

CAPÍTULO VI

Diseño y simulación de los convertidores de potencia

6.1.- Introducción

Como se mencionó en el objetivo general, se necesita un sistema fotovoltaico capaz de generar energía eléctrica con una señal sinusoidal a 60 Hz y un voltaje de 120 V_{rms} para una carga de 200 W. En el capítulo 5 se realizó el diseño fotovoltaico, el cual involucra la parte de generación (Paneles solares), y la acumulación de energía (Baterías). Por lo que la siguiente etapa del sistema fotovoltaico es el convertir la energía de los paneles solares en energía para ser consumida.

Los paneles solares al igual que el acumulador entregan un voltaje nominal de 12 volts de corriente directa, por lo que esta energía no es suficiente para alimentar lámparas fluorescentes de uso comercial. Por lo que es indispensable utilizar convertidores de potencia capaces de transformar la energía.

6.2. – Diseño de los convertidores elevadores

Para el primer diseño se implementó un convertidor elevador en dos etapas, el cual consiste de dos convertidores elevadores conectados en serie. Para este diseño se utilizaron las fórmulas de la topología elevadora del capítulo 3.

Se necesita un diseño donde el primer convertidor elevador entregue un voltaje de salida (V_o) de 48 Volts, con una potencia en carga de 200 Watts con un voltaje de entrada (V_s) de 12 Volts, a una frecuencia de conmutación a 20KHz.

- Para calcular el ciclo de trabajo del interruptor se despeja la ecuación del voltaje de salida:

$$V_o = \frac{V_s}{1-\alpha} \quad (39)$$

donde el ciclo de trabajo (α) es:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{V_s}{V_o}\right) = 1 - \left(\frac{12V}{48V}\right) = 0.75 \quad (40)$$

- Para calcular la resistencia en la carga se despeja la ecuación de la potencia de salida:

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} \quad (41)$$

donde la resistencia en la carga de es:

$$R = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{(48)^2}{200} = 11.52 \Omega \quad (42)$$

- El inductor se calcula teniendo en cuenta el rizo que se desee, para este caso el rizo debe ser de 0.5 Amperes, donde la fórmula para calcular el rizo es:

$$(\Delta i_L) = \frac{\alpha T V_S}{L} \quad (43)$$

donde T es el periodo, despejando L tenemos el inductor:

$$L = \frac{\alpha V_S}{f(\Delta i_L)} = \frac{0.75 * 12}{20 \text{KHz} * 0.5} = 900 \mu H \quad (44)$$

- La corriente media en el inductor se calcula con la siguiente ecuación:

$$I_L = \frac{V_S}{(1-\alpha)^2 R} \quad (45)$$

donde la corriente media es:

$$I_L = \frac{12}{(1-0.75)^2 * 11.52} = 16.667 \text{ Amp} \quad (46)$$

- Las corrientes máximas y mínimas están dadas por las ecuaciones:

$$I_{MAX} = \frac{V_O}{(1-\alpha)R} + \frac{\alpha V_S}{2Lf} \quad (47)$$

$$I_{min} = \frac{V_O}{(1-\alpha)R} - \frac{\alpha V_S}{2Lf} \quad (48)$$

Las corrientes máximas y mínimas en el inductor:

$$I_{MAX} = \frac{48}{(1-0.75)*11.52} + \frac{0.75*12}{2*900\mu H*20KHz} = 16.9167 \text{ Amp} \quad (49)$$

$$I_{min} = \frac{48}{(1-0.75)*11.52} - \frac{0.75*12}{2*900\mu H*20KHz} = 16.4167 \text{ Amp} \quad (50)$$

- Para calcular el rizo en el voltaje de salida se da por la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{\alpha}{RCf} \quad (51)$$

Se establece un rizo del 0.25% de salida, por lo que el capacitor se calcula de la ecuación anterior:

$$C = \frac{\alpha}{\left(\frac{\Delta V_O}{V_O}\right)Rf} = \frac{0.75}{0.25\%*11.52*20KHz} = 1.302mF \quad (52)$$

- La corriente de salida (I_O) se obtiene despejando (I_O) de la siguiente ecuación:

$$P_O = V_O I_O \quad (53)$$

donde la corriente de salida del primer convertidor elevador es:

$$I_O = \frac{P_O}{V_O} = \frac{200}{48} = 4.1667 \text{ Amp} \quad (54)$$

Con el diseño del primer convertidor elevador, se prosiguió al diseño del segundo convertidor, donde se buscó un voltaje de salida (V_{O2}) de 180 volts, con voltaje de entrada de 48 volts para una potencia en carga de 200 Watts, a 20 KHz de frecuencia de conmutación.

