
Resultados de Simulación y Experimentales.



5.1 Introducción

Para verificar el funcionamiento del CM, se realizó una simulación en Matlab-Simulink del CM. Se propone un diseño sencillo para modelar el convertidor matricial, se evaluaron las dos estrategias de modulación expuestas en el Capítulo 3. Debido a la principal aplicación del CM en variadores de velocidad, las simulaciones se hicieron para una carga inductiva.

Las pruebas se hicieron para la máxima ganancia de cada método de modulación y para una frecuencia de salida de 20 Hz con una frecuencia de conmutación de 2 kHz con el fin de observar claramente el comportamiento de las señales de control. Por otro lado se realizó una simulación con carga resistiva para hacer una comparación con el prototipo implementado.

Finalmente se muestran los resultados de la implementación del prototipo con el cual se logró verificar los principios básicos en el funcionamiento y operación del CM, se comprueba que el algoritmo de modulación opera correctamente generando el voltaje a la salida de frecuencia y amplitud variables.

El prototipo implementado se conectó a una carga resistiva obteniendo resultados de la frecuencia y distorsión de la señal.

5.2 Simulación CM con carga inductiva: Modulación VA

La parte más importante de la simulación es generar las señales de modulación PWM de los interruptores bi-direccionales del CM. Estas señales se generan a partir de la Eq. 5.1 definida en el Capítulo 3. Esta ecuación define a la modulación VA con una relación entrada-salida de 0.5.

$$m_{jk} = \frac{t_{jk}}{T} = \frac{1}{3} \left[1 + \frac{2V_j V_k}{V_{im}^2} \right], \quad \text{para } j = u, v, w \text{ y } k = a, b, c \quad (5-1)$$

Para implementar esta ecuación se utilizaron los bloques de operaciones que incluye Simulink®, como se verá en las secciones posteriores.

5.2.1 Generación de la funciones de modulación

La Fig. 5.1 muestra el módulo que genera los valores m_{jk} de la matriz de modulación $M(t)$, tomando muestras de los voltajes de entrada V_k y de los voltajes de salida requerido V_j .

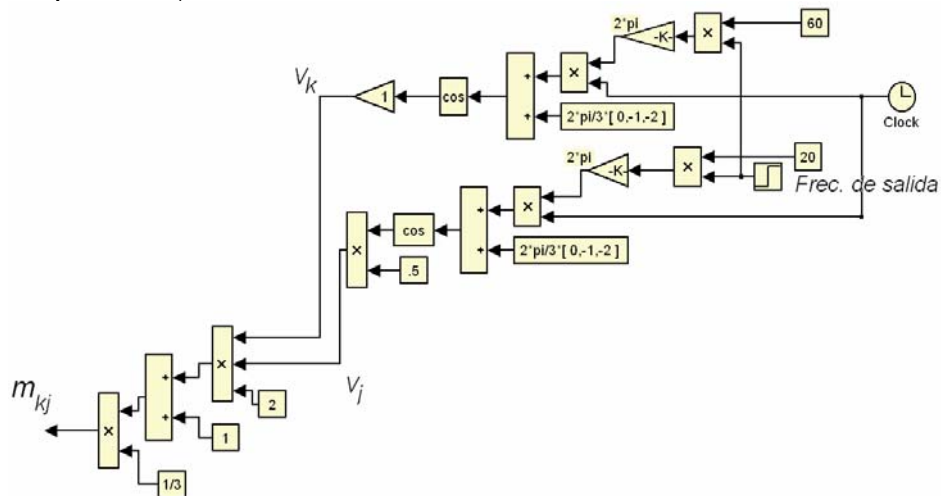


Figura 5.1 Módulo para obtener $m(t)$

La Fig. 5.2 muestra los resultados generados por este bloque para una frecuencia de salida de 20 Hz y una ganancia de $q = 0.5$. La señales corresponden a las señales de modulación para los interruptores que se conectan a la Fase U, esto es, las funciones m_{ua} , m_{ub} y m_{uc} .

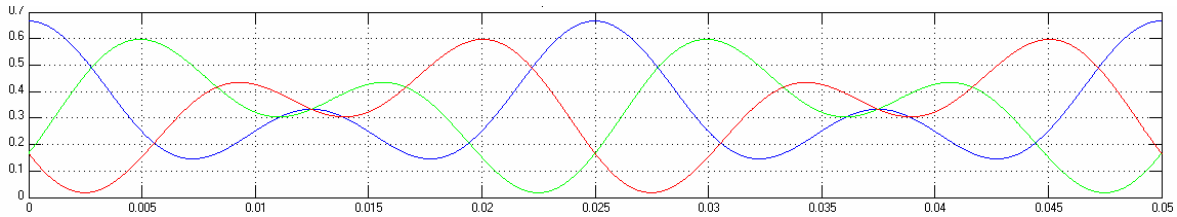


Figura 5.2 Funciones de modulación, Fase U.

Es esta gráfica se puede comprobar que la suma de las señales es uno para cualquier tiempo, lo que significa que solo un interruptor podrá estar conectado a la vez en un periodo de tiempo.

A partir de los valores de m_{jk} , se obtienen las funciones de conmutación de los interruptores, $s_{jk}(t)$.

5.2.2 Generación de las funciones de conmutación.

Estas funciones corresponden a las señales de disparo que se aplican a los MOSFETs en el CM a través de los drives. Con el bloque de la Fig. 5.3 se obtienen estas funciones de conmutación, en este bloque se define la frecuencia de conmutación, que será la frecuencia de la rampa con la que se comparan los valores de m_{jk} para generar las señales de disparo s_{jk} a dicha frecuencia.

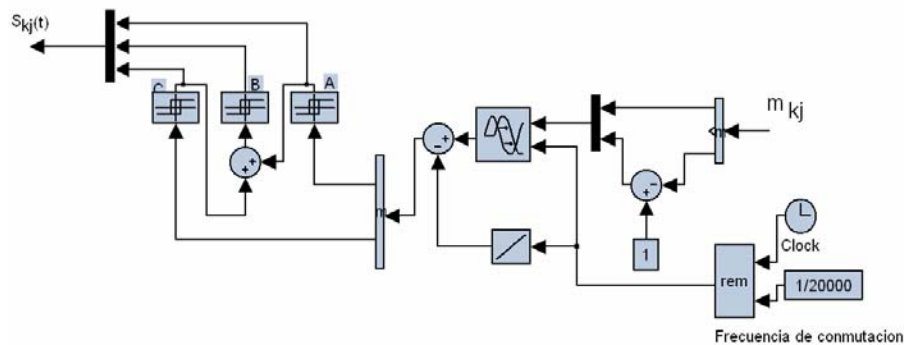


Figura 5.3 Módulo para obtener funciones de conmutación.

Las funciones de conmutación que se obtienen con este módulo se muestran en la Fig. 5.4. Estos patrones PWM corresponden a las funciones de interruptores de la Fase U, s_{ua} , s_{ub} , s_{uc} , generadas por las funciones de modulación de la Fig. 5.3. Para tener una mejor apreciación de las señales, se simuló inicialmente a una frecuencia de conmutación de 2 kHz.

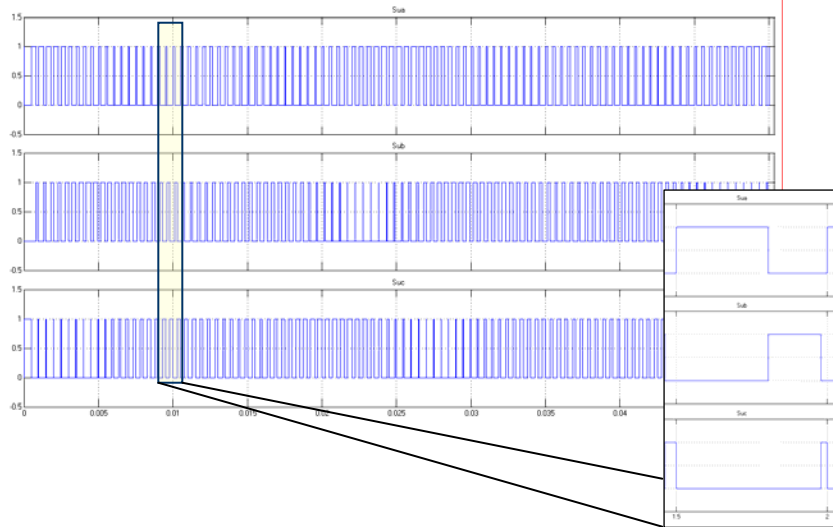


Figura 5.4 Funciones de conmutación, S_{ua} , S_{ub} , S_{uc} .

Haciendo un acercamiento de la señal, se puede observar que se obtiene el patrón esperado, de esta manera se evita el cerrar más de un interruptor al mismo tiempo, lo que produciría un corto circuito en las líneas de alimentación.

La Fig.5.5 muestra la manera como se obtiene las funciones de conmutación para una fase de salida, para las fases restantes el procedimiento es el mismo. S_{ua} se obtiene directamente al comparar la función rampa con el ciclo de trabajo definido por m_{ua} , para obtener S_{ub} y S_{uc} se hacen algunas operaciones adicionales a partir de m_{ua} y $m_{ua} + m_{ub}$ que permitan obtener los pulsos en un periodo T_s sin que haya traslape.

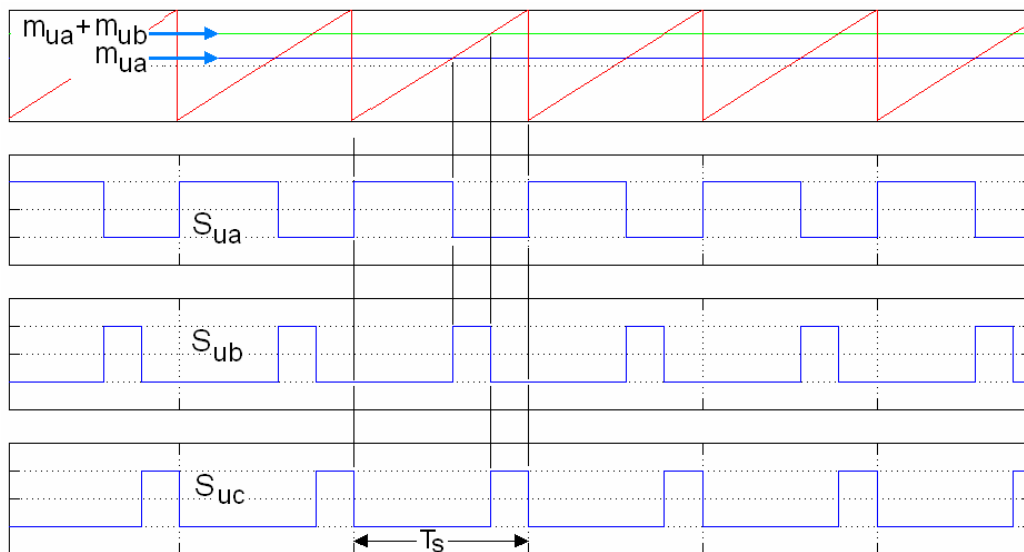


Figura 5.5 Generación de la funciones de conmutación.

