

CAPITULO 4

IMPLEMENTACIÓN, EVALUACIÓN Y RESULTADOS DEL PROTOTIPO

4.1 Introducción

Para la realización de la tesis, se propuso la implementación de un Convertidor Multicelda Apilable de 3x2, para el cual se realizaron simulaciones del prototipo en PSIM, esto con el fin de validar el funcionamiento del sistema de control en lazo abierto. Una vez realizadas las simulaciones y validado el funcionamiento del sistema, se llevó a la práctica obteniendo los resultados que se presentan en este capítulo.

4.2 Prototipo

El Convertidor Multicelda Apilable de 3x2 utilizado como prototipo inicial se muestra en la figura 4.1. En la tabla 4.1 se muestran los parámetros que fueron utilizados para la simulación y el desarrollo experimental del prototipo. El valor de los capacitores flotantes se obtuvo a partir de la ecuación (2.8.).

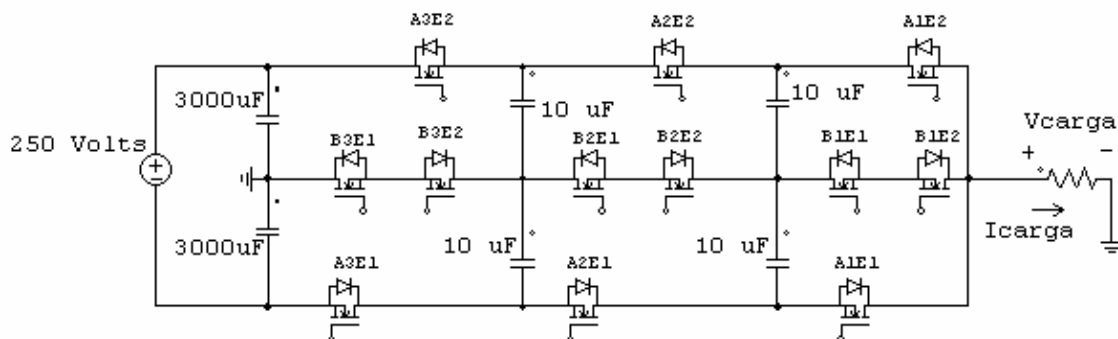


Figura 4.1. Prototipo inicial implementado del SMC de 3x2.

Parametro	Abreviatura	Valor
Voltaje de entrada de corriente directa (CD)	V_{Ent}	250 Volts
Capacitores flotantes	$C_k (k = 1, \dots, p-1)$	10 μ F
Resistencia (Carga)	R_L	35 Ω
Frecuencia de Conmutación	F_{sw}	20 KHz

Tabla 4.1. Parámetros del prototipo

4.2.1 Resultados de la simulación del Prototipo

En la figura 4.2 se observa el voltaje de salida (V_{carga}) del prototipo. Se pueden visualizar los siete niveles de voltaje con los que se sintetiza la señal de salida. La amplitud de cada uno de los niveles de voltaje es igual a E/pxn , siendo en este caso aproximadamente 42 volts, dando como resultado una señal de voltaje de salida de 250 Vp-p, con una frecuencia de salida igual a 60 Hz.

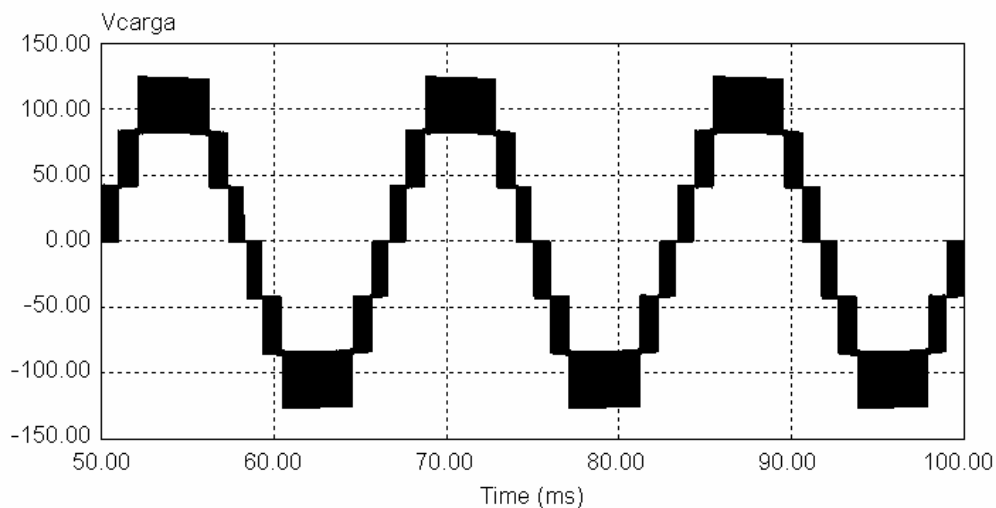


Figura 4.2. Voltaje en la carga del SMC de 3x2.

Dado que el prototipo de la figura 4.1 tiene una carga puramente resistiva, la forma de la corriente de carga (I_{carga}) conserva la misma forma de

onda que el voltaje y puede ser observada en la figura 4.3. La corriente pico a pico es aproximadamente de 6 A.

