

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



“Diseño y construcción de inversor monofásico de cuatro etapas”

PRESENTADO POR:

OSCAR ARMANDO ALFARO CRUZ

REGIS ERNESTO MURGAS ZELAYA

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO 2010

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ

SECRETARIO GENERAL :

LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO :

ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA

DIRECTOR :

ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título :

**“Diseño y construcción de inversor
monofásico de cuatro etapas”**

Presentado por :

OSCAR ARMANDO ALFARO CRUZ

REGIS ERNESTO MURGAS ZELAYA

Trabajo de Graduación Aprobado por :

Docente Director :

ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

San Salvador, Mayo 2010

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

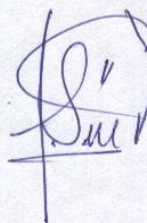
ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, 16 de Abril de 2010, en la Sala de Lectura, a las 16:40 horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. José Wilber Calderón Urrutia
Director

2. Ing. Salvador de Jesús German
Secretario

Firma:

 Wilber Calderón

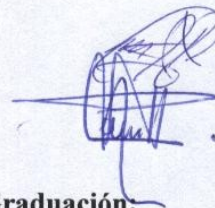


Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

Firma:

1- Ing. Marlon Javier Rodríguez

2- Ing. Jorge Alberto Zetino Chicas



Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

“Diseño y construcción de inversor monofásico de cuatro etapas”

A cargo de los Bachilleres:

ALFARO CRUZ, OSCAR ARMANDO
MURGAS ZELAYA, REGIS ERNESTO

Habiendo obtenido el presente Trabajo una nota final, global de:

9.6

(NUEVE. SEIS)

DEDICATORIA

A DIOS:

Por darme la oportunidad de vivir y brindarme la fortaleza, paz y tranquilidad de finalizar de manera satisfactoria la carrera de ingeniería eléctrica. Gracias señor Dios todo poderoso; este logro es gracias a ti.

A MI MADRE: ANDREA DE ALFARO

Agradezco de forma especial a mi madre por darme de manera incondicional todo su amor, cariño y comprensión y apoyarme siempre ante cualquier situación de la vida. Este merito también es de ella.

A MIS HERMANOS: LILIAN ALFARO Y GABRIEL ALFARO

Por todo su apoyo incondicional tanto moral como económico, ellos han sido parte fundamental en el esfuerzo y trabajo realizado a lo largo de estos años de estudio, sin ellos no habría sido posible el éxito alcanzado.

A TODA MI FAMILIA

Agradecer a todos aquellos familiares que de manera directa ó indirecta contribuyeron y me brindaron todo su apoyo.

OSCAR ARMANDO ALFARO CRUZ

DEDICATORIA

A MI MADRE: VICTORIA ZELAYA

Muchas gracias, por todo su amor y apoyo incondicional en todos los aspectos de mi formación como ser humano, sin usted hubiese sido imposible la culminación de mi carrera.

A MI PADRE: MIGUEL ÁNGEL

Muchas gracias, por el apoyo brindado en todo momento que lo necesite.

A MIS HERMANAS Y HERMANO: SANDRA CAROLINA, TANIA VICTORIA Y MIGUEL ENRIQUE

Muchas gracias, por creer en mi y brindarme todo su apoyo y comprensión, son un pilar fundamental para la culminación de mi carrera profesional.

A MI ABUELA, TIA, PRIMAS Y PRIMOS: MARÍA EVA, EVA CERROS, KAREN VERONICA, CLAUDIA LOURDES, EVER FRANSISCO, DANIEL ERNESTO

A todos ustedes muchas gracias, porque a pesar de la distancia siempre estuvieron pendientes de mi, dandome impulso y ayuda para continuar.

A TODA MI FAMILIA

Que de alguna manera contribuyeron a este logro.

A TODOS LOS COMPAÑEROS Y PERSONAS

Que tuve la oportunidad de conocer durante el tiempo que duro mi carrera y que de una u otra forma contribuyeron a ella, en especial al compañero José Luis Navas Reyes, quién en un principio formo parte de este trabajo de graduación.

REGIS ERNESTO MURGAS ZELAYA

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
DEDICATORIA	i
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
II. Inversores Multinivel	3
2.1. Inversor Multietapa con Puentes H e Inversores en Cascada	3
2.1.1. Inversor de Medio Puente	3
2.1.2. Inversor de Puente Completo	4
2.1.3. Inversor Multietapa en Cascada con Fuente Común	10
III. Características del Inversor Monofásico Multinivel	15
3.1. Inversor Monofásico Multinivel de 2 Etapas	19
3.2. Inversor Monofásico Multinivel de 3 Etapas	22
3.3. Inversor Monofásico Multinivel de 4 Etapas	25
IV. Simulación del Inversor Multinivel de 4 Etapas	31
4.1. Resultados de la Simulación	35
4.1.1. Señales de Control para cada uno de los IGBT's	35

Contenido	Página
4.1.2. Voltaje Secundario y Señal de Salida	37
4.1.3. Distribución de Potencia	38
4.2. Comparación del Inversor Multinivel de 4 Etapas con el Inversor PWM	39
V. Diseño y Construcción del Inversor Multinivel de 4 Etapas	41
5.1. Diseño y Construcción del Circuito de Control	41
5.2. Diseño y Construcción del Circuito de Potencia	47
5.3. Transformadores	54
5.4. Filtro de Salida	57
5.5. Circuito Completo del Inversor de 4 Etapas	58
VI. Fuentes de Alimentación DC	60
6.1. Diseño y Construcción de las fuentes de 5V y 15V	60
6.2. Diseño y Construcción de la Fuente de 80V	62
VII. Pruebas y Resultados de Laboratorio	64
7.1. Suma de los Voltajes Secundarios	64
7.1.1. Auxiliar 3	64
7.1.2. Sumatoria de los Voltajes Secundarios del Auxiliar 3 y Auxiliar 2	65
7.1.3. Sumatoria de los Voltajes Secundarios del Auxiliar 3, Auxiliar 2 y Auxiliar 1	66
7.2. Voltaje de Salida y Distorsión Armónica Total Sin Filtro.....	66
7.3. Voltaje de Salida y Distorsión Armónica Total con Filtro	68

Contenido	Página
7.4. Comparación de la Señal del Inversor con la Señal AC de la Red	69
7.5. Inversor Construido	70
VIII. Conclusiones	71
BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXO A: INVERSOR ACOPLADO POR DIODO E INVERSOR ACOPLADO POR CONDENSADOR	74
ANEXO B: CÁLCULO DE LAS SECUENCIAS DE CONMUTACIÓN	78
ANEXO C: SIMULACIONES	81
ANEXO D: CÁLCULO DE LOS TRANSFORMADORES DE CADA ETAPA DEL INVERSOR	86
ANEXO E: CIRCUITOS IMPRESOS	90
ANEXO F: LINKS PARA DATOS TÉCNICOS	93
ANEXO G: MANUAL DE USUARIO	94
ANEXO H: GUÍAS DE LABORATORIO	105
ANEXO I: PROGRAMA DE CONTROL DEL INVERSOR DE 4 ETAPAS	139
ANEXO j: COSTO DEL INVERSOR MULTINIVEL DE 4 ETAPAS	141

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	Página
Tabla 1. Control de un inversor de medio puente	4
Tabla 2. Control de un inversor de puente completo	5
Tabla 3. Secuencia de encendido de los transistores del inversor en cascada simétrico de dos etapas de la figura 4	6
Tabla 4. Secuencia de encendido para el inversor en Cascada Asimétrico de dos Etapas de la figura 8	8
Tabla 5. Secuencia de disparo del Inversor en Cascada Asimétrico de dos Etapas con siete niveles	8
Tabla 6. Lógica de control para un puente 'H'	17
Tabla 7. Número de niveles posibles de acuerdo al número de etapas	18
Tabla 8. Secuencia de conmutación del inversor de 2 etapas, 9 niveles	20
Tabla 9. Secuencia de conmutación del inversor de 3 etapas, 27 niveles	24
Tabla 10. Secuencia de conmutación del inversor de 4 etapas, 81 niveles	26
Tabla 11. Contenido de los archivos *.tbl de cada bloque lookup table	32
Tabla 12. Distribución de pines del puerto B y puerto C	42
Tabla 13. Tabla de verdad del opto-acoplador 6N137	43
Tabla 14. Características principales del IGBT	51
Tabla 15. Valores de voltaje primario y secundario de los transformadores	56
Tabla A.1.1. Secuencia de encendido para el inversor de la figura A.1.1	74
Tabla A.1.2. Secuencia de encendido para el inversor de la figura A.1(b)	75

Contenido	Página
Tabla A.2.1. Secuencia de encendido para el inversor de la figura A.2.1(a)	76
Tabla A.2.2. Secuencia de encendido para el inversor de la figura A.2.1(b)	77
Tabla D1. Valores de voltaje primario y secundario de los transformadores	86
Tabla D2. Calibres y diámetros de alambres esmaltados	86
Tabla E1. Corriente que soportan los diferentes anchos de pista	90
Tabla H1. Control de un inversor de puente completo	110
Tabla H2. Contenido de los archivos *.tbl de cada bloque lookup table	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 1. Inversor de: (a) dos niveles, (b) tres niveles, y (c) m niveles	3
Figura 2. Inversor de Medio Puente	4
Figura 3. Inversor de Puente Completo o Puente H	5
Figura 4. Inversor en cascada simétrico de dos etapas	5
Figura 5. Señal de voltaje de salida para el inversor en cascada simétrico de dos etapas con cinco niveles de la figura 4	6
Figura 6. Comparación del voltaje de salida para el inversor en cascada simétrico de dos etapas de la figura 4 y una señal sinusoidal pura	7
Figura 7. THD de la señal de voltaje de salida para el inversor en cascada simétrico de dos etapas de la figura 4	7
Figura 8. Inversor en Cascada Asimétrico de dos Etapas	8
Figura 9. Señal de voltaje de salida para el inversor de la figura 8	9
Figura 10. Comparación de la señal de voltaje de salida de 7 niveles con una señal sinusoidal pura del inversores en cascada asimétrico	9
Figura 11. THD para el inversor en cascada asimétrico con una señal de voltaje de salida de 7 niveles	10
Figura 12. Inversor en Cascada Simétrico de dos Etapas con fuente común	10
Figura 13. Señal de salida del inversor simétrico con fuente común de cinco niveles de la figura 12	11
Figura 14. Comparación señal de salida del inversor en cascada simétrico con fuente común de cinco niveles de la figura 12 con una señal sinusoidal pura	11
Figura 15. THD del inversor en cascada simétrico con fuente común de cinco niveles de la figura 12	12
Figura 16. Inversor Asimétrico de Fuente Común	12

Contenido	Página
Figura 17. Señal de salida del Inversor Asimétrico de Fuente Común con siete niveles	13
Figura 18. Comparación de la señal de salida del Inversor Asimétrico de Fuente Común con una señal sinusoidal pura	13
Figura 19. Gráfico del THD del Inversor Asimétrico de Fuente Común con siete niveles	14
Figura 20. Dos formas de generar una señal alterna, a) Con varias fuente de DC y b) Con una fuente de DC	16
Figura 21. Puente H con transistores IBGT	17
Figura 22. Los tres estados posibles de un puente 'H', a) Estado $+V_N$, b) Estado $-V_N$, c) Estado cero (0V)	17
Figura 23. Inversor monofásico multinivel de n etapas	19
Figura 24. Diagrama esquemático del inversor de 2 etapas	19
Figura 25. Señal de salida del inversor multinivel de 2 etapas	20
Figura 26. Diagrama esquemático del inversor de 3 etapas	23
Figura 27. Señal de salida del inversor multinivel de 3 etapas ...	23
Figura 28. Diagrama esquemático del inversor de 4 etapas	25
Figura 29. Señal de salida del inversor de 4 etapas.....	30
Figura 30. Comparación de la señal de salida del inversor de 4 etapas con una señal ideal	30
Figura 31. Semiciclo positivo de la señal de salida con los 40 niveles del inversor de 4 etapas	30
Figura 32. Simulación del inversor de 4 etapas	34
Figura 33. Señales de control para Auxiliar 3	35
Figura 34. Señales de control para Auxiliar 2	36
Figura 35. Señales de control para Auxiliar 1	36
Figura 36. Señales de control para Etapa Principal	36

Contenido	Página
Figura 37. Voltajes secundarios de cada uno de los transformadores de cada etapa	37
Figura 38. Suma de voltajes secundarios	37
Figura 39. Voltaje de salida del inversor de 4 etapas	37
Figura 40. THD del inversor de 4 etapas	38
Figura 41. Distribución de Potencia	38
Figura 42. Comparación de la corriente de carga entre el inversor multinivel de 4 etapas y el inversor PWM	39
Figura 43. Voltaje de salida del inversor multinivel de 4 etapas y el inversor PWM	40
Figura 44. Microcontrolador PIC16F877	41
Figura 45. Optoacoplador 6N137	42
Figura 46. Diagrama de conexiones del optoacoplador 6N137	43
Figura 47. Diagrama del circuito de control	44
Figura 48. Circuito impreso quemador de PIC	44
Figura 49. Quemador de PIC	45
Figura 50. Circuito impreso de control	45
Figura 51. Simulación del microcontrolador en Proteus	46
Figura 52. Señales de control del PIC en los pines B0 a B3	46
Figura 53. Retardo en las señales de control	46
Figura 54. Circuito de control, vista superior	47
Figura 55. Circuito de control, vista inferior	47
Figura 56. Driver IR2113	48
Figura 57. Diagrama de conexiones del driver IR2113	48
Figura 58. Circuito equivalente en el proceso de carga del C_{BS}	49

Contenido	Página
Figura 59. Circuito equivalente en el proceso de descarga de C_{BS}	50
Figura 60. IGBT STGP10NC60H	51
Figura 61. Diagrama esquemático de una etapa del circuito de potencia	52
Figura 62. Circuito impreso de una etapa del circuito de potencia	52
Figura 63. Una etapa del circuito de potencia, vista superior .	53
Figura 64. Una etapa del circuito de potencia, vista lateral	53
Figura 65. Una etapa del circuito de potencia, vista inferior ...	53
Figura 66. Circuito de potencia, vista superior	54
Figura 67. Circuito de potencia, vista lateral	54
Figura 68. Conexión entre puentes 'H' y Transformadores	55
Figura 69. Transformadores contruidos	57
Figura 70. Filtro LC	57
Figura 71. Capacitor e inductor utilizados para el filtro LC	58
Figura 72. Diagrama esquemático completo del inversor de 4 etapas	59
Figura 73. Diagrama esquemático de las fuentes de 5V y 15V	60
Figura 74. Fuentes de voltajes DC, tres de 5V y una de 15V	61
Figura 75. Diagrama esquemático de la fuente de 80V	62
Figura 76. Señal de salida (Vout), corriente de carga (Icarga), señal de entrada al regulador (BR1+) y señal de entrada al puente rectificador (Vin)	63
Figura 77. Fuente de voltaje de 80V DC	63
Figura 78. Pruebas del inversor implementado en el laboratorio .	64
Figura 79. Auxiliar 3 medido con el osciloscopio	64
Figura 80. Auxiliar 3 medido con el fluke	65

Contenido	Página
Figura 81. Auxiliar 3 + Auxiliar 2, medido con el osciloscopio .	65
Figura 82. Auxiliar 3 + Auxiliar 2, medido con el fluke	65
Figura 83. Auxiliar 3 + Auxiliar 2 + Auxiliar 1, medido con el osciloscopio	66
Figura 84. Auxiliar 3 + Auxiliar 2 + Auxiliar 1, medido con el fluke	66
Figura 85. Voltaje de salida sin filtro, medido con el osciloscopio	67
Figura 86. Voltaje de salida sin filtro, medido con el fluke ...	67
Figura 87. Espectro armónico y THD sin filtro	67
Figura 88. Forma, magnitud y frecuencia de la señal de salida sin filtro	68
Figura 89. Voltaje de salida con filtro, medido con el osciloscopio	68
Figura 90. Voltaje de salida con filtro, medido con el fluke	68
Figura 91. Espectro armónico de la señal de salida con filtro, medido con el fluke	69
Figura 92. Espectro armónico de la señal de salida con filtro, medido con el amprobe	69
Figura 93. THD de la red eléctrica	69
Figura 94. Inversor multinivel de 4 etapas, 81 niveles construido	70
Figura A.1.1. Esquema de Inversor Acoplado por Diodo. (a) Tres niveles. (b) Cinco niveles	74
Figura A.2.1. Esquema Inversor Acoplado por Condensador. (a) Tres niveles. (b) Cinco niveles	76
Figura C.1.1. Simulación del inversor multinivel de 2 etapas ..	81
Figura C.1.2. Señal de salida y THD del inversor de 2 etapas	81
Figura C.2.1. Simulación del inversor multinivel de 3 etapas	82
Figura C.2.2. Voltaje de salida del inversor de 3 etapas	82