- El ciclo de trabajo para este convertidor es de:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{V_S}{V_O}\right) = 1 - \left(\frac{48V}{180V}\right) = 0.7333 \quad (55)$$

- La resistencia en la carga para una potencia de 200 Watts es de:

$$R = \frac{V_O^2}{P_O} = \frac{(180)^2}{200} = 162 \Omega \quad (56)$$

- El rizo en el inductor debe ser de 0.6, por lo que la inductancia es de:

$$L = \frac{\alpha V_S}{f(\Delta i_L)} = \frac{0.733*48}{20KHz*0.6} = 2.933mH \quad (57)$$

- La corriente media en el inductor es de:

$$I_L = \frac{V_S}{(1-\alpha)^2 R} = \frac{48}{(1-0.733)^2 * 162} = 4.156 Amp \quad (58)$$

- Las corrientes máximas y mínimas en el inductor son:

$$I_{MAX} = \frac{V_O}{(1-\alpha)R} + \frac{\alpha V_S}{2Lf} = \frac{180}{(1-0.733)*162} + \frac{0.733*48}{2*2.933mH*20KHz} = 4.466 \text{ Amp} \quad (59)$$

$$I_{min} = \frac{V_O}{(1-\alpha)R} - \frac{\alpha V_S}{2Lf} = \frac{180}{(1-0.733)*162} - \frac{0.733*48}{2*2.933mH*20KHz} = 3.866 \text{ Amp} \quad (60)$$

- Se desea que el rizo del voltaje de salida sea de 0.5 volts por lo que el capacitor del convertidor es:

$$C = \frac{\alpha V_O}{Rf\Delta V_O} = \frac{0.733*180}{162*20KHz*0.5} = 81.47\mu F \quad (61)$$

- La corriente de salida para una potencia de 200 Watts es:

$$I_O = \frac{P_O}{V_O} = \frac{200}{180} = 1.111 \text{ Amp} \quad (62)$$

6.3. – Simulación de los convertidores elevadores

Al concluir con el diseño de los convertidores elevadores se prosiguió a la simulación de los circuitos con el propósito de verificar si los cálculos fueron los correctos. Las simulaciones se hicieron con el Software PSIM, ya que es un programa especial para simular circuitos de potencia.

Primero se simuló el primer convertidor, en la figura 6.1 se muestra el circuito del primer convertidor elevador.

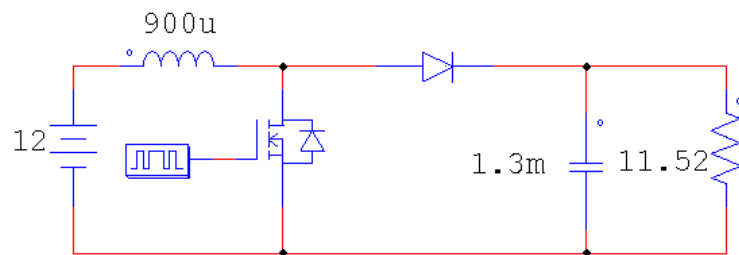


Figura 6.1. – Primer convertidor elevador

En la figura 6.2 se muestra el voltaje de entrada (V_s) de 12 volts y el voltaje de salida (V_o) de 48 volts en el primer convertidor elevador.

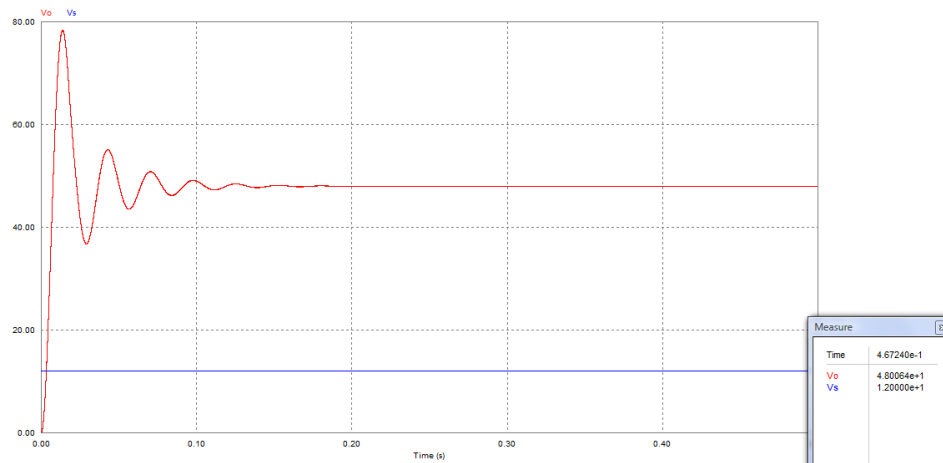


Figura 6.2.- Voltajes de entrada y salida del primer convertidor elevador

En la tabla 6.1 se muestra la potencia de entra y la potencia de salida del convertidor elevador de la primera etapa.

Tabla 6.1.- Potencias de convertidor elevador primera etapa

Potencia de entrada	200.095 W
Potencia de salida	199.95 W

De acuerdo a la ecuación (64), la eficiencia del primer convertidor elevador es:

$$\eta = \frac{Potencia_{Salida}}{Potencia_{Entrada}} \times 100 = \frac{199.95}{200.095} \times 100 = 99.9275\% \quad (63)$$

Las formas de onda de voltaje en inductor, interruptor y diodo del convertidor elevador de la primera etapa se muestran en la figura 6.3.

