

## CAPÍTULO VII

### Implementaciones y resultados

#### 7.1.- Implementación de los convertidores elevadores

Al finalizar con las simulaciones se prosiguió a la construcción de los convertidores de potencia. Se implementó el primer convertidor elevador con los componentes de los resultados de los cálculos del Capítulo 6.

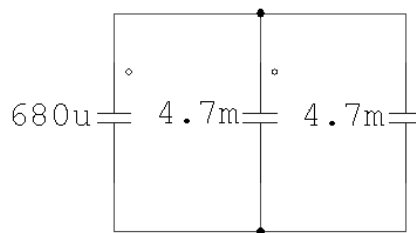
Según los cálculos del convertidor elevador primera etapa, se necesita un inductor de 900  $\mu\text{H}$  conmutando a 20KHz, con una corriente media de 16.667 amperes. Debido a la alta frecuencia se escogió un núcleo de ferrita, ya que es un núcleo que trabaja con altas frecuencias. Los cálculos para determinar el número de vueltas y tipo de núcleo se muestran en el apéndice B.

En la figura 7.1 se muestra el inductor que se utiliza para el convertidor elevador de la primera etapa.



**Figura 7.1.**-Inductor de 900  $\mu$ H implementado en la primera etapa elevadora

Para estabilizar el voltaje de salida en el primer convertidor, se hizo un arreglo de capacitores conectados en paralelo, con el fin de dividir la corriente y así asegurar un voltaje de salida constante. En la figura 7.2 se puede ver un diagrama esquemático del los capacitores utilizados.



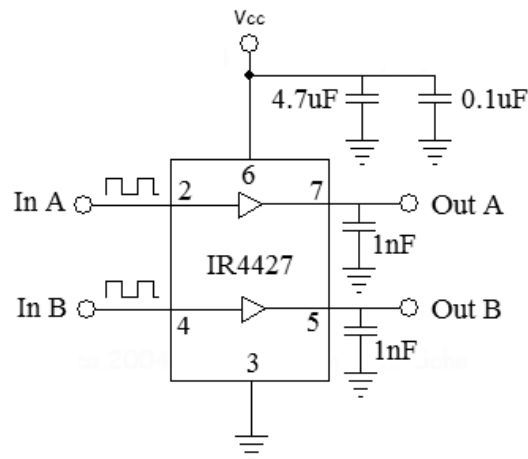
**Figura 7.2.**- Capacitores en paralelo de la primera etapa elevadora

Para escoger el diodo adecuado se tuvo que tomar en cuenta la frecuencia de conmutación, voltaje y corriente. Se eligió un diodo de los llamados ultra rápidos, el MUR3020pt, sus características se encuentran en el apéndice D.

Finalmente se decidió escoger un MOSFET de potencia como interruptor, ya que estos trabajan a altas frecuencias. El MOSFET para la primera etapa fue un IRF 3710 y sus características se encuentran en el apéndice D.

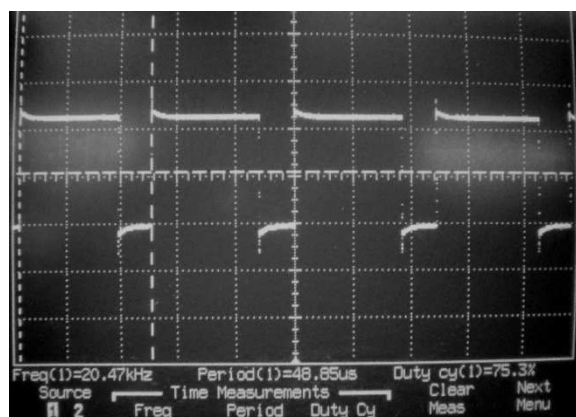
Para la señal de disparo del MOSFET se utilizó un TIMER 555 para generar los pulsos con 75% de ciclo de trabajo a 20 KHz (ver apéndice C). Sin

embargo, el TIMER 555 no tiene la suficiente corriente para activar el MOSFET, por lo que se implementó un DRIVE IR4427 para darle más corriente a la señal del TIMER 555. En la figura 7.3 se muestra el diagrama de conexión del DRIVE.