Contenido	Página
Figura C.2.3. HD del inversor de 3 etapas	83
Figura C.3.1. Simulación del inversor multinivel de 4 etapas	83
Figura C.3.2. Voltaje de salida del inversor de 4 etapas	84
Figura C.3.3. THD del inversor de 4 etapas	84
Figura C.4.1. Simulación del Inversor PWM	84
Figura C.4.2. Voltaje de salida del inversor PWM	85
Figura C.4.3. Corriente de carga del inversor PWM	85
Figura E.1.1. Diagrama Esquemático del circuito de control	91
Figura E.1.2. Ubicación de los componentes en el circuito impreso de control	91
Figura E.1.3. Circuito impreso de control	92
Figura E.2.1. Diagrama esquemático del circuito de potencia de una etapa	92
Figura E.2.2. Ubicación de los componentes en el circuito impreso de potencia	92
Figura E.2.3. Circuito impreso de potencia para una etapa	92
Figura G.1. Descripción de la Parte de atrás del Inversor	99
Figura G.2. Descripción de la parte frontal del Inversor	99
Figura G.3. Ubicación de los puntos de prueba del Inversor	99
Figura G.4. Esquema de conexiones del inversor	100
Figura G.5. Forma de Conectar las fuentes DC al inversor	100
Figura G.6. Forma correcta de medir las diferentes señales.....	101
Figura G.7. Señales en los puntos de prueba de lado secundario de cada transformador	102
Figura G.8. Ubicación del diodo Bootstrap	103
Figura G.9. Circuito para probar el driver IR2113	104
Figura G.10. Diagrama esquemático para probar el IGBT	104

Contenido	Página
Figura H.1. Niveles de un convertidor: a) 2 Niveles; b) 3 Niveles; c) n Niveles	109
Figura H.2. Inversores Multinivel: a) Acoplado por Diodo (Diode-Clamped Inverter) de 3 niveles; b) Acoplado por Condensador (Capacitor Clamped Inverter) de 3 niveles; c) Puentes H en cascada de 5 niveles	109
Figura H.3. Inversor de Puente Completo o Puente H	110
Figura H.4. Estados de conmutación de una etapa del puente H	111
Figura H.5. a) Inversor multinivel puente H monofásico en cascada de 4 etapas, b) Voltajes de salida individual por etapa, y voltaje total generado de 9 niveles	112
Figura H.6. Circuito a simular del inversor de 4 etapas	114
Figura H.7. Dos formas de generar una señal alterna. a) Con varias fuentes de DC y b) Con una fuente de DC	125
Figura H.8. Puente H con transistores IGBT	126
Figura H.9. Inversor monofásico multinivel de n etapas	126
Figura H.10. Fuentes de alimentación DC de 5V y 15V	127
Figura H.11. Fuente de alimentación de 80V DC	128
Figura H.12. Cargas para el inversor monofásico	129
Figura H.13. Descripción de la Parte de atrás del Inversor	130
Figura H.14. Descripción de la parte frontal del Inversor	130
Figura H.15. Ubicación de los puntos de prueba del Inversor	130
Figura H.16. Esquema de conexiones del inversor	132
Figura H.17. Forma de Conectar las fuentes DC al inversor	132
Figura H.18. Colocación de las puntas del osciloscopio para obtener las señales de control del inversor monofásico	133
Figura H.19. Colocación de las puntas del osciloscopio para obtener las señales de los voltajes en el lado secundario de los transformadores para el inversor monofásico	135

Contenido	Página
Figura H.20. Forma de conectar de la carga resistiva con el inversor monofásico	136
Figura H.21. Forma de conectar la bobina $L2 = 537.8 \text{ mH}$ al inversor monofásico	136
Figura H.22. Forma de conectar en serie las bobinas $L1$ y $L2$ para aplicarlas al inversor monofásico	137
Figura H.23. Forma de conectar en serie las bobinas $L1$ y $L2$ para aplicarlas al inversor monofásico	138

I. INTRODUCCIÓN

Recientemente los convertidores multinivel se han consolidado como una opción competitiva para la conversión de energía en el rango de media-alta potencia, principalmente desde el punto de vista económico, que en la actualidad es uno de los factores que más pesa a la hora de realizar un proyecto. Esta competitividad de la que hablamos se logra gracias a la capacidad de estos inversores para generar grandes cantidades de voltaje y corriente partiendo de topologías integradas de dispositivos semiconductores relativamente económicos y de uso comercial.

Los convertidores multinivel utilizan técnicas muy variadas para la conversión de energía, desde topologías básicas como el inversor de medio puente y puente completo, hasta convertidores con conexión en cascada de puentes 'H'. El uso de estos convertidores aplicado a diferentes áreas en la industria ha sido de vital importancia, tal es el caso de fuentes de potencia (UPS'S, calentadores por inducción, soldadores-cortadoras, fuentes de voltaje conmutadas, etc.) y drivers para motores (activación de robots, aire acondicionado, elevadores, servos de AC, etc.).

En la actualidad se esta utilizando mucho la técnica multinivel para el diseño de inversores de voltaje puesto que presenta características mejores comparadas con la técnica convencional PWM (Modulación por Ancho de Pulso), algunas de estas características son un contenido armónico menor, utilización de transistores de menor velocidad de conmutación, permite salidas de voltaje altos, entre otras. Por esta razón en este Trabajo de Graduación se ocupa la técnica multinivel para el "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INVERSOR MONOFÁSICO MULTINIVEL DE CUATRO ETAPAS", el cual generará 81 niveles o escalones en un período de la señal alterna de salida con magnitud de 120V AC y podrá suministrar un máximo corriente de 5A; estos niveles son generados a partir de una fuente de voltaje continuo de 80V DC.

En el presente informe pueden encontrarse los objetivos que se persiguen con la realización del mismo, también un marco teórico donde se presenta información general a cerca de los inversores multinivel y de los inversores multietapa con puentes 'H'; se presenta además una descripción de las etapas y del funcionamiento del circuito que se pretende diseñar y construir, así como también, una simulación realizada utilizando el software PowerSim (PSIM) para simular circuitos de electrónica de potencia; y finalmente se presentan las conclusiones finales del trabajo , así como también anexos con información de las hojas de datos (datasheet) de los diferentes componentes de circuito utilizados, diseño de transformadores, diseño del circuito impreso, etc.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Diseñar y construir un inversor monofásico multinivel de cuatro etapas, con un voltaje de salida de 120V AC y con una corriente máxima de 5A; utilizando la tecnología de puentes 'H' en cascada con voltajes de nivel escalonados en potencias de tres para maximizar el número de niveles, ocupando transistores de potencia del tipo IGBT para la conmutación.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Analizar y comprender la técnica multinivel en el diseño de inversores de voltaje, así mismo el funcionamiento de los puentes 'H'.
- b) Simulación del inversor, utilizando el programa de computadora Power Electronic Simulator (PSIM).
- c) Diseñar y construir el circuito de control que generará las señales que controlarán la conmutación de cada uno de los IGBT'S utilizados en el inversor. Utilizando para ello el microcontrolador PIC16f877 de la compañía Microchip.
- d) Diseñar y construir las fuentes de voltaje continuo requeridas en el funcionamiento del inversor.
- e) Construir aquellos transformadores que ameriten una relación de voltajes con la mayor exactitud posible.
- f) Diseño y construcción de todos los circuitos impresos necesarios, utilizando el programa EAGLE 4.16r2.
- g) Reducir al mínimo el contenido armónico en el voltaje de salida.
- h) Determinar las cargas inductivas, resistivas o la combinación de ambas, necesarias que permitan verificar el funcionamiento correcto del inversor.

II. INVERSORES MULTINIVEL

La función principal de un Inversor Multinivel es la de generar un voltaje alterno a partir de diferentes niveles de voltaje continuo. Estos inversores pueden ser conectados en serie (con fuentes DC flotantes galvánicamente aisladas) o en paralelo (con fuente DC común y galvánicamente aislados con transformadores de potencia en la carga).

Un inversor multinivel individual se caracteriza por generar cierto número de niveles de tensión en la salida. Un inversor de dos niveles genera dos niveles de voltaje de salida, uno de tres niveles generará tres niveles de tensión de salida y así sucesivamente pueden aumentarse los niveles de salida tanto como se deseen. En la figura 1.a se muestra un esquema básico de inversor con dos niveles, en la figura 1.b un esquema básico de inversor con tres niveles y en la figura 1.c un esquema básico de inversor con m niveles de tensión, donde los semiconductores se representan por medio de interruptores ideales con varias posiciones.

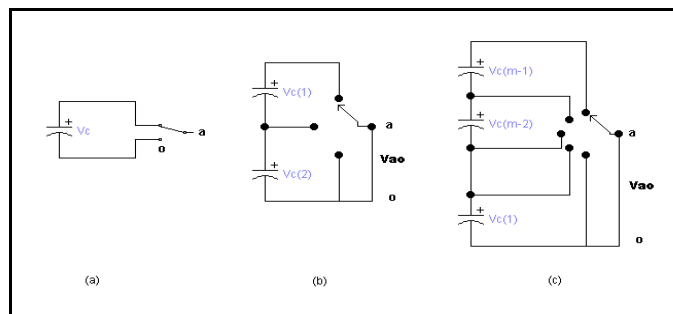


Figura 1. Inversor de: (a) dos niveles, (b) tres niveles y (c) m niveles.

Por lo tanto, en base a la figura 1 puede generalizarse una fórmula para el número de niveles de la señal de salida m de un inversor con n fuentes de voltaje, de la siguiente forma: $m=n+1$

Aunque existen varias topologías para los inversores multinivel, entre las que se pueden mencionar: Inversor Acoplado por Diodo (Diode-Clamped Inverter) y el Inversor Acoplado por Condensador (Capacitor Clamped Inverter), las cuales se describen en el anexo A; aquí solo se describirá el Inversor Multietapa con Puentes 'H' e Inversores en Cascada, por ser el que se utiliza en el presente Trabajo de Graduación.

2.1 Inversor Multietapa con Puentes H e Inversores en Cascada

2.1.1 Inversor de Medio Puente

Como se menciona anteriormente la función principal de un inversor multinivel es la de generar un voltaje alterno a partir de

distintos niveles de voltaje. La topología básica de un inductor monofásico es la de un inversor de medio puente, como el mostrado en la figura 2. El inversor está constituido por un par de interruptores los cuales funcionan de forma complementaria, es decir, al estar activo, se mantiene abierto y el voltaje del condensador se ve reflejado en la carga; mientras que al estar activo, se abre y el voltaje de entrada aparece a través de la carga. y nunca deben estar activos al mismo tiempo, ya que de estarlo se produciría un cortocircuito en la fuente de alimentación. El voltaje de salida en la carga corresponderá a una señal cuadrada. Considerando que C_1 y C_2 están cargados a la mitad del voltaje V_s , tal como se observa en los condensadores de la figura 2.

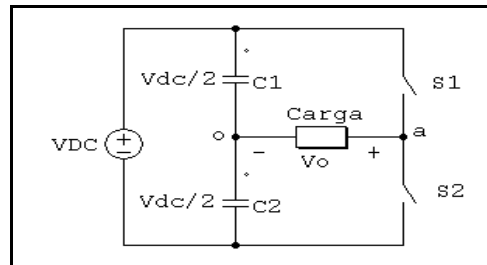


Figura 2. Inversor de Medio Puente.

Para la forma de onda del inversor de medio puente en la primera mitad del periodo $(T/2)$, se obtendrá un voltaje con forma de onda cuadrada $(V_s/2)$, para la segunda parte del periodo $(T/2)$ se polariza de forma inversa y el voltaje de salida será $-V_s/2$. Tal como se describe en la tabla 1.

Interruptores Cerrados	Voltaje V_{ao}
S_1	$+V_s/2$
Todos abiertos	0
S_2	$-V_s/2$

Tabla 1. Control de un inversor de medio puente.

2.1.2. Inversor de Puente Completo

El inversor de puente completo o puente 'H', que se presenta en la figura 3, está constituido por cuatro interruptores (S_1, S_2, S_3 y S_4), y su estrategia de control se define de la siguiente forma: cuando los interruptores S_1 y S_4 se activan simultáneamente, el voltaje de entrada V_s aparece a través de la carga. Si los interruptores S_2 y S_3

se activan al mismo tiempo el voltaje a través de la carga se invierte y adquiere el valor de $-V_s$.

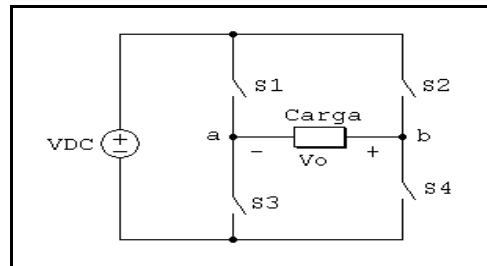


Figura 3. Inversor de Puente Completo o Puente H.

Los posibles estados de conmutación se muestran a continuación en la tabla 2.

Interruptores Cerrados	Voltaje V_{ab}
S_1 y S_4	$+V_s$
Todos abiertos	0
S_2 y S_3	$-V_s$

Tabla 2. Control de un inversor de puente completo.

Estos puentes 'H' pueden conectarse en cascada, ya sea en serie o en paralelo, y dependiendo del número de puentes 'H' o etapas que se conecten así será el número de niveles de tensión que se obtengan a la salida. Además, el tipo de inversores puede separarse en simétricos y asimétricos. Los simétricos tienen todas las fuentes independientes con el mismo valor de tensión, mientras que los asimétricos tienen las fuentes independientes con diferentes valores de tensión.

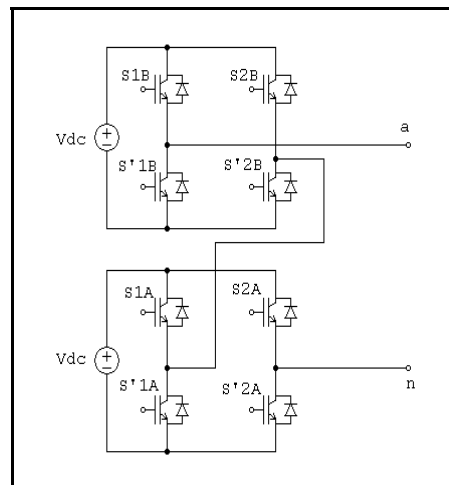


Figura 4. Inversor en cascada simétrico de dos etapas.

En la figura 4 se muestra el diagrama de conexión de un Inversor en Cascada Simétrico de Dos Etapas. Este inversor puede generar cinco niveles de tensión de salida; dos en el semiciclo positivo y dos en el semiciclo negativo, más el nivel cero, cada escalón tiene un nivel de voltaje igual a V_{dc} .

La secuencia de conmutación completa para la obtención de los diferentes de niveles de voltaje y que además se utilizó para la simulación del circuito se muestra en la tabla 3.

V_{an}	S_{1A}	S_{2A}	S'_{1A}	S'_{2A}	S_{1B}	S_{2B}	S'_{1B}	S'_{2B}
$+2V_{dc}$	1	0	0	1	1	0	0	0
$+V_{dc}$	1	0	0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1	0	1
$-V_{dc}$	0	1	1	0	0	0	1	0
$-2V_{dc}$	0	1	1	0	0	1	1	1

Tabla 3. Secuencia de encendido de los transistores del inversor en cascada simétrico de dos etapas de la figura 4.

El circuito del inversor en cascada simétrico de dos etapas de la figura 4, se simuló utilizando el software PSIM, obteniéndose la señal de voltaje de salida que muestra los cinco niveles de la misma (figura 5), se observa que la señal de salida es casi una señal cuadrada. Cabe destacar que en la simulación se utilizó un voltaje de entrada con valor de 169.7056V.