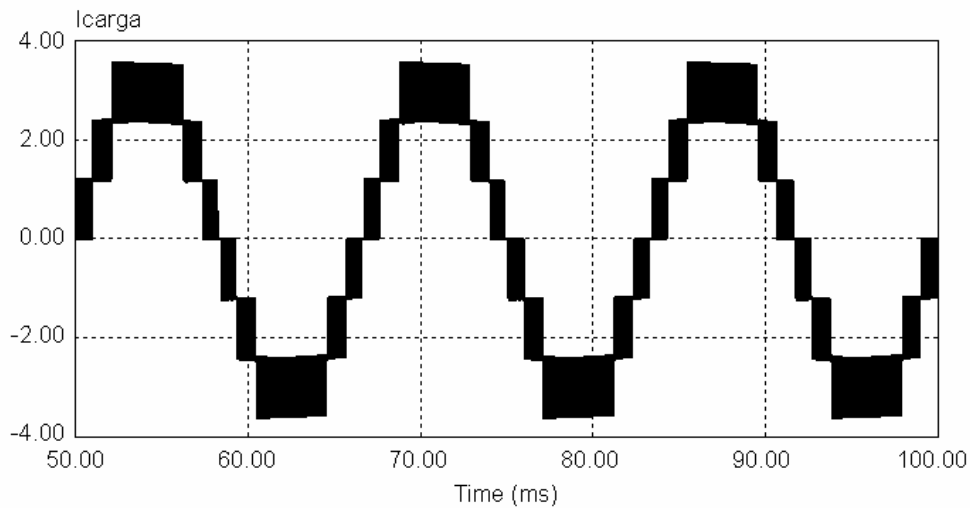


Figura 4.3. Corriente de salida del SMC con carga puramente resistiva.

Una característica importante del SMC es que el contenido armónico que presenta el voltaje de salida es bajo. Para observar esta característica, la figura 4.4 presenta el espectro del voltaje en la carga. El primer armónico significativo se presenta en el valor determinado por la frecuencia aparente de salida $p \cdot f_{sw}$, siendo en el caso igual a 60 KHz.

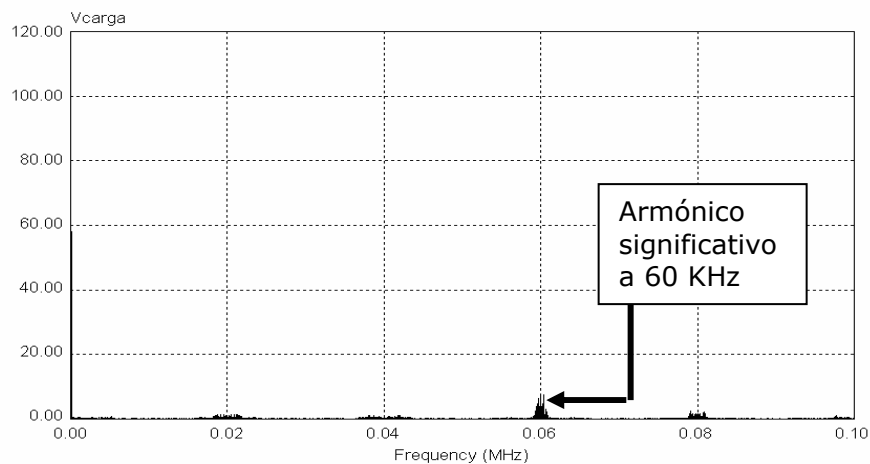


Figura 4.4. Espectro en frecuencia del voltaje de salida.

Para visualizar la magnitud de la componente fundamental del voltaje de salida en la figura 4.5 se presenta su espectro en frecuencia. Siendo la magnitud de la componente fundamental igual a 116 Volts.

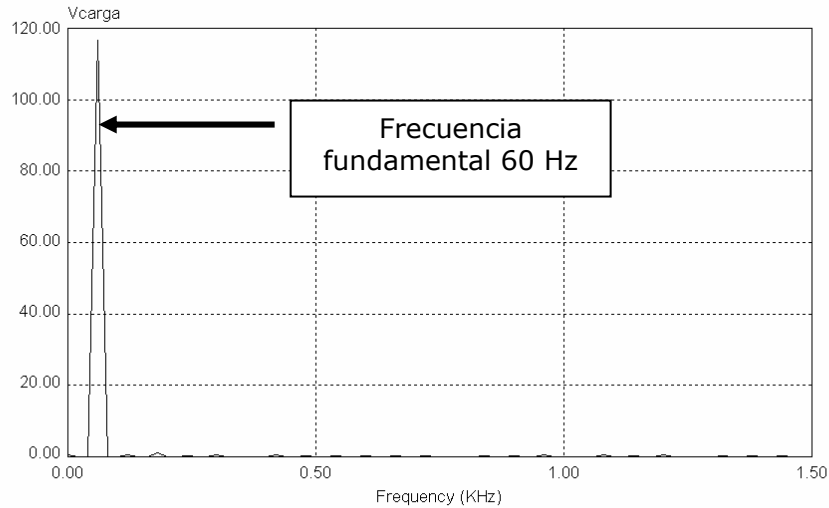


Figura 4.5. Componente fundamental del voltaje de salida.

Un factor importante para el buen funcionamiento del SMC, es el balance del voltaje en los capacitores flotantes. En la figura 4.6 se puede observar la evolución del voltaje en los capacitores flotantes C1 y C2. El voltaje de balance concuerda con la ecuación (2.2).