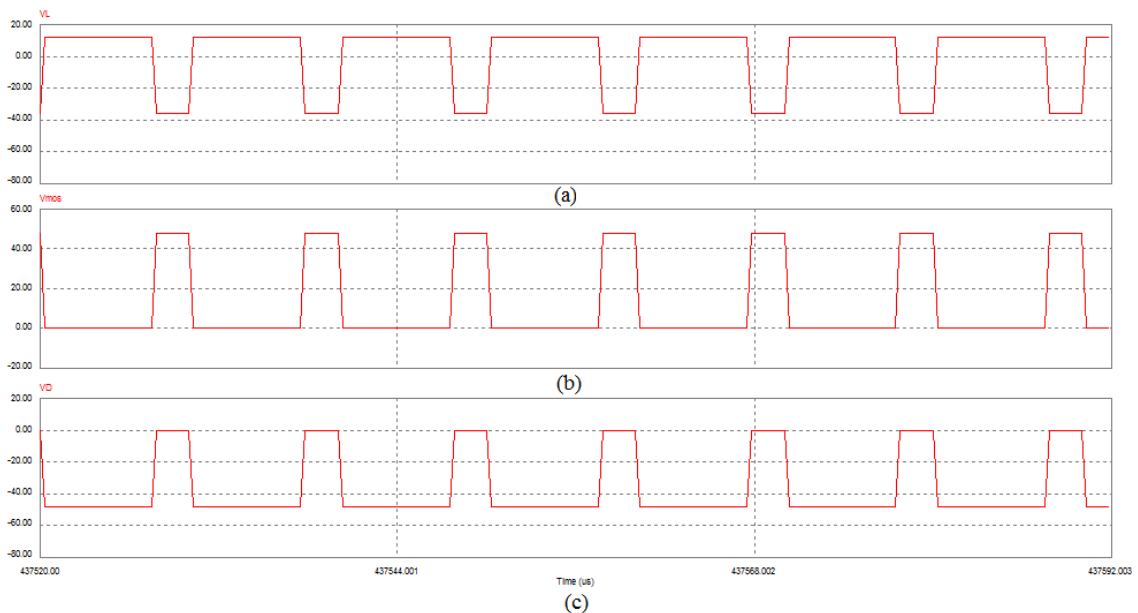


Figura 6.3.- formas de onda de voltaje del elevador primera etapa: (a) inductor, (b) interruptor, (c) diodo.

Tabla 6.2.- Voltaje RMS y Voltaje medio de los componentes del convertidor primera etapa

	Voltaje medio	Voltaje RMS
Inductor (L)	0 V	21.5 V
Interruptor (S)	11.8 V	24.54 V
Diodo (D)	-36.13 V	43 V

En la tabla 6.2 se muestran los voltajes obtenidos de la simulación del primer convertidor elevador.

La corriente que pasa en los componentes del primer circuito elevador, tanto en el inductor, interruptor y diodo se muestra en la figura 6.4.

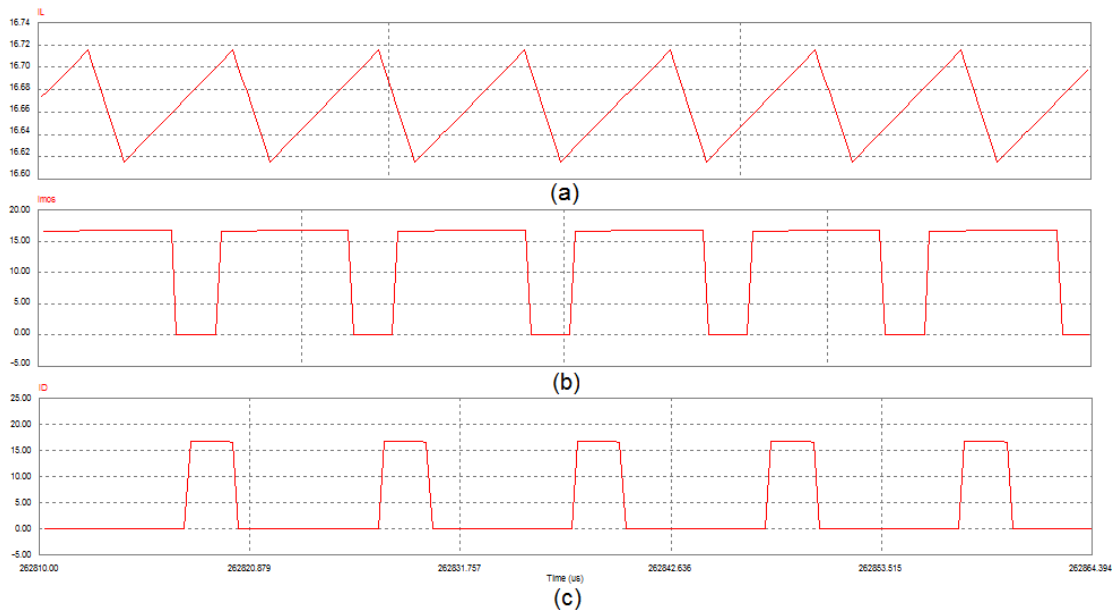


Figura 6.4.- Corriente en los componentes del primer circuito elevador: (a) inductor, (b) interruptor, (c) diodo

Las corrientes eficaces y las corrientes medias de los componentes del primer convertidor elevador se muestran en la tabla 6.3

Tabla 6.3.- Corriente RMS y media de los componentes de convertidor primera etapa

	Corriente media	Corriente RMS
Inductor (L)	16.65 A	16.65 A
Interruptor (S)	12.49 A	14.42 A
Diodo (D)	4.20 A	8.36 A

La figura 6.5 muestra el circuito de la segunda etapa, el cual es un convertidor elevador. De la misma manera se simuló para comprobar los cálculos realizados previamente.