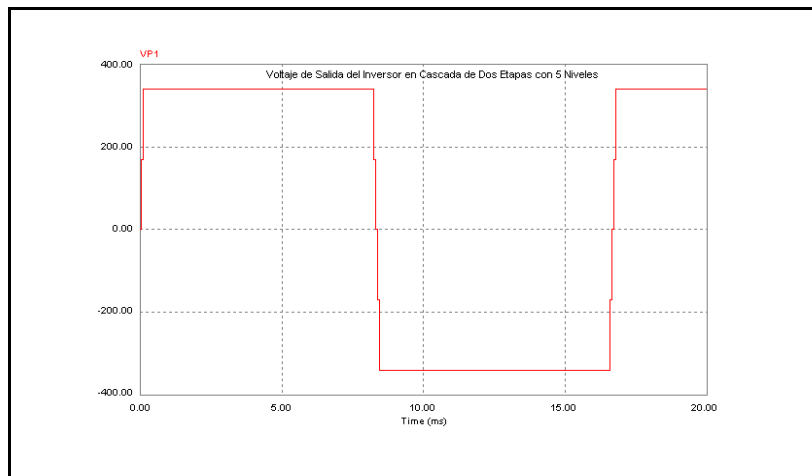


Figura 5. Señal de voltaje de salida para el inversor en cascada simétrico de dos etapas con cinco niveles de la figura 4.

En la simulación también se hace una comparación de la señal de salida del inversor con una señal sinusoidal pura, como se muestra en

la figura 6, observándose que la señal de salida de este inversor dista mucho de ser una señal sinusoidal, ya que los niveles de voltaje que se tienen no son los suficientes para la generación de esta señal sinusoidal.

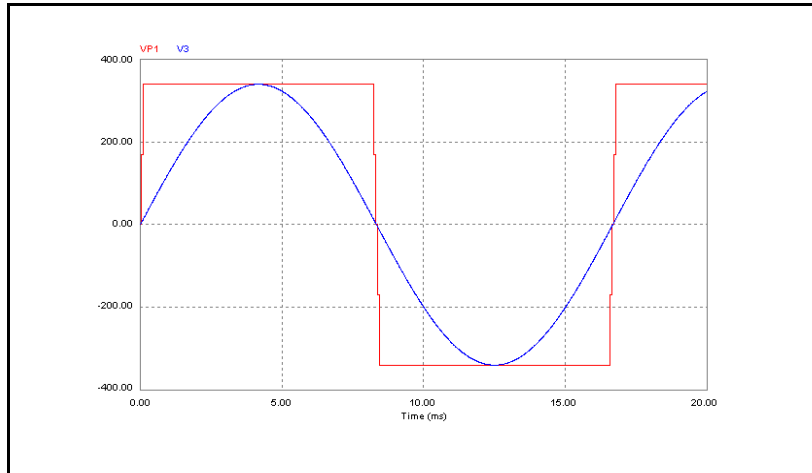


Figura 6. Comparación del voltaje de salida para el inversor en cascada simétrico de dos etapas de la figura 4 y una señal sinusoidal pura.

Además, en la simulación se obtuvo el THD para este circuito, el cual se muestra en la figura 7, puede observarse que el mayor valor del THD es de aproximadamente 4, pero a medida transcurre el tiempo este valor se va reduciendo hasta permanecer en un valor inferior a 1.

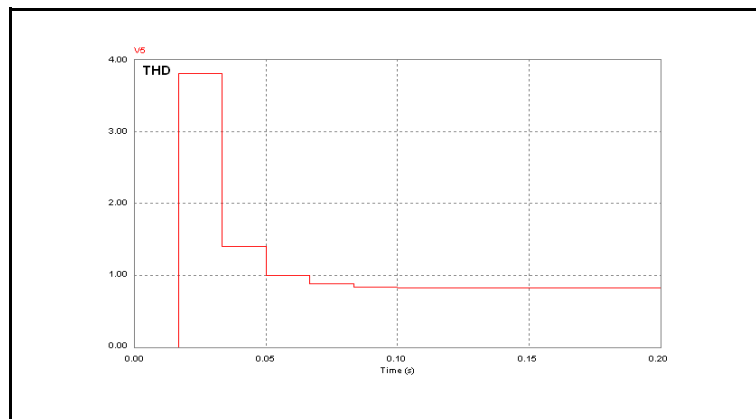


Figura 7. THD de la señal de voltaje de salida para el inversor en cascada simétrico de dos etapas de la figura 4.

En la figura 8 se muestra el diagrama de conexión para un Inversor en Cascada Asimétrico de dos etapas. Este inversor puede generar cinco niveles de tensión de salida; dos en el semiciclo positivo y dos en el semiciclo negativo, más el nivel cero, dichos niveles de voltaje van desde $+2V_{dc}$ a $-2V_{dc}$ cada escalón tiene un nivel de voltaje igual a V_{dc} . Para conseguir los diferentes niveles de tensión se debe utilizar la

misma secuencia de conmutación de la tabla 3, pero con una diferencia en los niveles de tensión. En la tabla 4 se pueden apreciar los niveles de tensión correspondientes al Inversor en Cascada Asimétrico.

V_{an}	S_{1A}	S_{2A}	S'_{1A}	S'_{2A}	S_{1B}	S_{2B}	S'_{1B}	S'_{2B}
$+1.5V_{dc}$	1	0	0	1	1	0	0	0
$+V_{dc}$	1	0	0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1	0	1
$-V_{dc}$	0	1	1	0	0	0	1	0
$-1.5V_{dc}$	0	1	1	0	0	1	1	1

Tabla 4. Secuencia de encendido para el inversor en Cascada Asimétrico de dos Etapas de la figura 8.

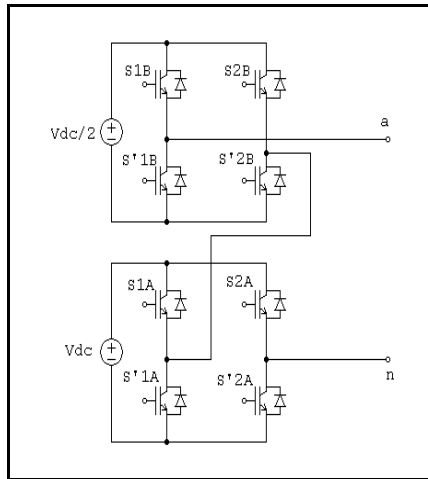


Figura 8. Inversor en Cascada Asimétrico de dos Etapas.

V_{an}	S_{1A}	S_{2A}	S'_{1A}	S'_{2A}	S_{1B}	S_{2B}	S'_{1B}	S'_{2B}
$+1.5V_{dc}$	1	0	0	1	1	0	0	1
$+V_{dc}$	1	0	0	1	0	0	1	1
$+0.5V_{dc}$	0	0	1	1	1	0	0	1
0	0	0	1	1	0	0	1	1
$-0.5V_{dc}$	0	0	1	1	0	1	1	0
$-V_{dc}$	0	1	1	0	0	0	1	1
$-1.5V_{dc}$	0	1	1	0	0	1	1	0

Tabla 5. Secuencia de disparo del Inversor en Cascada Asimétrico de dos Etapas con siete niveles.

Analizando el caso del Inversor Asimétrico, se observa que es posible generar un mayor número de niveles de tensión de salida con la misma configuración. Para ello es necesario agregar más combinaciones de las que se obtuvieron anteriormente. Dichas combinaciones se muestran en la tabla 5, para generar 7 niveles de tensión de salida.

El circuito de la figura 8 se simuló para obtener una señal de salida de siete niveles, dicha señal de salida se muestra en la figura 9.

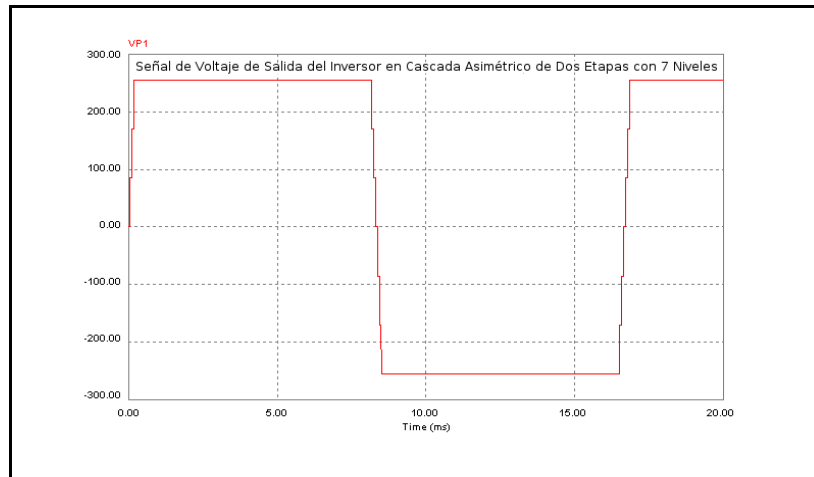


Figura 9. Señal de voltaje de salida para el inversor de la figura 8.

Al hacer una comparación de la señal de voltaje de la figura 9 con una señal sinusoidal pura puede observarse que la señal de salida de un inversor en cascada asimétrico de dos etapas con un voltaje de salida siete niveles se aproxima más que aquel de cinco niveles a una señal sinusoidal pura, sin embargo, aún se encuentra muy alejada de esta última. Dicha comparación se muestra en la figura 10.

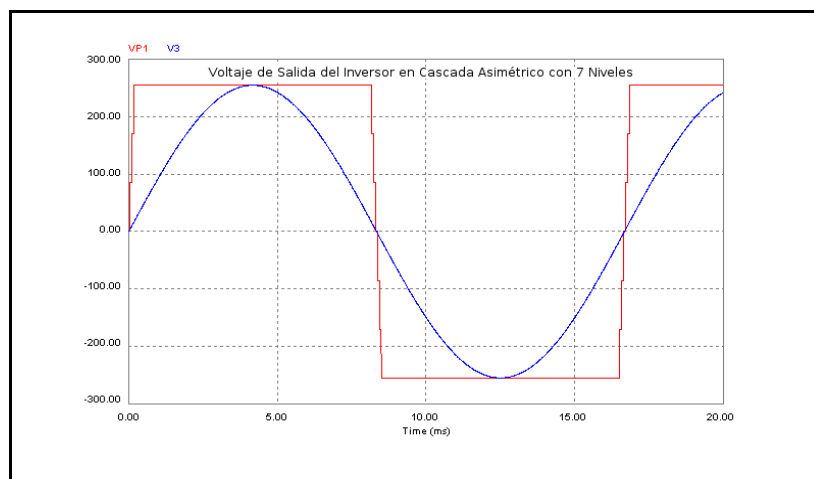


Figura 10. Comparación de la señal de voltaje de salida de 7 niveles con una señal sinusoidal pura del inversor en cascada asimétrico.

También se obtuvo el THD para el inversor en cascada asimétrico con una señal de salida de 7 niveles, que en la simulación arroja un valor de THD máximo mayor que el del inversor asimétrico en cascada con un voltaje de salida de cinco niveles, sin embargo, al transcurrir el tiempo este se estabiliza a un valor menor que 1, muy similar al del inversor con cinco niveles en la señal de salida, como se observa en la figura 11.

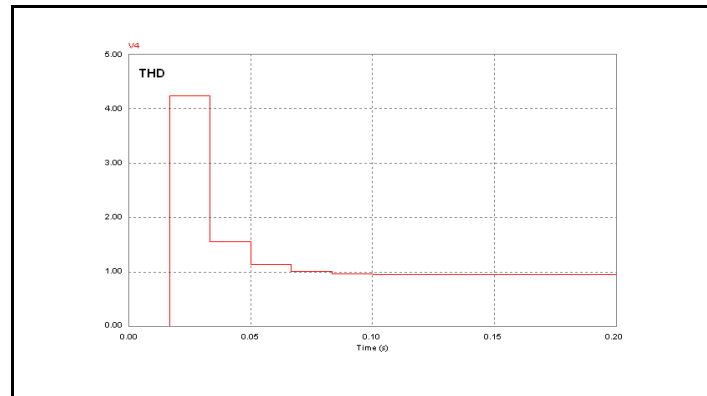


Figura 11. THD para el inversor en cascada asimétrico con una señal de voltaje de salida de 7 niveles.

2.1.3. Inversor Multietapa en Cascada con Fuente Común

Utilizando un esquema similar al del inversor con fuentes independientes, como los estudiados anteriormente, pero poniendo transformadores en la salida, se puede construir un Inversor Multietapa con Fuente Común, como se muestra en la figura 12, puede observarse que a diferencia del inversor con fuentes independientes, ambos puentes están alimentados desde una misma fuente de voltaje DC, y además los transformadores utilizados poseen la misma relación de transformación. Este inversor sería equivalente al Inversor Multietapa en Cascada con Fuentes Independientes y Simétrico, y por lo tanto, es capaz de generar cinco niveles de tensión (dos positivos, dos negativos y el cero). Para generar estos niveles de tensión se debe utilizar la misma secuencia de combinación que la mostrada en la tabla 3.

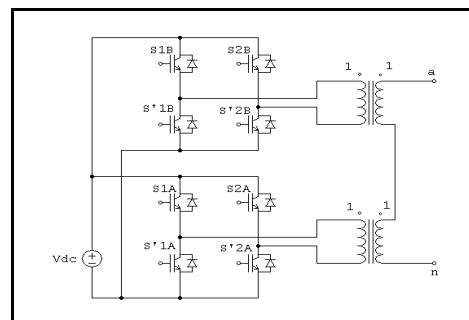


Figura 12. Inversor en Cascada Simétrico de dos Etapas con fuente común.

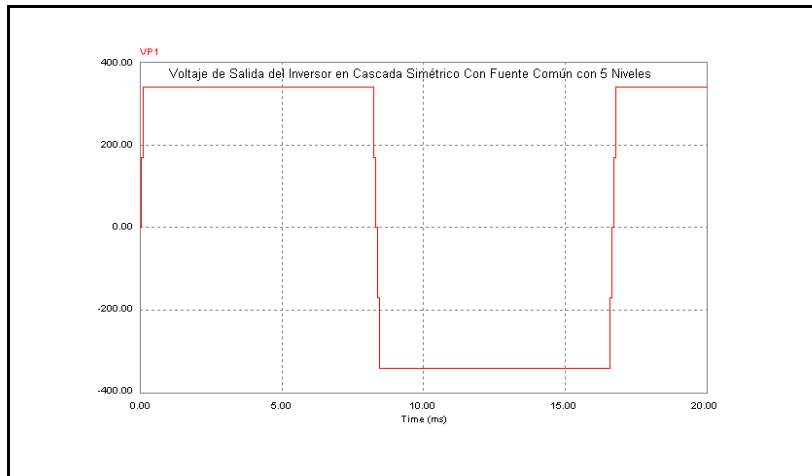


Figura 13. Señal de salida del inversor en cascada simétrico con fuente común de cinco niveles de la figura 12.

Además en la figura 14, se puede observar una comparación de la señal de salida con una señal sinusoidal pura, de la cual puede decirse, que se encuentra lejos de ser una señal sinusoidal, dado que la señal de salida cuenta con muy pocos niveles, además esta señal es muy similar a la del circuito del Inversor en Cascada con Fuentes Independientes Simétrico, no observándose mucho cambio entre ambos.

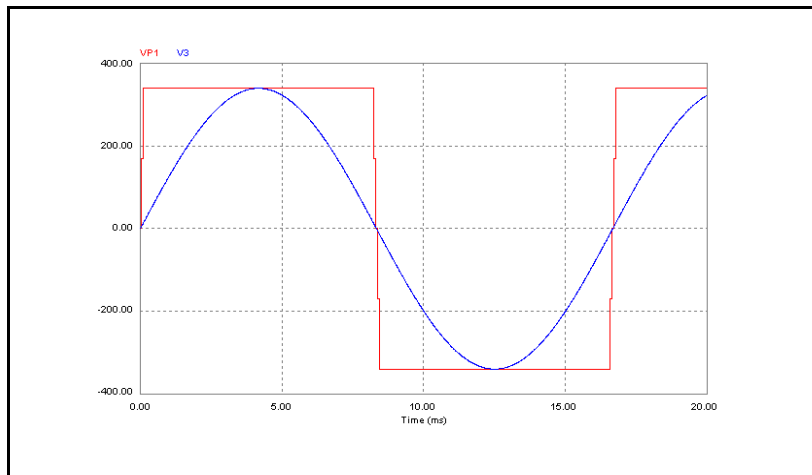


Figura 14. Comparación señal de salida del inversor en cascada simétrico con fuente común de cinco niveles de la figura 12 con una señal sinusoidal pura.

En lo que si se puede observar un cambio es en el THD, el cual muestra un valor máximo de aproximadamente 2.50, mucho menor al del circuito del Inversor en Cascada con Fuentes Independientes Simétrico, que mostró un valor cercano a 4.0; mientras que al transcurrir el tiempo el THD muestra un valor por debajo de 0.5, reduciéndose casi a la mitad en comparación con el caso del Inversor en Cascada con Fuentes Independientes Simétrico. Por lo cual puede decirse que la Distorsión Armónica Total del circuito del Inversor Multietapa con Fuente Común se

reduce casi a la mitad con respecto al circuito del Inversor en Cascada con Fuentes Independientes Simétrico, como se observa en la figura 15.