**Figura 7.3.-** Diagrama de conexión del DRIVE IR4427.

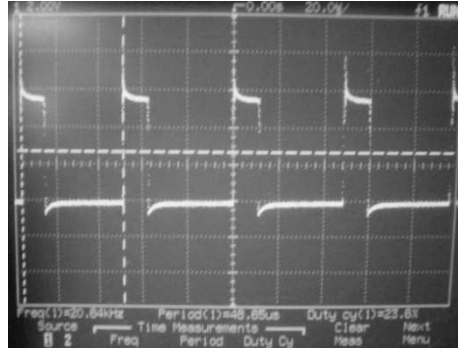
En la figura 7.4 se muestra la señal de salida A (Out A) en el osciloscopio del DRIVE IR4427. Esta señal es la que hace que conmute el MOSFET del primer convertidor elevador, por lo que tiene una frecuencia de 20 KHz con un ciclo de trabajo del 75%.



**Figura 7.4.-** Señal de disparo para el MOSFET de la primera etapa elevadora

Se conectó la primera etapa a un acumulador de automóvil (Batería) de 12 Volts y con una carga resistiva de  $20\Omega$  para comprobar su funcionamiento. La

señal de conmutación del MOSFET se observan en la figura 7.5, se puede ver que la señal tiene un ciclo de trabajo del 24%.



**Figura 7.5.-** Conmutación en el MOSFET del primer elevador

En la figura 7.6 se muestra el voltaje de salida del convertidor elevador primera etapa, se puede observar que el voltaje deseado idealmente es de 48 volts, pero al implementarlo se obtuvo un voltaje de 46.7 volts.



**Figura 7.6.-** Voltaje de salida en el convertidor elevador primera etapa

En la tabla 7.1 se muestran los valores de entrada y salida del voltaje como corriente para el primer convertidor elevador.

**Tabla 7.1.-** Entradas y salidas tanto de voltaje como corriente del convertidor primera etapa

	Entrada	Salida
VOLTAJE (V)	11.7	46.7
CORRIENTE (A)	11.6	2.5

Por lo tanto la potencia de entrada como la potencia de salida se determinó de la siguiente ecuación:

$$P = V * I \quad (75)$$

En la tabla 7.2 se muestra la potencia de entrada y la potencia de salida del convertidor elevador primera etapa.

**Tabla 7.2.-** Potencias de entrada y salida del primer convertidor elevador

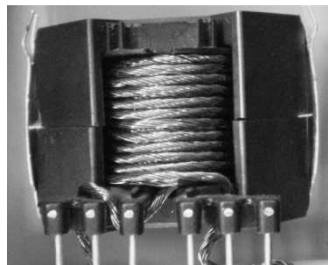
	Entrada	Salida
POTENCIA (W)	135.72	116.75

Por lo que la eficiencia en el convertidor de la primera etapa es de:

$$\eta = \frac{P_{entrada}}{P_{salida}} \times 100 = \frac{135.72}{116.75} \times 100 = 86.022\% \quad (76)$$

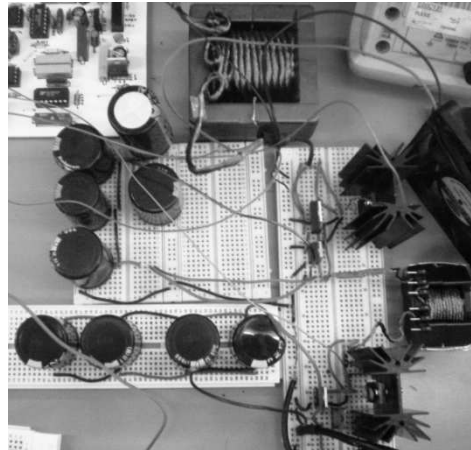
Se prosiguió a la construcción del segundo convertidor elevador, utilizando de igual manera un TIMER 555 y un DRIVE IR 4427. De igual manera se diseñó el inductor de 2.933mH (Ver apéndice B), se utilizó un diodo de rápida recuperación (MUR 840) y un interruptor de potencia MOSFET (IRF644). Las características de estos componentes de pueden ver en el apéndice D.

