



SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA  
COORDIANCIÓN SECTORIAL ACADÉMICA  
DIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



---

---

## INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MORELIA “José María Morelos y Pavón”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

### TESIS

“Diseño y Construcción de un Amplificador de  
Voltaje de Alta Potencia para Uso en Pruebas  
de Relevadores de Protección”

Que para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Presenta:  
Ing. Aldo Molina Moreno

Director  
Dr. Fernando Martínez Cárdenas

Codirector  
Dr. J.J. Darío Delgado Romero

Morelia, Michoacán, México. Enero del 2011

# Resumen

---

El consumo de la energía eléctrica de nuestro país se encuentra en constante crecimiento, por lo que las líneas eléctricas abarcan la mayor parte de los territorios de los países en crecimiento haciendo que sus redes eléctricas sean más grandes y complejas, esto implica que exista una mayor probabilidad de que las líneas se encuentren expuestas a fallas o daños eléctricos tales como: caídas de objetos, cortocircuitos o descargas atmosféricas ocasionando interrupciones en la energía eléctrica y daños a los equipos eléctricos.

Por lo tanto se requiere contar con equipos de protección que detecten las anomalías de la energía eléctrica y protejan las líneas eléctricas evitando sobrecargas de corriente o de voltaje y daños al ambiente. Los equipos de protección más utilizados hoy en día son los relevadores de protección ya que ellos detectan y aíslan las fallas eléctricas garantizando la continuidad y calidad del servicio de energía eléctrica.

Durante la vida útil de un relevador de protección las fallas eléctricas no ocurren constantemente por lo que puede pasar un periodo de tiempo sin activarse, esto ocasiona, que los mecanismos internos del propio relevador puedan fallar al momento de ocurrir una anomalía en las líneas eléctricas haciendo que la falla se propague hacia las demás líneas teniendo altos costos de reparación.

Una manera de solucionar este problema es utilizar un equipo de pruebas para los relevadores de protección. Este equipo de pruebas debe ser capaz de emular voltajes semejantes a los de la línea eléctrica como las condiciones típicas de falla, las condiciones de funcionamiento estable, operaciones de conmutación y esquemas lógicos; éstas posteriormente se conectan a los relevadores de protección con el fin de probar su correcto funcionamiento y garantizar su operación adecuada al momento de presentarse una falla.

Los equipos de prueba de relevadores de protección cuentan con dos partes principales: Las señales de control, con las que son sometidas a diferentes funciones típicas de falla y los amplificadores de corriente y de voltaje que se encargan de amplificar las señales de control para ser aplicadas a los relevadores de protección. Los amplificadores de corriente y de voltaje son limitados en potencia debido a que son lineales, por lo tanto es difícil de mantener una señal de voltaje en alta potencia, ocasionando que los dispositivos disipen mucho calor, sean voluminosos y se requiera un gran esfuerzo para mantener la señal. Los amplificadores de mayor potencia en la actualidad son los amplificadores clase D, cuyo principio de funcionamiento es a base de corte y saturación de un transistor de potencia y además de que hace uso de técnicas de modulación de ancho de pulso con lo que pueden entregar la energía con una mejor calidad y eficiencia.

Este trabajo se enfoca en el diseño de un amplificador de voltaje de alta potencia para uso en pruebas de relevadores de protección, utilizando un convertidor multinivel. Recientemente los convertidores multinivel han atraído gran interés en los investigadores debido a la alta eficiencia, menores pérdidas de potencia y disminución de interferencia electromagnética (EMI). Su forma escalonada permite reducir los esfuerzos en los transistores ofreciendo más ventajas sobre los amplificadores clase D ordinarios.

El convertidor multinivel que se desarrolla en este trabajo usa una topología denominada puente H conectado en cascada, para ello se conectan dos puentes H en serie generando en la salida del convertidor un total de hasta 9 niveles. Para poder generar una mejor calidad de voltaje en su salida

se desarrolla la técnica de modulación de ancho de pulso Senoidal (SPWM), en la salida del voltaje del convertidor multinivel se agrega un filtro  $\pi$  para poder suavizar la señal de salida con el fin de asemejarla a la señal de entrada pero en mayor magnitud.

