



Figura 7.- Prototipo de vehículo eléctrico construido en Vehizero.

Además de los aditamentos mencionados, la batería alimenta la marcha del generador de emergencia y el circuito de encendido del vehículo. En el diagrama de conexiones (figura 2) se aprecia que la tierra de la batería auxiliar está conectada directamente al chasis del vehículo y que debe estar aislada respecto a la tierra del banco de baterías del vehículo, esto representa una restricción muy importante para el diseño del convertidor DC-DC.

3. Elección de la topología de la Fuente.

Antecedentes

Antes de evaluar el prototipo fue necesario revisar los parámetros más relevantes de un convertidor DC-DC como son su eficiencia y capacidad de regulación, una ventaja importante en este tipo de convertidores es su alta eficiencia, esto debido al uso de elementos de conmutación en la transferencia de potencia en lugar de un regulador lineal normalmente usado para convertidores AC-DC. Una vez realizada la revisión se plantearon las principales restricciones de diseño y se enlistaron configuraciones de convertidores DC-DC a ser considerados para la construcción del prototipo.

Restricciones:

- Aislamiento del voltaje de Banco de baterías y Batería auxiliar.
- Eficiencia mayor al 70%.
- Bajo porcentaje de relación señal a ruido
- Voltaje de salida 13.5[V] a 14.5[V].
- Voltaje de rizo < 200[mV]p-p.
- Voltaje de regulación 70[V]-104[V]
- Corriente de salida 8[A]-10[A].

3.1 Configuraciones más comunes de convertidores DC-DC.

Debido a la necesidad de aislamiento del voltaje de salida respecto al voltaje de entrada, las configuraciones Buck y Boost-Buck (figuras 8 y 9) fueron desechadas pues en ambas topologías la tierra de entrada es común a la tierra de salida.

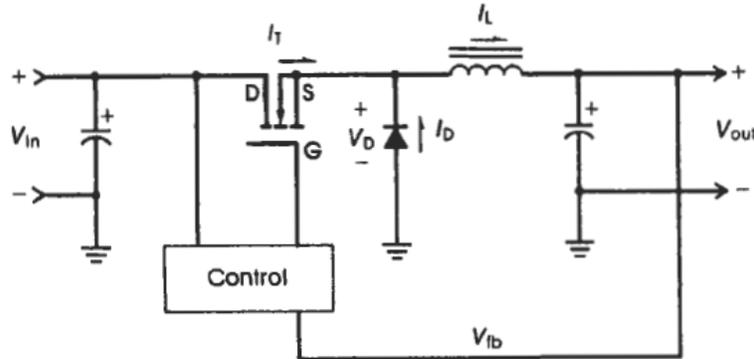
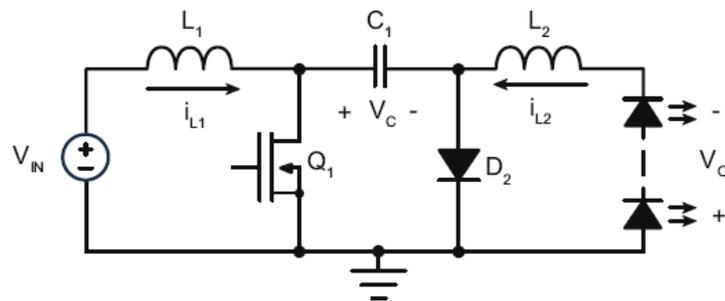


Figura 8.- Convertidor Buck



Boost Buck (Ćuk) Converter

Figura 9.- Convertidor Boost-Buck

Las configuraciones más apropiadas para cumplir con las restricciones de diseño son la FLYBACK y la PUSH-PULL. Para saber qué configuración elegir entre estas dos fue necesario estudiar las ecuaciones de diseño e implementación, así como el número mínimo de componentes pasivos y activos para su funcionamiento.

Flyback.

