

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE INVERSOR MULTINIVEL MONOFÁSICO EN CASCADA

Marcelo Silva, Franklin Silva, Andrés Ricaurte, David Sarzosa
Ingeniería Electromecánica. Universidad de las Fuerzas Armadas
Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga
Quijano y Ordóñez S/N y Hermanas Páez, Latacunga, Ecuador.
Email: cmsilva@espe.edu.ec; fmsilva@espe.edu.ec; arc-23@hotmail.com; djsa18@yahoo.com.

RESUMEN

El presente artículo expone el diseño, construcción e implementación de un inversor multinivel monofásico en cascada. El cual tiene la finalidad de generar corriente alterna a partir de fuentes de corriente continua con valores a la salida del inversor de 120Vac y 2A.

La obtención de la corriente alterna se realiza mediante la conmutación de los IGBT's generando así una señal casi sinusoidal a la salida del inversor.

Palabras claves: Inversor multinivel.

ABSTRACT

This paper presents the design, construction and implementation of an inverter single-phase multilevel in cascade. Which has the purpose of generating alternating current from current sources continues with values to the exit of the investor of 120Vac and 2A.

The obtaining of the alternating current from by means of the commutation of the IGBT's generating this way an almost sinusoidal sign to the exit of the inverter.

Keywords: Inverter multilevel

I. INTRODUCCIÓN

Los inversores multinivel son inversores de última tecnología que pueden generar corrientes o incluso voltajes sinusoidales con mucho menor contenido armónico. Si el número de niveles es lo suficientemente alto, se puede obtener un voltaje (o corriente) casi sinusoidal. Más aún, se puede modular en

y el nivel de potencia de los semiconductores se reducen considerablemente. Dentro del contexto de utilizar los inversores multinivel para obtener un bajo contenido armónico, se diseñó y construyó un prototipo de inversor monofásico de 8 niveles para operar un motor de corriente alterna.

Este inversor consta de tres puentes completos tipo H, con sus voltajes escalados, lo que permite obtener el número de niveles ya mencionado.

El inversor diseñado es capaz de soportar corrientes de aproximadamente 2 A, con un voltaje de salida de 110 Vac, dando una potencia nominal de 220 W. Para llevar a cabo este proceso, se diseñó un sistema de potencia modular con inversores individuales aislados galvánicamente, con sus sistemas de control de encendido y fuentes de alimentación independientes.

El proyecto realizado es en base a un inversor multinivel en cascada que consiste en una serie de unidades inversoras de medio puente (monofásicas, puente completo).

La función general de este inversor multinivel es sintetizar un determinado voltaje a partir de varias fuentes separadas de cd (SDCS, de several separate dc sources), que pueden ser baterías, celdas de combustible o celdas solares.

II. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

En la tabla 1 se indica las características de diseño que se tomó en cuenta para la realización del diseño del inversor multinivel.

Tabla 1: Características de Diseño Seleccionado.

CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DEL INVERSOR SELECCIONADO	
PARÁMETRO	SELECCIÓN
Tipo	Multinivel en cascada
Etapas	3
Fase	Monofásico
Carga	Inductiva
Tipo de alimentación	Asimétrica
# Fuentes de entrada	3
Niveles de tensión	8
Modulación	Pulso Único
Conmutadores	IGBT
Salida	Aprox. onda sinusoidal

A. DISEÑO DE LA ETAPA DE POTENCIA

Para el diseño de la etapa de Potencia del Inversor Monofásico Multinivel de Tres Etapas Conectadas en Cascada planteado en el desarrollo presente, existen varios parámetros iniciales o de diseño a considerar.

B. PARÁMETRO DE DISEÑO PARA LA ETAPA DE POTENCIA

Para el diseño de la etapa de potencia del inversor monofásico multinivel de tres etapas conectadas en cascada los parámetros de diseño están dados por los valores nominales de la carga. En tabla 2 se detallan los parámetros de diseño.

Tabla 2: Parámetros de Diseño de la Etapa de Potencia.