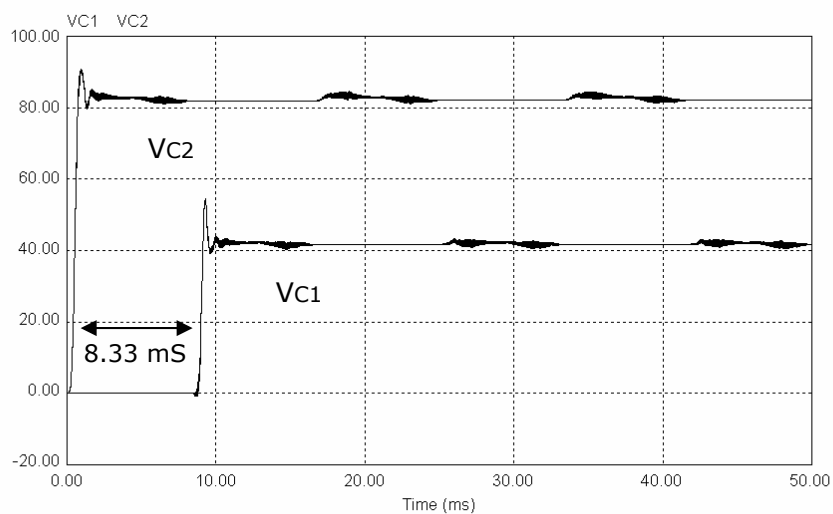


Figura 4.6. Voltaje en los capacitores flotantes C1 y C2.

Una segunda simulación fue realizada al prototipo. La carga resistiva fue modificada por una carga R-L (Resistiva-Inductiva). El valor de la inductancia igual a 7 mH, y la resistencia de 35 Ω . Esto con el fin de observar el comportamiento del voltaje de salida de un SMC bajo una carga inductiva. Los resultados obtenidos son ilustrados en las figuras 4.7 y 4.8, en las cuales se presentan tanto el voltaje y la corriente en la carga respectivamente.

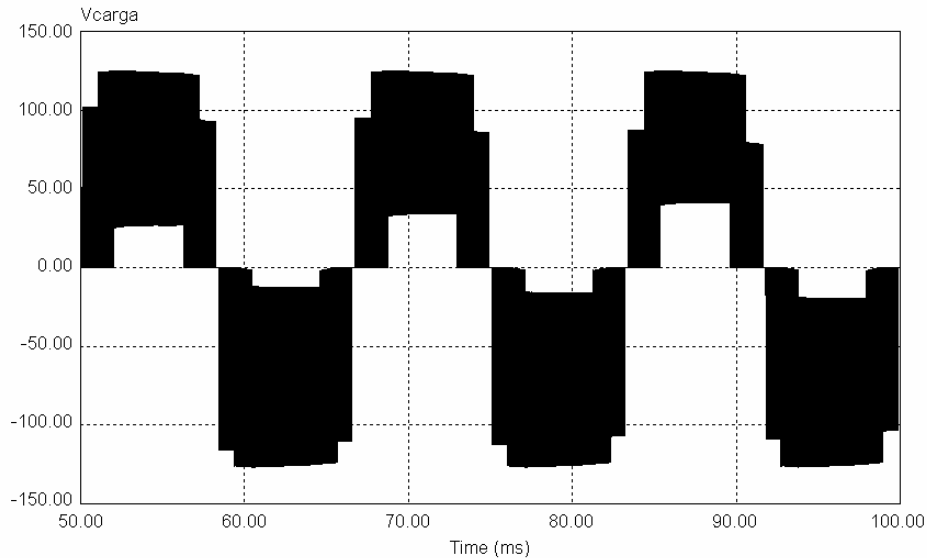


Figura 4.7. Voltaje de salida de un SMC de 3x2 con carga R-L.

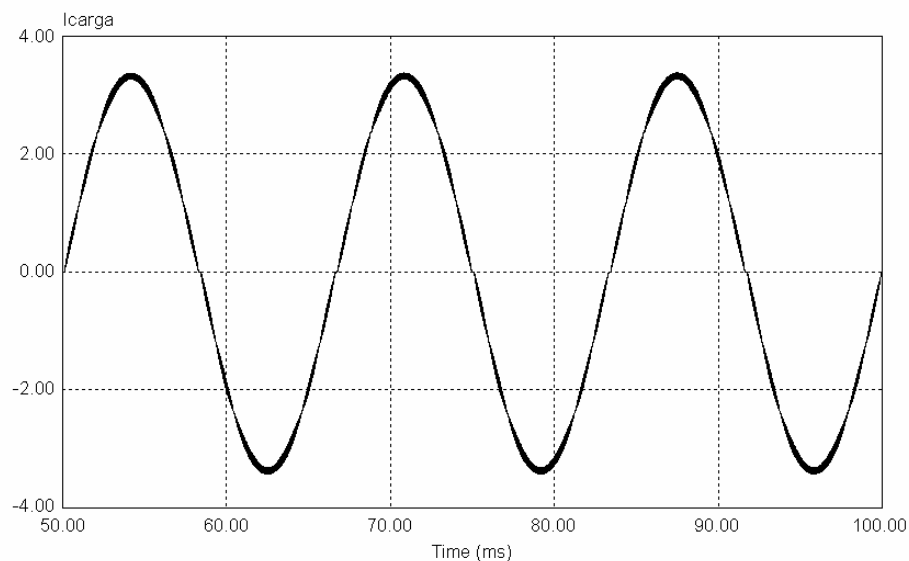


Figura 4.8 Corriente de salida de un SMC de 3x2 con carga R-L.