La topología Flyback (figura 10) es muy parecida a las configuraciones Boost y Buck-Boost, sin embargo presenta grandes ventajas respecto a estas, como son:

- Se pueden obtener varios voltajes de salida con una misma alimentación.
- Los voltajes de salida pueden ser positivos o negativos.
- Los voltajes de salida no tienen conexión galvánica con el voltaje de entrada.
- Con un diseño cuidadoso del transformador, el rango dinámico de regulación puede ser muy grande.

El transformador puede operar en dos modos, continuo o discontinuo. En el modo discontinuo el núcleo vacía la energía almacenada durante el periodo de encendido del elemento conmutador, esta es la forma más segura de operar del transformador siempre y cuando el ciclo de trabajo de la señal de conmutación no rebase el 50%, pues un ciclo de trabajo excesivo podría saturar el núcleo. En el modo continuo la energía del núcleo no es descargada por completo en el tiempo de encendido sino que llega a un mínimo para después incrementarse, este modo de operación reduce el esfuerzo al que es sometido el núcleo en condiciones de carga plena, sin embargo para conservar un balance de energía en el transformador es necesario que exista una carga mínima para extraer el sobrante de energía almacenada y así evitar que el núcleo se sature.

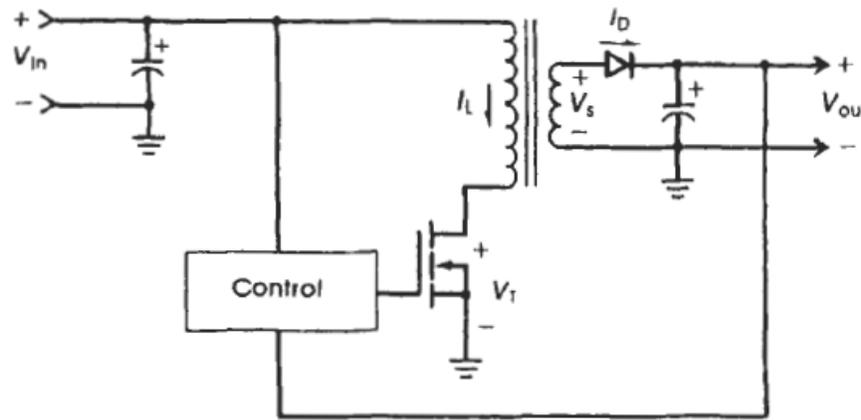


Figura 10.- Topología Flyback.

La saturación del núcleo presenta una gran desventaja para esta configuración. Cuando esto ocurre la permeabilidad magnética del material se decrementa rápidamente anulando el valor de la inductancia del devanado primario, esto provoca que la rampa de corriente en el tiempo de encendido crezca infinitamente dejando al elemento de conmutación en corto franco.

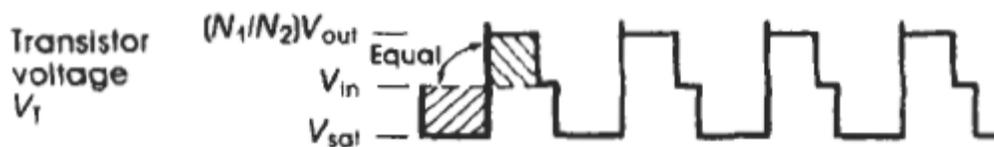


Figura 11.- Voltaje en el elemento de conmutación.

El voltaje en el elemento de conmutación (figura 11) está directamente relacionado con el diseño del transformador, pues aunque el voltaje de salida es bajo, la relación de transformación podría elevar en gran medida el valor del voltaje en el elemento de conmutación y por lo tanto el esfuerzo al que este expuesto. La relación de transformación del transformador depende en gran manera del rango de regulación deseado y en el caso específico del voltaje del banco de baterías, que en ocasiones puede llegar a los 70[V].

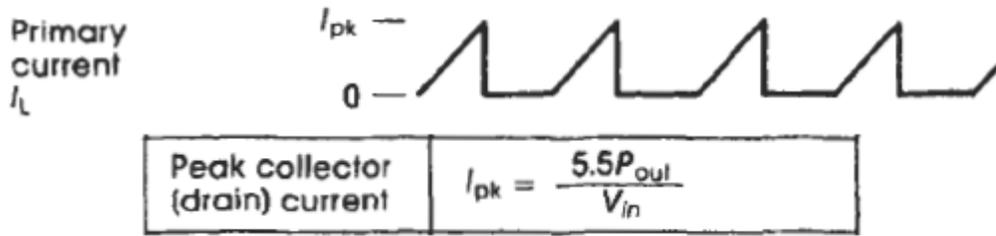


Figura 12.- Corriente en el devanado primario.