Como resultados se presentan algunas señales del voltaje de salida con respecto al voltaje de entrada, presentando voltajes de salida de forma senoidal de 60Hz con diferentes armónicos, también se presenta una serie de simulaciones utilizando el simulador PSCAD/EMTDC para simular el principio de funcionamiento de un convertidor multinivel usando la topología de puentes H conectados en cascada, se presentan diferentes análisis de contenido armónico y distorsión armónica total (THD) para compararlo con el convertidor clase D tradicional. Por último se diseña y se construye el amplificador de voltaje y se presentan pruebas realizadas con un relevador de protección para poder utilizarlo en pruebas de relevadores de protección.

# Tabla de contenido

---

|  |              |
|--|--------------|
| <b>Resumen</b> .....   | <b>vii</b>   |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>ix</b>    |
| <b>Dedicatoria</b> .....   | <b>xi</b>    |
| <b>Agradecimientos</b> .....   | <b>xiii</b>  |
| <b>Tabla de contenido</b> .....  | <b>xv</b>    |
| <b>Abreviaturas y Acrónimos</b> .....  | <b>xix</b>   |
| <b>Lista de Figuras</b> .....  | <b>xxiii</b> |
| <b>Lista de tablas</b> .....   | <b>xxix</b>  |
| <b>Capítulo 1. Introducción</b> .....  | <b>1</b>     |
| 1.1 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....  | 2            |
| 1.1.1 <i>Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia</i> .....                       | 2            |
| 1.1.2 <i>Convertidores multinivel</i> .....  | 4            |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN.....   | 6            |
| 1.3 HIPÓTESIS.....   | 6            |
| 1.4 OBJETIVOS.....   | 7            |
| 1.4.1 <i>Objetivos Particulares</i> .....  | 7            |
| 1.5 METODOLOGÍA.....   | 7            |
| 1.6 APORTACIONES.....  | 8            |
| 1.7 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DE LOS CAPÍTULOS.....                                    | 8            |
| <b>Capítulo 2. Sistemas de protección y pruebas de relevadores de protección</b> ..... | <b>11</b>    |
| 2.1 SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.....   | 12           |
| 2.1.1 <i>Finalidad de la protección por relevadores</i> .....                          | 13           |
| 2.2 CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN.....                       | 13           |
| 2.2.1 <i>Sensibilidad</i> .....  | 13           |
| 2.2.2 <i>Selectividad</i> .....  | 14           |
| 2.2.3 <i>Rapidez</i> .....   | 14           |
| 2.2.4 <i>Fiabilidad</i> .....  | 15           |
| 2.3 CLASIFICACIÓN DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN.....                                     | 15           |
| 2.4 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN.....                                       | 15           |
| 2.4.1 <i>Batería de alimentación</i> .....   | 16           |
| 2.4.2 <i>Transformadores de medición para protección</i> .....                         | 16           |
| 2.4.3 <i>Interruptor Automático</i> .....  | 17           |
| 2.4.4 <i>Relevadores de protección</i> .....   | 18           |
| 2.5 ESTRUCTURA DE RELEVADOR DE PROTECCIÓN.....   | 19           |