Se puede observar en la figura 4.7, que existe distorsión en el voltaje de salida. También, en la figura 4.9 se presenta el espectro del voltaje, donde se puede observar la presencia de un armónico significativo en el valor de la frecuencia de conmutación f_{sw} , ver 2.3.3. Este armónico puede eliminarse a través de la implementación de un filtro de balance.

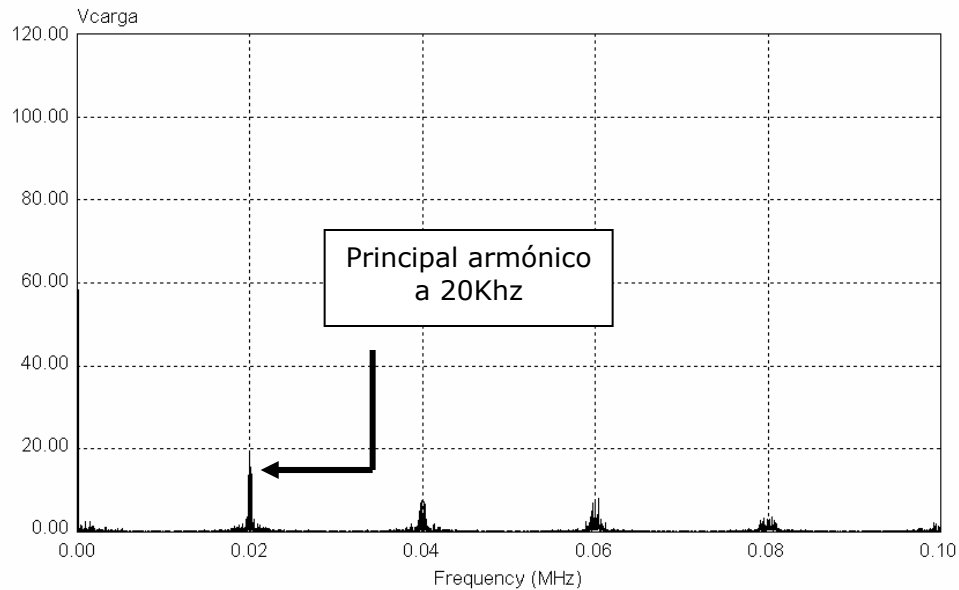


Figura 4.9. Espectro del voltaje en la carga bajo una carga R-L.

El filtro de balance deberá estar sintonizado a la frecuencia de conmutación f_{sw} para la eliminación de dicho armónico. Por lo tanto, al prototipo de la figura 4.1 se le ha agregado un filtro de balance a la salida como el de la figura 2.16. Este fue diseñado bajo las siguientes especificaciones:

- Factor de calidad $Q = 10$
- $F_o = 20$ Khz.

Dadas las especificaciones de diseño y basado con lo mencionado en la sección 2.3.3, el filtro RLC de balance determinado para esta aplicación es igual a:

- $R = 1 \text{ ohm}$.
- $L = 79.58 \text{ } \mu\text{H}$.
- $C = 795.7 \text{ nF}$.

En la figura 4.10 se puede observar la respuesta en frecuencia de la corriente en el filtro de balance. Dicho filtro presenta una baja impedancia para la frecuencia de conmutación f_{sw} , y sobre el resto del espectro de frecuencias presenta una alta impedancia, esto con el fin de que no presente un alto consumo de corriente.

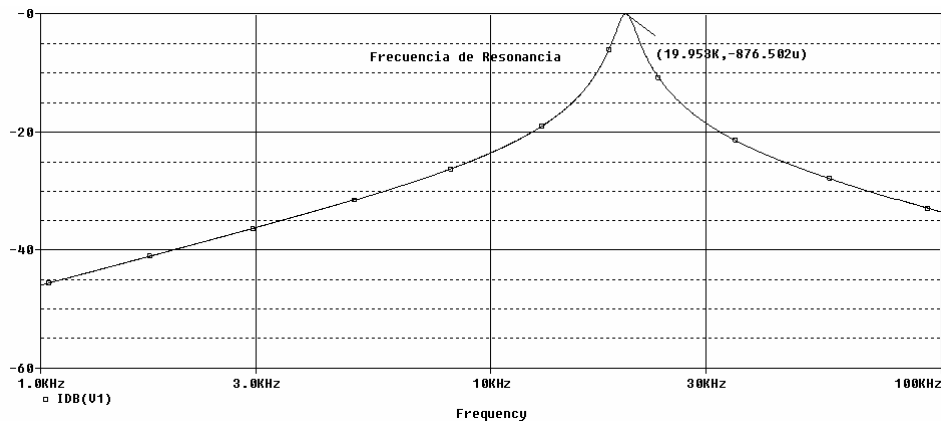


Figura 4.10. Respuesta en frecuencia de la corriente en el filtro de balance.