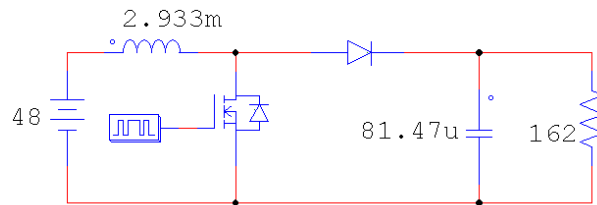


Figura 6.5.- Circuito elevador segunda etapa.

Se observa en la figura 6.6 que el voltaje de salida (V_o) en el convertidor elevador de la segunda etapa es de 180 volts con un voltaje de entrada (V_s) de 48 volts.

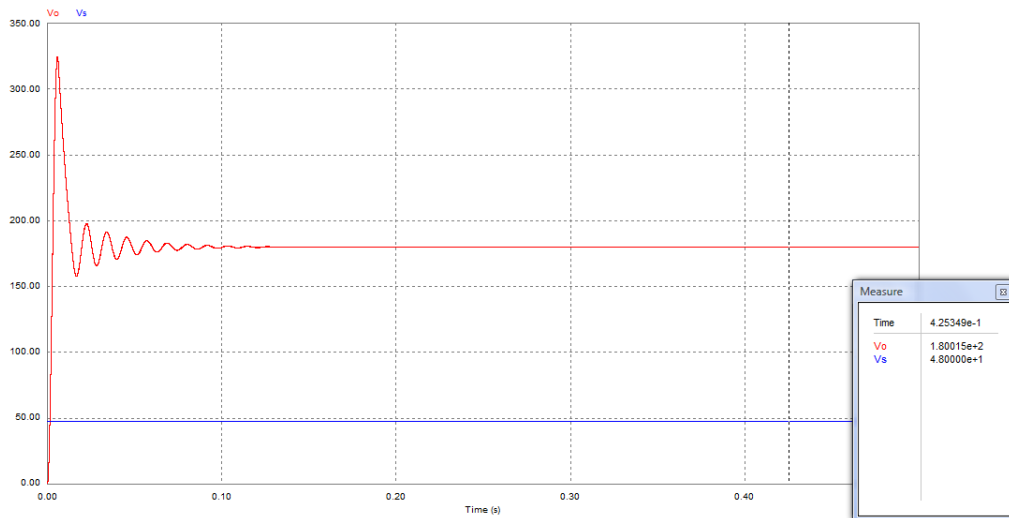


Figura 6.6.- Voltaje de entrada y salida de la segunda etapa elevadora

Se puede apreciar en la tabla 6.4 la potencia de entrada y potencia de salida del segundo convertidor elevador.

Tabla 6.4.- Potencias en el convertidor elevador segunda etapa

Potencia de entrada	200.029 W
Potencia de salida	199.99 W

Por lo que la eficiencia en el segundo convertidor elevador es de:

$$\eta = \frac{199.99}{200.029} \times 100 = 99.98\% \quad (64)$$

El voltaje en el inductor de la segunda etapa elevadora se puede ver en la figura 6.7, así como los voltajes en el interruptor y en el diodo.

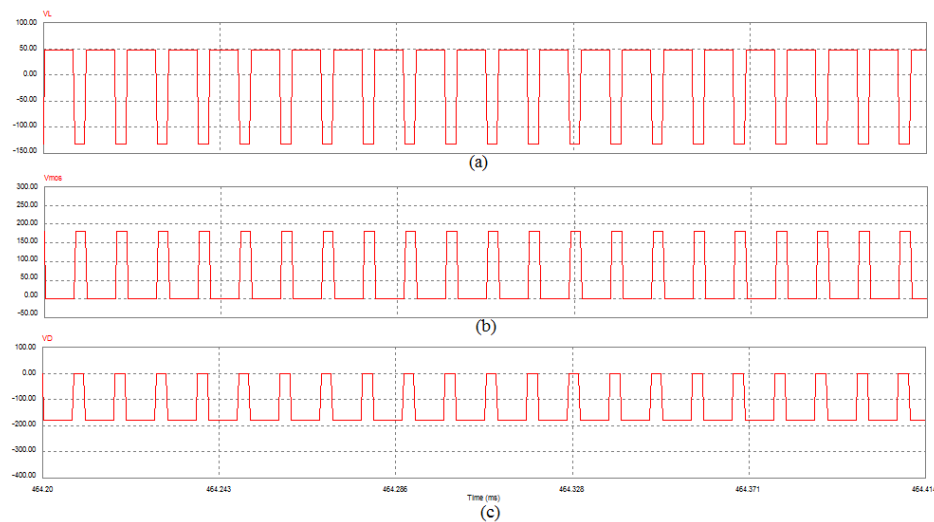


Figura 6.7.- Voltajes en componentes del segundo elevador: (a) inductor, (b) interruptor, (c) diodo

En la figura 6.8 se observan las formas de onda de corriente del inductor, interruptor y diodo.