PARÁMETROS DE DISEÑO	
PARÁMETRO	VALOR NOMINAL
Voltaje Carga	110 VRMS
Potencia	200 Watts
Frecuencia	60Hz

C. SELECCIÓN DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN

El requerimiento de las fuentes se basa en el tipo de alimentación asimétrica y en la corriente de salida que es de 2 A. Para la selección de las fuentes de alimentación se debe tomar en cuenta los parámetros de diseño, por lo que el voltaje necesario es de 120Vrms, en donde el voltaje de la onda no es sinusoidal, por lo que esta es solo una aproximación, el diseño de las fuentes de alimentación se tomó en cuenta el valor del voltaje pico de 168V, este valor pico será dividido para $\sqrt{2}$ entonces:

$$168V/\sqrt{2} = 118.79 V$$

Esto se realiza por que la señal es casi sinusoidal.

En la tabla 3 se indica las fuentes de alimentación utilizadas, con una corriente de 6A, esta corriente nos ayudara en el arranque del motor por que la corriente arranque es 5 – 6 veces la corriente nominal. Los valores necesarios para la selección de las fuentes se detallan a continuación.

Tabla 3: Selección de Fuentes de Alimentación.

ALIMENTACIÓN		
ETAPA	VALOR NOMINAL DE SALIDA	VOLTAJE DE ALIMENTACION
I	24 VDC 6 A	110V-220V
II	48 VDC 6 A	110V-220V
III	96 VDC 6A	110V-220V

D. SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE POTENCIA.

En la figura 1, se indica el esquema de conexiones utilizado para el desarrollo de la selección del dispositivo de potencia.

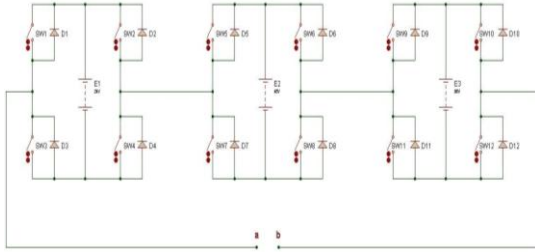


Figura 1: Inversor Monofásico Multinivel de Tres Etapas Conectado en Cascada

La utilización del IGBT como dispositivo de potencia en el proyecto se justifica en base a las características de robustez y velocidad de respuesta, la corriente que se desea que circule por cada IGBT es de 2A, a continuación en la tabla 4 detallaremos los requerimientos para la selección del dispositivo de potencia.

Tabla 4: Requerimientos para el dispositivo de potencia.

REQUERIMIENTOS PARA EL DISPOSITIVO DE POTENCIA	
DISPOSITIVO	REQUERIMIENTO
IGBT	IGBT A UTILIZAR: 12 I_{arranque}: 6 A V: 168 V_{maxdc} FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN: 60 HZ TIPO: DE POTENCIA

Los parámetros técnicos específicos del dispositivo se muestran a continuación.

$$I_{\text{máx por IGBT}} = I_{\text{máx carga}}$$

$$I_{\text{máx carga}} = 2A$$

$$\sum \text{Fuentes de alimentación Inversor} = 168 \text{ Vdc}$$

Basado en los parámetros de corriente y voltaje de diseño máximos se procedió a validar las capacidades del IGBT seleccionado FGA40N65SMD, cumpliendo como se muestra las condiciones necesarias para el funcionamiento del inversor.

E. DISEÑO DE LA ETAPA DE CONTROL

Antes de la selección del dispositivo de control se detallara las señales que este entregara para el funcionamiento del inversor multinivel, es por esto que un parámetro de diseño del

inversor multinivel es minimizar la distorsión armónica, para aquello se calculara los ángulos de disparo, otro parámetro de diseño de esta etapa de control es los pulsos que el Microcontrolador debe entregar al inversor multinivel para su funcionamiento.

F. SELECCIÓN DEL ÁNGULO DE DISPARO PARA MINIMIZAR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA.

El contenido armónico de un sistema que posee inversores tipo puente completo en cascada se reduce de manera considerable solo por el hecho de incrementar las etapas, proceso que incluso permite obtener mayor voltaje de salida.