Al implementar el filtro de balance diseñado en el prototipo inicial, el resultado fue el esperado, el cual era la eliminación del efecto indeseable del armónico en f_{sw} sobre el voltaje de salida. En la figura 4.11 se observa el voltaje y la corriente en la carga, después de la implementación del filtro de balance.

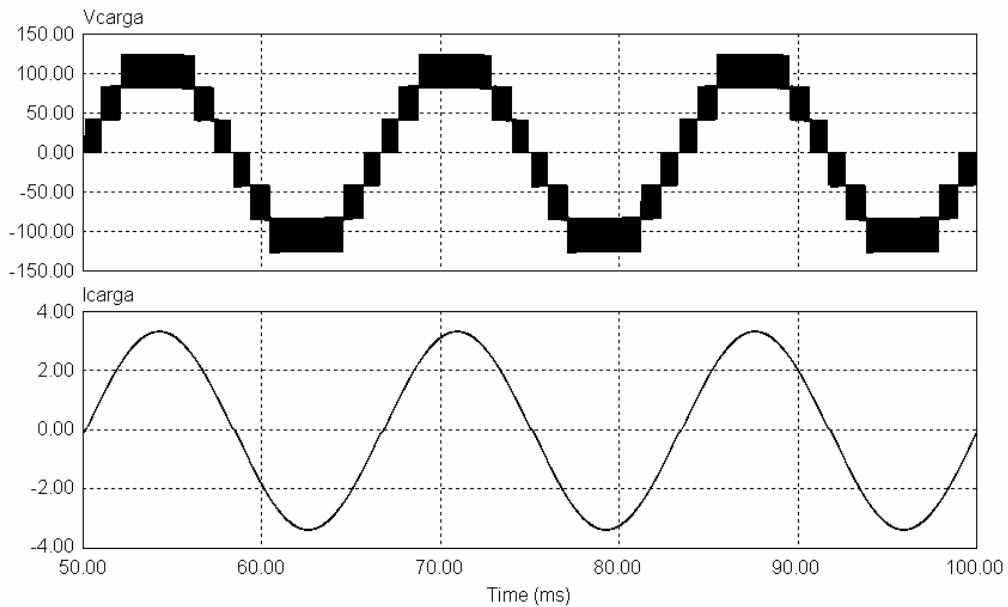


Figura 4.11. Voltaje (V_{carga}) y corriente (I_{carga}) en la carga con el filtro de balance.

También, al prototipo inicial se le agregó un filtro de salida como el mencionado en la sección 2.3.2, el cual consta de un inductor L_o y un capacitor C_o a la salida. La adición del filtro de salida y el filtro de balance al prototipo inicial se puede observar en la figura 4.12.

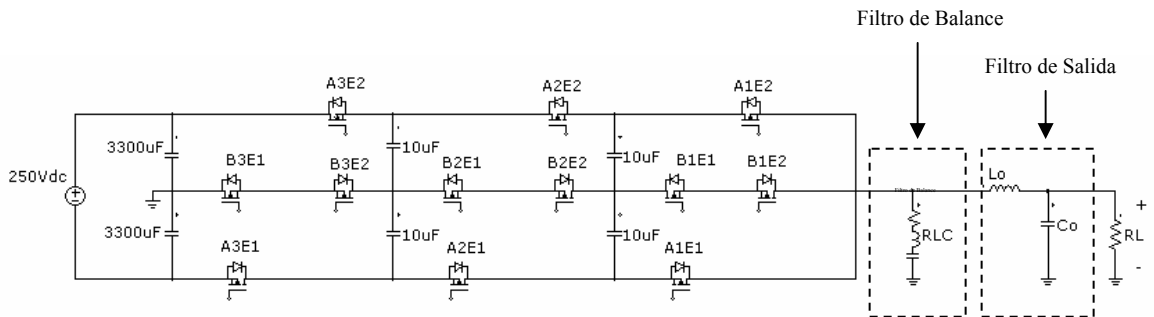


Figura 4.12. Adición del filtro de balance y filtro de salida al SMC de 3x2.

El diseño del filtro de salida está basado en las siguientes especificaciones de diseño:

- $E = 250 \text{ V}$
- $I_{max} = 3.5 \text{ A}$
- $r_1 = 0.01$
- $r_2 = 0.01$

A partir de las ecuaciones (2.23) y (2.24) se pueden obtener el valor de ΔI y ΔV_{ck} , con lo cual se tienen todos los parámetros necesarios para calcular el filtro de salida. Sustituyendo los parámetros necesarios en las ecuaciones (2.18) y (2.22) se pueden obtener los valores de L_o y C_o respectivamente, que para el caso del prototipo resultan:

- $L_o = 4.375 \text{ mH}$.
- $C_o = 33 \text{ nF}$.

En la figura 4.13 se presenta el voltaje y la corriente en la carga después de la implementación del circuito de la figura 4.12.