5.2.3 Convertidor Matricial.

El convertidor matricial se simuló con el bloque de la Fig.5.6.

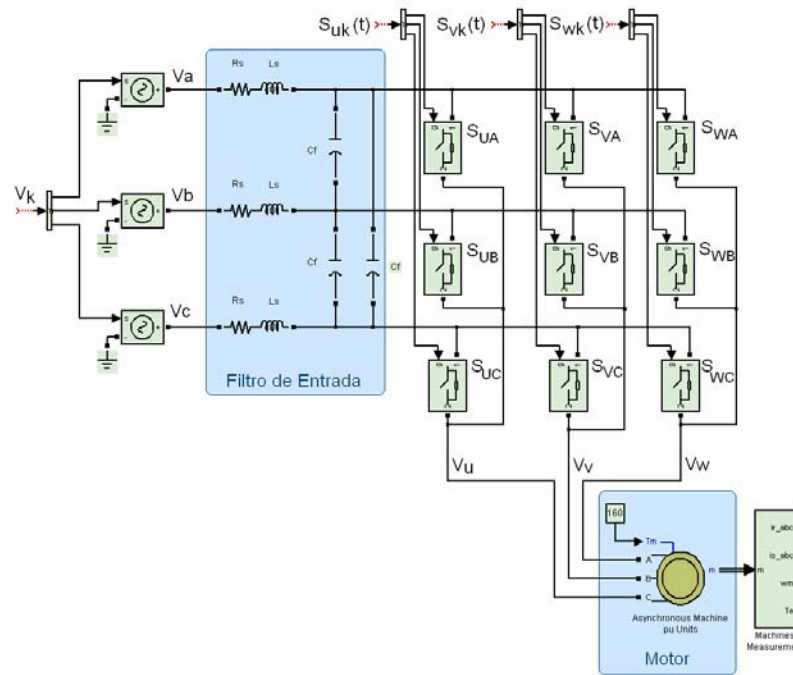
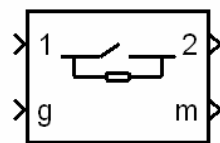


Figura 5.6 Módulo del CM.

Interruptores Bi-direccionales

Para las celdas de conmutación se utilizaron interruptores ideales, incluidos en la librería de SimPowerSystems de Simulink. Este interruptor, mostrado en la Fig. 5.7 es controlado por medio de la compuerta “g”, las terminales de interruptor son a través de los nodos “1” y “2”. Este interruptor esta diseñado para operar como interruptor ideal, que al estar apagado su resistencia interna es infinita.



Ideal Switch

Figura 5.7 Interruptor Bi-direccional Ideal.

Filtros de entrada

Los filtros de entrada son necesarios para eliminar el rizo por la frecuencia de conmutación en las corrientes de entrada, estos fueron diseñados para una frecuencia de corte menor a la frecuencia de conmutación. Se tomó L_s con el valor de la inductancia característica de la línea, y se calculó C_f a partir de este

parámetro y considerando una frecuencia de conmutación de $f_s=2$ kHz. En base estudios ya realizados [24], [27] se tomaron en cuenta los siguientes los siguientes parámetros para el filtro de entrada

$$R_s = 0.1 \text{ ohm}$$

$$L_s = 0.62 \text{ mH}$$

$$C_f = 10 \text{ uF}$$

para $f_s = 2\text{kHz}$.

Para el filtro se utilizaron los módulos RLC en serie disponibles también en el Toolbox de SimPowerSystems. Este elemento (Fig. 5.8) permite implementar los arreglos RL y C necesarios para el filtro con los valores deseados.

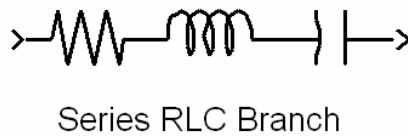


Figura 5.8 Elemento RLC.

Carga Inductiva

Debido a que la principal aplicación del CM esta orientada al control de motores de inducción, para esta simulación se empleó un motor trifásico como carga al CM. Este tiene las siguientes características,

Potencia =10 HP
 Voltaje Línea-Línea = 460 V
 Velocidad = 1760 rpm

Este motor fue modelado con un bloque disponible en el mismo toolbox de SimPowerSystems, el motor seleccionado se muestra en la Fig. 5.9 y modela un motor trifásico asíncrono, también conocido como motor de inducción.

Todos los parámetros y variables eléctricas referidas al estator del motor se seleccionaron por medio de un modelo predefinido con las características antes mencionadas.

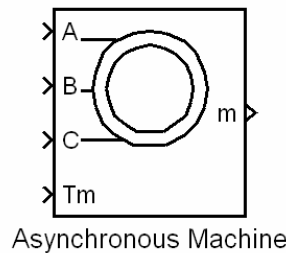


Figura 5.9 Motor de inducción.

5.2.4 Voltajes y corrientes del CM

El voltaje de salida y la corriente de entrada se muestran en la Fig. 5.10. Nótese como en el voltaje de entrada se encuentra modulado. Para estos resultados se continuó con una frecuencia de conmutación a 2 kHz para observar mejor el comportamiento de las señales.

La corriente de entrada se muestra sin filtrar, este tiene su armónico fundamental en la frecuencia de la línea, 60 Hz.

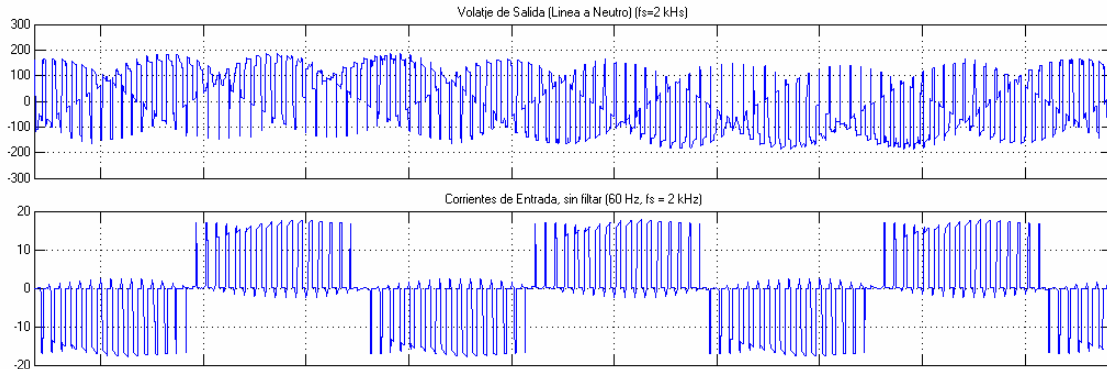


Figura 5.10 Voltaje de salida y corriente de entrada del CM.

Las siguientes gráficas muestran la corriente de entrada antes y después de filtrar.

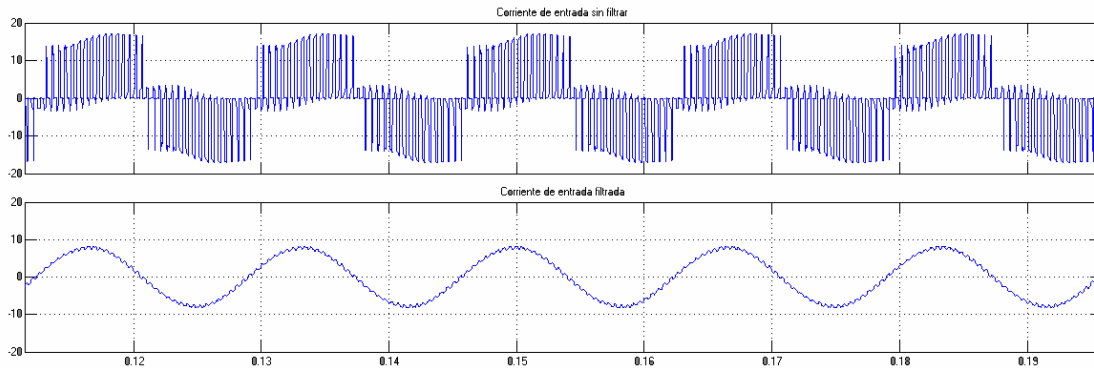


Figura 5.11 Corriente de entrada antes y después del filtro.

La Fig. 5.12 muestra como la corriente y el voltaje de entrada están en fase a una frecuencia de 60 Hz, generando un factor de potencia alto.

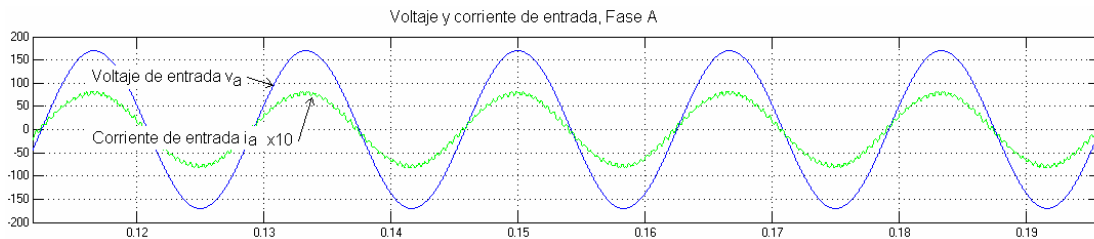


Figura 5.12 Voltaje y corriente de entrada

Las siguientes graficas muestran las corrientes de entrada i_a , i_b , i_c y las corrientes de salida i_u , i_v , i_w del CM, para una frecuencia de conmutación de 20 kHz.