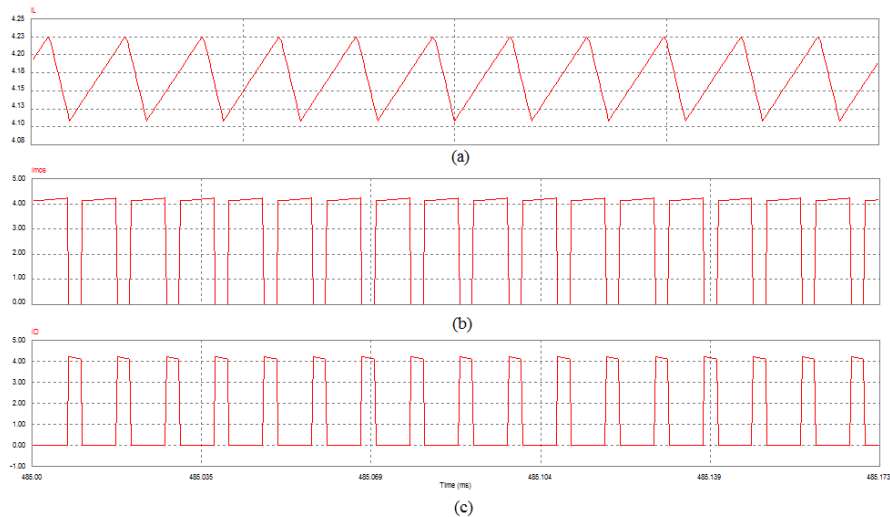


Figura 6.8.- Corriente en (a) inductor, (b) interruptor y (c) diodo del convertidor elevador segunda etapa

6.4.- Diseño y simulación del inversor

Como se dijo en el Capítulo 4 un inversor es un convertidor de potencia que transforma una corriente de directa en una alterna. Para el sistema fotovoltaico se necesita una señal de corriente alterna sinusoidal para alimentar una carga de lámparas fluorescentes, por lo que se implementó un inversor de onda completa con modulación de ancho de pulsos sinusoidal unipolar.

- Para la técnica de SPWM unipolar se compararon dos señales, una señal de referencia a 60 Hz sinusoidal y una señal portadora a 6KHz triangular.

- El índice de modulación de amplitud esta dado por la siguiente ecuación:

$$m_a = \frac{V_{m,referencia}}{V_{m,portadora}} = \frac{V_{m, seno}}{V_{m, tri}} \quad (65)$$

- Donde sí $m_a \leq 1$, la amplitud de la señal de salida ($V1$) es linealmente proporcional a m_a . Por lo que:

$$V1 = m_a V_{CC} \quad (66)$$

- Si el voltaje deseado son 120 Vrms:

$$V_{RMS} = \frac{V1}{\sqrt{2}} \quad (67)$$

$$V1 = 120 V_{RMS} * \sqrt{2} = 169.70 \text{ Volts} \quad (68)$$

- Conociendo la amplitud de la señal de salida ($V1$) y teniendo el voltaje de entrada (V_{CC}), se puede calcular el índice de modulación de amplitud m_a .

$$m_a = \frac{V1}{V_{CC}} = \frac{169.70}{180} = 0.9428 \quad (69)$$

Conociendo este índice de modulación se prosiguió a la simulación del inversor en puente completo, con el control PWM sinusoidal unipolar. En la figura 6.9 se muestra el circuito inversor sin filtro de salida.

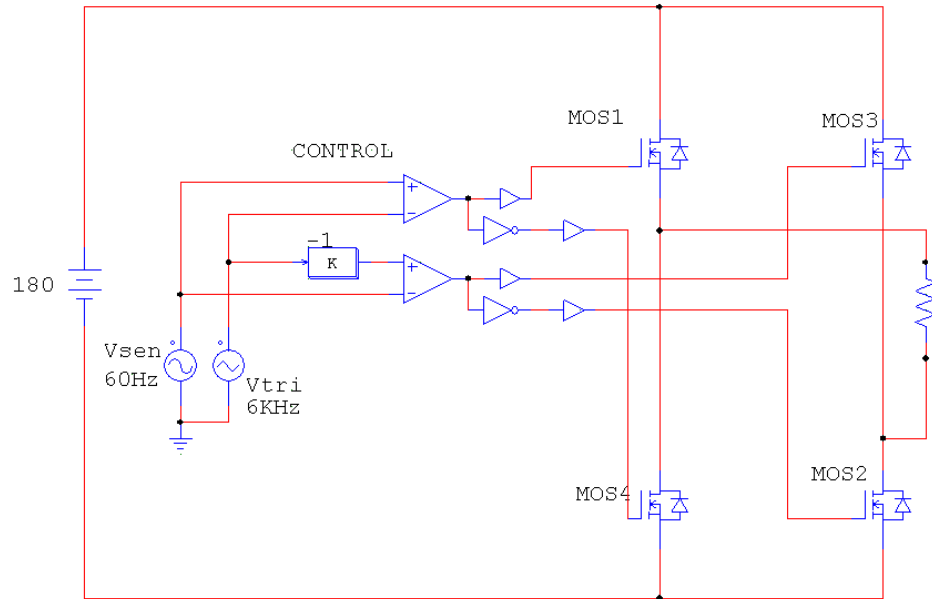


Figura 6.9.- Circuito inversor en puente completo sin filtro.

La señal de referencia (V_{sen}) y la señal portadora (V_{tri}) se muestran en la figura 6.10.