Cálculo del TDH

$$TDH = \sqrt{\frac{E_t^2 - E_1^2}{E_1^2}} * 100 \quad \text{Ec. 1}$$

La relación de las armónicas existentes está dada en función de los ángulos posibles de la siguiente forma.

$$E_1^2 = \frac{8E^2}{49\pi^2} [\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) + \cos(\alpha_4) + \cos(\alpha_5) + \cos(\alpha_6) + \cos(\alpha_7)] \quad \text{Ec. 2}$$

$$E_t^2 = \frac{2E^2}{49\pi} \left[\frac{49\pi}{2} - 1\alpha_1 - 3\alpha_2 - 5\alpha_3 - 7\alpha_4 - 9\alpha_5 - 11\alpha_6 - 13\alpha_7 \right] \quad \text{Ec. 3}$$

En la tabla 5 se indica los ángulos obtenidos luego de igualar a cero cada una de las ecuaciones son los siguientes:

Tabla 5: Ángulos

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
8.57°	10.08	25.72°	31.56°	42.85°	49.92°	66.01°
0.397 (ms)	0.466 (ms)	1.190 (ms)	1.461 (ms)	1.983 (ms)	2.310 (ms)	3.054 (ms)

Entonces el TDH obtenido al reemplazar en la ecuación 1 es:

$$TDH = 7.94\%$$

Basados en los datos anteriores para el diseño del inversor multinivel, se requiere que el microcontrolador opere de la siguiente manera, es por esto que se indicara los pulsos y su manera de activación. En la figura 2 se

indica los pulsos de cada uno de los IGBT's con su forma de onda ideal.

La forma de onda ideal de voltaje de salida del inversor monofásico multinivel de tres etapas conectadas en cascada mediante las señales de control se muestra en la siguiente figura.

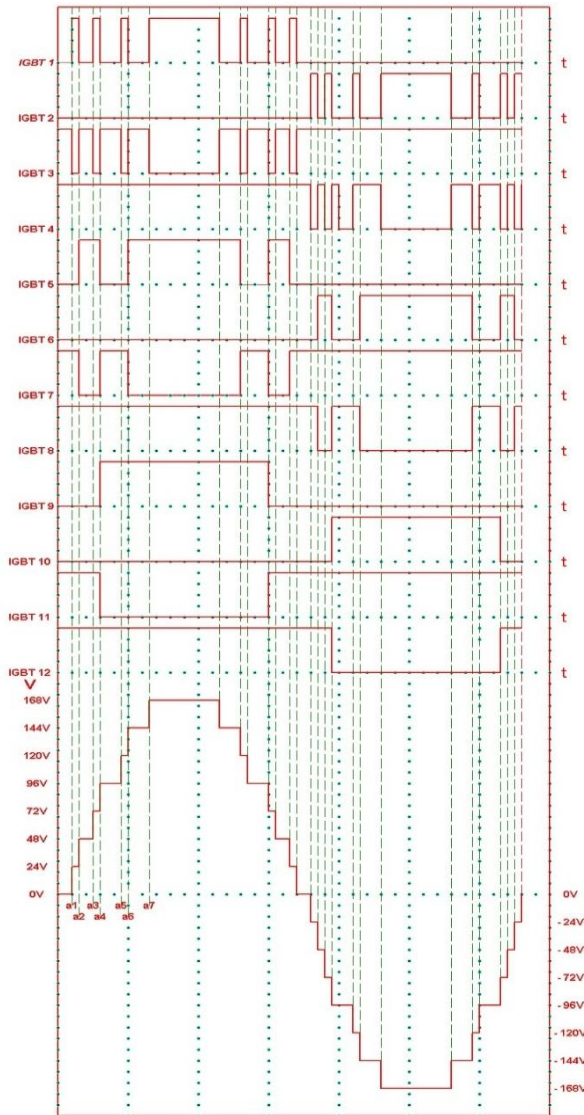


Figura 2: Forma de Onda Ideal con los Pulsos de cada IGBT

G. SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR.

A continuación en la tabla 6 se citara los requerimientos y la justificación del microcontrolador seleccionado.