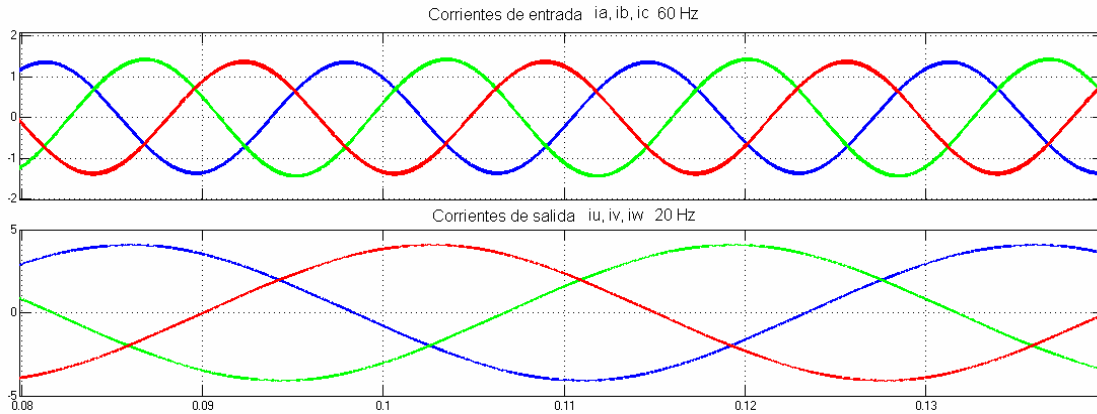


Figura 5.13 Corriente de entrada y corriente de salida del CM.

5.2.5 Espectro en frecuencia.

Utilizando la transformada FFT de la corriente de entrada sin filtrar, se obtiene el espectro de la Fig.5.14. Nótese que existe un armónico fundamental en 60 Hz, y los siguientes armónicos aparecen después de la frecuencia de conmutación, en múltiplos de ella.

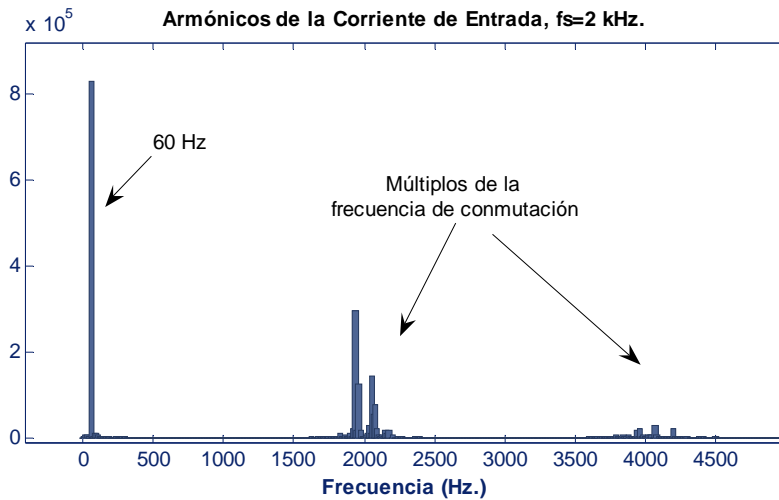


Figura 5.14 Armónicos de la corriente de entrada.

El espectro del Voltaje de salida para una fase se muestra en la Fig.5.15. El armónico fundamental se presenta en 20 Hz, mientras que el siguiente aparece en la frecuencia de conmutación y múltiplos.

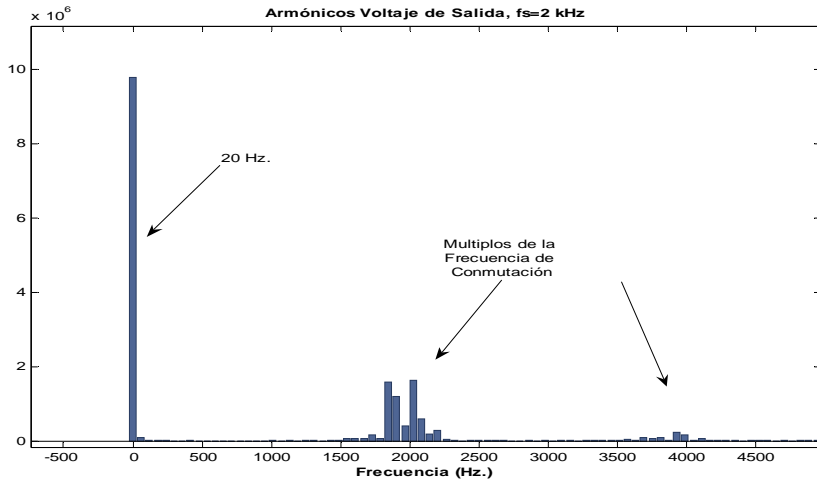


Figura 5.15 Armónicos del voltaje de salida.

El circuito completo se muestra en la Fig. 5.16

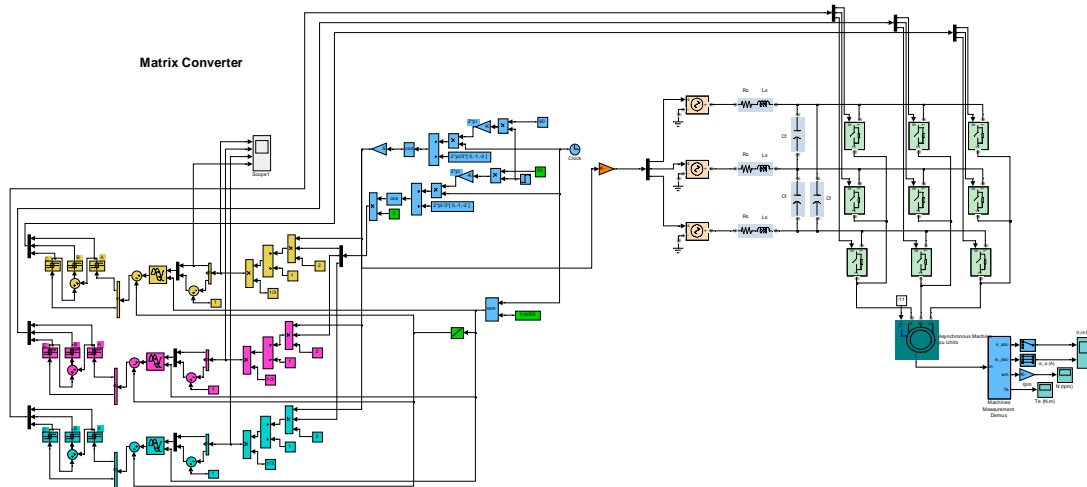


Figura 5.16 Circuito Simulado.

5.3 Simulación CM con carga resistiva: Modulación VA

La siguiente simulación se realizó para verificar el correcto funcionamiento del CM ante una carga resistiva. A pesar de que el convertidor ha sido diseñado para manejar cargas inductivas, se realizó esta simulación debido a que la implementación del prototipo se ha hecho para una carga resistiva, con el fin de solo corroborar el correcto control de los interruptores que permitan variar el voltaje y frecuencia de salida.

El circuito utilizado es similar al de la Fig. 5.16, excepto por que la carga ahora es puramente resistiva. La simulación se realizó utilizando los mismos parámetros de las pruebas hechas en la implementación, con el fin de poder hacer una comparación.

La tabla 5.1 muestra los parámetros de entrada utilizados para esta simulación.

Parámetros de entrada	
Voltaje de entrada	$V_i = 50 \text{ V}_{L-N}$
Frecuencia de Entrada	$f_i = 60 \text{ Hz.}$
Resistencia	$R = 800 \Omega$
Ganancia	$q = 0.3$
Frecuencia de Conmutación	$f_s = 20 \text{ kHz}$

Tabla 5.1 Parámetros de Entrada

5.3.1 Voltajes y corrientes del CM

La Fig. 5.17 muestra las formas de onda obtenidas en la corriente de entrada de la Fase A y el voltaje de salida de la Fase U.

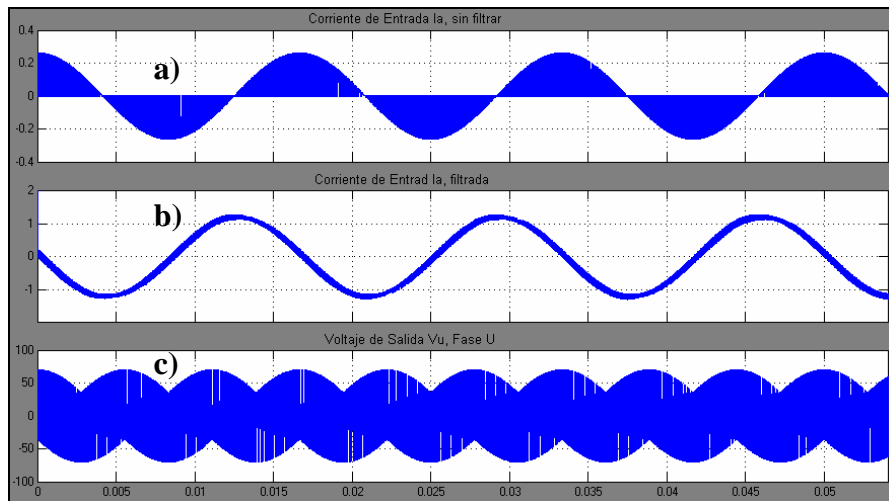


Figura 5.17 Voltajes y Corrientes a) Corriente de Entrada i_a b) Corriente de entrada i_a filtrada c) Voltaje de salida fase U

La Fig. 5.18 muestra los valores rms de los voltajes de entrada y salida para una fase por medio de la FFT en Simulink. Con los resultados obtenidos en la Fig. 5.18 se verifica que la relación entrada-salida es de $q=0.3$, como se había establecido en los parámetros de entrada.

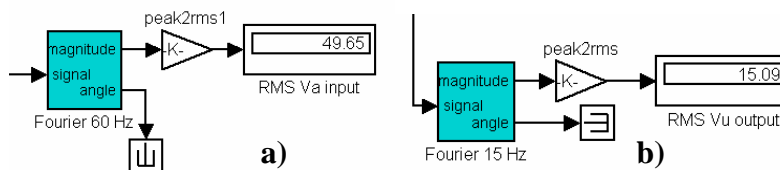


Figura 5.18 Valor RMS a) voltaje de entrada fase A b) voltaje de fase U de salida.

5.3.2 Espectro en frecuencia.

La Fig. 5.19 muestra el espectro en frecuencia de la corriente de entrada de la Fase A, este contiene un armónico fundamental en 60 Hz, y en la frecuencia de conmutación y múltiplos de ella, 20 kHz en este caso.