En la figura 7.7 se muestra el inductor que se utilizó para la segunda etapa elevadora.



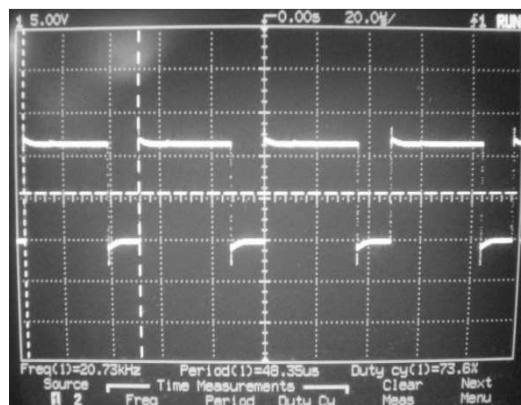
**Figura 7.7.-** Inductor de 2.933 mH utilizado en la segunda etapa elevadora

El segundo convertidor elevador se comprobó conectando en serie el primer elevador, se utilizó una resistencia en carga de  $270\Omega$ . En la figura 7.8 se muestran los dos convertidores conectados en serie.



**Figura 7.8.-** Convertidores elevadores conectados en serie.

La señal de disparo del MOSFET del segundo convertidor elevador que tiene una frecuencia de 20KHz y un ciclo de trabajo de 73% se muestra en la figura 7.9.



**Figura 7.9.-** Señal de disparo de la segunda etapa elevadora

En la figura 7.10 se observa el voltaje de salida de la segunda etapa elevadora



**Figura 7.10.-** Voltaje de salida en el segundo convertidor elevador

En la tabla 7.3 se muestran los voltajes de entrada y salida de los dos convertidores elevadores, de igual manera se muestran las corrientes de entrada y salida.

**Tabla 7.3.-** Voltajes y corrientes de entrada y salida de los convertidores en serie

	Entrada	Salida
VOLTAJE (V)	11.7	179.7
CORRIENTE (A)	15.6	0.9

La potencia de entrada y de salida de los dos convertidores elevadores conectados en serie se da por la ecuación (75). En la tabla 7.4 se muestran las potencias de entrada y salida de los convertidores.

**Tabla 7.4.-** Potencias de entrada y salida de los convertidores elevadores en serie

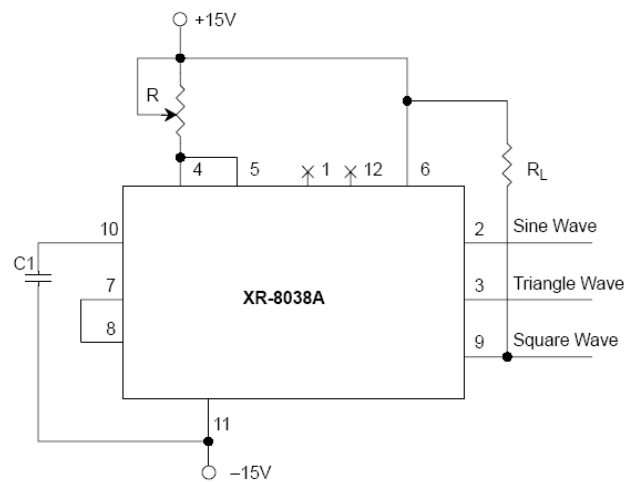
	Entrada	Salida
POTENCIA (W)	182.52	161.73

Por lo tanto la eficiencia de los convertidores elevadores conectados en serie es de:

$$\eta = \frac{161.73}{182.52} \times 100 = 88.60\% \quad (77)$$

## 7.2.- Implementación del convertidor inversor

Al comprobar que los convertidores elevadores estaban funcionando correctamente, se construyó el inversor en puente completo con la técnica de modulación por ancho de pulsos sinusoidal. Para poder tener un control PWM sinusoidal, se necesitó generar dos señales, una señal sinusoidal a 60 Hz y otra triangular a 6 KHz. Para eso se utilizó el circuito integrado XR8038, que es un generador de funciones. La figura 7.11 muestra el diagrama para generar las señales con un ciclo de trabajo del 50 %



**Figura 7.11.-** Diagrama de conexión del generador de funciones

Donde la frecuencia es:

$$f = \frac{0.15}{R * C} \quad (78)$$



En la figura 7.12 se muestra la señal de referencia a 60 Hz y la señal portadora a 6 KHz.

