

## Introducción

La electrónica de potencia es la rama de la ingeniería electrónica dedicada a estudiar el manejo de la energía eléctrica de una manera eficiente a altos niveles de potencia. Su origen se puede asociar con el desarrollo del SCR en 1956 y su posterior comercialización en 1968, lo que permitió controlar grandes cantidades de potencia con una alta eficiencia. Desde que se desarrolló el primer SCR hasta hoy ha habido grandes avances en los dispositivos semiconductores y se han introducido muchas clases distintas de dispositivos y técnicas de conversión. Junto con el desarrollo de la electrónica de potencia se desarrolló también la microelectrónica, lo que permitió tener la capacidad actual de procesar una cantidad gigantesca de información con una rapidez increíble. Todo ello ha resultado en la posibilidad de controlar grandes cantidades de potencia con una eficiencia siempre creciente. La capacidad de los dispositivos actuales ha alcanzado rangos de hasta 3500 [A] y 6000 [V]. En [19] se presenta una lista actual de los dispositivos semiconductores disponibles y algunas áreas donde se aplica la electrónica de potencia.

Una de las aplicaciones específicas en donde la electrónica de potencia es un elemento fundamental es la construcción de fuentes de poder. El hecho de controlar el flujo de energía eléctrica de una fuente de poder a una carga de manera eficiente siempre ha preocupado a los ingenieros. Básicamente hay dos formas de controlar el flujo de corriente que es suministrada a una carga; de forma lineal y de forma conmutada. En cualquiera de las dos formas es importante tener una baja pérdida de potencia y por consiguiente una alta eficiencia del manejo de la energía eléctrica, con ello se logra disminuir los costos por el consumo de la energía eléctrica y las dificultades para remover el calor generado debido a la potencia disipada. Otros importantes beneficios son la disminución del peso y tamaño del sistema electrónico. Sin embargo tales características son en muchos casos imposibles de alcanzar ya que muchos sistemas electrónicos utilizan dispositivos electrónicos que trabajan en una región lineal, por ejemplo los elementos resistivos que son generadores de calor.

Un ejemplo de un control lineal de energía es el de control de velocidad de motores de corriente continua Ward Leonard<sup>1</sup>. Este método consiste esencialmente en generar tensiones directas variables, el elemento de control es un reóstato el cual debe de ser lo suficientemente amplio en su rango de tensión y potencia para que se puedan inducir fuerzas electromotrices desde un valor pequeño hasta el de tensión nominal. Aunque el método Ward Leonard permite un control de velocidad efectivo estable y de gran amplitud, presenta sin embargo algunas desventajas fuertes, como son la necesidad de contar con máquinas extras que deben ser conectadas en cascada, el lugar relativamente grande que ocupa, la respuesta lenta, el costo, el mantenimiento entre otros.

De manera alternativa, la electrónica de potencia puede ser utilizada para mejorar el desempeño de las fuentes en este tipo de aplicaciones. Un control conmutado de energía utiliza elementos semiconductores de conmutación, los cuales trabajan tanto en su zona de corte como de saturación. Estos dispositivos funcionan como interruptores electrónicos que permiten o impiden el flujo de corriente. Su uso permite conseguir una alta eficiencia, ya que

---

<sup>1</sup> En [3] es posible encontrar una descripción detallada del método

las pérdidas totales del sistema se reducen casi exclusivamente a las pérdidas por conmutación. Actualmente los controladores de motores basados en la tecnología de conmutación han sustituido a los lineales debido a su menor costo y mayor eficiencia. Mientras que con el uso de circuitos electrónicos donde se utilizan elementos resistivos (generadores de calor) se puede alcanzar una eficiencia del 40 % al 50 %, con la tecnología de conmutación se llega a tener eficiencias del orden del 90 % [1]. A los sistemas electrónicos que procesan energía basados en la tecnología de conmutación se les conoce como convertidores electrónicos (conmutados) y son el campo de estudio de la electrónica de potencia.

En un contexto general, un convertidor electrónico conmutado es un arreglo de interruptores electrónicos (implementados con algún dispositivo semiconductor) donde los interruptores siguen una política de encendido y apagado, por medio de la cual modifican las características eléctricas de la potencia eléctrica [19]. Debido al tipo de conversión que realizan se pueden clasificar en, rectificadores, inversores, *choppers* y cicloconvertidores.