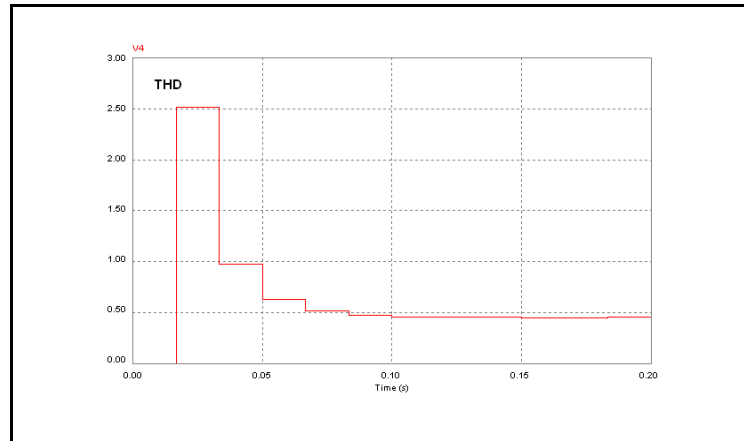


Figura 15. THD del inversor en cascada simétrico con fuente común de cinco niveles de la figura 12.

La ventaja de esta configuración frente a la que no utiliza transformadores es que con una sola fuente DC se pueden alimentar todos los puentes del inversor. Esta ventaja es más evidente al aumentar el número de etapas del inversor. Por ejemplo, en un inversor trifásico de cuatro etapas con fuentes independientes, se necesitan doce fuentes DC para construir un inversor de las mismas características que uno de fuente común, que sólo utiliza una fuente DC. No obstante hay que mencionar que la topología de fuente común no es muy práctica en aplicaciones en frecuencia variable. Por esta razón ella está pensada para la implementación de rectificadores, filtros activos de potencia, compensadores estáticos de reactivos o inversores conectados a la red trifásica.

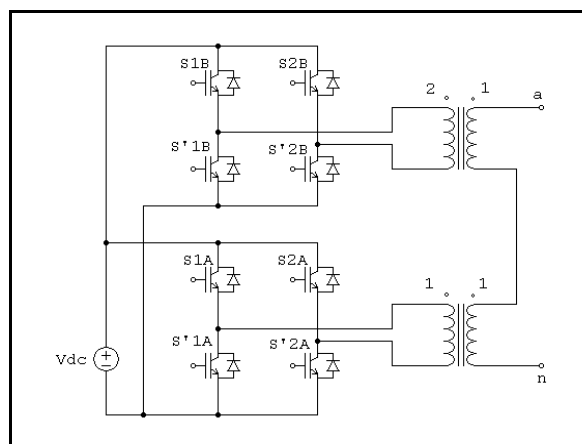


Figura 16. Inversor Asimétrico de Fuente Común.

Utilizando transformadores de distinta razón de transformación se puede construir un Inversor Asimétrico de Fuente Común, como el de dos

etapas mostrado en la figura 16. Para generar los diferentes niveles de tensión se deben utilizar las mismas combinaciones que las mostradas anteriormente en las tablas 4 y 5.

Utilizando la secuencia de conmutación de la tabla 5, se simuló el circuito del Inversor Asimétrico de Fuente Común de la figura 16 para siete niveles, cuya señal de salida se muestra en la figura 17, observándose que esta señal es muy similar a la del Inversor Asimétrico con dos fuentes de alimentación de la figura 8.

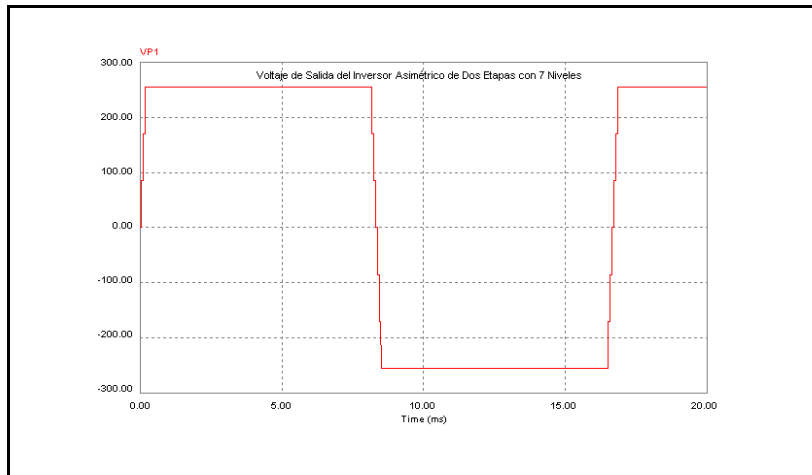


Figura 17. Señal de salida del Inversor Asimétrico de Fuente Común con siete niveles.

Así mismo en la figura 18 se hace una comparación de la señal de salida del Inversor Asimétrico de Fuente Común de siete niveles con una señal sinusoidal pura, observándose que esta difiere mucho de ser una señal sinusoidal como en el caso del circuito de la figura 8. Sin embargo el valor del THD se ha reducido casi a la mitad al comparar ambos circuitos, esto puede apreciarse en la gráfica de la figura 19.

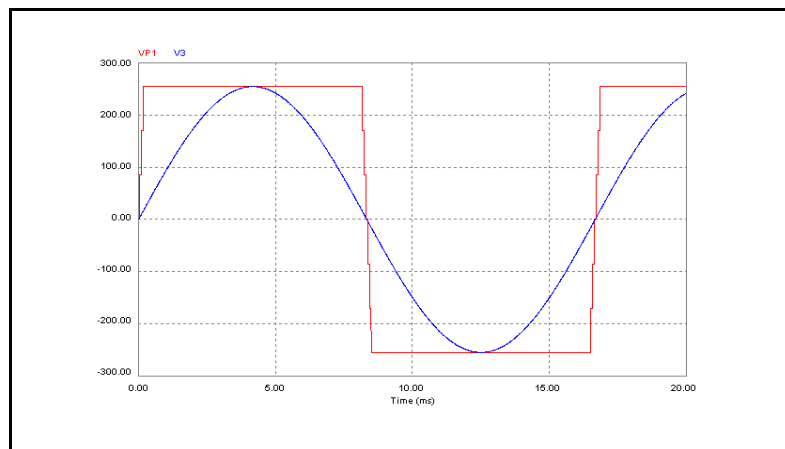


Figura 18. Comparación de la señal de salida del Inversor Asimétrico de Fuente Común con una señal sinusoidal pura.

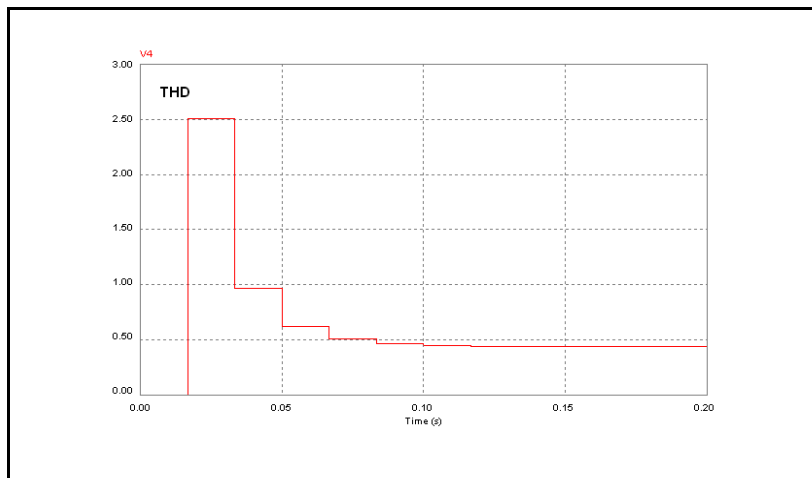


Figura 19. Gráfico del THD del Inversor Asimétrico de Fuente Común con siete niveles.

A continuación se profundizará en el Inversor Asimétrico de Fuente Común con transformadores de salida y con diferente relación de voltaje; este método es el que se utilizará en el diseño y construcción del inversor monofásico multinivel de 4 etapas, generando una señal de salida con 81 niveles.

Con el objeto de comparar la señal de salida de voltaje, se realizará también un estudio de los inversores multinivel de 2 y 3 etapas, antes de analizar el de 4 etapas, con ello podremos saber la razón por la cual se declina a implementar un inversor de 4 etapas.

III. CARACTERÍSTICAS DEL INVERSOR MONOFÁSICO MULTINIVEL

Los inversores multinivel en los últimos años se han consolidado como una opción más para convertir energía CD-CA en el rango de potencia media y alta desde el punto de vista económico y técnico, podemos encontrar un incremento en las aplicaciones donde la conversión de la energía se realiza mediante convertidores multinivel.

De acuerdo con la historia el concepto de conversión multinivel existe antes de los trabajos presentados por Nabae, Takahashi y Akagi en 1980, pero a partir de esta fecha se considera el punto de partida de los inversores multinivel actuales. Es por esto que la comunidad científica y la industria han enfocado sus investigaciones y desarrollo en estos inversores. La técnica multinivel se considera un área joven en el campo de la conversión de energía, presentando unas expectativas que hacen pensar en un gran potencial para una más amplia aplicación en el futuro.

La forma más general de entender el inversor multinivel es considerarlo como un seccionador de tensión. La tensión alterna de salida, de valor elevado, se obtiene a partir de diferentes niveles de tensión continua.

Las características principales de los inversores multinivel son las siguientes:

- La disposición del voltaje de entrada (V_{IN}) a un valor único de voltaje y la utilización de transformadores acoplados a los interruptores (IGBT'S) permiten múltiples niveles de tensión a partir de los cuales se forma la señal alterna.
- La potencia del inversor se incrementa al emplear voltajes mayores sin necesidad de incrementar la corriente, evitando así mayores pérdidas durante la conducción, y por consecuencia mejorar el rendimiento del inversor.
- El voltaje de salida obtenido en un inversor multinivel presenta un contenido armónico menor que el obtenido en un inversor convencional de potencia equivalente. Teóricamente puede obtenerse una distorsión armónica nula si se dispone de número infinito de niveles de tensión generando como consecuencia la reducción del peso y costo de los filtros de salida.
- La corriente de entrada absorbida presenta una distorsión armónica baja.

Un inconveniente de los inversores multinivel se genera cuando se emplea un número grande de interruptores (más de 7 IGBT'S) la complejidad del control se incrementa.

Los inversores multinivel pueden construirse de una o más etapas, entre más etapas hay mayor número de niveles se pueden generar y por consecuencia la señal sinusoidal resultante posee más escalones ó peldaños y una distorsión armónica total mucho menor.

Existen dos formas de generar una señal alterna (figura 20) en los inversores multinivel, la primera consiste en utilizar "n" fuentes por "n" etapas del inversor, es decir una fuente por cada etapa. La segunda opción consiste en utilizar transformadores a la salida de cada una de las etapas del inversor, dicho de otra manera "n" transformadores por "n" etapas.

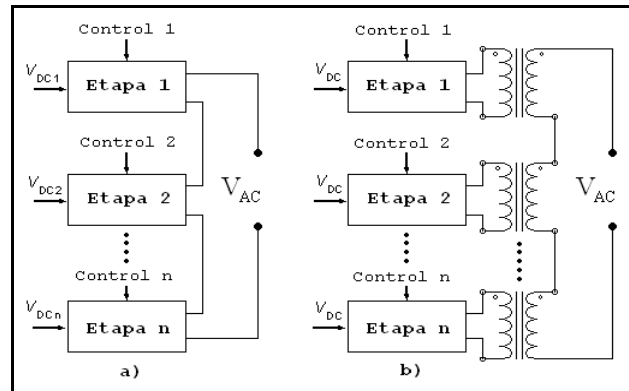


Figura 20. Dos formas de generar una señal alterna, a) Con varias fuentes de DC y b) Con una fuente de DC.

Para determinar que opción nos conviene más se debe evaluar el costo y dificultad que implica construir varias fuentes de DC o construir varios transformadores, dependerá de las condiciones con que se cuente. Pero en general es más fácil construir un transformador que una fuente de señal continua en especial cuando se tratan de valores arriba de 40V.

En nuestro caso ocuparemos la segunda opción, ocupando una sola fuente de voltaje DC de 80V, esperando obtener a la salida un voltaje alterno de 120V AC. Por esta razón desarrollaremos de manera exclusiva el inversor multinivel con transformadores y en particular el de 4 etapas, por ser el que presenta, un menor contenido armónico con respecto a los demás.

Las etapas de un inversor multinivel se refieren básicamente al número de puentes 'H' utilizados, así por ejemplo un inversor de 2 etapas, utiliza 2 puentes 'H'; uno de 3 etapas utiliza 3 puentes 'H' y así sucesivamente. Un puente 'H' es llamado así por la forma como se representa esquemáticamente, adopta una forma similar a la de una H. Se utiliza este tipo de estructura principalmente para invertir la polaridad del voltaje de salida y de esta forma cambiar el sentido de giro de un motor DC. En la figura 21 se presenta el esquema de un puente 'H'. El puente 'H' está formado por 4 transistores de potencia, los cuales pueden

ser IGBT ó MOSFET, conectados uno sobre otro y estos a su vez en paralelo con otros dos transistores conectados de la misma manera. La H se forma cuando se conecta la carga en sus terminales de salida (V_{SAL}).

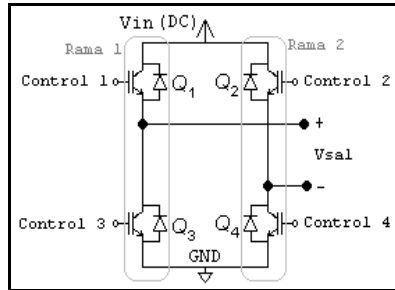
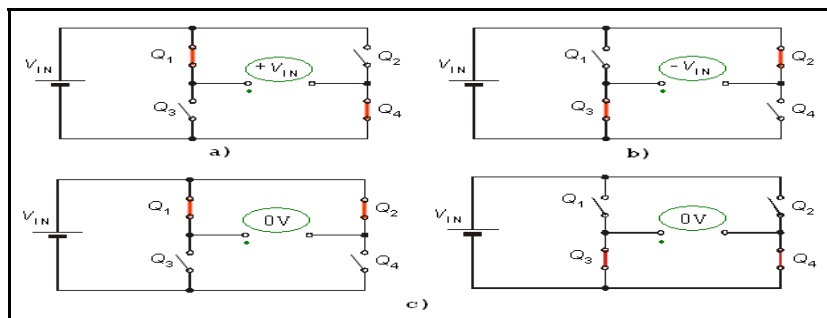


Figura 21. Puente H con transistores IGBT.

El puente 'H' es una de las partes más importantes del inversor multinivel, Por ello es importante que se conozca el funcionamiento correcto del puente 'H'. Esta configuración de transistores es capaz de generar tres niveles o estados de voltaje, dependiendo de la secuencia de conmutación que tenga dicho puente. En la figura 22 podemos ver los tres estados posibles del puente 'H' y las dos maneras de generar el estado cero, los cuales se reflejan en la tabla 6. Para una mejor comprensión se han dibujado a los IGBT'S como interruptores ideales.

	Señal de control para cada IGBT del puente 'H'			
$\langle V_{SAL} \rangle$	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
$+ V_N$	1	0	0	1
$- V_N$	0	1	1	0
0 (cero)	1	1	0	0
0 (cero)	0	0	1	1

Tabla 6. Lógica de control para un puente 'H'.



El funcionamiento del puente 'H' se puede explicar de la siguiente manera:

- Cuando el IGBT Q_1 y Q_4 se activan (interruptor cerrado) y Q_2 con Q_3 desactivados (interruptor abierto), tenemos a la salida del puente (V_{SAL}) un voltaje igual a $+V_N$.
- Cuando se activan Q_2 y Q_3 , desactivando Q_1 y Q_4 , tenemos a la salida un voltaje $-V_N$.
- Si activamos Q_1 y Q_2 o Q_3 y Q_4 , tenemos a la salida un voltaje igual a cero.
- Bajo ningún motivo se debe activar al mismo tiempo Q_1 y Q_3 , ni tampoco Q_2 y Q_4 . Porque de lo contrario generaríamos un cortocircuito en la fuente de voltaje DC.