Tabla 6: requerimientos para el microcontrolador

REQUERIMIENTOS PARA EL MICROCONTROLADOR	
DISPOSITIVO	REQUERIMIENTO
CONTROLADOR	PUERTOS DIGITALES DE SALIDA: 12 SALIDAS POR IGBT 1 SALIDA PARA UN LED TEMPORIZADOR FRECUENCIA SEÑAL DE RELOG ESPACIO DE MEMORIA Puertos digitales con interrupción: 1 Salida para switch on/off, 1 Salida para pulsador arranque

Para la selección del microcontrolador se tomó en cuenta los requerimientos, es por esto que podemos justificar el microcontrolador ATMEGA164P seleccionado, y también en comparación de otro tipo de dispositivos de control.

H. IMPLEMENTACIÓN DE LA ETAPA DE POTENCIA

Para la elaboración de las placas figura 3, se realiza un modelo puesto que las dos restantes son iguales, tiene el mismo circuito y funcionalidad cambiando nada más sus conexiones entre sí.

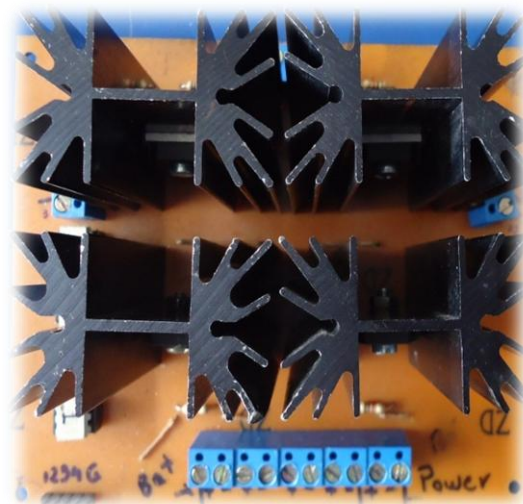


Figura 3: Tarjeta de Potencia

I. IMPLEMENTACION DE LA ETAPA DE CONTROL

En la figura 4 se muestra el diagrama eléctrico de conexiones de la etapa de control del inversor multinivel monofásico.