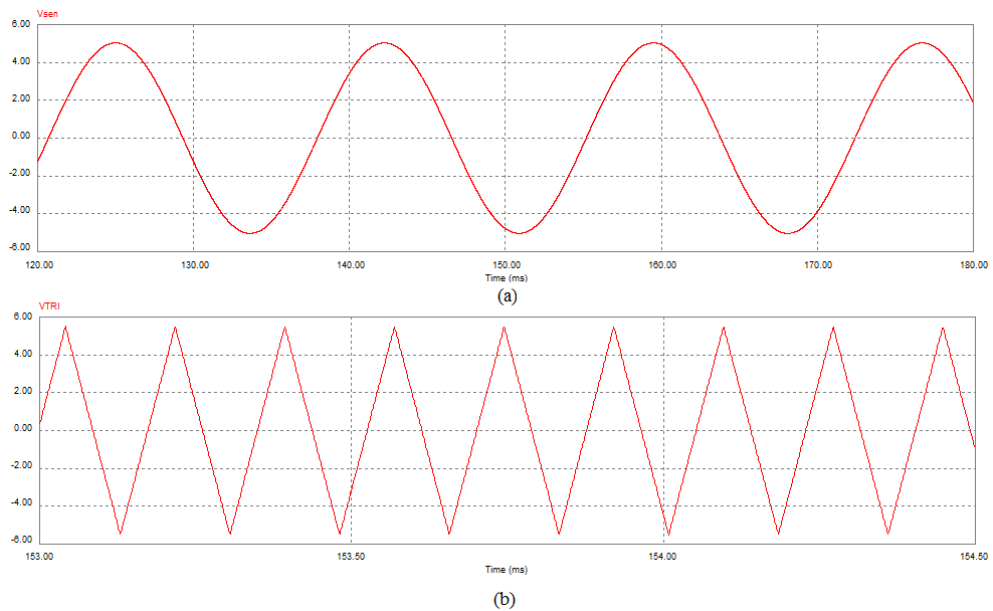


Figura 6.10.- Señales de modulación. (a) Señal sinusoidal a 60 Hz, (b) señal triangular a 6KHz

La conmutación en los interruptores (MOS4 y MOS2) como el voltaje de salida en el inversor sin filtro, se muestran en la figura 6.11.

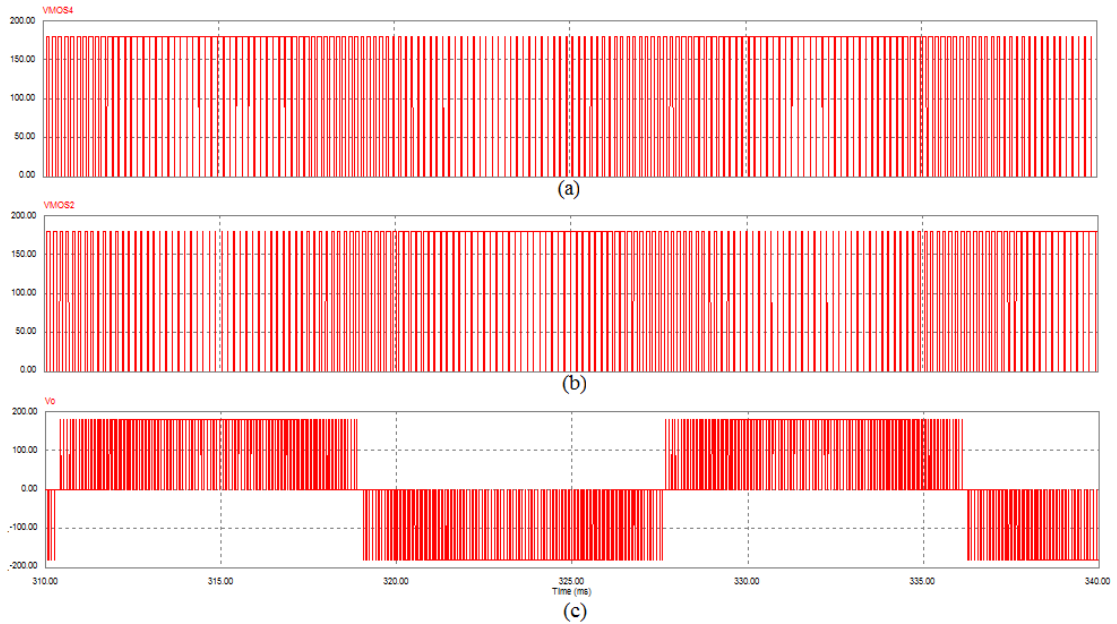


Figura 6.11.- Señales de conmutación y señal de salida. (a) Interruptor 4, (b) interruptor 2, (c) Voltaje en carga sin filtro.

Para conseguir una señal sinusoidal en la salida es necesario colocar un filtro pasa baja para eliminar los armónicos no deseados, este filtro sólo deja pasar la componente fundamental e impide el paso del resto de las componentes armónicas. Para esto se debe de conocer el índice de modulación de frecuencia m_f :

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{seno}} = \frac{6,000 \text{ Hz}}{60 \text{ Hz}} = 100 \quad (70)$$

Los armónicos en la salida comienzan aproximadamente a $2m_f$, y es recomendable que la m_f sea un entero par [5]. En este caso el índice de modulación de frecuencia es de 100.

El filtro pasa baja consta de un inductor y un capacitor, en la figura 6.12 se muestra este filtro.

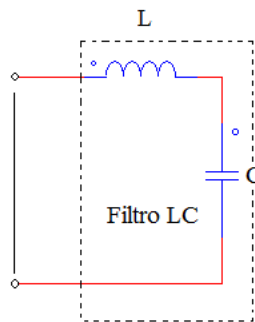


Figura 6.12.-Filtro pasa baja LC

Ya que la respuesta en frecuencia del filtro se expresa en términos de ancho de banda. Se eligió el factor de calidad (Q) con un valor de 2.47, para eliminar el 3°, 4° y 5° armónico [5].