En este sentido el inversor convierte una tensión de naturaleza continua (CD) a otra de naturaleza alterna (CA) sin ningún tipo de movimiento entre las partes que lo componen, y es un elemento básico en sistemas electrónicos como los actuales controladores de motores y las fuentes de tensión ininterrumpibles (UPS). Debido al creciente costo en la energía eléctrica y la preocupación por un consumo razonable<sup>2</sup> se ha propiciado la investigación para mejorar la eficiencia de dichos convertidores.

Una de las topologías básicas para construir un inversor es la topología de puente completo, la cual ocupa cuatro transistores que son alimentados por una fuente de tensión directa, misma que será convertida en alterna. Esencialmente la salida de un inversor con topología de puente completo no es senoidal y contiene componentes armónicas debidas a la conmutación de los interruptores electrónicos, en este sentido la calidad de un inversor se suele evaluar en términos de la distorsión armónica total (THD). La THD es una medida de la coincidencia de formas entre una onda y su componente fundamental [19].

Por otro lado, cuando se desea tener control sobre el valor de la magnitud de la señal de salida de un inversor se utilizan técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM), las cuales consisten básicamente en modificar el ancho de pulso de la señal de disparo de los interruptores electrónicos con lo que se tiene control sobre la ganancia del inversor. Entre las técnicas de modulación más usuales están la de modulación de un solo ancho de pulso, la de múltiples pulsos y la de pulsos senoidales.

Con el fin de mejorar el rendimiento de los inversores (una menor THD), el estudio de los inversores se puede abordar de manera muy general desde dos enfoques: 1) el diseño electrónico, para el cual el tema fundamental es la definición de nuevas topologías y la evaluación de nuevos dispositivos (y en general de nuevos elementos tanto pasivos como activos); y 2) el diseño de esquemas de control, donde el esfuerzo principal se concentra en la determinación de nuevas políticas de conmutación de los semiconductores involucrados con el

---

<sup>2</sup> Tan sólo en su libro *Motor Control Electronics Handbook* [21] Valentine Richard estima que el 50% de la electricidad generada a nivel mundial es consumida por motores eléctricos, lo que ilustra la importancia de contar con eficientes convertidores de potencia para operar este tipo de máquinas.

fin de alcanzar las características preestablecidas para la señal de salida. En los dos campos se han desarrollado investigaciones que han dado como resultado la propuesta de nuevas topologías de inversores así como nuevos algoritmos de control.

En el sentido del diseño electrónico se pueden mencionar a los convertidores resonantes y los inversores multinivel, los cuales han atraído mucho el interés en el campo de la electrónica de potencia debido a las ventajas que ofrecen entre las cuales están la reducción de las pérdidas por conmutación, un menor esfuerzo dieléctrico de los interruptores, la producción de altas tensiones con un menor estrés eléctrico de los dispositivos semiconductores que lo componen<sup>3</sup> etc.

En el desarrollo de nuevos algoritmos de control el estudio es también extenso, por ejemplo en [11] se hace un estudio detallado de diversos esquemas de modulación de ancho de pulso, mientras que en [6] y [7] se plantean algunos más los cuales fueron desarrollados atendiendo la filosofía de los controladores basados en pasividad, tema sobre el cual se puede encontrar información en [16].

Tanto con el enfoque del diseño electrónico como con el de nuevos algoritmos de control se necesitan herramientas físicas que permitan desarrollar experimentos que ayuden a la validación de nuevas topologías de inversores y de nuevas leyes de control. Para ello una estructura básica de un banco de pruebas debe tener los mismos elementos que un sistema de control convencional es decir, una etapa de control, una etapa de realimentación y una planta o proceso que se desee controlar.

Es en este sentido como surge éste trabajo de tesis, el cual tiene por objeto construir la planta de un banco de pruebas atendiendo a los requisitos de compatibilidad y seguridad solicitados por los otros elementos del sistema. A lo largo del presente trabajo se detalla la estructura del banco de pruebas y la construcción del inversor en el cual se basa su estructura.