| 2.6 APLICACIONES BÁSICAS DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN.....                              | 20           |
| 2.7 ZONAS DE PROTECCIÓN.....   | 21           |
| 2.8 RELEVADORES DE PROTECCIÓN.....   | 21           |
| 2.9 EVOLUCIÓN DE LOS RELEVADORES DE PROTECCIÓN.....                                    | 21           |
| 2.10 TIPOS DE RELEVADORES DE PROTECCIÓN.....   | 22           |
| 2.10.1 <i>Relevadores electromagnéticos</i> .....                                      | 22           |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 2.10.2 | <i>Relevadores de inducción</i> .....                         | 23 |
| 2.10.3 | <i>Relevadores electrodinámicos</i> .....                     | 23 |
| 2.10.4 | <i>Relevadores electrónicos</i> .....                         | 23 |
| 2.10.5 | <i>Relevadores térmicos</i> .....                             | 24 |
| 2.10.6 | <i>Sistemas digitales de relevadores de protección</i> .....  | 24 |
| 2.10.7 | <i>Sistemas digitales protección</i> .....                    | 25 |
| 2.11   | FUNCIONES DE LOS RELEVADORES DE PROTECCIÓN .....              | 26 |
| 2.11.1 | <i>Relevadores de sobrecorriente</i> .....                    | 26 |
| 2.11.2 | <i>Protecciones de corriente instantáneas</i> .....           | 27 |
| 2.11.3 | <i>Protecciones de retardo de tiempo definido</i> .....       | 27 |
| 2.11.4 | <i>Protecciones de tiempo inverso</i> .....                   | 28 |
| 2.11.5 | <i>Relevador diferencial</i> .....                            | 31 |
| 2.11.6 | <i>Relevador Direccional</i> .....                            | 32 |
| 2.11.7 | <i>Relevador de Distancia</i> .....                           | 32 |
| 2.12   | SISTEMA DE PRUEBAS DE PROTECCIÓN.....                         | 32 |
| 2.12.1 | <i>Pruebas de ensayo</i> .....                                | 33 |
| 2.12.2 | <i>Pruebas Rutinarias de producción de fábrica</i> .....      | 33 |
| 2.12.3 | <i>Pruebas de puesta en servicio</i> .....                    | 34 |
| 2.12.4 | <i>Pruebas de mantenimiento periódico</i> .....               | 34 |
| 2.12.5 | <i>Localización de fallas</i> .....                           | 35 |
| 2.13   | MÉTODOS DE PRUEBAS.....                                       | 35 |
| 2.13.1 | <i>Estado estacionario</i> .....                              | 35 |
| 2.13.2 | <i>Estado dinámico</i> .....                                  | 36 |
| 2.13.3 | <i>Pruebas de estado transitorio</i> .....                    | 37 |
| 2.13.4 | <i>Pruebas principales</i> .....                              | 37 |
| 2.13.5 | <i>Pruebas de relevadores asistidos por computadora</i> ..... | 37 |
| 2.14   | PROCESO DE PRUEBAS .....                                      | 38 |
| 2.15   | EQUIPOS DE PRUEBAS DE RELEVADORES DE PROTECCIÓN.....          | 39 |
| 2.15.1 | <i>Megger</i> .....   | 39 |
| 2.15.2 | <i>ISA</i> .....  | 40 |
| 2.15.3 | <i>Manta Test Systems</i> .....                               | 40 |
| 2.15.4 | <i>Omicron</i> .....  | 41 |
| 2.15.5 | <i>Kocos</i> .....  | 42 |
| 2.15.6 | <i>Kingsine</i> .....   | 42 |
| 2.15.7 | <i>Tesient Instrument Co. Ltd</i> .....                       | 43 |
| 2.15.8 | <i>Doble</i> .....  | 43 |