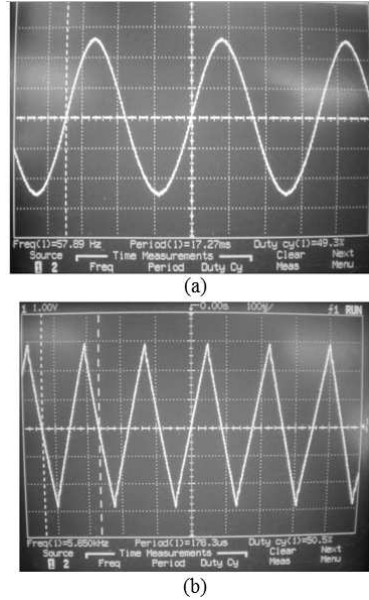


Figura 7.12.- Señales de modulación. (a) Referencia, (b) Portadora

Para los pulsos PWM se utilizaron comparadores de voltajes. En la figura 7.13 se muestra el diagrama de cómo se compararon las señales de modulación.

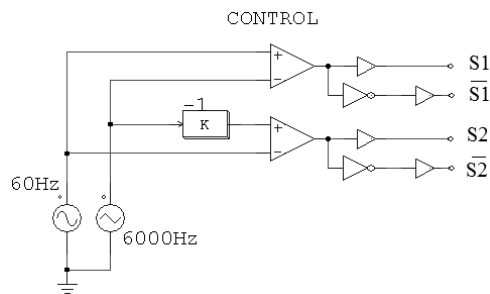
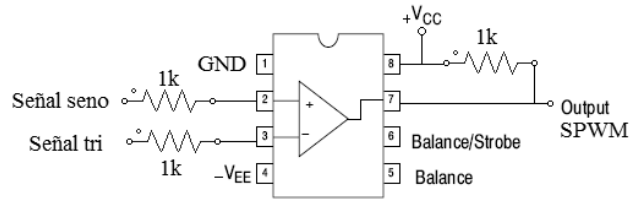


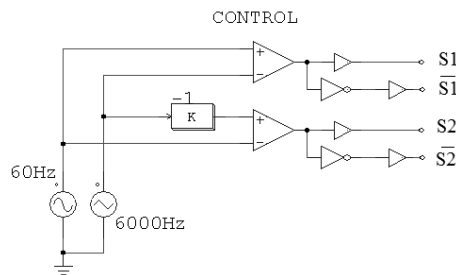
Figura 7.13.- Comparador de señales de referencia (seno) y portadora (tria)

Se utilizó un comparador de voltaje, el LM 311 para obtener los pulsos PWM, en la figura 7.14 se muestra una de las conexiones del comparador.



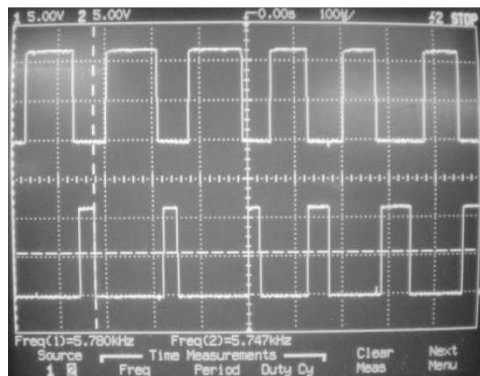
**Figura 7.14.-** Diagrama de conexión del comparador LM311.

En la figura 7.15 se muestra el diagrama de cómo se compararon las señales de modulación.