En cualquier configuración de convertidor DC-DC ocurre un fenómeno muy particular denominado normalmente espigas de sobre voltaje (figura 13), este fenómeno es más evidente con la presencia de inductancias conectadas directamente al voltaje de alimentación y conmutadas a tierra como es el caso de la topología Flyback, esto ocurre cuando el elemento de conmutación entra en el estado de no conducción, esto se debe a que durante el tiempo de encendido del elemento de conmutación, la corriente que fluye por el devanado primario crece hasta alcanzar un máximo como se muestra en la figura 12, cuando el elemento de conmutación deja de conducir el cambio de la corriente con respecto al tiempo es muy grande y multiplicado por el valor de la inductancia del devanado primario genera un voltaje que podría dañar al elemento de conmutación. Debido a este fenómeno, la topología Flyback suele llevar una red limitadora de voltaje entre las terminales del elemento de conmutación, normalmente llamada red snubber. El diseño de la red snubber significa dificultades en el diseño, pues se debe calcular para un elemento de conmutación específico, que suele ser un MOSFET, pues los valores de los componentes cambiarán dependiendo de las características intrínsecas del MOSFET, como son las inductancias y capacitancias parásitas, así como el voltaje máximo de Drain-Source que el MOSFET puede soportar sin dañarse.

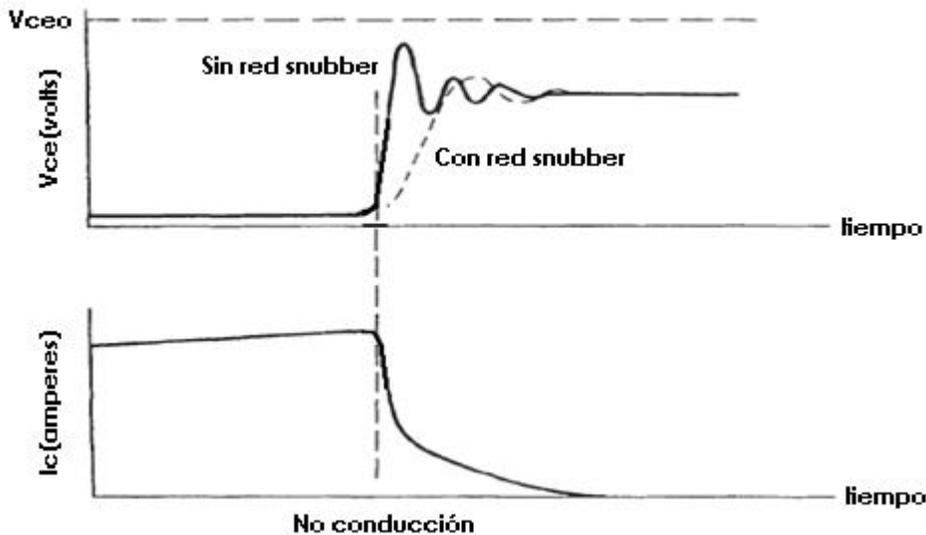


Figura 13.- Presencia de espigas de voltaje.

Push-Pull.

La topología Push-Pull (figura 14) es básicamente un convertidor de medio puente (Half-Bridge converter), con la diferencia que el devanado primario del transformador tienen tap central y ambos elementos de conmutación están conectados a tierra. El tap central del transformador es conectado al voltaje de entrada, y los elementos de conmutación se encargan de alternar este voltaje, de manera que el transformador presenta esta señal conmutada reducida o ampliada según la relación de transformación al filtro L-C de la salida. Contrario a la topología Flyback, el transformador no almacena energía y la corriente de salida fluye cuando cualquiera de los elementos de conmutación está encendido. Ambos extremos del primario son embobinados en el mismo sentido, de manera que el flujo de corriente cambia de dirección dependiendo del elemento de conmutación que está encendido, de esta forma el flujo magnético dentro del material del núcleo es bipolar, haciendo un uso más eficiente del material del núcleo y con ciertas restricciones de diseño, el tamaño del núcleo podría reducirse.