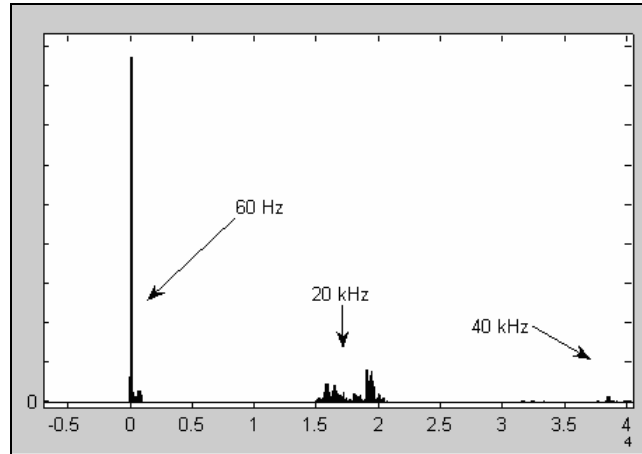


Figura 5.19 Armónicos de la corriente de entrada fase A.

La Fig. 5.20 muestra los armónicos del voltaje de salida de la Fase U, con un armónico fundamental en la frecuencia deseada de 15 Hz, y los armónicos en la frecuencia de conmutación y múltiplos de ella.

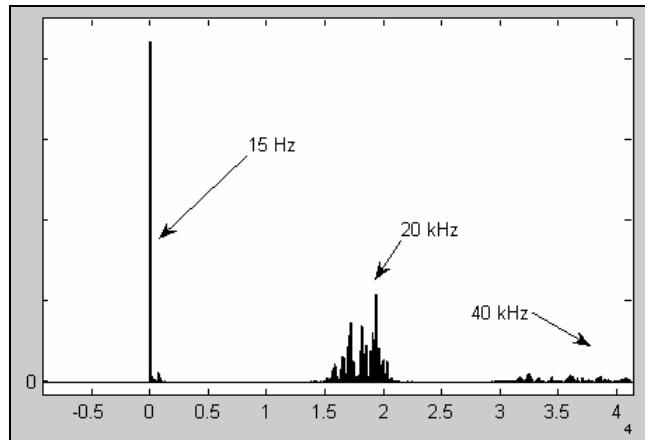


Figura 5.20 Armónicos del voltaje de salida fase U.

La tabla 5.2 muestra los resultados de voltaje y frecuencia en la fase de salida U.

Resultados	
Voltaje de salida	$V_0 = 15 V_{L-N}$
Frecuencia de Entrada	$f_0 = 15 \text{ Hz.}$

Tabla 5.2 Resultados

Las Figuras 5.21-24 muestran los resultados obtenidos para diferentes frecuencias de salida de 10, 50, 75 y 160 Hz respectivamente. Estos resultados se obtuvieron con los parámetros de entrada de la tabla 5.3.

Parámetros de entrada	
Voltaje de entrada	$V_i = 120 \text{ V}_{L-N}$
Frecuencia de Entrada	$f_i = 60 \text{ Hz.}$
Resistencia	$R = 800 \Omega$
Ganancia	$q = 0.5$
Frecuencia de Conmutación	$f_s = 2 \text{ kHz}$

Tabla 5.3 Parámetros de Entrada

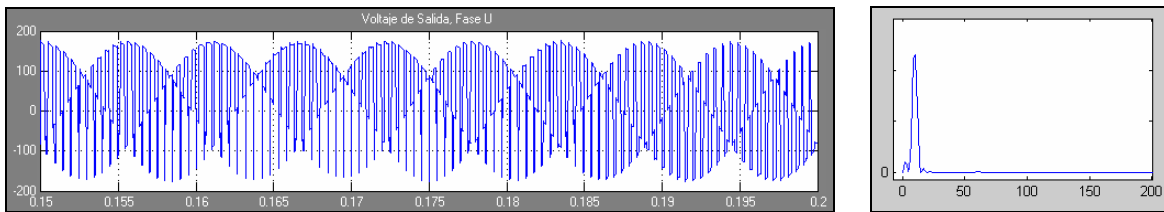


Figura 5.21 a) Voltaje de salida v_u b) FFT del voltaje de salida a 10 Hz

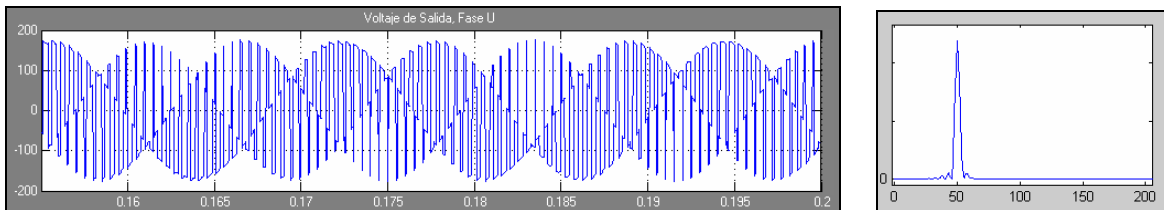


Figura 5.22 a) Voltaje de salida v_u b) FFT del voltaje de salida a 50 Hz

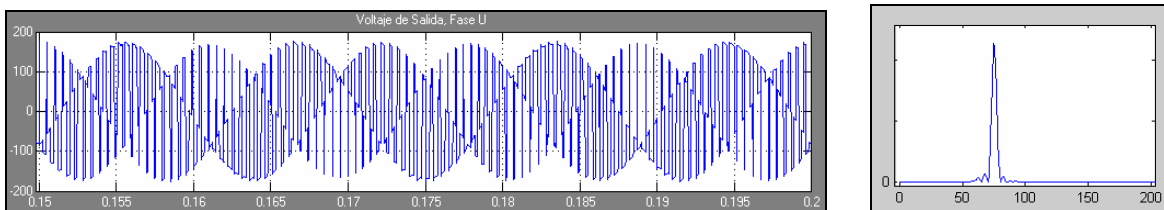


Figura 5.23 a) Voltaje de salida v_u b) FFT del voltaje de salida a 75 Hz

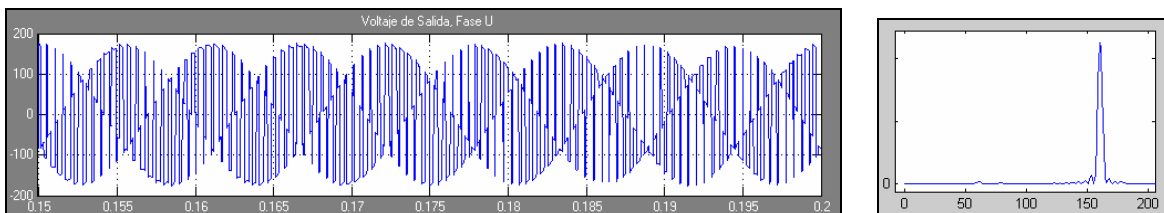


Figura 5.24 a) Voltaje de salida v_u b) FFT del voltaje de salida a 160 Hz

5.4 Simulación con modulación basada en voltajes L-L

Como en el método anterior, el primer paso es obtener las funciones de modulación $m(t)$, generar las funciones de conmutación a partir de las funciones $m(t)$, y finalmente aplicar estas señales a los interruptores del CM.

5.4.1 Generación de las funciones de modulación

Para obtener las funciones de modulación, el primer paso es identificar los modos que se encuentran en la entrada y salida. Con el módulo de la Fig. 5.25 se obtienen los diferentes modos en los voltajes de entrada y salida.

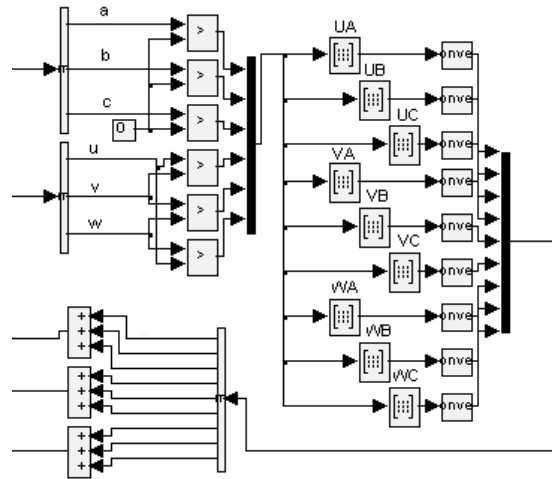


Figura 5.25 Módulo para la obtención de los modos.

En el bloque de la Fig. 5.26 se implementan las funciones de modulación para la Fase U definidas por las ecuaciones (3-73)-(3-75) en el Capítulo 3.

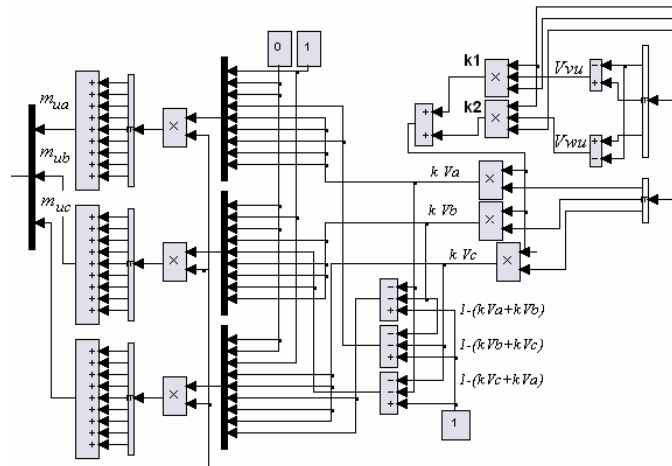


Figura 5.26 Módulo para obtener las funciones de modulación, Fase U.

Los resultados para las funciones de modulación de la Fase U se muestran en la Fig. 5.27

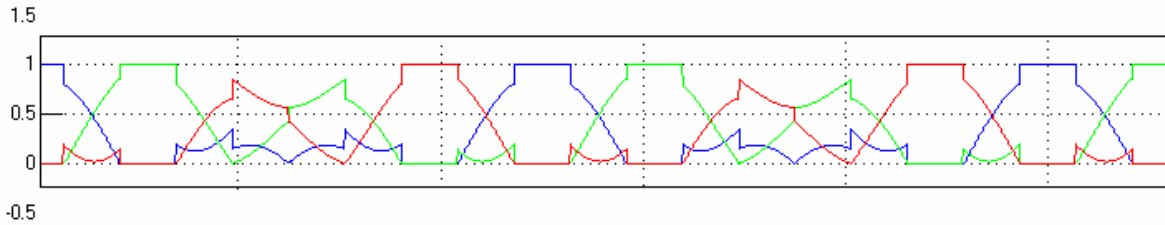


Figura 5.27 Señales de modulación.

5.4.2 Generación de las funciones de conmutación

Las funciones de conmutación son generadas de la misma manera que en el método anterior, por medio de comparaciones con una señal rampa. Los pulsos generados por las funciones de modulación de este método se grafican en la Fig. 5.28.