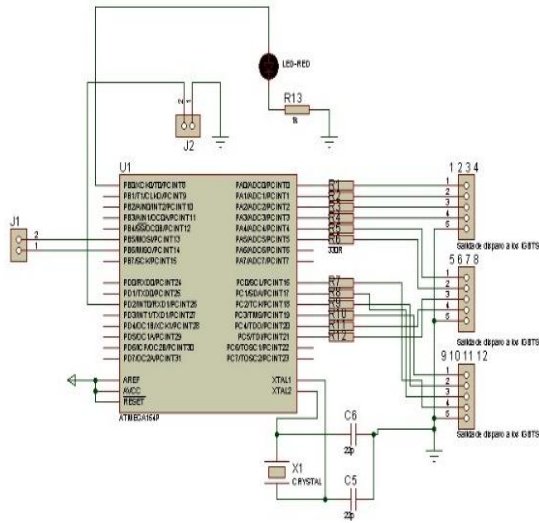


Figura 4: Diagrama Eléctrico de la etapa de control

J. UBICACIÓN DE LOS COMPONENTES EN EL CIRCUITO IMPRESO – ETAPA DE POTENCIA.

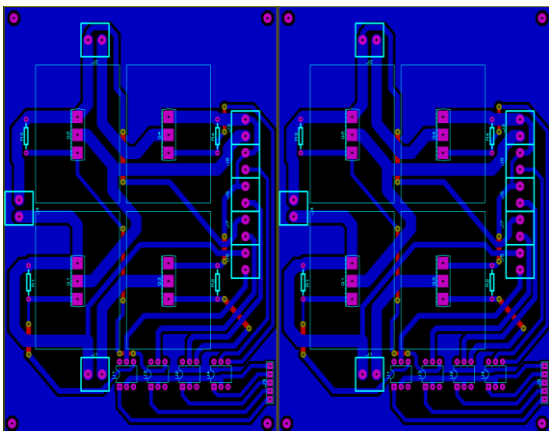


Figura 5: Placa del circuito de la etapa de potencia

K. UBICACIÓN DE LOS COMPONENTES EN EL CIRCUITO IMPRESO – ETAPA DE CONTROL

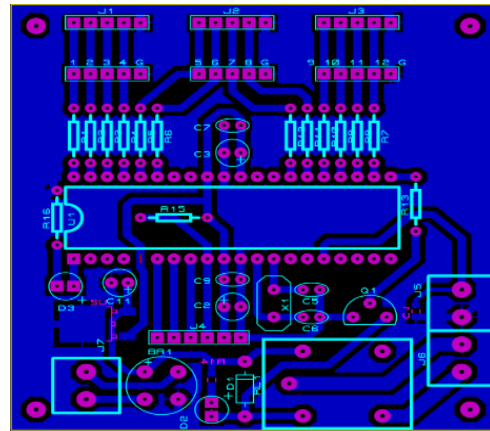


Figura 6: Placa del circuito de la etapa de control.

L. INTEGRACIÓN DE LA ETAPA DE CONTROL CON LA ETAPA DE POTENCIA.

Para la integración de la etapa de control con la etapa de potencia se realizó con el conductor AWG número 20, esto permite estar comunicados y así enviar los pulsos de la placa de control a cada uno de los IGBT's implementados en las placas de potencia.

En la figura 7 esta como resultado el módulo final del prototipo didáctico de inversor multinivel monofásico en cascada.



Figura 7: Módulo final del Inversor Multinivel Didáctico Monofásico en Cascada.

III. ANÁLISIS Y PRUEBAS DE RESULTADOS

El presente se analizara los resultados obtenidos durante el proceso de desarrollo del proyecto de titulación enfocando dicho análisis a pruebas sobre los dispositivos implementados.

A. PRUEBAS DEL INVERSOR

Las pruebas fueron realizadas tomando en cuenta los valores ideales del inductor multinivel. En la tabla 7 se muestra los valores ideales del inductor.

Tabla 7: Valores ideales del inductor.

VALORES IDEALES DEL INVERSOR	
PARÁMETRO	VALOR NOMINAL
Voltaje Carga	110 VRMS
Corriente Carga	2 A
Frecuencia	60Hz
Carga	Monofásica

B. FORMA DE ONDA IDEAL Y REAL DEL INVERSOR

Tomando en cuenta el diseño ya realizado y llevándolo a simulación en la figura 8, se generó el tipo de onda, esta onda es la ideal generada para nuestro proyecto.

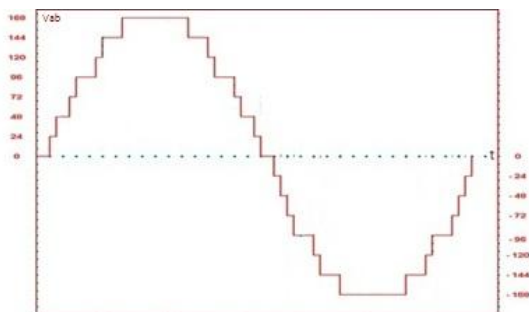


Figura 8: Forma de onda Ideal Generada

La forma de onda generada ya construido el prototipo se indica en la figura 9, cumpliendo así con los niveles, tiempos y corrientes antes mencionadas para su diseño.

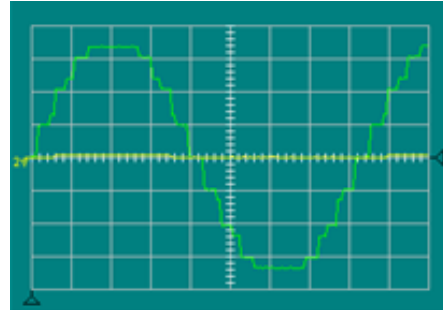


Figura 9: Forma de onda Real Generada.

C. PULSOS DE LOS IGBT OBTENIDOS POR EL MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS (LV DAM EMS)

A continuación en las siguientes figuras se indica los pulsos generados en forma práctica por cada IGBT a través del módulo de adquisición de datos (LV DAM EMS), en comparación con su onda fundamental.

