en el microcontrolador. Este genera sólo dos señales PWM, la tercera señal PWM que se necesita para obtener una fase de salida se obtiene de la diferencia las dos señales generadas. Esta operación se lleva a cabo en un PLD, donde también se le insertan los tiempos muertos a las señales de control, necesarios para la operación correcta en la conmutación de las celdas de conmutación del CM.

Debido a que las nueve señales de control que requiere el CM son diferentes para cada fase de salida y dado que el PIC16F877 solo cuenta con dos señales de salida PWM, se ha implementado una etapa de control por cada fase de salida (C1,C2 y C3). Cada etapa de control opera de la misma manera excepto por que el dato del voltaje de referencia V_j , necesario para el cálculo de los ciclos de trabajo, depende de la fase a la que pertenece. Debido a que el valor de los voltajes en las fases de salida debe estar sincronizado, las etapas de control utilizan el mismo reloj, y una de ellas, C1, lleva el control de los voltajes de referencia. Esta configuración se muestra en el diagrama de la Fig. 4.14

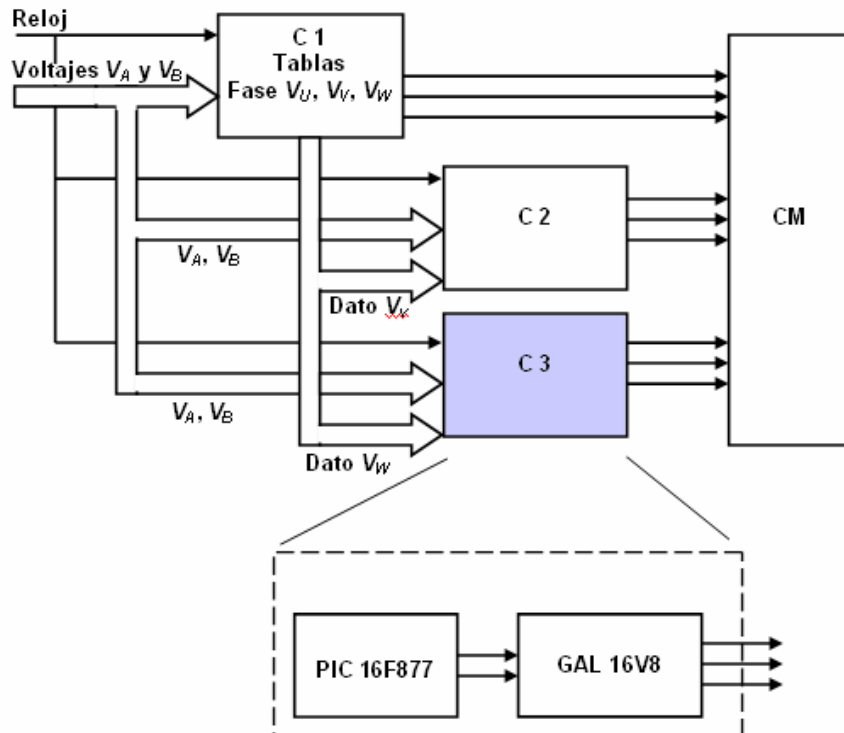


Figura 4.14 Diagrama de bloques para la generación de las señales de control.

La etapa C1 genera las señales de control para las celdas de conmutación conectadas a la fase de salida U, C2 genera los pulsos para la fase de salida V y C3 para la fase de salida W.

Los tiempos muertos se obtiene retrasando las señales mediante un circuito RC, el diagrama para introducir los retardos se muestra en la Fig. 4.15

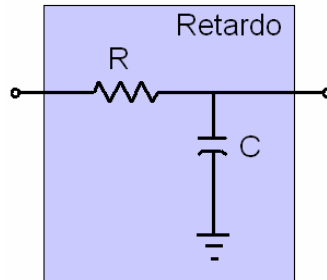


Figura 4.15 Circuito de retardo.

De este circuito RC, se calcula el tiempo de retardo τ con la siguiente ecuación

$$\tau = RC$$

Se seleccionaron los siguientes valores para obtener un retardo mayor a 400 ns

$$R = 120$$

$$C = 4.7 \text{ nF}$$

$$\tau = (120) (4.7e-9) = 564 \text{ ns}$$

La Fig.4.16 muestra el circuito completo del CM. En el Capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos de esta implementación, también se muestran resultados de una simulación para verificar el correcto funcionamiento del circuito.

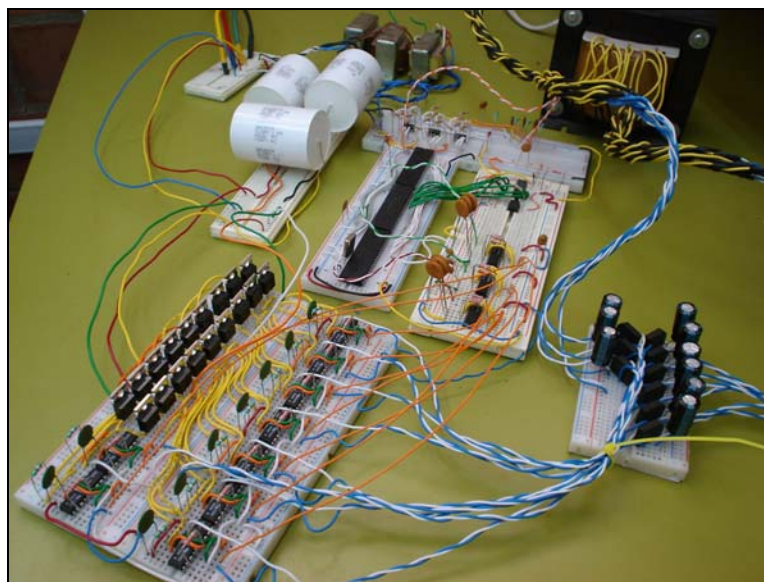


Figura 4.16 Prototipo del CM