**Capítulo 3. Convertidores Multinivel ..... 45**

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.1   | CONVERTIDORES MULTINIVEL.....  | 46 |
| 3.2   | TOPOLOGÍAS DE LOS CONVERTIDORES MULTINIVEL.....  | 47 |
| 3.2.1 | <i>Convertidor con diodo anclado. (Diode – Clamped Converter)</i> .....  | 47 |
| 3.2.2 | <i>Convertidor multinivel con capacitores flotantes (Flying Capacitor Multilevel Converter)</i> .....                  | 49 |
| 3.2.3 | <i>Convertidor multinivel con conexión en puentes H en cascada (Cascaded Full H-Bridge Multilevel Converter)</i> ..... | 52 |
| 3.3   | ESTRATEGIAS DE CONMUTACIÓN MULTINIVEL.....   | 55 |
| 3.3.1 | <i>Modulación en escalera</i> .....  | 57 |
| 3.3.2 | <i>Cancelación Selectiva de Armónicos</i> .....  | 57 |
| 3.3.3 | <i>PWM Senoidal</i> .....  | 58 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Capítulo 4. Diseño e Implementación del Amplificador de Voltaje .....</b>                                      | <b>65</b>  |
| 4.1 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL AMPLIFICADOR DE VOLTAJE .....   | 66         |
| 4.1.1 <i>Acondicionamiento de señal</i> .....   | 66         |
| 4.1.2 <i>Microcontrolador</i> .....   | 72         |
| 4.1.3 <i>Multiplexor</i> .....  | 80         |
| 4.1.4 <i>Controladores de disparo.</i> .....  | 82         |
| 4.1.5 <i>Módulo de potencia.</i> .....  | 83         |
| 4.2 FILTRO $\Pi$ LC PASA-BAJAS.....   | 85         |
| 4.2.1 <i>Modelo de la entrada de voltaje de un relevador de protección</i> .....                                  | 86         |
| 4.2.2 <i>Diseño del filtro LC</i> .....   | 89         |
| 4.3 FUENTES DE CD.....  | 91         |
| <b>Capítulo 5. Resultados.....</b>  | <b>93</b>  |
| 5.1 SIMULACIONES.....   | 94         |
| 5.1.1 <i>Simulación del convertidor multinivel en PSCAD</i> .....   | 94         |
| 5.1.2 <i>Comparación con las diferentes técnicas PWM convencionales aplicadas al convertidor multinivel</i> ..... | 99         |
| 5.2 SEÑALES OBTENIDAS POR EL AMPLIFICADOR DE VOLTAJE.....   | 103        |
| 5.2.1 <i>Linealidad</i> .....   | 104        |
| 5.2.2 <i>Medición de la Distorsión armónica total (THD)</i> .....   | 106        |
| 5.2.3 <i>Respuesta en frecuencia del MCD-SPWM</i> .....   | 109        |
| 5.2.4 <i>Distorsión Armónica Total del MCD-SPWM</i> .....   | 110        |
| 5.2.5 <i>Medición del Tiempo muerto</i> .....   | 111        |
| 5.2.6 <i>Señal PWM Multinivel</i> .....   | 111        |
| 5.2.7 <i>Señales de prueba aleatorias.</i> .....  | 112        |
| 5.2.8 <i>Potencia del MCD-SPWM</i> .....  | 115        |
| 5.2.9 <i>Características nominales del MCD-SPWM</i> .....   | 116        |
| <i>En la Tabla 5.3 se muestran las características nominales del MCD-SPWM.</i> .....                              | 116        |
| 5.2.10 <i>Prueba con relevador de protección</i> .....  | 116        |
| 5.3 ASPECTO FÍSICO DEL AMPLIFICADOR DE VOLTAJE .....  | 121        |
| <b>Capítulo 6. Conclusiones .....</b>   | <b>125</b> |
| 6.1 TRABAJO A FUTURO.....   | 126        |
| <b>Referencias bibliográficas .....</b>   | <b>127</b> |
| <b>Apéndice A: Tutorial básico de PSCAD/EMTDC.....</b>  | <b>139</b> |
| A.1 INTRODUCCION AL PSCAD.....  | 139        |
| A.1.1 <i>Los ficheros relacionados con el PSCAD</i> .....   | 139        |
| A.1.2 <i>El entorno Grafico</i> .....   | 140        |
| A.2 CREACIÓN DE UN PROYECTO.....  | 142        |
| A.2.1 <i>Nuevo proyecto</i> .....   | 142        |
| A.2.2 <i>Guardar Proyecto</i> .....   | 142        |
| A.2.3 <i>Control de área de proyectos</i> .....   | 144        |
| A.3 DISEÑO DEL ESQUEMA ELÉCTRICO.....   | 144        |
| A.3.1 <i>Búsqueda y copia de la fuente de voltaje</i> .....   | 145        |
| A.3.2 <i>Situar la fuente de voltaje en nuestro esquema</i> .....   | 145        |
| A.3.3 <i>Parametrización de la fuente de voltaje</i> .....  | 146        |
| A.3.4 <i>Situar y parametrizar la resistencia y el inductor</i> .....   | 146        |
| A.3.5 <i>Conectar componentes</i> .....   | 147        |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| A.4                                    | COLOCACIÓN DE MEDIDORES .....                                  | 148        |
| A.5                                    | GRÁFICA CON LA EVOLUCIÓN DE VOLTAJES Y CORRIENTES .....        | 148        |
| A.5.1                                  | <i>Situar la variable a representar</i> .....                  | 149        |
| A.5.2                                  | <i>Colocar la ventana de representación</i> .....              | 149        |
| A.5.3                                  | <i>Añadir a las gráficas las variables a representar</i> ..... | 150        |
| A.6                                    | SIMULACIÓN.....  | 151        |
| A.6.1                                  | <i>Parámetros de simulación</i> .....                          | 151        |
| A.7                                    | SIMULACIÓN Y RESULTADOS.....                                   | 152        |
| A.7.1                                  | <i>Errores en la simulación</i> .....                          | 152        |
| A.8                                    | RESULTADOS.....  | 153        |
| <b>Apéndice B: Programación.</b> ..... |  | <b>155</b> |
| B.1                                    | CODIGO DE PROGRAMACION DEL MICROCONTROLADOR.....               | 155        |
| B.2                                    | CALCULOS DE PARAMETROS DEL FILTRO LC.....                      | 158        |
| B.3                                    | MODELADO DEL TRANSFORMADOR DE VOLTAJE. ....                    | 159        |