En conclusión podemos decir que un puente 'H' puede generar tres estados posibles $+V_N$, $-V_N$ y el cero. Si colocamos la salida de dos o más puentes 'H' en serie; incrementamos de forma exponencial el número de estados, expresado matemáticamente como 3^n , donde n representa el número de puentes 'H' o etapas de un inversor y el 3 representa a los 3 estados posibles de un sólo puente 'H'. En la tabla 7 podemos observar cuantos estados o niveles podemos obtener dependiendo de el número de etapas.

Etapas (n)	Niveles (N) = 3^n
1	3
2	9
3	27
4	81
5	243

Tabla 7. Número de niveles posibles de acuerdo al número de etapas.

Los inversores multinivel de n etapas con una sola fuente de DC, requieren de transformadores a la salida del puente 'H', con ello se logra generar un determinado valor de voltaje de referencia para esa etapa, permitiendo así tener una sola fuente de alimentación DC para n etapas de un inversor. Esta fuente de voltaje DC es de la cual se generarán los diferentes niveles que conformarán la señal sinusoidal a la salida del inversor. La forma como se determina el voltaje de referencia de una o más etapas, así como también la relación de voltajes de los transformadores, se ilustra en la figura 23.

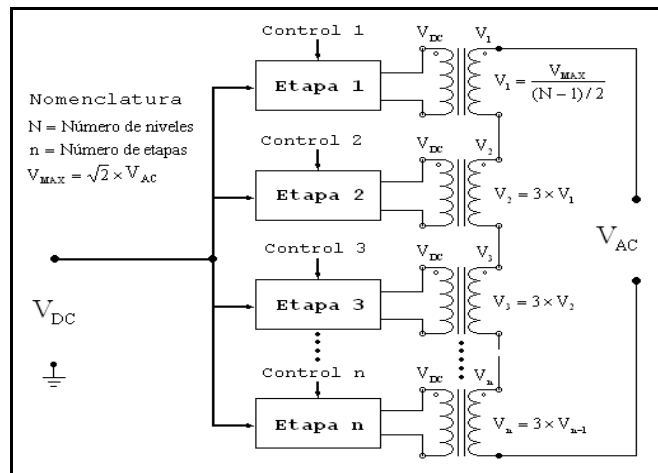


Figura 23. Inversor monofásico multinivel de n etapas.

Como hemos visto en la figura 23, el voltaje mínimo lo genera siempre la etapa 1 y por el contrario la etapa n genera siempre el voltaje mayor. Esto implica que la etapa 1, se combina muchísima más veces que las etapas restantes y significa que la etapa 1 tiene las señales de control con las frecuencias más altas comparadas con el resto de etapas, cuya frecuencia dependerá de la frecuencia de la señal alterna deseada a la salida del inversor.

3.1. Inversor Monofásico Multinivel de 2 Etapas

Como se había mencionado antes un inversor multinivel de 2 etapas implica la utilización de 2 puentes 'H' y puede generar 9 niveles posibles (ver tabla 7) de los cuales 4 serán positivos, 4 negativos y el cero. En la figura 24 se ilustra el diagrama esquemático del inversor de 2 etapas. Nos enfocaremos principalmente en la determinación de la secuencias de conmutación de cada uno de los IGBT'S, los cuales se presentarán en una tabla, explicando de forma breve los cálculos que dan origen a dicha tabla.

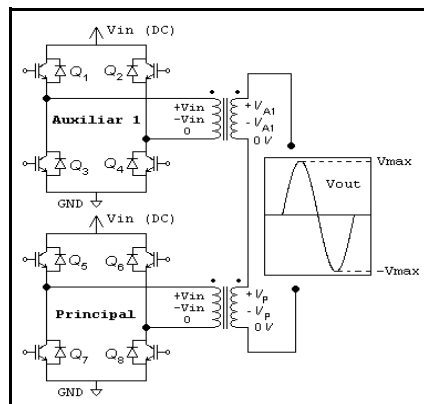


Figura 24. Diagrama esquemático del inversor de 2 etapas.

La etapa Auxiliar 1 tiene en su salida un transformador con una relación de voltaje de V_{in} / V_{A1} y la etapa 2 tiene un transformador, con relación de voltaje de V_{in} / V_P . La salida de voltaje de este inversor puede apreciarse en la figura 25, en la cual podemos observar los diferentes niveles que componen la señal alterna.

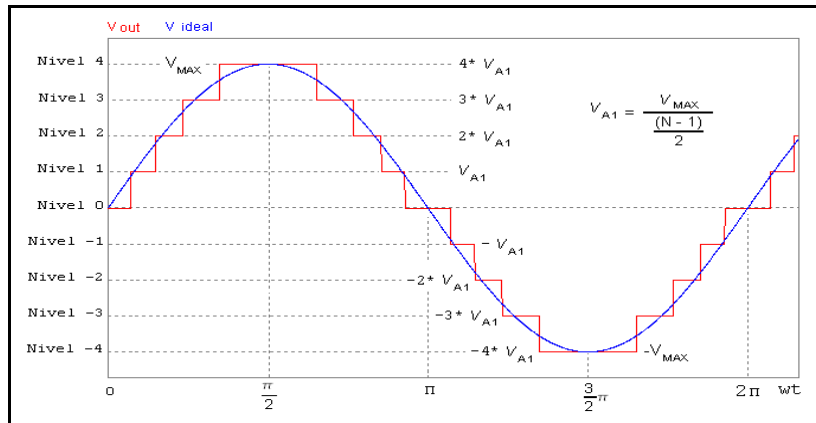


Figura 25. Señal de salida del inversor multinivel de 2 etapas.

Nivel (N)	Combinación	Voltaje de salida (V_{OUT})	Etapa 2 ó Principal				Etapa 1 ó Auxiliar1			
			Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
1	V_{A1}	$0.25 * V_{MAX}$	1	1	0	0	1	0	0	1
2	$2 * V_{A1} = V_P - V_{A1}$	$0.5 * V_{MAX}$	1	0						

valores de cada celda y la simbología utilizada en la tabla 8 y en las tablas sucesivas correspondientes a la secuencias de conmutación:

- Lo primero que hacemos es calcular el número de niveles (N) a partir del número de etapas (n) con la formula $N=3^n$, donde $n=2$, evaluando tenemos: $N=3^2=3^2=9$

- El segundo paso consiste en calcular el voltaje V_{A1} (nivel 1), el cual se refiere al voltaje de referencia de la etapa 1 ó Auxiliar 1, cuyo valor corresponde al voltaje mínimo del inversor y se determina de la siguiente manera:

$$V_{A1} = \frac{V_{MAX}}{\frac{N-1}{2}} = \frac{V_{MAX}}{\frac{9-1}{2}} = 0.25 V_{MAX}$$

En donde V_{MAX} o nivel máximo, es igual a valor pico de la señal alterna a la salida del inversor (V_{OUT}) y se determina de la siguiente manera: $V_{MAX} = \sqrt{2} * V_{OUT}$

- Luego calculamos el resto de los niveles con la siguiente formula:

$$N_i = i * V_{A1}$$

$$N_2 = 2 * V_{A1} = 2 * 0.25 V_{MAX} = 0.5 V_{MAX}$$

$$N_3 = 3 * V_{A1} = 3 * 0.25 V_{MAX} = 0.75 V_{MAX}$$

$$N_4 = 4 * V_{A1} = 4 * 0.25 V_{MAX} = V_{MAX}$$

- Los niveles negativos se calculan con el complemento de los niveles positivos, de la siguiente forma:

$$N_{-i} = -i * V_{A1}$$

$$N_{-1} = -1 * V_{A1} = -0.25 V_{MAX}$$

$$N_{-2} = -2 * V_{A1} = -2 * 0.25 V_{MAX} = -0.5 V_{MAX}$$

$$N_{-3} = -3 * V_{A1} = -3 * 0.25 V_{MAX} = -0.75 V_{MAX}$$

$$N_{-4} = -4 * V_{A1} = -4 * 0.25 V_{MAX} = -V_{MAX}$$

- En este paso calculamos el voltaje de V_p o voltaje principal, cuyo valor se refiere al voltaje de referencia de la etapa 2 ó principal y su valor se determina con la formula: $V_p = 3 * V_{A1}$

- Debemos notar que el nivel 3 es $3 * V_{A1}$, cuyo valor es igual a V_p , lo que significa que para este nivel sólo necesitamos el voltaje en el secundario de la etapa principal.

- Ahora en este punto se debe buscar la combinación correcta que nos genere los niveles antes descrito. ¿Como vamos encontrar la combinación correcta de cada nivel?, para inversores con pocos niveles es sencillo, pero se complica un poco cuando son bastantes, la técnica que se emplea es por simple inspección, por ejemplo si queremos encontrar la combinación del nivel 2, lo primero que

debemos saber es su valor, en este caso es $2V_{A1}$; entonces tomamos el valor del auxiliar 1 (V_{A1}) y analizamos con que otro valor de las siguientes etapas se puede combinar, para este caso es muy sencillo porque solo queda el valor de la etapa principal, cuyo valor es $3V_{A1}$, entonces observamos por simple inspección que al restar el valor de la etapa principal, con el valor de la etapa 1 ó auxiliar 1, tenemos el resultado deseado ($3V_{A1} - V_{A1} = 2V_{A1}$), entonces la combinación buscada es ($V_P - V_{A1}$). De la misma forma se procede a buscar las otras combinaciones.

- Por último completamos la tabla de secuencia de conmutaciones utilizando la tabla 6; de acuerdo a la combinación que se requiera para obtener el nivel deseado.

3.2. Inversor Monofásico Multinivel de 3 Etapas

Este inversor consta de 3 puentes 'H', posee 27 de niveles de los cuales 13 son positivos, 13 negativos y el cero. El esquema de este inversor se ilustra en la figura 26 y en la tabla 9 se muestra las secuencias de conmutación de cada IGBT, los cuales se han calculado ocupando el mismo mecanismo explicado en la sección anterior.

A continuación se detallan dos del total de pasos, para encontrar las secuencias de conmutación de la tabla 9. Para mayores detalles consultar el anexo B.

El primer paso es calcular el número de niveles (N) a partir del número de etapas (n) con la formula $N=3^n$, donde $n=3$, evaluando tenemos: $N=3^n=3^3=27$

El segundo paso consiste en calcular el voltaje V_{A2} (nivel 1), el cual se refiere al voltaje de referencia de la etapa 2 ó Auxiliar 2, cuyo valor corresponde al voltaje mínimo del inversor y se determina de la siguiente forma:

$$V_{A2} = \frac{V_{MAX}}{\frac{N-1}{2}} = \frac{V_{MAX}}{\frac{27-1}{2}} = \frac{1}{13} V_{MAX}$$

Los voltajes secundarios de cada uno de los transformadores tienen los siguientes valores:

- Para etapa Auxiliar 2: $V_{A2} = \frac{1}{13} V_{MAX}$
- Para etapa Auxiliar 1: $V_{A1} = 3 * V_{A2} = \frac{3}{13} V_{MAX}$
- Para etapa Principal: $V_P = 3 * V_{A1} = \frac{9}{13} V_{MAX}$

Ahora se pueden calcular la relación de voltajes 'a' de cada transformador:

- Para etapa Auxiliar 2: $a_{A2} = \frac{V_{IN}}{V_{A2}} = 13 \frac{V_{IN}}{V_{MAX}}$
- Para etapa Auxiliar 1: $a_{A1} = \frac{V_{IN}}{V_{A1}} = \frac{13}{3} \frac{V_{IN}}{V_{MAX}}$
- Para etapa Principal: $a_P = \frac{V_{IN}}{V_P} = \frac{13}{9} \frac{V_{IN}}{V_{MAX}}$

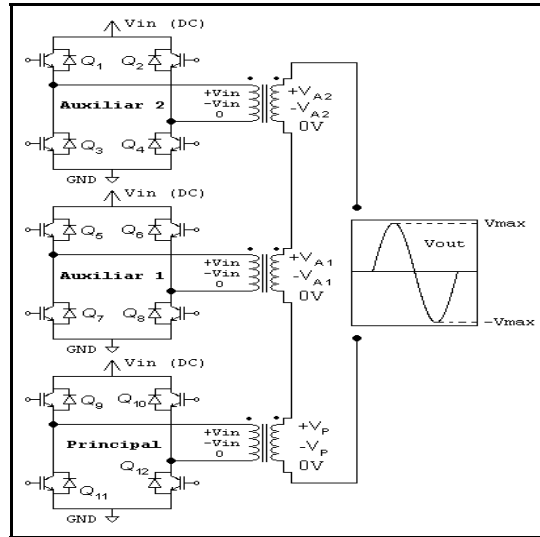


Figura 26. Diagrama esquemático del inversor de 3 etapas.

A continuación, se ilustra la señal de salida del inversor de 3 etapas y la tabla de secuencias de conmutaciones.

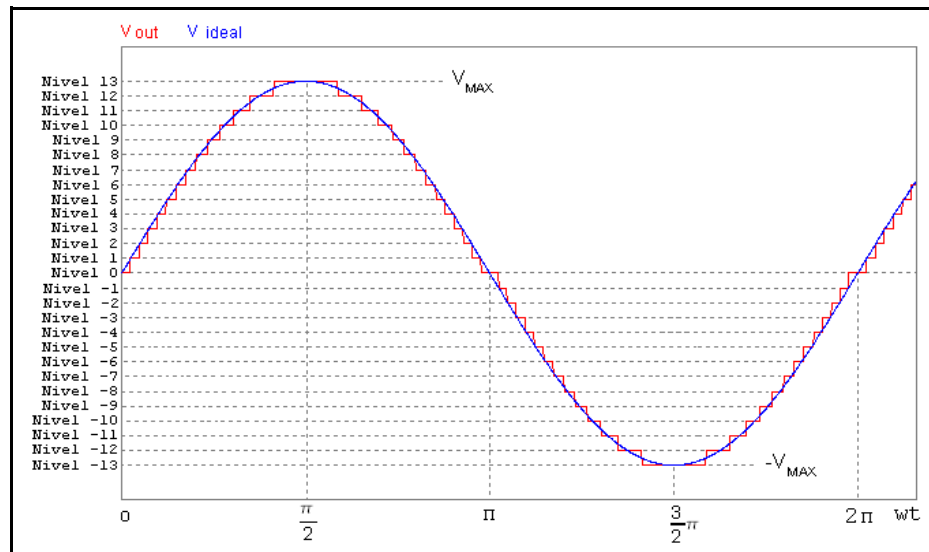


Figura 27. Señal de salida del inversor multinivel de 3 etapas.

Nivel (N)	Combinación	Voltaje de salida (V_{OUT})	Etapa 3 ó Principal				Etapa 2 ó Auxiliar 1				Etapa 1 ó Auxiliar 2			
			Q_9	Q_{10}	Q_{11}	Q_{12}	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
1	V_{A2}	$\frac{1}{13} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
2	$V_{A1} - V_{A2}$	$\frac{2}{13} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
3	V_{A1}	$\frac{3}{13} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0
4	$V_{A1} + V_{A2}$	$\frac{4}{13} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
5	$V_P - V_{A1} - V_{A2}$	$\frac{5}{13} V_{MAX}$	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
6	$V_P - V_{A1}$	$\frac{6}{13} V_{MAX}$	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0
7	$V_P - V_{A1} + V_{A2}$	$\frac{7}{13} V_{MAX}$	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
8	$V_P - V_{A2}$	$\frac{8}{13} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0
9	V_P	$\frac{9}{13} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
10	$V_P + V_{A2}$	$\frac{10}{13} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
11	$V_P + V_{A1} - V_{A2}$	$\frac{11}{13} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0
12	$V_P + V_{A1}$	$\frac{12}{13} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0
13	$V_P + V_{A1} + V_{A2}$	V_{MAX}	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
-1	$-V_{A2}$	$-\frac{1}{13} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
-2	$-V_{A1} + V_{A2}$	$-\frac{2}{13} V_{MAX}$	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1
-3	$-V_{A1}$	$-\frac{3}{13} V_{MAX}$	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
-4	$-V_{A1} - V_{A2}$	$-\frac{4}{13} V_{MAX}$	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
-5	$-V_P + V_{A1} + V_{A2}$	$-\frac{5}{13} V_{MAX}$	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
-6	$-V_P + V_{A1}$	$-\frac{6}{13} V_{MAX}$	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0
-7	$-V_P + V_{A1} - V_{A2}$	$-\frac{7}{13} V_{MAX}$	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0
-8	$-V_P + V_{A2}$	$-\frac{8}{13} V_{MAX}$	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
-9	$-V_P$	$-\frac{9}{13} V_{MAX}$	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
-10	$-V_P - V_{A2}$	$-\frac{10}{13} V_{MAX}$	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
-11	$-V_P - V_{A1} + V_{A2}$	$-\frac{11}{13} V_{MAX}$	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1

Nivel (N)	Combinación	Voltaje de salida (V_{OUT})	Etapa 3 ó Principal				Etapa 2 ó Auxiliar 1				Etapa 1 ó Auxiliar 2			
			Q_9	Q_{10}	Q_{11}	Q_{12}	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
-12	$-V_P - V_{A1}$	$-\frac{12}{13}V_{MAX}$	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
-13	$-V_P - V_{A1} - V_{A2}$	V_{MAX}	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0

Tabla 9. Secuencia de conmutación del inversor de 3 etapas, 27 niveles.