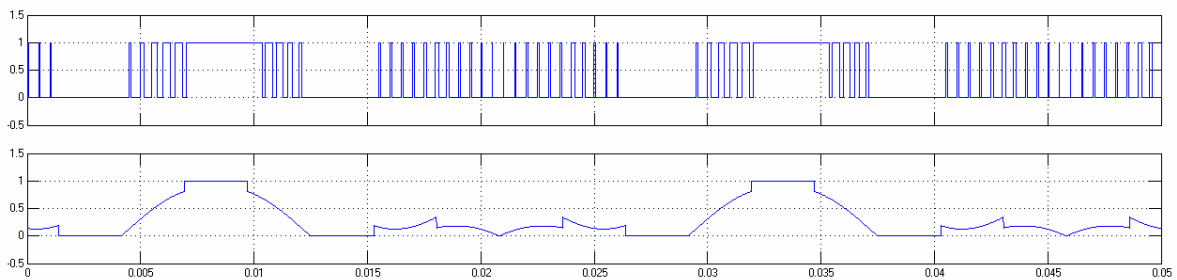


Figura 5.28 Funciones de Conmutación y Modulación para el interruptor Sua.

5.4.3 Convertidor Matricial.

La estructura de CM se modela con el circuito de la Fig. 5.29, este es muy parecido al utilizado anteriormente, excepto por que se conecta a la salida una carga RL.

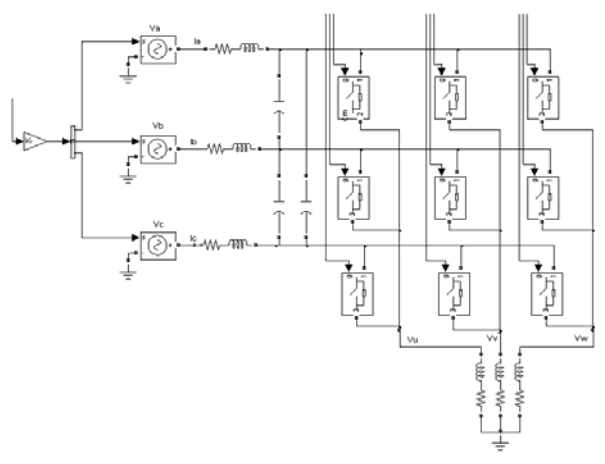


Figura 5.29 CM simulado.

5.4.4 Voltajes y corrientes del CM

La Fig. 5.30 muestra los voltajes de salida del CM, el voltaje línea-neutro, y los voltajes Línea-Línea se muestran en la Fig. 5.31.

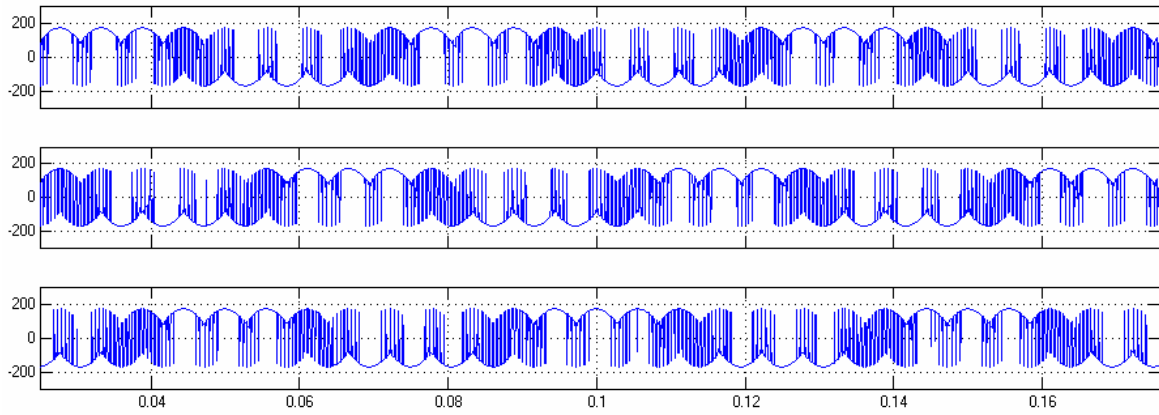


Figura 5.30 Voltajes de salida v_{u0} , v_v , v_w

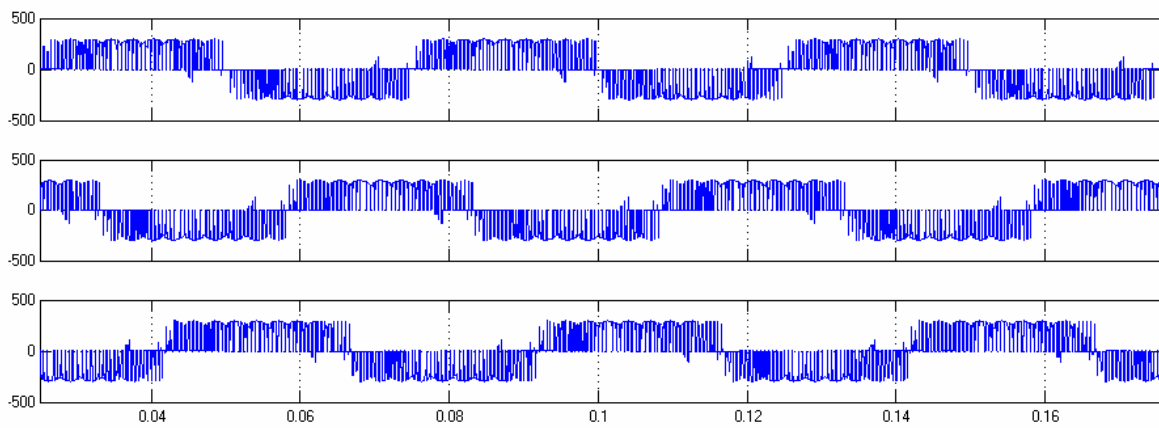


Figura 5.31 Voltajes de salida L-L v_{uv} , v_{vw} , v_{wu}

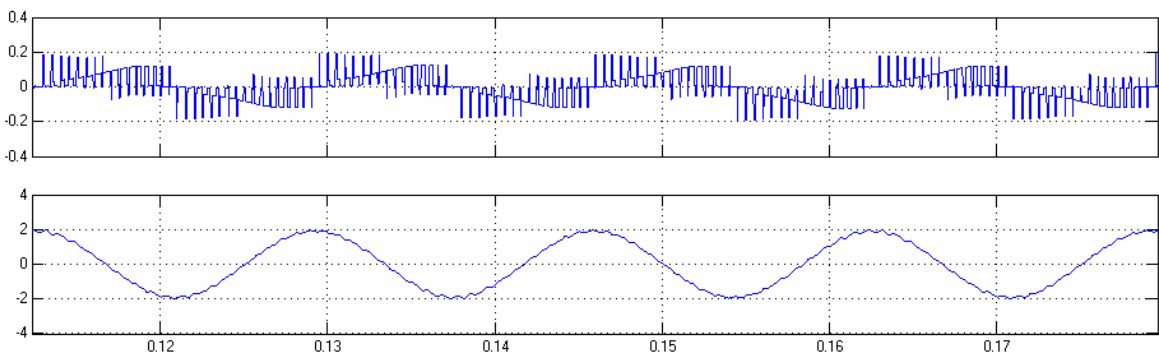


Figura 5.32 Corriente de entrada, a) Sin filtrar, b) Filtrada

De la Fig. 5.33 puede observarse los voltajes de entrada y salida del convertidor, estos son calculados con la transformada de Fourier para los armónicos fundamentales de entrada y salida. La relación de voltajes de entrada-salida resulta de 0.86, como se había esperado.

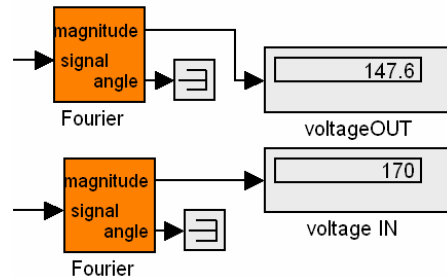


Figura 5.33 Amplitud del armónico fundamental de entrada y salida

5.4.5 Espectro en Frecuencia

La Fig. 5.34 muestra los armónicos de la corriente de entrada, un armónico fundamental y en múltiplos de la frecuencia de conmutación. Los armónicos generados en el voltaje de salida de la Fase U se muestra en la Fig. 5.35 donde se muestra un armónico fundamental en 20 Hz, y armónicos situados en la frecuencia de conmutación y múltiplos de ella.

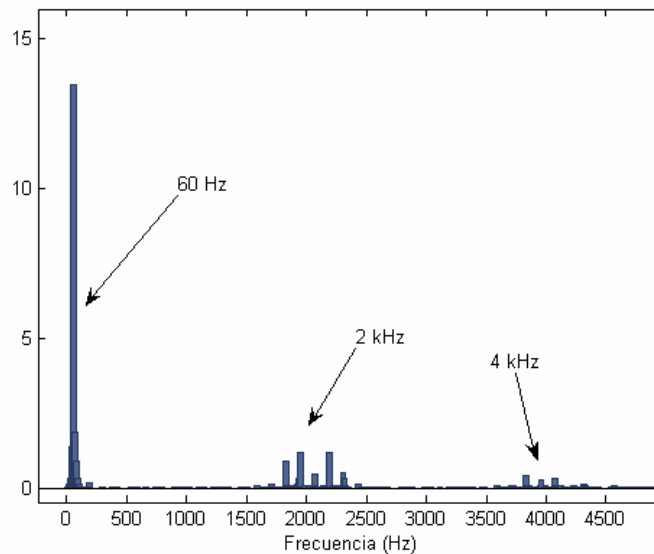


Figura 5.34 Armónicos de la corriente de entrada.

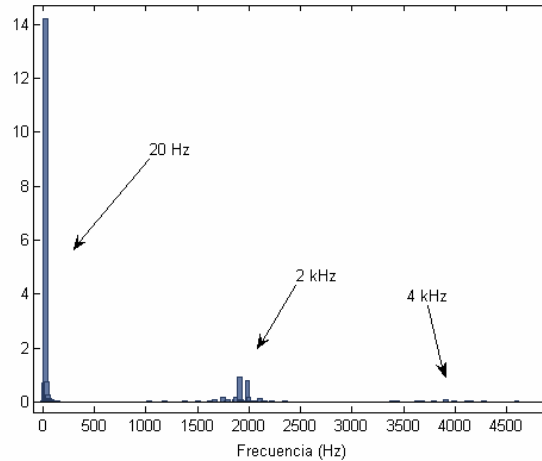


Figura 5.35 Armónicos del voltaje de salida.