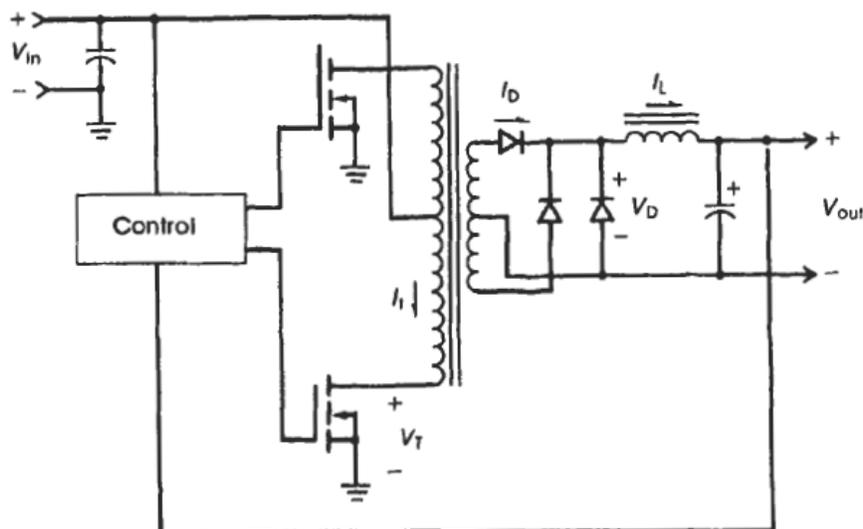


Figura 14.- Topología Push-Pull.

Por lo tanto el núcleo para una configuración Push-Pull sería más pequeño que el núcleo de una configuración Flyback. Otra ventaja es que al usar dos elementos de conmutación una configuración Push-Pull entregaría el doble de potencia de salida que una configuración Flyback operando a la misma frecuencia de conmutación. Esto es gracias a que cada elemento de conmutación opera a una frecuencia de $\frac{F_{SW}}{2}$. El principio de operación de la topología Push-Pull es el siguiente: Cuando un elemento de conmutación está encendido, la corriente fluye por una mitad del devanado primario, al mismo tiempo la corriente fluye por una mitad del devanado secundario, polarizando de forma directa a su respectivo diodo, esta corriente pasa al filtro L-C y es almacenada, el voltaje pico en el filtro será $\frac{N_2}{N_1} V_{in}$ (figura 15).



Figura 15.- Voltaje en el filtro de salida.

Cuando uno de los elementos de conmutación está encendido, en el otro elemento se presenta un voltaje de $2V_{in}$ entre sus terminales (figura 16), esto es debido a la corriente que fluye en dirección inversa por la mitad activa del devanado primario.

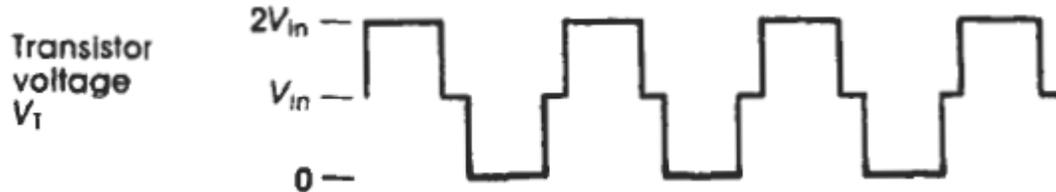


Figura 16.- Voltaje en el elemento de conmutación.

La presencia de este voltaje representa una desventaja para la configuración Push-Pull, pues los elementos de conmutación se deben elegir con precaución. Otra desventaja de la configuración es que los elementos de conmutación deben de ser idénticos en sus características, lo cual en la vida real es muy difícil de lograr, pues siempre habrá diferencias en los voltajes de encendido y en los tiempos de conmutación de dos MOSFETS, estas diferencias provocan un desbalance en la polarización del flujo magnético que pasa por el núcleo del transformador, este fenómeno aumenta en condiciones de carga plena y cuando el ciclo de trabajo de ambos elementos de conmutación es el máximo existirá un elemento por el cual pase más corriente y este podría dañarse a la larga.