Para calcular los valores del inductor y capacitor del filtro se utiliza la ecuación del factor de calidad:

$$Q = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (71)$$

Donde la resistencia en la carga para 200 Watts es de 68Ω , y se cuenta con un capacitor de alta frecuencia de $10\mu\text{F}$, por lo que el inductor es de:

$$L = \left(\frac{R}{Q}\right)^2 * C = \left(\frac{68}{2.47}\right)^2 * 10\mu F = 7.57mH \quad (72)$$

En la figura 6.13 se muestra el inversor en puente completo con el filtro de salida y en la figura 6.14 se muestra la señal de salida filtrada en donde se puede observar la sinusoidal deseada a 60Hz.

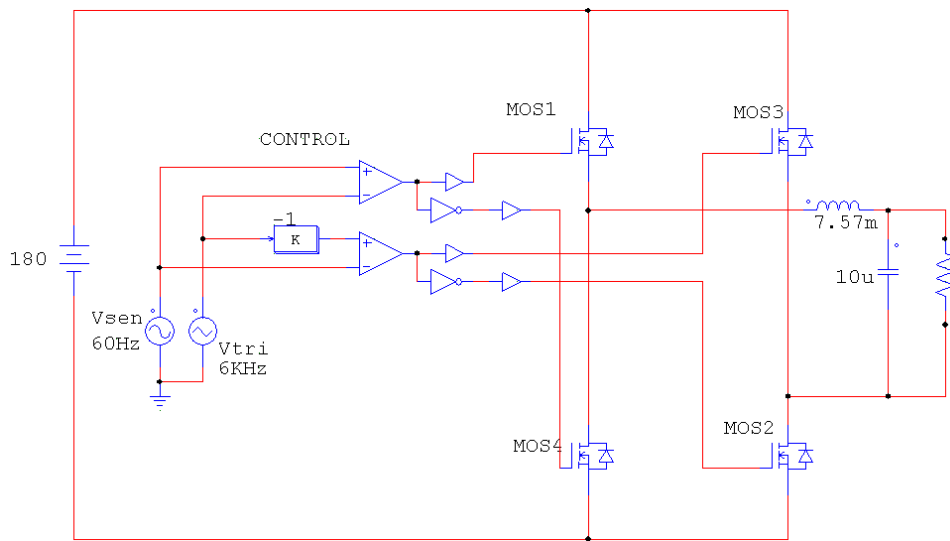


Figura 6.13.- Circuito inversor en puente completo con filtro pasa baja.

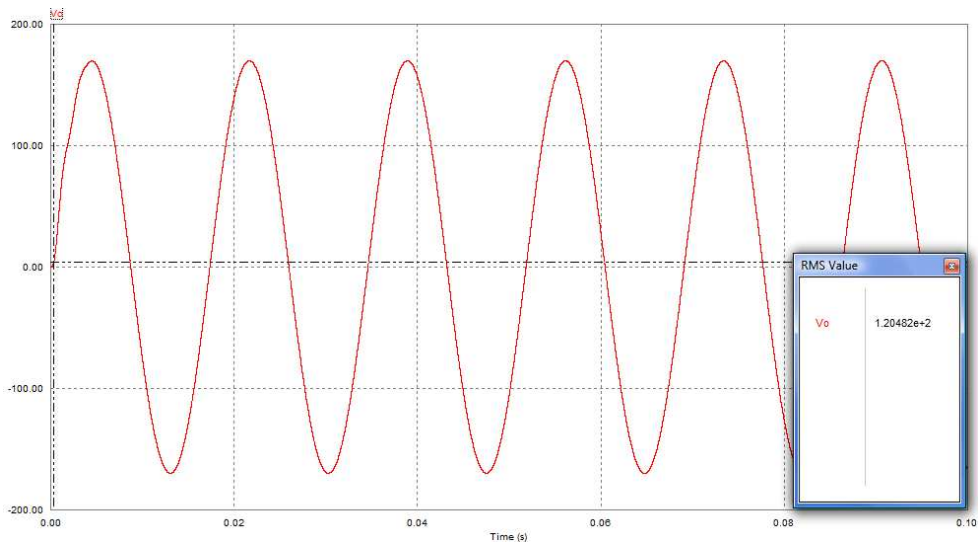


Figura 6.14.- Señal sinusoidal a 60Hz con 120Vrms de salida

La potencia de entrada y de salida del convertidor inversor se muestra en la tabla 6.5.

Tabla 6.5.- Potencias del convertidor inversor

Potencia de entrada	200.90 W
Potencia de salida	200.87 W

La eficiencia del convertidor inversor en la simulación es de:

$$\eta = \frac{200.87}{200.90} \times 100 = 99.98\% \quad (73)$$

Al finalizar con las simulaciones de cada convertidor, se comprobó si todo el sistema funciona correctamente, así que se juntaron los tres circuitos y se simularon en conjunto para ver la señal de salida. La figura 6.15 muestra el circuito inversor elevador.