5.5 Resultados Experimentales: Modulación AV.

Los resultados que se muestran fueron tomados con los siguientes parámetros

Voltaje de entrada,	$V_{in} = 50 \text{ Vrms}$
Frecuencia de Conmutación	$f_s = 20 \text{ kHz}$
Ganancia	$q = 0.3$
Carga resistiva	$R = 800 \text{ omhs}$
Frecuencia de salida	$f_o = 15 \text{ Hz.}$

Se muestran inicialmente en la Fig. 5.36 las señales generadas por la función de modulación en el microcontrolador m_{ua} , así como la función de conmutación del interruptor S_{ua} . Al obtener los valores m_{ua} , estos se envían a uno de los puertos de salida del Micro, después se hace una conversión Digital- Analógica (D/A) del dato para poder verificar la señal en el osciloscopio.

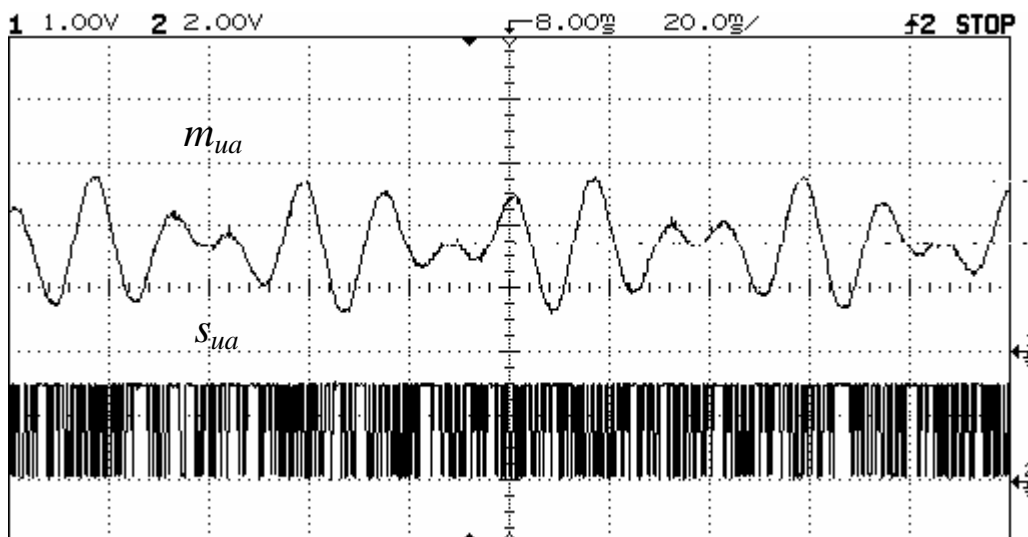


Figura 5.36 Señal de modulación y señal de conmutación

Las funciones de modulación m_{ua} y m_{ub} son multiplexadas para poder utilizar solo un puerto de salida, Fig. 5.37. Con ello se verifico que la suma de los ciclos de trabajo no excedan la unidad en un periodo de conmutación y evitar poner las líneas de entrada en corto.

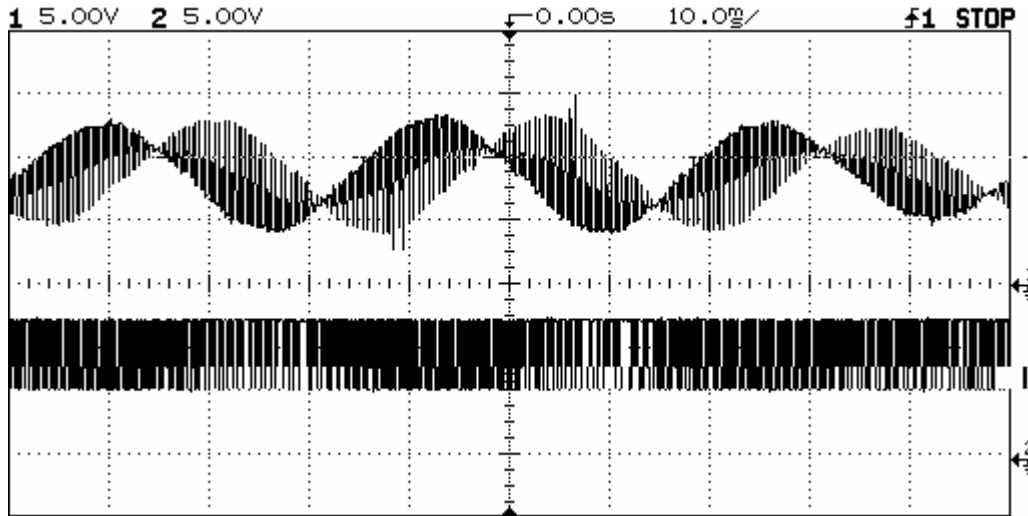


Figura 5.37 Funciones de modulación multiplexadas m_{ua} y m_{ub} .

La función de modulación y la señal de control s_{ua} generada por el modulo PWM interno del Micro se presenta en la Fig. 5.38, nótese el ancho del pulso de la señal de conmutación sigue a la señal de modulación.

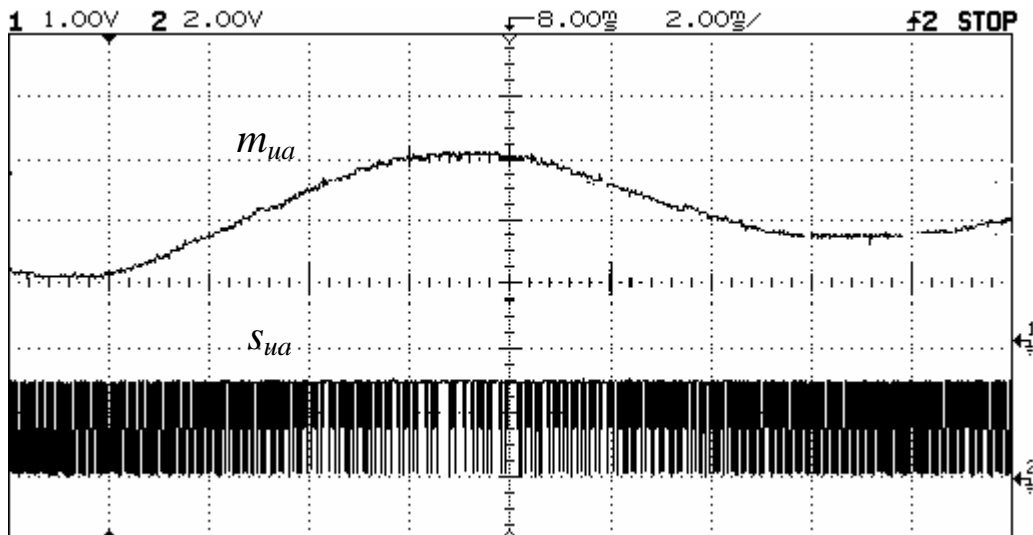


Figura 5.38 Comportamiento PWM.

La Fig. 5.39 presentan las señales de conmutación para los interruptores conectados a una fase de salida, (s_{ua} , s_{ub} , s_{uc}). Estos patrones se obtienen a la salida del PLD, que es el dispositivo que se encarga de colocar las señales de micro en una forma apropiada para evitar que los pulsos se traslapen.

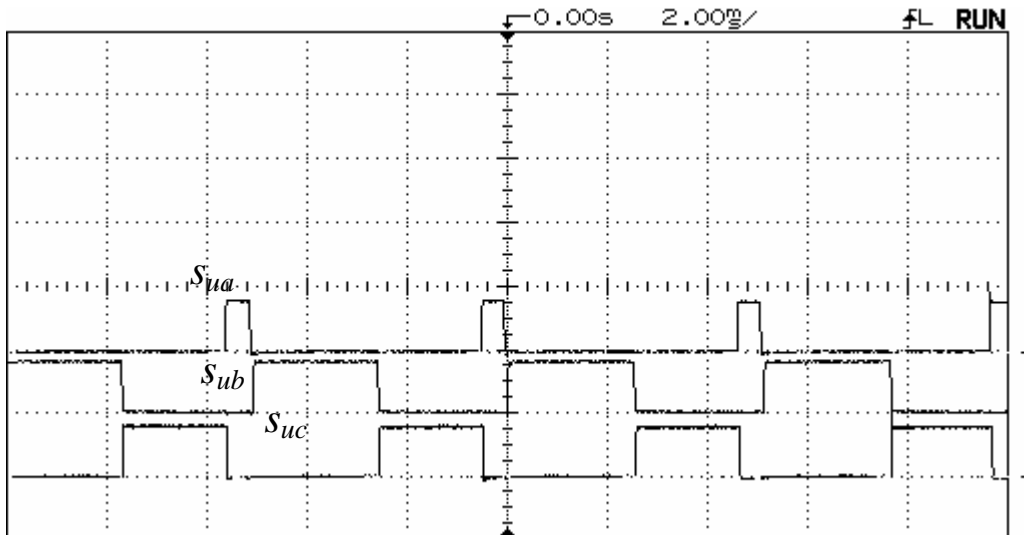


Figura 5.39 Señales de control para una Fase de salida.

En la Fig. 5.40 observa el tiempo muerto que existe entre la señales de los diferentes interruptores en una fase de salida, este tiempo muerto es suficiente para evitar el traslape que existe cuando dos interruptores conmutan al mismo tiempo para cambiar de fase.