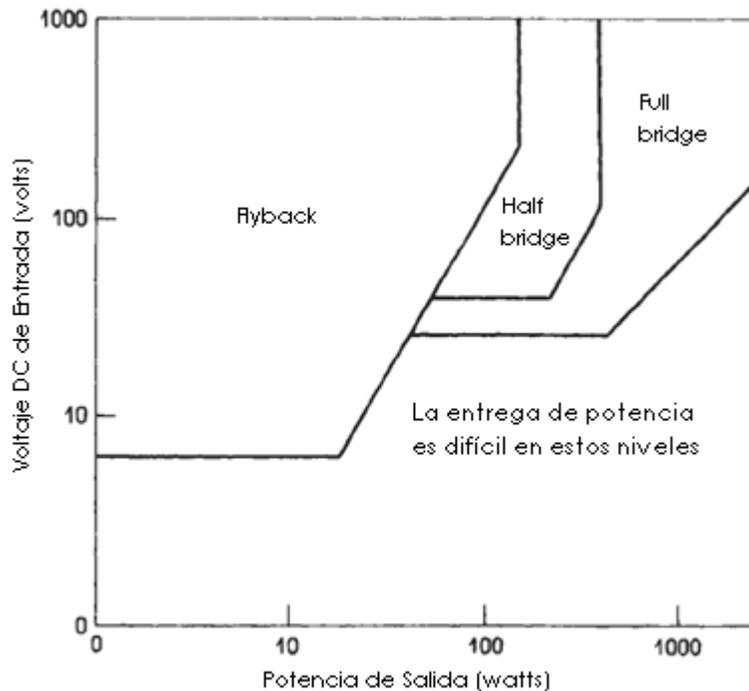


Figura 17.- Aplicación común de convertidores DC-DC.

En la Figura 17 se presenta el uso recomendado de las diferentes configuraciones de convertidores DC-DC con transformador, en función del voltaje de entrada y la potencia de salida. Este cuadro en conjunto con las ventajas y desventajas de las configuraciones estudiadas, ayudó a determinar cuál sería implementada en el prototipo.

Se enlistaron las ventajas de cada configuración, tomando en cuenta número de componentes y grado de dificultad en el diseño.

Ventajas Flyback:

- El diseño del transformador es más simple.
- Se utiliza un solo elemento de conmutación.
- Su implementación requiere menos componentes (el filtro de salida es capacitivo).

Ventajas Push-Pull:

- El transformador es más pequeño.
- La eficiencia es más grande.
- El voltaje de rizo es menor.
- Elegir un elemento de conmutación adecuado evita la necesidad de red snubber.

Desventajas Flyback:

- Necesidad de red snubber.
- Voltaje de rizo elevado.

Desventajas Push-Pull:

- Necesita más componentes para su implementación.

La configuración Push-Pull a pesar de ser más difícil de diseñar, tiene ventajas en dos características clave: eficiencia y voltaje de rizo. Otro punto importante para la elección fue el hecho de que la electrónica necesaria para la configuración Push-Pull permite que se pueda implementar también la configuración Flyback en dado caso que el diseño se dificulte.

4. Desarrollo

Una vez que se determinó que la configuración implementada en el prototipo fue la correcta, se planteó un diagrama de operación básico (figura 18) que incluyera los componentes elementales para la operación del prototipo, pues debido a la poca información con la que se contaba fue necesario rediseñar prácticamente desde cero el prototipo, aun cuando se tenía un PCB (de las ciclas en ingles Prited Circuit Board) armado y funcional no se contaba con parámetros de diseño de componentes específicos como el transformador, por lo cual fue necesario rediseñarlo con el fin de disminuir su tamaño en lo posible, lo mismo sucedió con el filtro de salida y la red de sensado de corriente.