3.3. Inversor Monofásico Multinivel de 4 Etapas

El inversor multinivel de 4 etapas posee 81 niveles, de los cuales 40 son positivos, 40 negativos y el cero. Como el número de niveles es mayor que los anteriores, la salida de este inversor posee por consecuencia un contenido armónico mucho menor. El mecanismo o proceso para calcular la tabla de secuencias de conmutación es el mismo empleado con los inversores anteriores. El lector puede consultar el anexo B, donde se encuentran todos los cálculos realizados a este inversor con respecto a las secuencias de conmutación.

A continuación se ilustra el esquemático de este inversor.

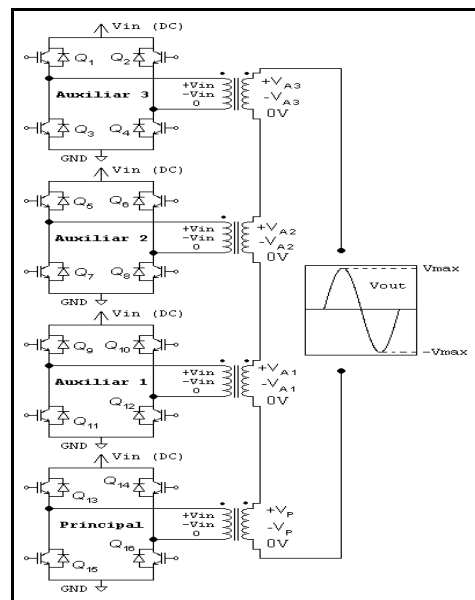


Figura 28. Diagrama esquemático del inversor de 4 etapas.

A continuación se describen algunos cálculos realizados al inversor de 4 etapas:

Cálculo del número de niveles (N) a partir del número de etapas (n) con la fórmula $N=3^n$, donde $n=4$, evaluando tenemos: $N=3^n=3^4=81$

Cálculo del voltaje V_{A3} o nivel 1, el cual se refiere al voltaje de referencia de la etapa 3 ó Auxiliar 3, cuyo valor corresponde al voltaje mínimo del inversor y se determina de la siguiente forma:

$$V_{A3} = \frac{V_{MAX}}{\frac{N-1}{2}} = \frac{V_{MAX}}{\frac{81-1}{2}} = \frac{1}{40} V_{MAX}$$

Los voltajes secundarios de cada uno de los transformadores tienen los siguientes valores:

- Para etapa Auxiliar 3: $V_{A3} = \frac{1}{40} V_{MAX}$
- Para etapa Auxiliar 2: $V_{A2} = 3 * V_{A3} = \frac{3}{40} V_{MAX}$
- Para etapa Auxiliar 1: $V_{A1} = 3 * V_{A2} = \frac{9}{40} V_{MAX}$
- Para etapa Principal: $V_P = 3 * V_{A1} = \frac{27}{40} V_{MAX}$

Ahora se pueden calcular la relación de voltajes 'a' de cada transformador:

- Para etapa Auxiliar 3: $a_{A3} = \frac{V_{IN}}{V_{A3}} = 40 \frac{V_{IN}}{V_{MAX}}$
- Para etapa Auxiliar 2: $a_{A2} = \frac{V_{IN}}{V_{A2}} = \frac{40}{3} \frac{V_{IN}}{V_{MAX}}$
- Para etapa Auxiliar 1: $a_{A1} = \frac{V_{IN}}{V_{A1}} = \frac{40}{9} \frac{V_{IN}}{V_{MAX}}$
- Para etapa Principal: $a_P = \frac{V_{IN}}{V_P} = \frac{40}{27} \frac{V_{IN}}{V_{MAX}}$

El resultado de todos los cálculos se resumen en la tabla de secuencias de conmutación de la tabla 10.

Nivel (N)	Combinación	Voltaje de salida (V_{OUT})	Etapa 4 ó Principal				Etapa 3 ó Auxiliar 1				Etapa 2 ó Auxiliar 2				Etapa 1 ó Auxiliar 3			
			Q_{13}	Q_{14}	Q_{15}	Q_{16}	Q_9	Q_{10}	Q_{11}	Q_{12}	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
1	V_{A3}	$\frac{1}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
2	$V_{A2} - V_{A3}$	$\frac{1}{20} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
3	V_{A2}	$\frac{3}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0
4	$V_{A2} + V_{A3}$	$\frac{1}{10} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
5	$V_{A1} - V_{A2} - V_{A3}$	$\frac{5}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
6	$V_{A1} - V_{A2}$	$\frac{6}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0

Nivel (N)	Combinación	Voltaje de salida (V_{OUT})	Etapa 4 ó Principal				Etapa 3 ó Auxiliar 1				Etapa 2 ó Auxiliar 2				Etapa 1 ó Auxiliar 3			
			Q_{13}	Q_{14}	Q_{15}	Q_{16}	Q_9	Q_{10}	Q_{11}	Q_{12}	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
7	$V_{A1} - V_{A2} + V_{A3}$	$\frac{7}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
8	$V_{A1} - V_{A3}$	$\frac{1}{5} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0
9	V_{A1}	$\frac{9}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
10	$V_{A1} + V_{A3}$	$\frac{1}{4} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
11	$V_{A1} + V_{A2} - V_{A3}$	$\frac{11}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0
12	$V_{A1} + V_{A2}$	$\frac{12}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0
13	$V_{A1} + V_{A2} + V_{A3}$	$\frac{13}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
14	$V_P - V_{A1} - V_{A2} - V_{A3}$	$\frac{14}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
15	$V_P - V_{A1} - V_{A2}$	$\frac{15}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
16	$V_P - V_{A1} - V_{A2} + V_{A3}$	$\frac{16}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1
17	$V_P - V_{A1} - V_{A3}$	$\frac{17}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
18	$V_P - V_{A1}$	$\frac{9}{20} V_{MAX}$	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
19	$V_P - V_{A1} + V_{A3}$	$\frac{19}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
20	$V_P - V_{A1} + V_{A2} - V_{A3}$	$\frac{1}{2} V_{MAX}$	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0
21	$V_P - V_{A1} + V_{A2}$	$\frac{21}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0
22	$V_P - V_{A1} + V_{A2} + V_{A3}$	$\frac{11}{20} V_{MAX}$	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
23	$V_P - V_{A2} - V_{A3}$	$\frac{23}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
24	$V_P - V_{A2}$	$\frac{3}{5} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
25	$V_P - V_{A2} + V_{A3}$	$\frac{25}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1
26	$V_P - V_{A3}$	$\frac{13}{20} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
27	V_P	$\frac{27}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
28	$V_P + V_{A3}$	$\frac{7}{10} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
29	$V_P + V_{A2} - V_{A3}$	$\frac{29}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
30	$V_P + V_{A2}$	$\frac{3}{4} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0
31	$V_P + V_{A2} + V_{A3}$	$\frac{31}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1

Nivel (N)	Combinación	Voltaje de salida (V_{OUT})	Etapa 4 ó Principal				Etapa 3 ó Auxiliar 1				Etapa 2 ó Auxiliar 2				Etapa 1 ó Auxiliar 3			
			Q_{13}	Q_{14}	Q_{15}	Q_{16}	Q_9	Q_{10}	Q_{11}	Q_{12}	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
32	$V_P + V_{A1} - V_{A2} - V_{A3}$	$\frac{4}{5} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
33	$V_P + V_{A1} - V_{A2}$	$\frac{33}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0
34	$V_P + V_{A1} - V_{A2} + V_{A3}$	$\frac{17}{20} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
35	$V_P + V_{A1} - V_{A3}$	$\frac{7}{8} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0
36	$V_P + V_{A1}$	$\frac{9}{10} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
37	$V_P + V_{A1} + V_{A3}$	$\frac{37}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
38	$V_P + V_{A1} + V_{A2} - V_{A3}$	$\frac{19}{20} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0
39	$V_P + V_{A1} + V_{A2}$	$\frac{39}{40} V_{MAX}$	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0
40	$V_P + V_{A1} + V_{A2} + V_{A3}$	V_{MAX}	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
-1	$-V_{A3}$	$-\frac{1}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
-2	$-V_{A2} + V_{A3}$	$-\frac{1}{20} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1
-3	$-V_{A2}$	$-\frac{3}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
-4	$-V_{A2} - V_{A3}$	$-\frac{1}{10} V_{MAX}$	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
-5	$-V_{A1} + V_{A2} + V_{A3}$	$-\frac{5}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
-6	$-V_{A1} + V_{A2}$	$-\frac{6}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0
-7	$-V_{A1} + V_{A2} - V_{A3}$	$-\frac{7}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0
-8	$-V_{A1} + V_{A3}$	$-\frac{1}{5} V_{MAX}$	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
-9	$-V_{A1}$	$-\frac{9}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
-10	$-V_{A1} - V_{A3}$	$-\frac{1}{4} V_{MAX}$	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
-11	$-V_{A1} - V_{A2} + V_{A3}$	$-\frac{11}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1
-12	$-V_{A1} - V_{A2}$	$-\frac{12}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
-13	$-V_{A1} - V_{A2} - V_{A3}$	$-\frac{13}{40} V_{MAX}$	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
-14	$-V_P + V_{A1} + V_{A2} + V_{A3}$	$-\frac{14}{40} V_{MAX}$	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
-15	$-V_P + V_{A1} + V_{A2}$	$-\frac{15}{40} V_{MAX}$	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0
-16	$-V_P + V_{A1} + V_{A2} - V_{A3}$	$-\frac{16}{40} V_{MAX}$	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0

Nivel (N)	Combinación	Voltaje de salida (V_{OUT})	Etapa 4 ó Principal				Etapa 3 ó Auxiliar 1				Etapa 2 ó Auxiliar 2				Etapa 1 ó Auxiliar 3			
			Q_{13}	Q_{14}	Q_{15}	Q_{16}	Q_9	Q_{10}	Q_{11}	Q_{12}	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
-17	$\neg V_P + V_{A1} + V_{A3}$	$-\frac{17}{40}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
-18	$\neg V_P + V_{A1}$	$-\frac{9}{20}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
-19	$\neg V_P + V_{A1} \neg V_{A3}$	$-\frac{19}{40}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0
-20	$\neg V_P + V_{A1} \neg V_{A2} + V_{A3}$	$-\frac{1}{2}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
-21	$\neg V_P + V_{A1} \neg V_{A2}$	$-\frac{21}{40}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0
-22	$\neg V_P + V_{A1} \neg V_{A2} \neg V_{A3}$	$-\frac{11}{20}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
-23	$\neg V_P + V_{A2} + V_{A3}$	$-\frac{23}{40}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
-24	$\neg V_P + V_{A2}$	$-\frac{3}{5}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0
-25	$\neg V_P + V_{A2} \neg V_{A3}$	$-\frac{25}{40}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
-26	$\neg V_P + V_{A3}$	$-\frac{13}{20}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
-27	$\neg V_P$	$-\frac{27}{40}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
-28	$\neg V_P \neg V_{A3}$	$-\frac{7}{10}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
-29	$\neg V_P \neg V_{A2} + V_{A3}$	$-\frac{29}{40}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1
-30	$\neg V_P \neg V_{A2}$	$-\frac{3}{4}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
-31	$\neg V_P \neg V_{A2} \neg V_{A3}$	$-\frac{31}{40}V_{MAX}$	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
-32	$\neg V_P \neg V_{A1} + V_{A2} + V_{A3}$	$-\frac{4}{5}V_{MAX}$	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
-33	$\neg V_P \neg V_{A1} + V_{A2}$	$-\frac{33}{40}V_{MAX}$	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0
-34	$\neg V_P \neg V_{A1} + V_{A2} \neg V_{A3}$	$-\frac{17}{20}V_{MAX}$	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0
-35	$\neg V_P \neg V_{A1} + V_{A3}$	$-\frac{7}{8}V_{MAX}$	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
-36	$\neg V_P \neg V_{A1}$	$-\frac{9}{10}V_{MAX}$	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
-37	$\neg V_P \neg V_{A1} \neg V_{A3}$	$-\frac{37}{40}V_{MAX}$	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
-38	$\neg V_P \neg V_{A1} \neg V_{A2} + V_{A3}$	$-\frac{19}{20}V_{MAX}$	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1
-39	$\neg V_P \neg V_{A1} \neg V_{A2}$	$-\frac{39}{40}V_{MAX}$	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
-40	$\neg V_P \neg V_{A1} \neg V_{A2} \neg V_{A3}$	$-V_{MAX}$	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0

Tabla 10. Secuencia de conmutación del inversor de 4 etapas, 81 niveles.

En las siguientes figuras se muestra el voltaje de salida del

inversor de 4 etapas, en la figura 29, podemos observar la señal completa y en la figura 30 se hace la comparación con una señal ideal sinusoidal en la cual se puede ver que ambas señales son casi iguales. En la figura 31 se ilustra el semiciclo positivo con los 40 niveles positivos, el semiciclo negativo no se muestra; pero tiene la forma opuesta del semiciclo positivo.

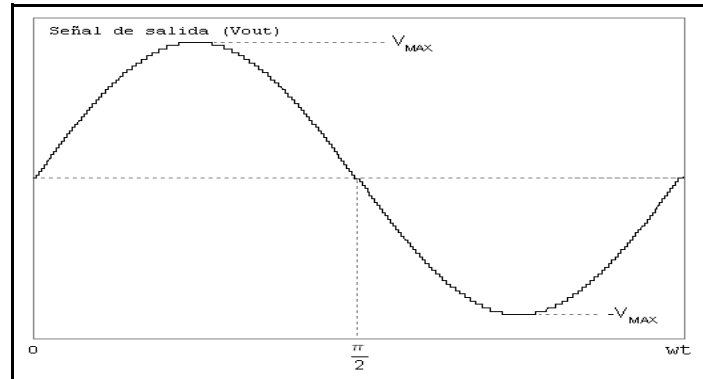


Figura 29. Señal de salida del inversor de 4 etapas.

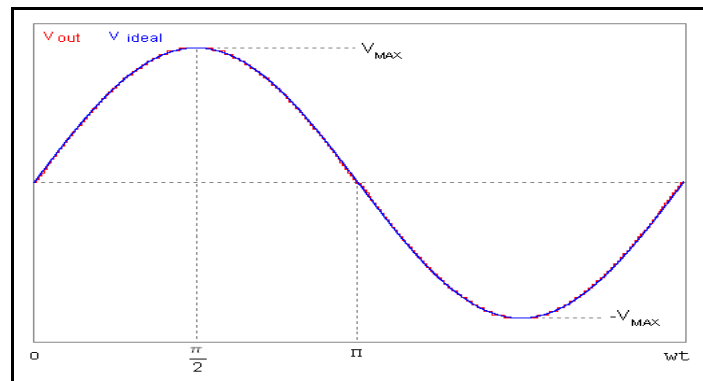


Figura 30. Comparación de la señal de salida del inversor de 4 etapas con una señal ideal.

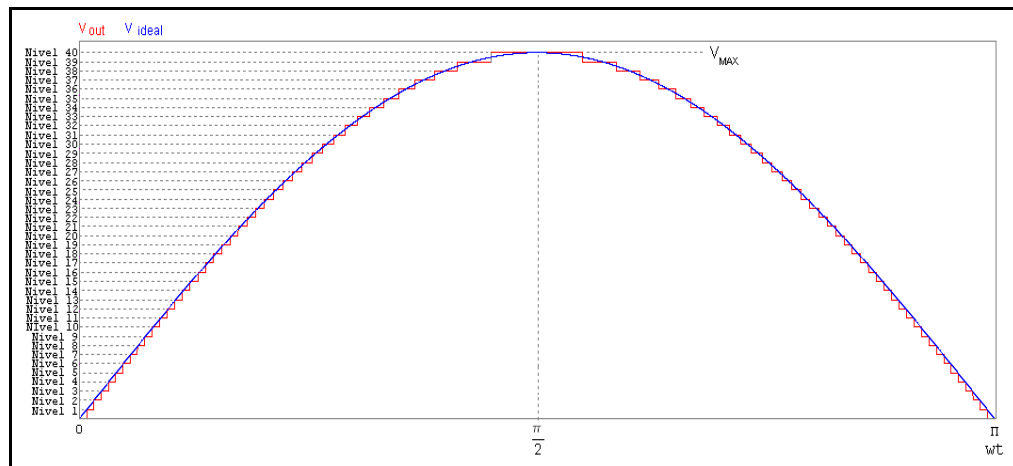
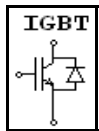


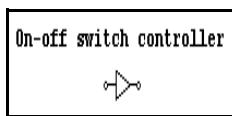
Figura 31. Semiciclo positivo de la señal de salida con los 40 niveles del inversor de 4 etapas.