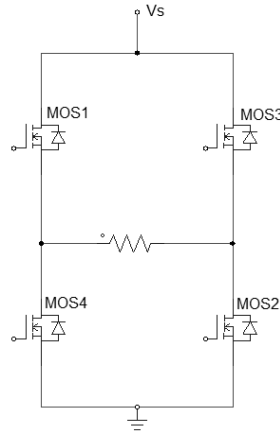
**Figura 7.15.-** Comparador de señales de referencia y portadora

En la figura 7.16 se muestran los pulsos generados por la comparación de las señales de modulación.



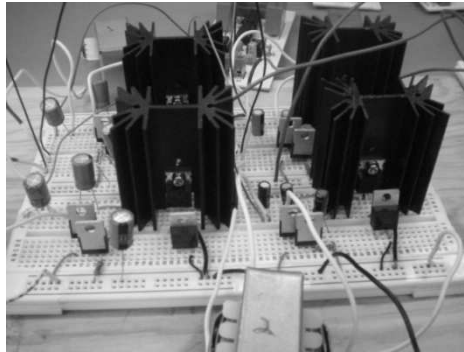
**Figura 7.16.-** Señal PWM sinusoidal.

El inversor en onda completa está compuesto por cuatro MOSFETS IRF740. En la figura 7.17 se muestra el diagrama de cómo se conectaron los cuatro interruptores.



**Figura 7.17.-** Inversor en puente completo

En forma física se muestra en la figura 7.18 los cuatro interruptores del inversor en puente completo.



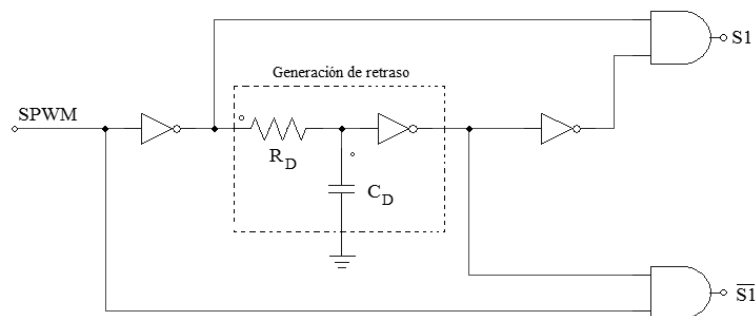
**Figura 7.18.-** Inversor en puente completo

Se puede observar en la figura 7.18 que los MOSFET de potencia tienen colocado un disipador de calor. Debido a la conmutación los interruptores tienden a calentarse de tal forma que si no se les da enfriamiento, estos pueden dejar de funcionar.

Debido a que los componentes utilizados no son ideales, y como las señales de disparo son complementarias, fue necesario implementar un circuito generador de tiempos muertos, con el fin de evitar que los interruptores lleguen a conmutar al mismo tiempo y así evitar un cortocircuito en la fuente [6].

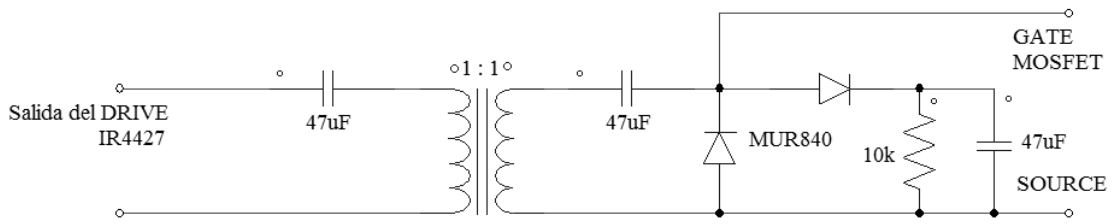
El circuito generador de tiempos muertos se muestra en la figura 7.19, se puede observar que se implementan compuertas AND y NOT. La siguiente ecuación muestra la expresión que establece el tiempo muerto [6]. El tiempo muerto establecido para este caso fue de 22  $\mu$ s.