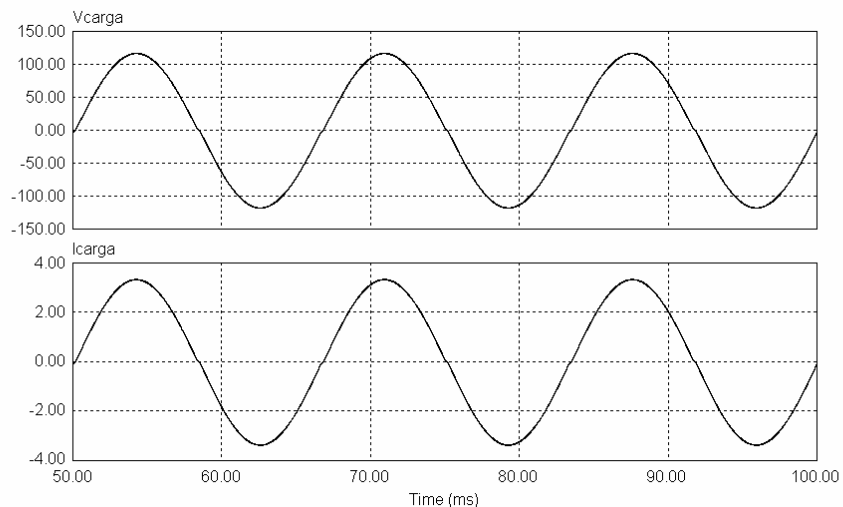


Figura 4.13. Voltaje y Corriente en la carga al implementar el filtro de salida.

4.2.2 Resultados experimentales de la implementación del Prototipo.

En esta sección se presentan los resultados de la implementación. El primer prototipo implementado es el mostrado en la figura 4.1, el cual contiene los parámetros presentados en la tabla 4.1.

En figura 4.14 se presenta el voltaje de salida con carga resistiva. Este está compuesto por siete niveles de voltaje tomando en cuenta el nivel de referencia de cero volts, con una frecuencia de 60 Hz, y una amplitud pico a pico de 250 Volts.

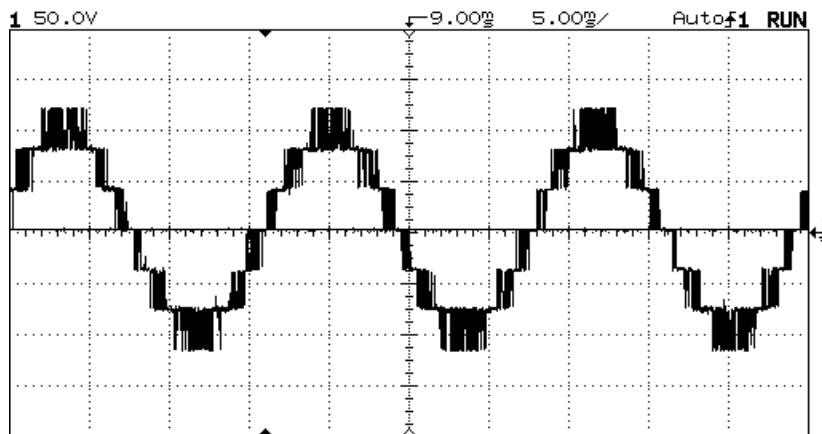


Figura 4.14. Voltaje de salida experimental de un SMC de 3x2 con carga resistiva. (50 Volts/Div., 5 msec. Time/Div.)

También, en la figura 4.15 se puede observar un solo periodo del voltaje de salida, observando los niveles de voltaje y su duración en el tiempo.

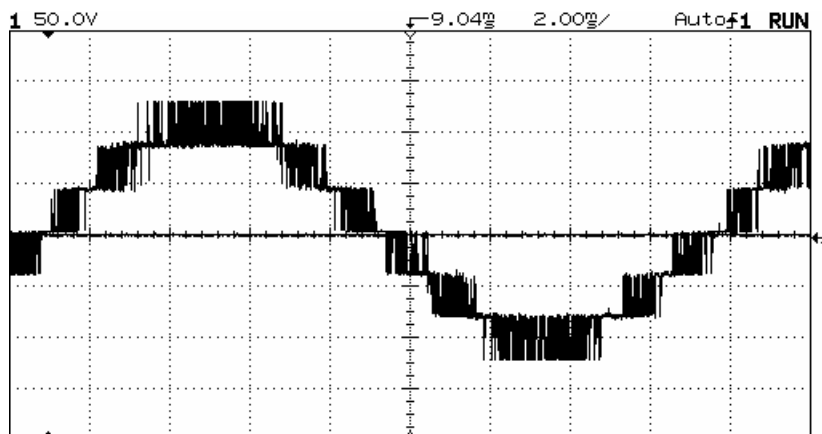


Figura 4.15. Visualización de un periodo de la señal de voltaje de salida de un SMC de 3x2 (Volts/Div. 50 V, Time/Div. 2 msec.).

La segunda prueba realizada al SMC de 3x2 fue la sustitución de la resistencia de carga por una carga inductiva. En este caso la carga esta formada por un motor de inducción. También, el voltaje de entrada fue modificado a 100 volts. En la figura 4.16 se muestra el voltaje de salida. Como se puede observar en la figura 4.16 el voltaje de salida presenta distorsión debida a la carga inductiva.