IV. SIMULACIÓN DEL INVERSOR MULTINIVEL DE 4 ETAPAS

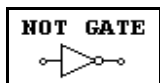
Para la simulación del inversor de 4 etapas se utilizó el programa simulador de circuitos PSIM (simulador de electrónica de potencia y motores drive). El circuito a simular se muestra en la figura 32. Antes hacemos una breve descripción de los elementos utilizados en la simulación; indicando la función que desempeña cada elemento.



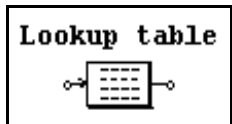
Símbolo del IGBT, puede utilizarse en forma ideal o utilizarlo con algunos parámetros reales como voltaje de saturación, caída de voltaje en el diodo, posición inicial (Apagado o encendido) y corriente de conducción.



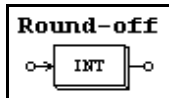
Este elemento sirve de interfase entre el circuito de potencia y el circuito control, proporciona el voltaje necesario en la compuerta del IGBT para que se active y conduzca.



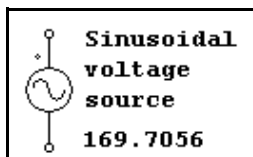
Compuerta negadora que sirve para crear la secuencia inversa de los IGBT3 e IGBT4 de cada etapa.



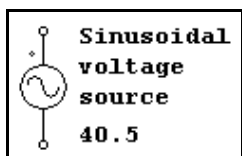
Contiene una tabla con valores de entrada y su correspondiente valor de salida en un archivo con extensión *.tbl, dicho archivo contendrá las secuencias de disparo para uno de los IGBT de cada rama del puente 'H'.



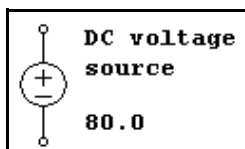
Este bloque o función sirve para generar valores con la cantidad de decimales y aproximaciones que nos convenga, para este caso queremos solo valores enteros.



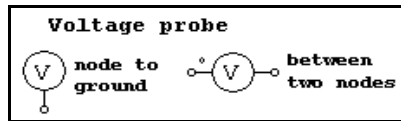
Fuente alterna de referencia para compararla con la señal de salida del inversor, con una frecuencia de 60Hz.



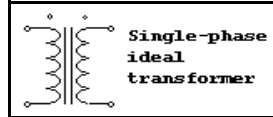
Fuente de señal alterna para generar valores instantáneos de -40.5 a 40.5, con una frecuencia de 60Hz. Estos valores son enviados y procesados por el bloque Round-off.



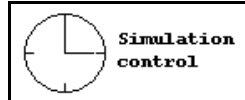
Fuente de DC, con un valor de 80V, de la cual se formará la señal de onda sinusoidal en la salida del inversor.



Elementos que sirven para medir los voltajes en un nodo o entre dos nodos.



Símbolo del transformador monofásico se utilizan 4, uno por cada puente H, la suma de todos los voltajes secundarios genera la señal de salida del inversor.



Controla los parámetros de la simulación, como por ejemplo el rango de tiempo en el cual se bosquejará, las señales de salida.

A continuación en la tabla 11 se muestra el contenido de los archivo *.tbl, el cual es requerido por el bloque lookup table, que tiene como función seleccionar el valor de salida correspondiente al valor de entrada, cuyos valores se encuentran en dicho archivo y ordenados de tal manera que primero se escribe la entrada y luego la salida separados por coma(,). Para el caso de la simulación del inversor de 4 etapas, las entradas varían de -40 hasta 40 en pasos de 1 y las salidas sólo pueden ser 1 ó 0 (cero), como se observa en la tabla 11. Cada bloque lookup table deberá tener su respectivo archivo *.tbl guardado en el mismo directorio donde se encuentra el archivo esquemático. Para una mejor comprensión cada bloque lookup table ha sido nombrado con el mismo nombre de su archivo *.tbl.

1A.tbl	2A.tbl	1B.tbl	2B.tbl	1C.tbl	2C.tbl	1D.tbl	2D.tbl
-40, 0	-40, 1	-40, 0	-40, 1	-40, 0	-40, 1	-40, 0	-40, 1
-39, 1	-39, 1	-39, 0	-39, 1	-39, 0	-39, 1	-39, 0	-39, 1
-38, 1	-38, 0	-38, 0	-38, 1	-38, 0	-38, 1	-38, 0	-38, 1
-37, 0	-37, 1	-37, 1	-37, 1	-37, 0	-37, 1	-37, 0	-37, 1
-36, 1	-36, 1	-36, 1	-36, 1	-36, 0	-36, 1	-36, 0	-36, 1
-35, 1	-35, 0	-35, 1	-35, 1	-35, 0	-35, 1	-35, 0	-35, 1
-34, 0	-34, 1	-34, 1	-34, 0	-34, 0	-34, 1	-34, 0	-34, 1
-33, 1	-33, 1	-33, 1	-33, 0	-33, 0	-33, 1	-33, 0	-33, 1
-32, 1	-32, 0	-32, 1	-32, 0	-32, 0	-32, 1	-32, 0	-32, 1
-31, 0	-31, 1	-31, 0	-31, 1	-31, 1	-31, 1	-31, 0	-31, 1
-30, 1	-30, 1	-30, 0	-30, 1	-30, 1	-30, 1	-30, 0	-30, 1
-29, 1	-29, 0	-29, 0	-29, 1	-29, 1	-29, 1	-29, 0	-29, 1
-28, 0	-28, 1	-28, 1	-28, 1	-28, 1	-28, 1	-28, 0	-28, 1
-27, 1	-27, 1	-27, 1	-27, 1	-27, 1	-27, 1	-27, 0	-27, 1
-26, 1	-26, 0	-26, 1	-26, 1	-26, 1	-26, 1	-26, 0	-26, 1
-25, 0	-25, 1	-25, 1	-25, 0	-25, 1	-25, 1	-25, 0	-25, 1
-24, 1	-24, 1	-24, 1	-24, 0	-24, 1	-24, 1	-24, 0	-24, 1
-23, 1	-23, 0	-23, 1	-23, 0	-23, 1	-23, 1	-23, 0	-23, 1
-22, 0	-22, 1	-22, 0	-22, 1	-22, 1	-22, 0	-22, 0	-22, 1
-21, 1	-21, 1	-21, 0	-21, 1	-21, 1	-21, 0	-21, 0	-21, 1
-20, 1	-20, 0	-20, 0	-20, 1	-20, 1	-20, 0	-20, 0	-20, 1
-19, 0	-19, 1	-19, 1	-19, 1	-19, 1	-19, 0	-19, 0	-19, 1
-18, 1	-18, 1	-18, 1	-18, 1	-18, 1	-18, 0	-18, 0	-18, 1
-17, 1	-17, 0	-17, 1	-17, 1	-17, 1	-17, 0	-17, 0	-17, 1
-16, 0	-16, 1	-16, 1	-16, 0	-16, 1	-16, 0	-16, 0	-16, 1
-15, 1	-15, 1	-15, 1	-15, 0	-15, 1	-15, 0	-15, 0	-15, 1
-14, 1	-14, 0	-14, 1	-14, 0	-14, 1	-14, 0	-14, 0	-14, 1
-13, 0	-13, 1	-13, 0	-13, 1	-13, 0	-13, 1	-13, 1	-13, 1
-12, 1	-12, 1	-12, 0	-12, 1	-12, 0	-12, 1	-12, 1	-12, 1

1A.tbl	2A.tbl	1B.tbl	2B.tbl	1C.tbl	2C.tbl	1D.tbl	2D.tbl
-11, 1	-11, 0	-11, 0	-11, 1	-11, 0	-11, 1	-11, 1	-11, 1
-10, 0	-10, 1	-10, 1	-10, 1	-10, 0	-10, 1	-10, 1	-10, 1
-9, 1	-9, 1	-9, 1	-9, 1	-9, 0	-9, 1	-9, 1	-9, 1
-8, 1	-8, 0	-8, 1	-8, 1	-8, 0	-8, 1	-8, 1	-8, 1
-7, 0	-7, 1	-7, 1	-7, 0	-7, 0	-7, 1	-7, 1	-7, 1
-6, 1	-6, 1	-6, 1	-6, 0	-6, 0	-6, 1	-6, 1	-6, 1
-5, 1	-5, 0	-5, 1	-5, 0	-5, 0	-5, 1	-5, 1	-5, 1
-4, 0	-4, 1	-4, 0	-4, 1	-4, 1	-4, 1	-4, 1	-4, 1
-3, 1	-3, 1	-3, 0	-3, 1	-3, 1	-3, 1	-3, 1	-3, 1
-2, 1	-2, 0	-2, 0	-2, 1	-2, 1	-2, 1	-2, 1	-2, 1
-1, 0	-1, 1	-1, 1	-1, 1	-1, 1	-1, 1	-1, 1	-1, 1
0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1
1, 1	1, 0	1, 1	1, 1	1, 1	1, 1	1, 1	1, 1
2, 0	2, 1	2, 1	2, 0	2, 1	2, 1	2, 1	2, 1
3, 1	3, 1	3, 1	3, 0	3, 1	3, 1	3, 1	3, 1
4, 1	4, 0	4, 1	4, 0	4, 1	4, 1	4, 1	4, 1
5, 0	5, 1	5, 0	5, 1	5, 1	5, 0	5, 1	5, 1
6, 1	6, 1	6, 0	6, 1	6, 1	6, 0	6, 1	6, 1
7, 1	7, 0	7, 0	7, 1	7, 1	7, 0	7, 1	7, 1
8, 0	8, 1	8, 1	8, 1	8, 1	8, 0	8, 1	8, 1
9, 1	9, 1	9, 1	9, 1	9, 1	9, 0	9, 1	9, 1
10, 1	10, 0	10, 1	10, 1	10, 1	10, 0	10, 1	10, 1
11, 0	11, 1	11, 1	11, 0	11, 1	11, 0	11, 1	11, 1
12, 1	12, 1	12, 1	12, 0	12, 1	12, 0	12, 1	12, 1
13, 1	13, 0	13, 1	13, 0	13, 1	13, 0	13, 1	13, 1
14, 0	14, 1	14, 0	14, 1	14, 0	14, 1	14, 1	14, 0
15, 1	15, 1	15, 0	15, 1	15, 0	15, 1	15, 1	15, 0
16, 1	16, 0	16, 0	16, 1	16, 0	16, 1	16, 1	16, 0
17, 0	17, 1	17, 1	17, 1	17, 0	17, 1	17, 1	17, 0
18, 1	18, 1	18, 1	18, 1	18, 0	18, 1	18, 1	18, 0
19, 1	19, 0	19, 1	19, 1	19, 0	19, 1	19, 1	19, 0
20, 0	20, 1	20, 1	20, 0	20, 0	20, 1	20, 1	20, 0
21, 1	21, 1	21, 1	21, 0	21, 0	21, 1	21, 1	21, 0
22, 1	22, 0	22, 1	22, 0	22, 0	22, 1	22, 1	22, 0
23, 0	23, 1	23, 0	23, 1	23, 1	23, 1	23, 1	23, 0
24, 1	24, 1	24, 0	24, 1	24, 1	24, 1	24, 1	24, 0
25, 1	25, 0	25, 0	25, 1	25, 1	25, 1	25, 1	25, 0
26, 0	26, 1	26, 1	26, 1	26, 1	26, 1	26, 1	26, 0
27, 1	27, 1	27, 1	27, 1	27, 1	27, 1	27, 1	27, 0
28, 1	28, 0	28, 1	28, 1	28, 1	28, 1	28, 1	28, 0
29, 0	29, 1	29, 1	29, 0	29, 1	29, 1	29, 1	29, 0
30, 1	30, 1	30, 1	30, 0	30, 1	30, 1	30, 1	30, 0
31, 1	31, 0	31, 1	31, 0	31, 1	31, 1	31, 1	31, 0
32, 0	32, 1	32, 0	32, 1	32, 1	32, 0	32, 1	32, 0
33, 1	33, 1	33, 0	33, 1	33, 1	33, 0	33, 1	33, 0
34, 1	34, 0	34, 0	34, 1	34, 1	34, 0	34, 1	34, 0
35, 0	35, 1	35, 1	35, 1	35, 1	35, 0	35, 1	35, 0
36, 1	36, 1	36, 1	36, 1	36, 1	36, 0	36, 1	36, 0
37, 1	37, 0	37, 1	37, 1	37, 1	37, 0	37, 1	37, 0
38, 0	38, 1	38, 1	38, 0	38, 1	38, 0	38, 1	38, 0
39, 1	39, 1	39, 1	39, 0	39, 1	39, 0	39, 1	39, 0
40, 1	40, 0	40, 1	40, 0	40, 1	40, 0	40, 1	40, 0

Tabla 11. Contenido de los archivos *.tbl de cada bloque lookup table.

La fuente de voltaje alterna de 40.5 y el bloque round-off permiten en conjunto generar valores enteros entre -40 y 40 en pasos de 1. Cada valor generado es enviado a cada uno de los bloques lookup table, éste por su parte compara el valor de entrada con los valores de entrada que tiene registrado en el archivo *.tbl y si lo encuentra envía a su salida el correspondiente valor de salida, así por ejemplo si el valor de entrada en el bloque 1A es 4, entonces su salida es 1, corroborar en el archivo 1A.tbl. Cada bloque lookup es alimentado por el mismo valor de

entrada y cada bloque genera un valor de 0 (cero) ó 1 lógico los cuales son enviados a cada IGBT al lado superior de cada puente 'H', antes de llegar al IGBT deben pasar por un acondicionamiento que lo proporciona el elemento on-off switch controller, el cual proporciona el voltaje necesario para hacer encender al IGBT.

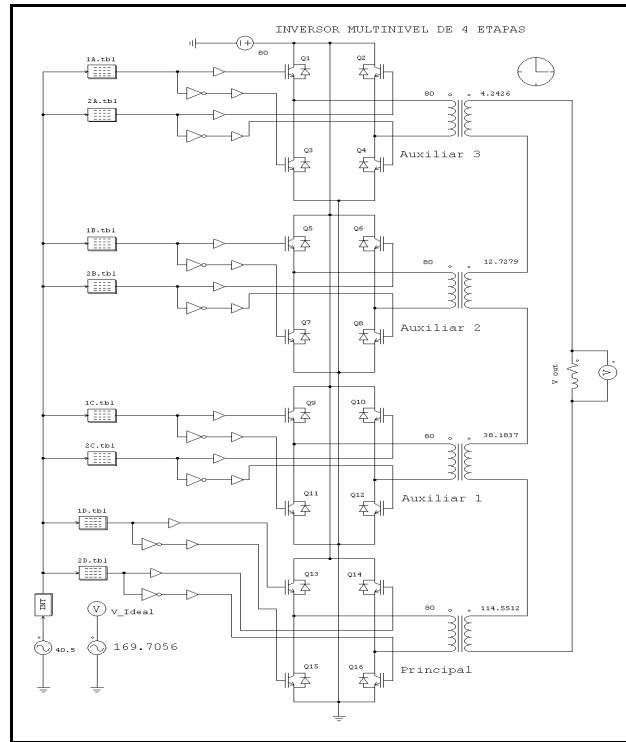


Figura 32. Simulación del inversor de 4 etapas.

Las señales de control correspondientes a los IGBT'S inferiores de cada puente 'H' son originadas a partir de las señales de control de los IGBT'S superiores por medio de una compuerta negadora, de esta forma se completan las 16 señales de control que se necesitan para los 16 IGBT'S utilizados por el inversor. Como la simulación es bastante idealista y los IGBT son utilizados como interruptores ideales, no necesitan un retardo entre el IGBT superior y el IGBT inferior de cada etapa en la transición de encendido a apagado o viceversa. Caso contrario a lo que sucede en el mundo real donde sí es necesario el retardo, ya que los IGBT reales no se encienden ni se apagan de inmediato si no que requieren de un tiempo de encendido y de apagado el cual no es el mismo, generalmente el tiempo de apagado es mayor que el de encendido.