$$t_c = R_D * C_D \quad (79)$$



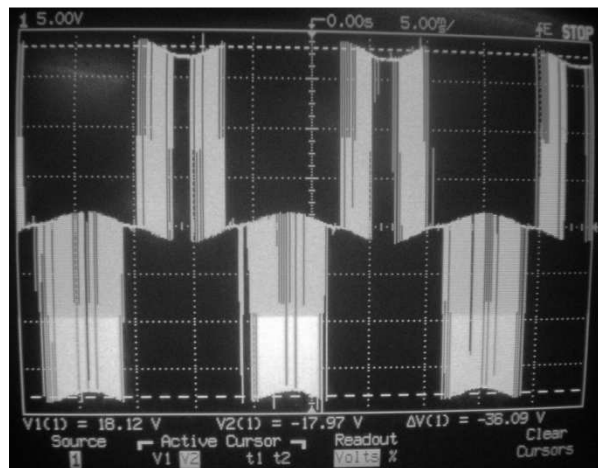
**Figura 7.19.-** Circuito generador de tiempos muertos.

Para implementar el disparo en los interruptores del inversor, es necesario proteger la etapa de control de la de potencia, ya que esta etapa contiene altas corrientes y altos voltajes. Además con esta etapa se logra flotar la tierra de la etapa de control evitando que pueda causar problemas en la etapa de potencia y de todo el sistema. Se puede observar en la figura 7.20 la etapa de aislamiento [7].



**Figura 7.20.-** Etapa de aislamiento

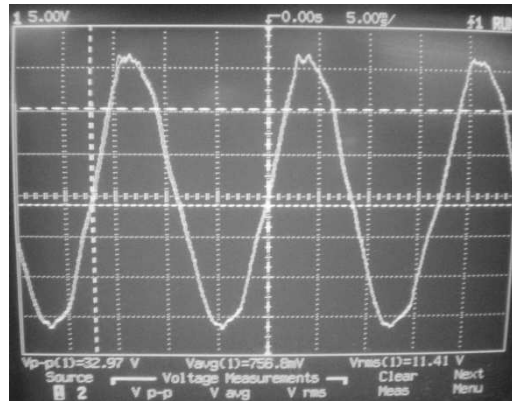
El inversor se probó con un foco de 100 Watts sin el filtro LC, y en la figura 7.21 muestra la salida en la carga. Se puede ver los pulsos en el semi ciclo positivo y negativo con una amplitud del voltaje de entrada.



**Figura 7.21.-** Señal de salida del inversor sin filtro LC

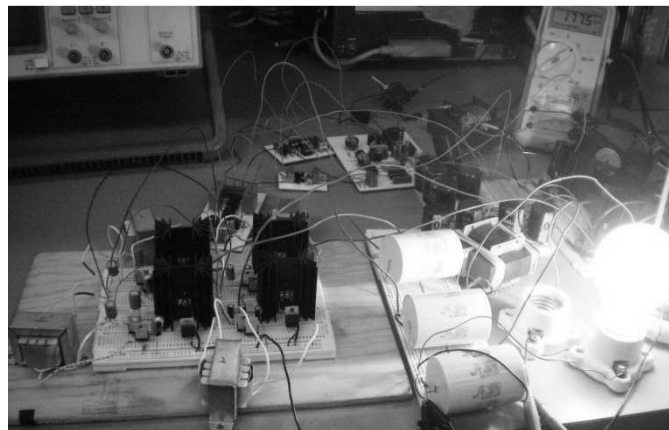
Para poder observar la señal de la figura 7.14 se utilizó una punta atenuada diez veces, con el fin de que se pueda apreciar en el osciloscopio. Por lo tanto el valor que nos muestra el osciloscopio se multiplica por 10.

Se implemento el filtro pasa baja a la salida del inversor y la figura 7.22 muestra la señal de salida con un foco de 100 Watts de carga.



**Figura 7.22.-** señal de salida del inversor en puente completo.

La figura 7.23 muestra todo el circuito elevador - inversor con una carga de 100 Watts.