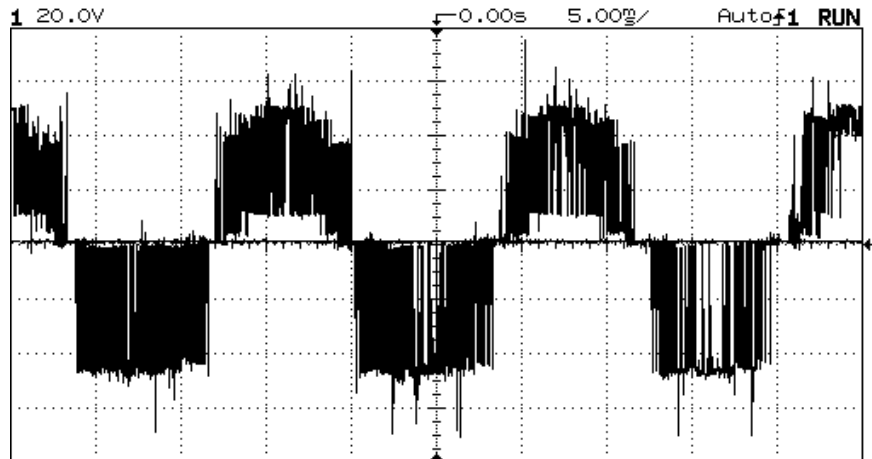
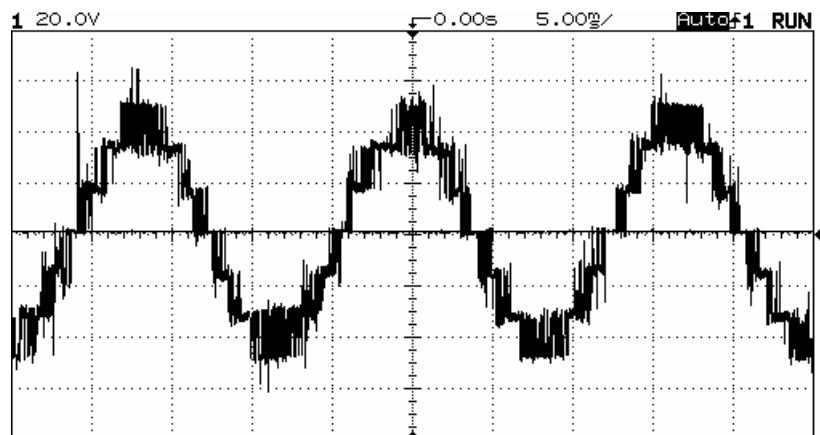


Figura 4.16. Voltaje de salida con carga inductiva.

Para eliminar la distorsión en el voltaje de salida, se implemento el filtro de balance diseñado en la sección 4.2.1. El filtro de balance esta sintonizado a la frecuencia de conmutación f_{sw} . La utilización de este filtro permite que la señal de salida recupere su forma inicial. En la figura 4.17 se muestra el voltaje de salida de un SMC de 3x2 con carga inductiva.



**Figura 4.17 Voltaje de salida de un SMC de 3x2 con el filtro de balance y carga inductiva.
(20 Volts/Div.)**

El último prototipo implementado es el mostrado en la figura 4.12 y el cual contiene los parámetros de la tabla 4.1. En donde se ha adicionado el filtro de balance y el de salida a la estructura SMC de 3x2. El filtro de salida esta formado por un inductor L_o de 4.5 mH y por un capacitor C_o de 33 nF. La figura 4.18 muestra el voltaje y la corriente de salida con carga resistiva.

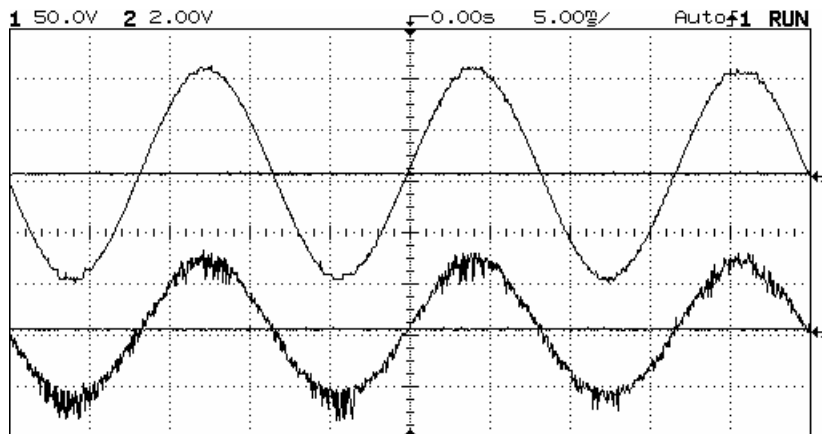


Figura 4.18. Voltaje y corriente de salida de un SMC de 3x2 con el filtro de salida y carga resistiva.
(Canal 1: 50 Volts/Div. Canal 2: 2 Amp/Div.).

Los valores obtenidos a la salida con la implementación del filtro de salida en la estructura SMC de 3x2 con carga resistiva son los siguientes:

- Corriente de salida: **$I_{rms} = 1.93 \text{ A}$.**
- Voltaje de salida: **$V_{rms} = 69.98 \text{ V}$.**

En donde la potencia de salida es igual a:

- Potencia de salida: **$P_{salida} = 134 \text{ Watts}$.**

La tabla 4.2 muestra las mediciones del voltaje y corriente rms de salida realizadas al SMC de 3x2 con carga resistiva. También, se puede observar la potencia de salida que es igual a 134 Watts y el factor de potencia de salida (Total PF) que es del 100%.