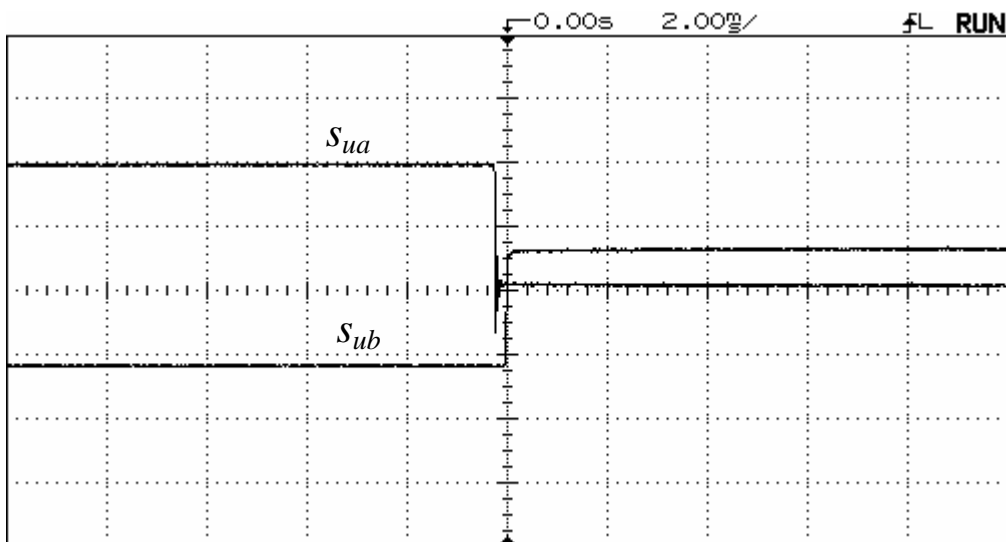


Figura 5.40 Tiempo muerto de 540 ns

El voltaje de salida v_u línea-neutro generado por las señales de control anteriores se muestra en la Fig. 5.41. Esta formada por segmentos de las tres fases de entrada.

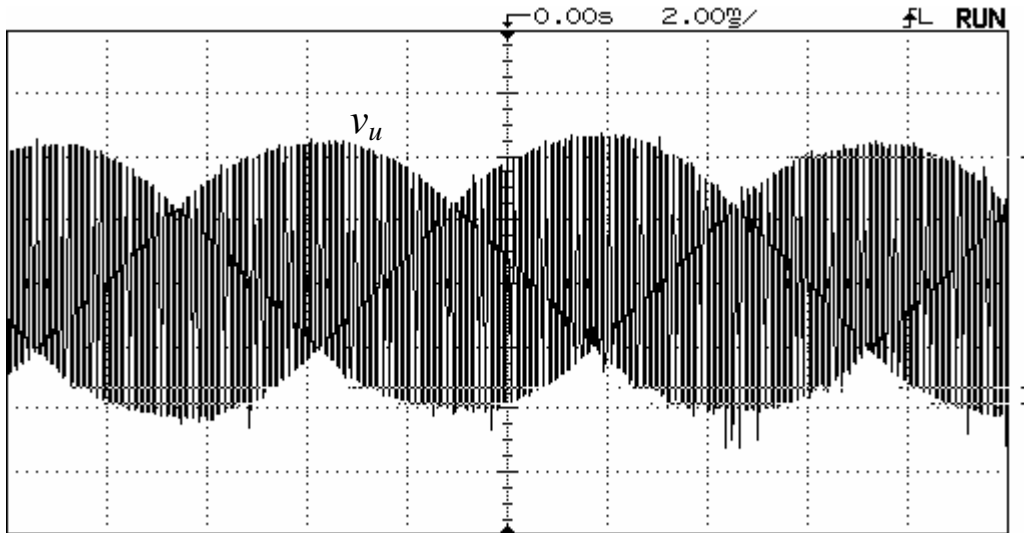


Figura 5.41 Voltaje de salida v_u .

Los voltajes de salida línea-neutro, de las fases U, V y W se muestran en la Fig.5.42

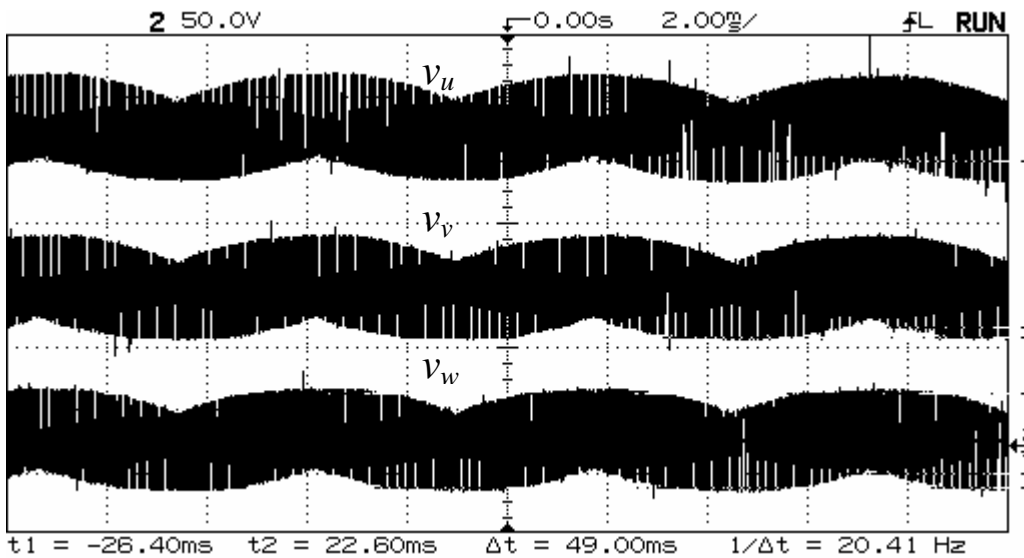


Figura 5.42 Voltajes de Salida v_u , v_v , v_w .

La Fig. 5.43 Muestra la corriente de entrada en la fase A y al voltaje de salida en la fase U. La corriente de entrada se midió antes de ser filtrada, el componente

de baja frecuencia esta a 60 Hz, como la frecuencia de entrada. Estos resultados son similares a los obtenidos por la simulación en la sección 5.17, con lo que se verifica su correcto funcionamiento.

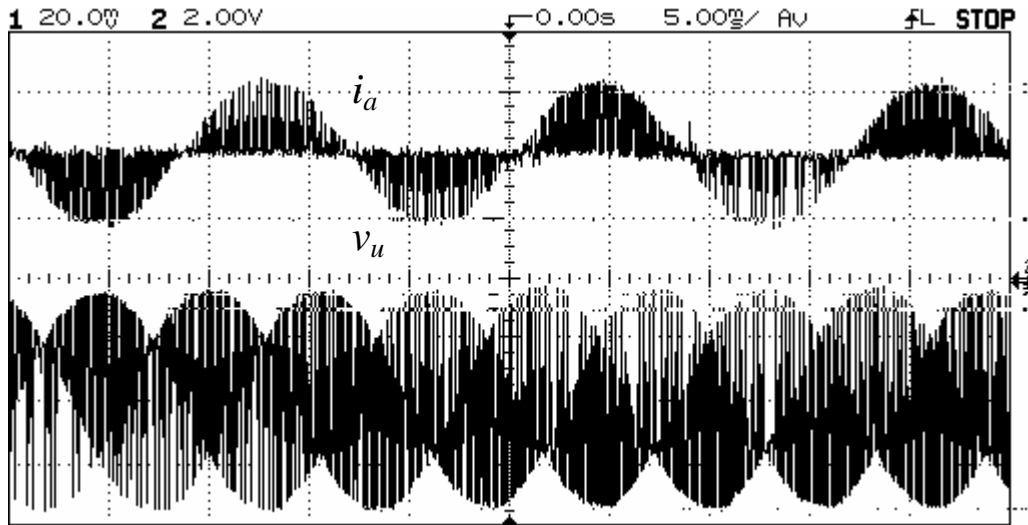


Figura 5.43 Corriente de entrada sin filtrar y voltaje de salida

El voltaje y la corriente de entrada en una misma fase se ven en la Fig. 5.44, con una frecuencia de 60 Hz, en fase. La forma de onda de la corriente es senoidal como se esperaba, esta se obtuvo de la señal de corriente de la Fig. 5.43 por medio de una operación en el osciloscopio que genera el promedio de la señal, de modo que al filtrar la señal se debe obtener un forma de onda muy semejante si el filtro esta bien diseñado.

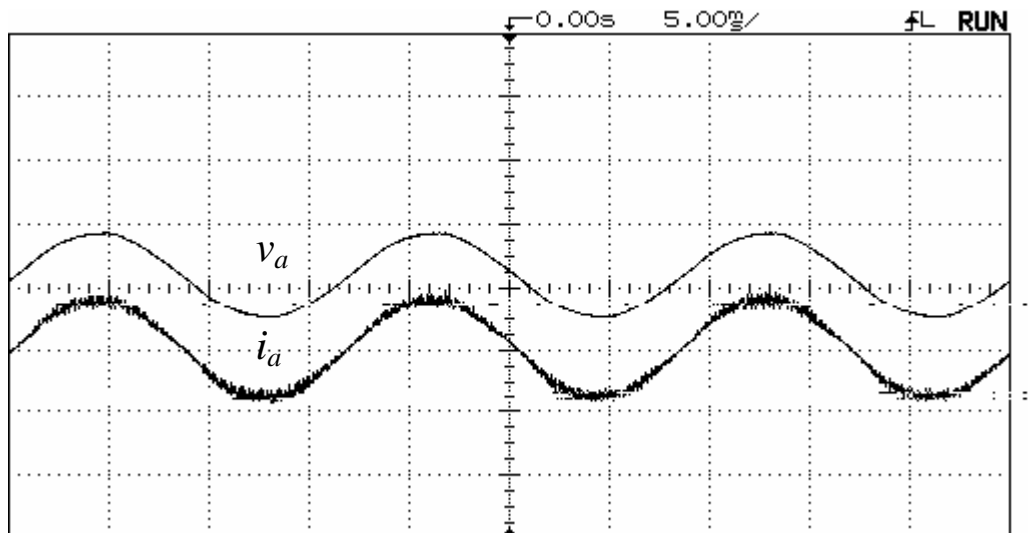


Figura 5.44 Voltaje y corriente de entrada en fase.

La señal de salida de referencia y el voltaje de salida del CM se muestra en Fig. 5.45, se puede observar que el voltaje de salida sigue el patrón PWM de la referencia.

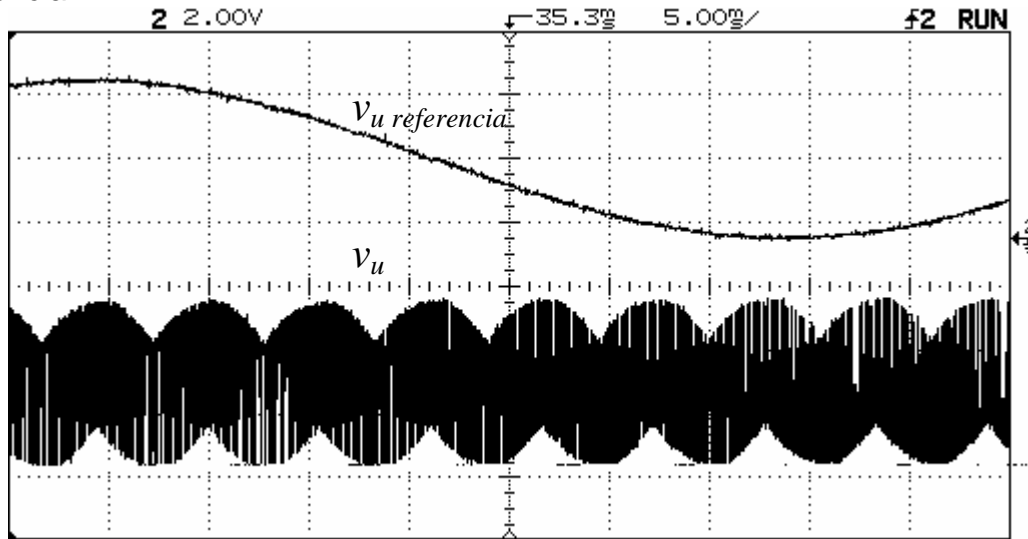


Figura 5.45 Voltaje de salida referencia y del convertidor.