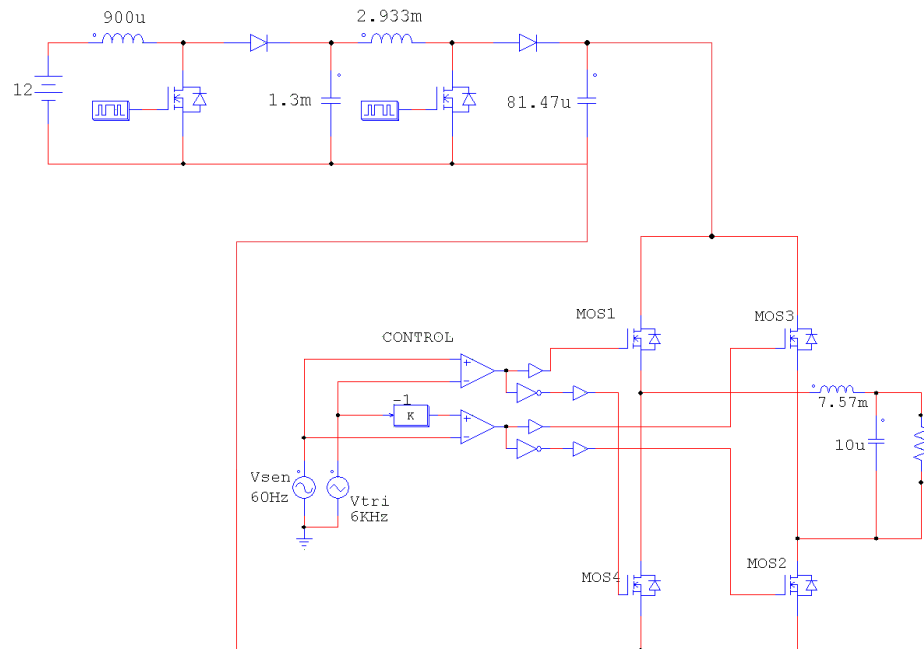


Figura 6.15.- Convertidor elevador en dos etapas e inversor de puente completo

En la figura 6.16 se muestran los voltajes de salida de cada convertidor elevador y del inversor con un voltaje de salida sinusoidal.

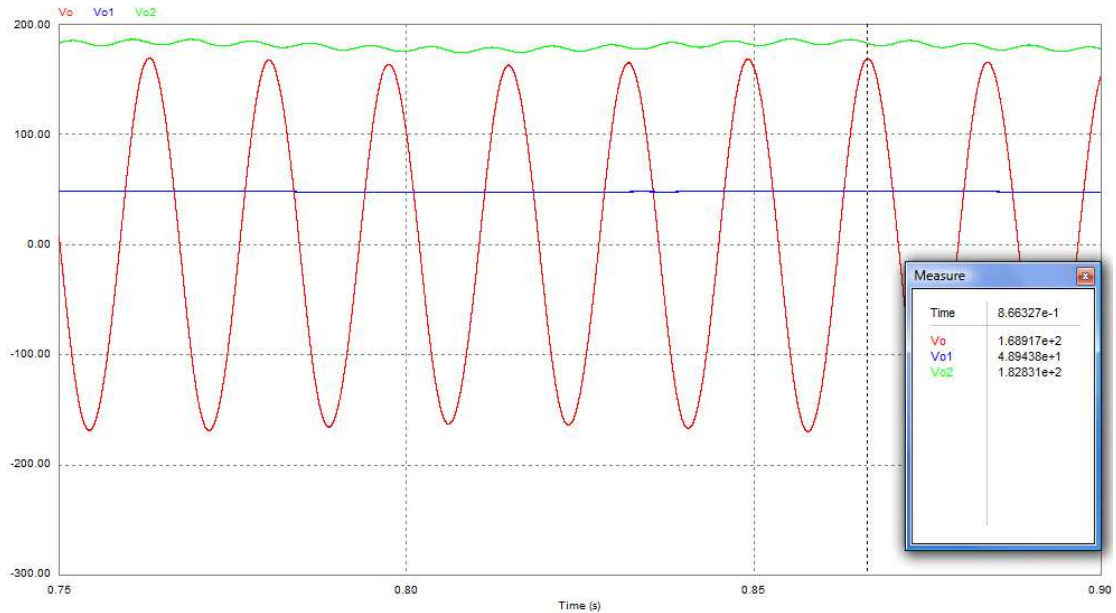


Figura 6.16.- Voltajes de salida en los convertidores de potencia.

Se puede observar en la tabla 6.6 la potencia de entrada del primer convertidor, así como la potencia de salida en el inversor.

Tabla 6.6.- Potencia de entrada y potencia de salida del convertidor -inversor

Potencia de entrada	203.54
Potencia de salida	187.06

Por lo tanto la eficiencia de todo el circuito elevador- inversor en la simulación es de:

$$\eta = \frac{187.06}{203.54} \times 100 = 91.90\% \quad (74)$$

Podemos observar que la eficiencia de todo el circuito elevador-inversor es del 91.90%, mientras que en las demás simulaciones la eficiencia por separado de cada convertidor fue del 99%. Esto quiere decir que al juntar todos los circuitos se producen pérdidas en la conmutación y en los componentes.

Con los diseños de los convertidores de potencia y el diseño del capítulo 5 se tiene completo el sistema fotovoltaico, el cual consiste del bloque generador (paneles solares), acumulación de energía (baterías) y el sistema de transformación de energía el cual consta de los convertidores elevadores e inversor. Los convertidores fueron diseñados para soportar la carga de 200 Watts, para la iluminación con las lámparas fluorescentes presentadas en el capítulo anterior. En el siguiente capítulo se implementará lo calculado en los capítulos 5 y 6, además se harán las pruebas de todo el sistema.