## ***0.1 Motivación***

La motivación para desarrollar el presente trabajo de tesis es doble. Por un lado (como se comentó en la sección anterior), la construcción de convertidores conmutados es un tema importante por sí mismo, debido al impacto que la electrónica de potencia tiene actualmente en numerosas aplicaciones, tanto industriales como domésticas. Por otro lado, existe la necesidad de contar con convertidores electrónicos para el trabajo de investigación aplicada en el área de electrónica de potencia y control que actualmente se desarrolla en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, ya que el alto costo que implica su diseño por terceros motiva el desarrollo de los mismos por miembros de su comunidad, quienes tienen los conocimientos y habilidades para realizar esta tarea.

Considerando el escenario descrito en el párrafo anterior, resulta inmediato concebir un trabajo de tesis de nivel licenciatura que considere las necesidades del grupo de investigación de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y que, con base en la capacidad de los estudiantes, desarrolle los circuitos conmutados requeridos aportando ideas de diseño y poniendo en práctica la capacidad adquirida durante su formación académica.

---

<sup>3</sup> El lector interesado puede consultar un estudio más detallado en [19]

El trabajo de tesis propuesto es importante, ya que además del tema central dado por la electrónica de potencia, involucra el uso de muchas ramas de la ingeniería eléctrica, como son el análisis de circuitos eléctricos, técnicas de diseño en electrónica analógica y digital, teoría de control, procesamiento de señales y microprocesadores entre otras. Por lo anterior, el trabajo de tesis ofrece la posibilidad de poner en práctica los conocimientos adquiridos durante los estudios y poder aplicarlos de manera tangible en una aplicación práctica, lo que redundaría en la adquisición de una visión más completa y profunda de los conocimientos, ya que generalmente durante el proceso se presentan factores que en etapas previas de la investigación se consideraron como ideales o que ni siquiera fueron tomadas en cuenta.

El desarrollo tecnológico, es además, de gran importancia para la Facultad de Ingeniería de la UNAM, pues cumple con la misión de vinculación de los estudiantes de licenciatura con los investigadores de nuestra casa de estudios.

En este punto es importante mencionar que aunque el objetivo final del diseño del convertidor presentado en este trabajo de tesis es el de facilitar la evaluación de algoritmos de control, por la complejidad de este tema la contribución de la tesis se concentra sólo en el diseño e implementación del convertidor, aunque esta tarea se realiza considerando las necesidades impuestas por el objetivo mencionado.

## ***0.2 Objetivo***

Con base en lo descrito en los apartados anteriores, es necesario contar con un convertidor electrónico que convierta corriente continua a corriente alterna, y el cual pueda ser un elemento de un sistema de evaluación experimental completo donde los investigadores puedan observar su comportamiento ante diversas situaciones de interés. El convertidor electrónico deberá contar con sistemas de seguridad que garanticen lo mejor posible la integridad, tanto del usuario como la de los circuitos adicionales con los cuales tenga que operar como sistema.

Los objetivos particulares, que al mismo tiempo definen las metas parciales que deben ser cubiertas durante el desarrollo del trabajo son:

- Diseñar e implementar un inversor y los circuitos necesarios para su funcionamiento.
- Diseñar e implementar un sistema de seguridad que evite posibles daños al inversor.
- Evaluar de manera experimental el desempeño del inversor.

## ***0.3 Organización de la tesis***

El presente trabajo se divide en tres Capítulos. En el primero se da una visión general del sistema de evaluación experimental de algoritmos de control en que ha de trabajar el inversor a construir. Se describen las características que debe de tener el inversor, así como la propuesta de solución a las mismas. Con el título de *diseño e implementación del inversor* se presenta en el segundo Capítulo el diseño del inversor con una configuración de puente completo y los circuitos auxiliares para su funcionamiento. En el tercer Capítulo del trabajo se presentan los resultados de la evaluación experimental y desempeño del inversor ante

condiciones de interés. Existe también un apartado donde se concentran las conclusiones a las cuales se llegó durante el desarrollo del presente proyecto. Adicionalmente se agrega una sección de apéndices donde se concentran los diagramas eléctricos del circuito, hojas de especificaciones de elementos importantes y listados del código de programación.