**Figura 7.23.-** Circuito elevador - inversor

El voltaje de salida del inversor se muestra en la figura 7.24, este voltaje es en corriente alterna.



**Figura 7.24.**- Voltaje de salida en todo el circuito elevador – inversor.

En la tabla 7.5 se muestra el voltaje de entrada y salida del convertidor elevador-inversor, así como la corriente de salida y entrada.

**Tabla 7.5.**- Entrada y salida de voltajes y corrientes en el elevador-inversor

	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
Voltaje (V)	11.4	114
Corriente (A)	10.6	0.8

En la tabla 7.6 se muestran las potencias de entrada y salida de todo el circuito elevador-inversor.

**Tabla 7.6.**- Potencia de entrada y salida del convertidor –inversor

	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
Potencia (W)	120.84	91.2

Por lo que la eficiencia en todo el sistema de potencia es de:

$$\eta = \frac{91.2}{120.84} \times 100 = 75.47\% \quad (80)$$

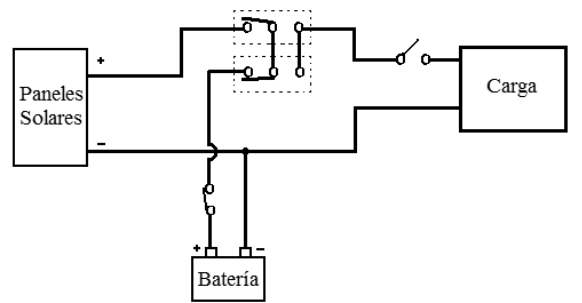
### **7.3.- Control de las fuentes de alimentación**

Al finalizar con la construcción del circuito elevador-inversor se instaló un sistema de interruptores, el cual se encarga de conectar o desconectar tanto la batería como los paneles solares.

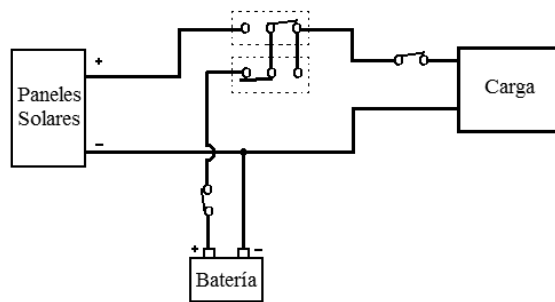
En la figura 7.25a se muestra la conexión cuando los paneles solares están cargando la batería, dejando la carga sin energía. En la figura 7.25b la carga está alimentada únicamente por la batería, dejando desconectados los paneles solares. Y como tercera opción se puede observar en la figura 7.25c que la batería esta desconectada en su totalidad, dejando a los paneles solares alimentar la carga.

Los resultados obtenidos con los módulos solares fueron similares a la batería, con la variante de que se probó el sistema en un día semi nublado, por lo que el foco de 100 Watts variaba según los rayos del sol que le llegaba a los paneles solares, ya que cuando se ponía completamente nublado el foco bajaba de intensidad.

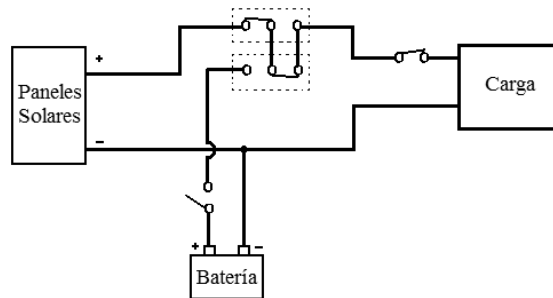




a) Paneles solares cargando la batería



b) La batería Alimenta la carga



c) Los paneles solares alimentan la carga

**Figura 7.25.-** Diagrama de conexión.

Se puede observar en la ecuación (80) que la eficiencia de toda la etapa de potencia es baja, esto se debe a que existen pérdidas por conmutación de los dos interruptores de los convertidores elevadores, así como en los cuatro MOSFET del inversor. Además de que el control también se alimenta de la batería o paneles solares.