Summary Information			Voltage	Current
Frequency	59.81	RMS	69.98	1.93
Power		Peak	99.02	2.73
Watts	134.00	DC Offset	-0.20	-0.05
VA	134.00	Crest	1.41	1.42
Vars	9.00	THD Rms	1.06	1.56
Peak W	275.00	THD Fund	1.06	1.56
Phase	4° lead	HRMS	0.74	0.03
Total PF	1.00	KFactor		1.03
DPF	1.00			

Tabla 4.2 Mediciones realizadas al SMC de 3x2 final con carga resistiva.

Para determinar la eficiencia η del convertidor, es necesario determinar el voltaje y la corriente promedio de entrada para calcular la potencia entregada al convertidor. Los valores medidos de corriente y voltaje promedio de entrada son los siguientes:

- Corriente: $I_{ent} = 0.58 \text{ A}$.
- Voltaje: $V_{ent} = 250 \text{ V}$.

En donde la potencia de entrada es igual a:

- Potencia $P_{ent} = 145 \text{ Watts}$.

La eficiencia η del SMC de 3x2 con carga resistiva puede ser determinada por:

$$\eta \times 100\% = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{V_{rms} * I_{rms}}{V_{ent} * I_{ent}} \times 100\% = 93\%$$

También, como otro punto a evaluar al prototipo de la figura 4.12 es el comportamiento del voltaje de salida bajo una carga inductiva. Para fines de evaluación el voltaje de entrada V_{ent} se redujo a 100 volts. La carga utilizada para este caso fue un motor de inducción. La figura 4.19 muestra el voltaje y la corriente de salida del SMC de 3x2 con carga inductiva.

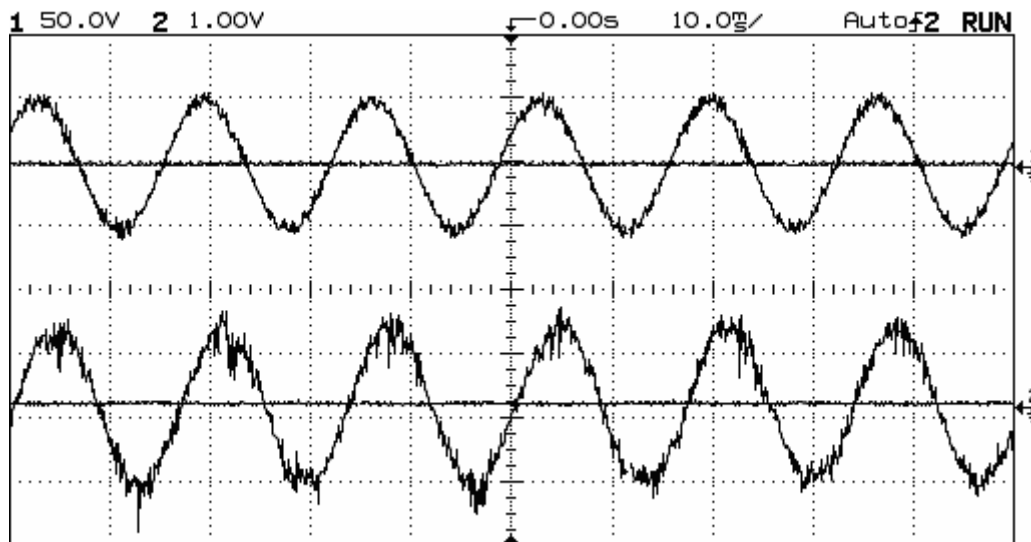


Figura 4.19. Voltaje y corriente de salida de un SMC de 3x2 con carga inductiva.
(Canal 1: 50 Volts/Div. Canal 2: 1 Amp/Div.)

En la tabla 4.3 se puede observar las mediciones realizadas del voltaje y la corriente rms de salida del SMC con carga inductiva. También, se presenta el factor de potencia de salida que es igual a 79% y la potencia de salida que es igual a 19 Watts. También, las mediciones indican un defasamiento de la corriente de salida con respecto al voltaje de salida de 38° , el cual es provocado por la carga inductiva.

Summary Information			Voltage	Current
Frequency	59.81	RMS	27.62	0.92
Power		Peak	39.71	1.31
Watts	19.00	DC Offset	-0.33	-0.05
VA	25.00	Crest	1.44	1.42
Vars	15.00	THD Rms	2.47	5.41
Peak W	49.00	THD Fund	2.47	5.42
Phase	38° lag	HRMS	0.68	0.05
Total PF	0.79	KFactor		1.22
DPF	0.79			

Tabla 4.3 Mediciones realizadas al SMC de 3x2 final con carga inductiva.

Para calcular la eficiencia del convertidor con carga inductiva se tiene que el voltaje y corriente de entrada son igual a:

$$V_{ent} = 100 \text{ volts.}$$

$$I_{ent} = 0.215 \text{ A.}$$

Tomando el voltaje y corriente rms de salida así como el ángulo de defasamiento de la tabla 4.3 se tiene que la eficiencia es igual a:

$$\eta \times 100\% = \frac{V_{salida} * I_{salida} * \cos(38^\circ)}{V_{ent} * I_{ent}} * 100\% = 93\%$$

Finalmente, se puede concluir que la topología de Convertidores multicelda apilables es una buena elección para la implementación de convertidores CD-CA de mediana y alta potencia, con una alta eficiencia y una baja distorsión del voltaje de salida.