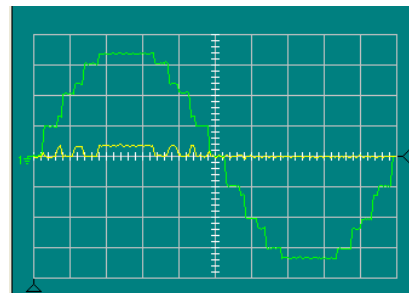


Figura 10a: Pulso en la gate del 1er IGBT

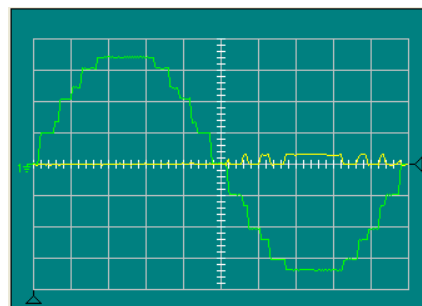


Figura 10b: Pulso en la gate del 2do IGBT

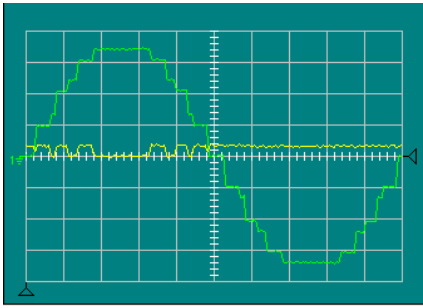


Figura 10c: Pulso en la gate del 3er IGBT

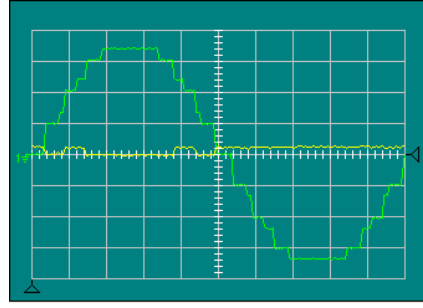


Figura 10d: Pulso en la gate del 7mo IGBT

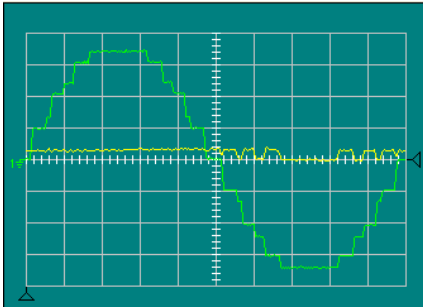


Figura 10e: Pulso en la gate del 4to IGBT

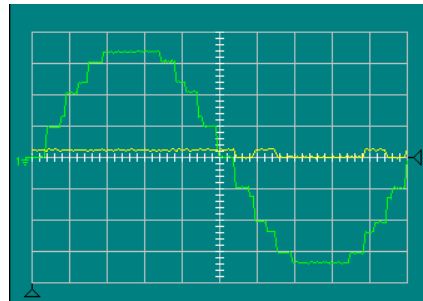


Figura 10f: Pulso en la gate del 8vo IGBT

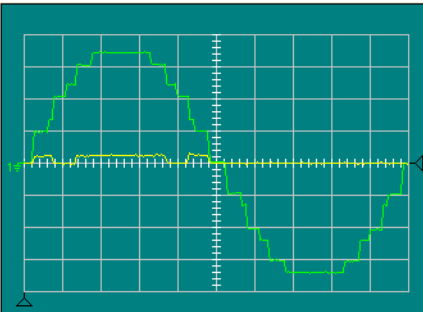


Figura 10g: Pulso en la gate del 5to IGBT

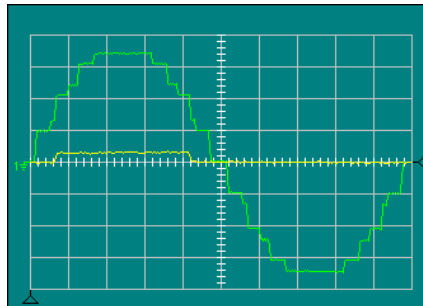


Figura 10h: Pulso en la gate del 9no IGBT

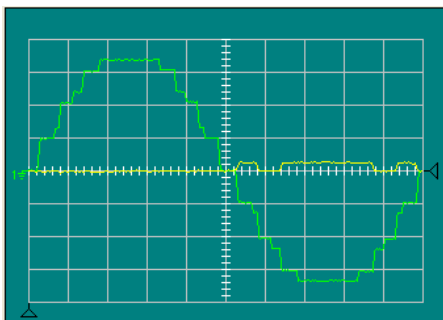


Figura 10i: Pulso en la gate del 6to IGBT

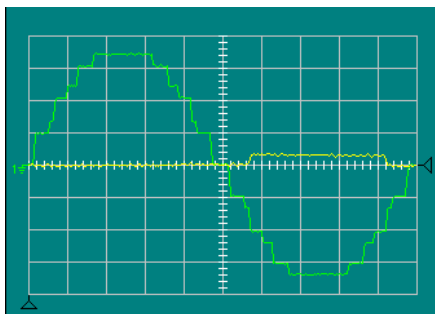


Figura 10j: Pulso en la gate del 10mo IGBT

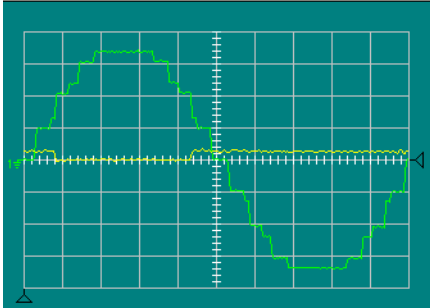


Figura 10k: Pulso en la gate del 11 vo lgbt

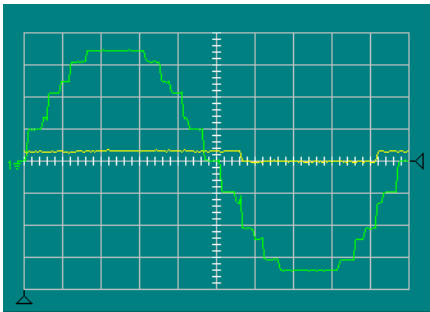


Figura 10m: Pulso en la gate del 12 vo lgbt

Como se puede observar los pulsos generados en la práctica corresponden a los pulsos generados de manera ideal, con un margen de error inferior a la unidad.