La Fig. 5.46 muestra corrientes de entrada filtradas. Puede verse que existe un rizo debido a que el filtro no esta correctamente sintonizado. Pero en esta grafica se ve que el desfase es el correcto y se verifico que estuvieran en fase con los voltajes de entrada.

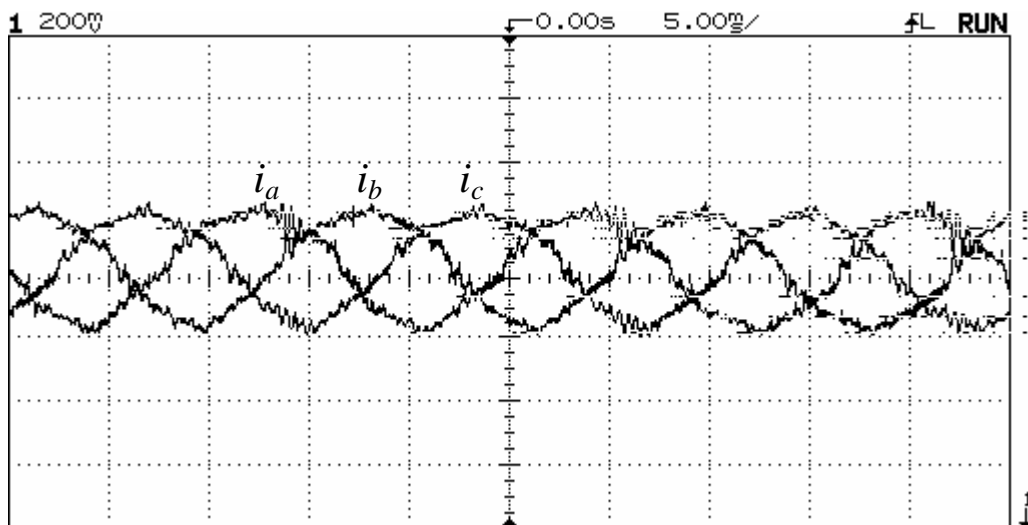


Figura 5.46 Corrientes de entrada filtrada

En la Fig. 5.47 se obtuvo la transformada FFT de una fase de salida. Se observaron los armónicos a la frecuencia de conmutación y sus múltiplos el armónico fundamental a 15 Hz, que es la frecuencia de salida requerida.

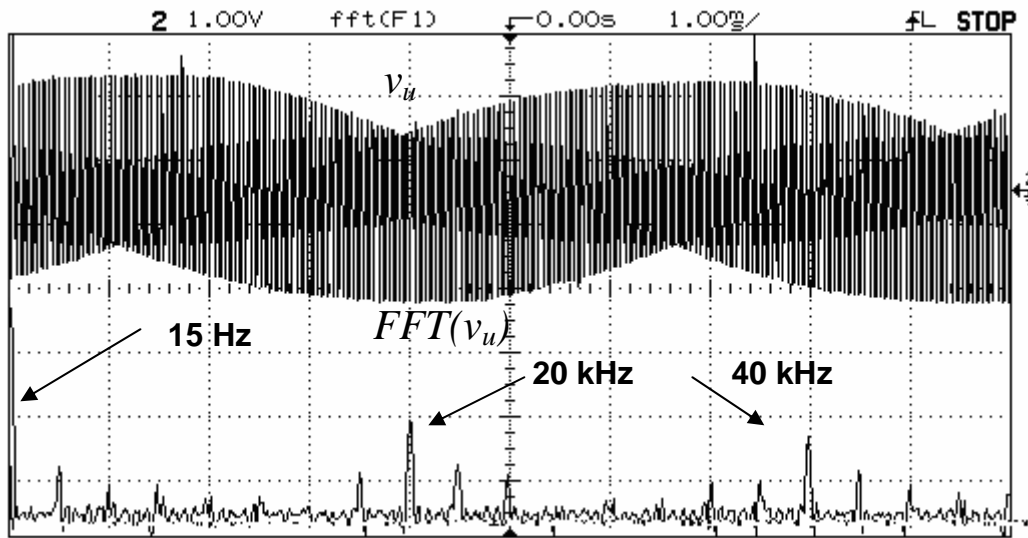


Figura 5.47 Voltaje de salida y Espectro en frecuencia

Los siguientes resultados se obtuvieron del medidor de armónicos FLUKE. La Fig 5.48 muestra el voltaje de salida obtenido para la Fase U. En la Fig 5.49 se obtienen los armónicos principales, nótese que prácticamente sólo existe el armónico fundamental. La Fig. 5.50 muestra los valores obtenidos para esta medición, con una frecuencia fundamental de 15 Hz y un THD de 3.3%.

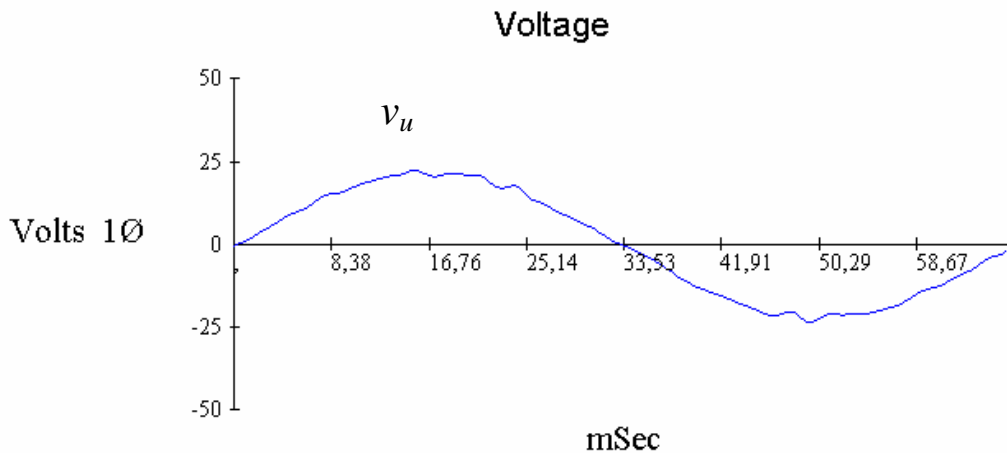


Figura 5.48 Voltaje de salida

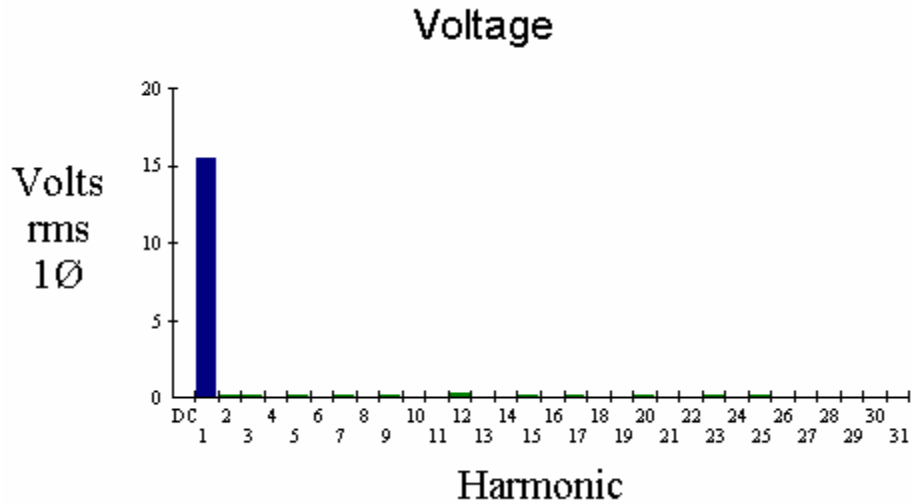


Figura 5.49 Armónicos en el voltaje de salida.

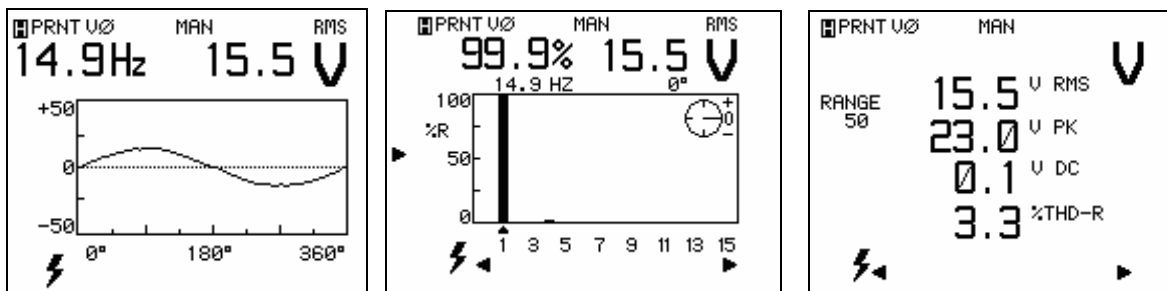


Figura 5.50 Voltaje de salida, armónicos y Distorsión Armónica Total (THD)

<i>Voltaje de Entrada</i>	<i>Voltaje de Salida</i>
$V_i = 50 V_{L-L}$	$V_o = 15.5 V_{L-N}$
$f_i = 60 \text{ Hz}$	$f_o = 15 \text{ Hz}$
	THD = 3.3 %

Tabla 5.1 Tabla de Resultados.

Los resultados de la Tabla 5.1 y las formas de onda de voltaje y corriente obtenidos con esta implementación se verifican con los generados en la simulación de la sección 5.3. Estos resultados corresponden a los esperados por la simulación, de manera que el control digital diseñado para el prototipo funciona de manera correcta, ofreciendo una opción de bajo costo que permita operar al CM.