D. RESULTADO DEL TDH ADQUIRIDO POR EL MODULO DE ADQUISICION DE DATOS (LV DAM EMS)

En la figura 11 se observa que el valor TDH obtenido en forma práctica del módulo de adquisición de datos (LV DAM ES), es menor al calculado, cumpliendo así de manera correcta el diseño para el TDH.

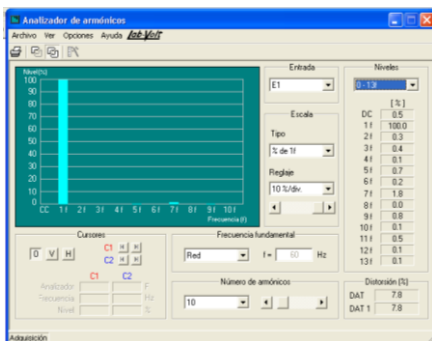


Figura 11: Valor obtenido en la práctica del TDH

El valor obtenido en esta práctica es de 7.9%, esto significa que el valor corresponde al calculado.

E. RESULTADO DE LOS ÁNGULOS DE DISPARO DE CADA NIVEL ADQUIRIDO POR EL MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS (LV DAM EMS)

En la tabla 8 se indica los valores obtenidos en el diseño y en la práctica en milisegundos (ms), para su respectiva comparación de resultados.

Tabla 8: Valores calculados y obtenidos en la práctica.

VALOR CALCULADO	VALOR OBTENIDO	ERROR (%)
0.397	0.40	0.75
0.466	0.47	0.85
1.190	1.20	0.83
1.461	1.47	0.61
1.983	2.00	0.85
2.310	2.33	0.85
3.054	3.07	0.50

Los valores obtenidos en esta práctica están dentro del margen del error, lo que quiere decir que lo diseñado a lo obtenido se cumplió satisfactoriamente.

F. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.

En la tabla 9 se muestra los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio, esto se realizó con la ayuda de un motor, los valores representados son a la salida del generador conectado a este un módulo de cargas resistivas (figura 9).

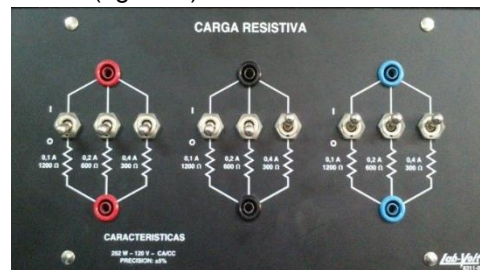


Figura 9: Módulo real de cargas resistivas

A continuación se presenta los valores obtenidos en la pruebas de laboratorio.

Tabla 9: Valores obtenidos en la prueba de laboratorio.

CARGA RESISTIVA EN EL GENERADOR (A)	SALIDA MOTOR	
	VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)
0	110	2
0,1	110	2
0,2	110	2
0,3	110	2
0,4	110	2
0,5	110	2
0,6	110	2,1
0,7	110	2,1
0,8	110	2,1
0,9	110	2,1
1,0	110	2,2
1,1	110	2,2
1,2	110	2,2
1,3	110	2,2
1,4	110	2,2
2,1	110	2,2
2,8	110	2,2
3,5	110	2,3
4,1	110	2,3

En esta práctica se obtuvo los valores esperados en la parte de diseño, con un voltaje de 110V y una corriente menor a 2.5A.

Cabe recalcar que para la suma de la carga resistiva se debe subir cada uno de los interruptores del módulo de carga resistiva según corresponda por obtener los valores establecidos en dicha práctica.

IV. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un inversor multinivel monofásico de tres etapas, obteniendo un equipo de potencia de estructura compacta y robusta.
- Una vez construido el equipo, este fue sometido a pruebas prácticas con resultados exitosos.
- La utilización de los opto acopladores, es importante porque nos permite separar y aislar las tierras entre el circuito de control y el

circuito de potencia con el objetivo de proteger la parte de control en caso de presentarse problemas con la respuesta del sistema en la parte de potencia del Inversor.

- El inversor multinivel construido a partir de puente "H" debe conectarse en cascada para obtener la máxima cantidad de niveles posibles. De esta forma con muy pocas etapas se pueden tener un gran número de niveles; en este caso con 3 etapas obtuvimos 8 niveles.
- Las pruebas realizadas en el laboratorio cumple satisfactoriamente con los parámetros de diseño señalados al inicio del segundo capítulo, pudiéndose comprobar prácticamente las buenas propiedades de la tecnología de los inversores multinivel, haciendo de este módulo, funcional, didáctico y práctico para su estudio.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benavent. (2001). *Electrónica de Potencia, Teoría y Aplicaciones*. México: Alfaomega.
- Hart, D. W. (2001). *Introducción a la Electrónica de Potencia*. Madrid, España: PEARSON EDUCACION, S.A.
- Mohan, N. (2009). *Electrónica de potencia (Tercera ed.)*. MONTERREY, MEXICO.
- Rashid, M. H. (2004). *Electrónica de potencia (TERCERA ed.)*.
- Ross. (1997). *The Power of Electronics*.

BIOGRAFÍA



David Sarzosa. Nació el 28 de mayo de 1986 en Latacunga provincia de Cotopaxi en Ecuador. Es graduado de Ingeniería en Electromecánica, de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE en el año 2015. Áreas de Interés: Sistemas Eléctricos, Control Eléctrico, Automatización. Email: djsa18@yahoo.com



Andrés Ricaurte. Nació el 10 de noviembre de 1985 en Riobamba provincia de Chimborazo en Ecuador. Es graduado de Ingeniería en Electromecánica, de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE en el año 2015. Áreas de Interés: Sistemas Electrónicos, Automatización. Email: arc-23@hotmail.com