Para calcular los voltajes secundarios, necesitamos primero definir el voltaje de salida AC que deseamos nos genere el inversor, éste valor como ya se menciono es de 120V rms, aplicando las formulas antes vistas, obtenemos los resultados siguientes:

$$V_{MAX} = \sqrt{2} * V_{OUT} = \sqrt{2} * 120 = 169.7056V$$

- Voltaje secundario de Auxiliar 3: $V_{A3} = \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{1}{40} * 169.7056$
 $V_{A3} = 4.2426V$
- Voltaje secundario de Auxiliar 2: $V_{A2} = 3 * V_{A3} = 3 * 2.2426$
 $V_{A2} = 12.7279V$
- Voltaje secundario de Auxiliar 1: $V_{A1} = 3 * V_{A2} = 3 * 12.7279$
 $V_{A1} = 38.1837V$
- Voltaje secundario de Principal: $V_P = 3 * V_{A1} = 3 * 38.1837$
 $V_P = 114.5512V$

Teniendo en cuenta que el voltaje de entrada es de 80V continuos y con los voltajes secundarios ya definidos podemos encontrar la relación de voltajes para cada transformador:

- Transformador Auxiliar 3: $a_{A3} = \frac{V_{IN}}{V_{A3}} = 40 \frac{V_{IN}}{V_{MAX}} = 40 \frac{80}{169.7056}$
 $a_{A3} = 18.8561$
- Transformador Auxiliar 2: $a_{A2} = \frac{V_{IN}}{V_{A2}} = \frac{40}{3} \frac{V_{IN}}{V_{MAX}} = \frac{40}{3} \frac{80}{169.7056}$
 $a_{A2} = 6.2853$
- Transformador Auxiliar 1: $a_{A1} = \frac{V_{IN}}{V_{A1}} = \frac{40}{9} \frac{V_{IN}}{V_{MAX}} = \frac{40}{9} \frac{80}{169.7056}$
 $a_{A1} = 2.0951$
- Transformador Principal: $a_P = \frac{V_{IN}}{V_P} = \frac{40}{27} \frac{V_{IN}}{V_{MAX}} = \frac{40}{27} \frac{80}{169.7056}$
 $a_P = 0.6983$

4.1. Resultados de la Simulación

4.1.1 Señales de Control para cada uno de los IGBT'S

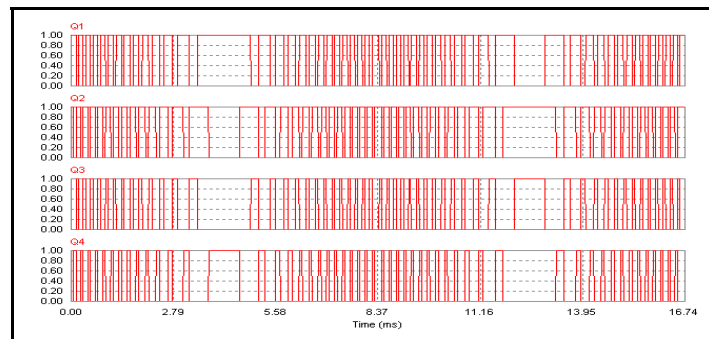


Figura 33. Señales de control para Auxiliar 3.

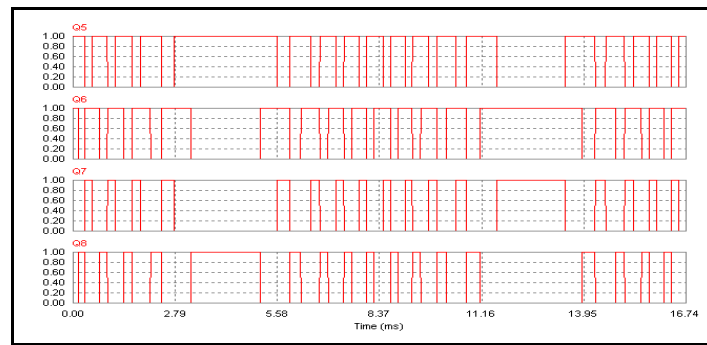


Figura 34. Señales de control para Auxiliar 2.

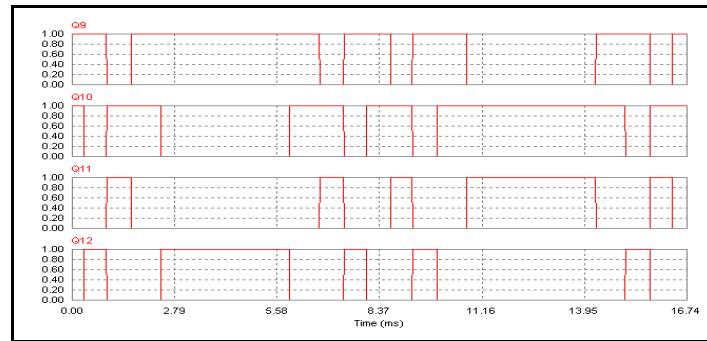


Figura 35. Señales de control para Auxiliar 1.

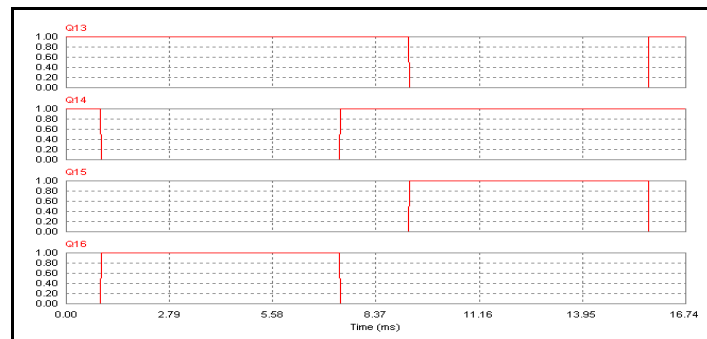


Figura 36. Señales de control para Etapa Principal.

En las figuras 33, 34, 35 y 36 hemos visto como deben de ser las señales de control para cada uno de los 16 IGBT que componen el inversor multinivel de 4 etapas, en las mismas figuras podemos notar que las frecuencias de conmutación son mayores para la etapa del Auxiliar 3 y por el contrario las frecuencias menores son para la etapa Principal. El valor de frecuencia para la etapa Auxiliar 3 es 4.2KHz, para la etapa Auxiliar 2 de 1.7KHz, para el Auxiliar 1 de 540Hz y para la etapa principal de 60Hz; estos valores fueron medidos a partir de la simulación.

Por otra parte podemos deducir por medio de los voltajes de referencia o en base a los voltajes de lado secundario de los

transformadores de cada etapa, que la etapa Principal suministrará la mayor potencia y por el contrario la etapa Auxiliar 3 suministrará la menor potencia, posteriormente se darán más detalles sobre este punto.

4.1.2. Voltaje Secundario y Señal de Salida

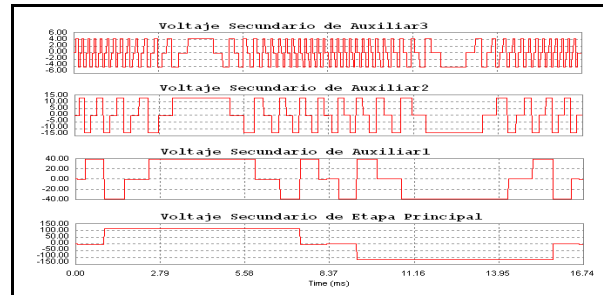


Figura 37. Voltajes secundarios de cada uno de los transformadores de cada etapa.

A los voltajes secundarios también se les suele llamar voltajes modulados, que al sumarse generarán la señal sinusoidal a la salida del inversor. Esto se ilustra en la figura 38.

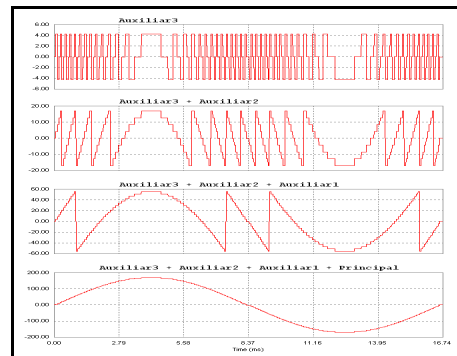


Figura 38. Suma de voltajes secundarios.

La onda sinusoidal obtenida, es muy parecida a una señal ideal; esta comparación la podemos apreciar mejor en la figura 39.

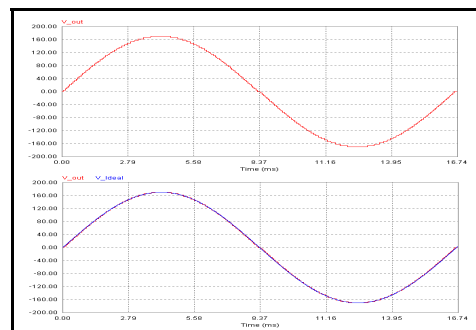


Figura 39. Voltaje de salida del inversor de 4 etapas.

La comparación de la señal de salida (color rojo) con una señal ideal (color azul) es asombroso ya que como puede verse las dos señales parecen iguales; pero la medición del THD nos dirá que tan parecidas son, esto se ilustra en la figura 40.

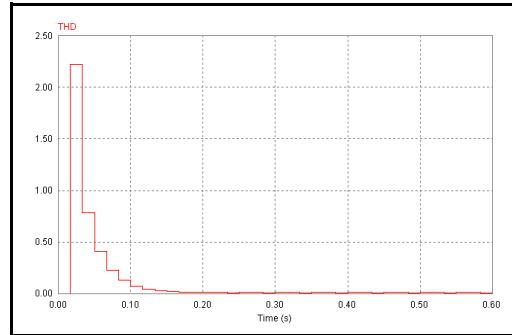


Figura 40. THD del inversor de 4 etapas.

El valor del THD medido a partir de la simulación es 1.3% lo que nos permite concluir que el resultado es bastante satisfactorio y se encuentra en el rango permitido por las leyes y normas relacionadas con la distorsión armónica total, por tal motivo no es necesario seguir analizando y estudiando inversores de un número de etapas mayores. Los resultados obtenidos nos permiten concluir en elegir al inversor de 4 etapas como la mejor opción para ser implementada, es por ello que de ahora en adelante nos enfocaremos exclusivamente en el desarrollo y construcción del mismo.

4.1.3. Distribución de Potencia

En la figura 41 se muestra la simulación correspondiente a la distribución de potencia para cada una de las etapas del inversor multinivel, alimentando una carga resistiva de 25Ω , con un voltaje sinusoidal de 120V rms, el 80% de la potencia activa la suministra la etapa Principal y el 20% restante lo suministran las otras etapas.

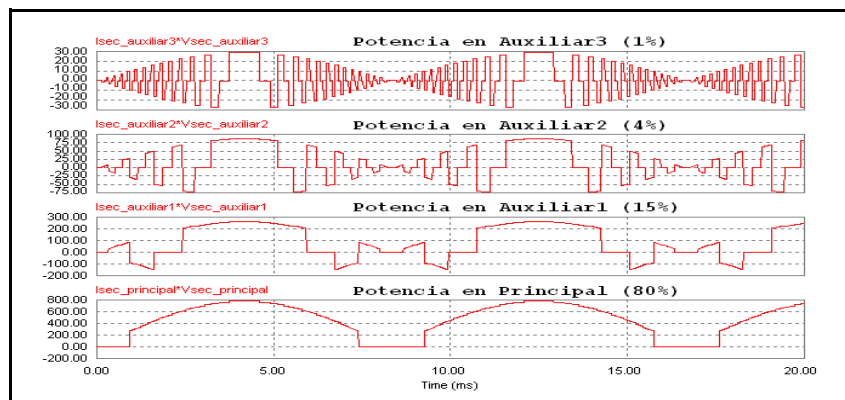


Figura 41. Distribución de Potencia

Como puede apreciarse en la figura 41, la mayor potencia (80%) se toma de la etapa Principal, pero por otro lado es la etapa que opera a la menor frecuencia (60Hz); esto es una ventaja la que permite utilizar en aplicaciones de elevada potencia semiconductores lentos, los que pueden soportar mayores potencias, por ejemplo en la etapa Principal podemos ocupar semiconductores GTOs o IGBTs.

El mismo resultado debemos esperar si empleamos una carga RL, es decir la etapa Principal siempre deberá aportar la mayor potencia y por el contrario la etapa del Auxiliar 3 aportará la menor potencia.

4.3. Comparación del Inversor Multinivel de 4 Etapas con el Inversor PWM

Para ver las ventajas del inversor multinivel en relación a técnicas más convencionales, se realizó una comparación bajo las mismas características, entre un inversor monofásico PWM y un inversor monofásico multinivel de 81 niveles. Las corrientes generadas por los inversores multinivel son bastante más puras que las de los inversores PWM y están libres de armónicas. En la figura 42 se muestra una simulación con las corrientes en una carga RL para los dos tipos de inversor, donde se puede apreciar que la corriente del inversor PWM posee rizado, y la del inversor multinivel es prácticamente sinusoidal.

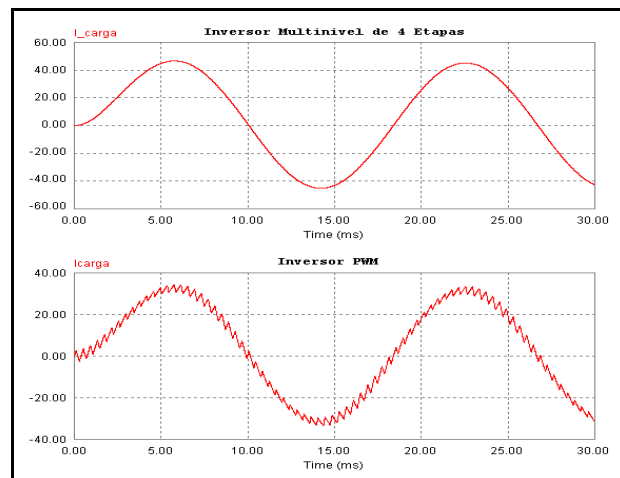


Figura 42. Comparación de la corriente de carga entre el inversor multinivel de 4 etapas y el inversor PWM.

Los inversores PWM modulan el voltaje por ancho de pulso, lo que hace que el voltaje de salida no sea perfectamente sinusoidal y se mueva bruscamente, generando grandes dV/dt . Esto puede causar problemas en los aislamientos, y en el caso de los motores, producir daños a los rodamientos. Por el contrario, como los inversores multinivel generan la tensión modulando la amplitud del voltaje de salida, éste varía desde cero al valor máximo de la senoide de forma suave y escalonada. En la figura 43 se muestra los voltajes de salida para estos inversores, para

el caso del inversor PWM se ha utilizado uno de dos niveles operando a 10kHz, con el esquema que se muestra en el Anexo C.

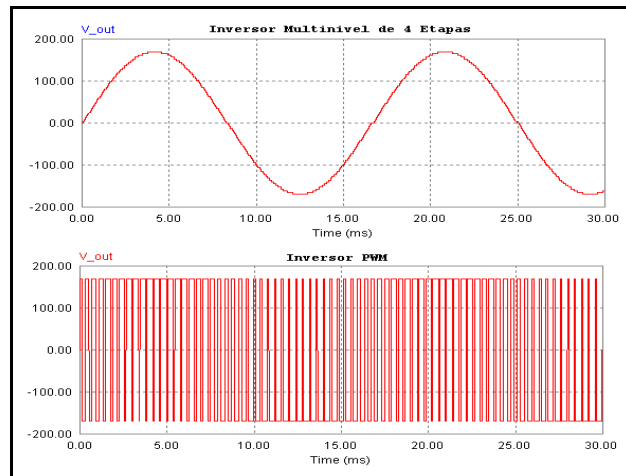


Figura 43. Voltaje de salida del inversor multinivel de 4 etapas y el inversor PWM.

Por otra parte, la frecuencia de conmutación de los inversores multinivel es bastante más baja que la frecuencia de conmutación de los inversores PWM. Estos últimos utilizan frecuencias de conmutación desde 10kHz a 100kHz, en cambio el inversor multinivel desarrollado en este trabajo en la etapa más lenta (Principal) conmuta a la frecuencia fundamental (60 Hz) y el más rápido (3er Auxiliar) lo hace a un promedio 54 veces más rápido que la frecuencia fundamental (2,7 kHz), con la ventaja adicional de que esta etapa es la que aporta la menor potencia del inversor (alrededor del 1%).

V. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL INVERSOR MULTINIVEL DE 4 ETAPAS

En este capítulo se describe la forma en que se llevó a cabo la construcción del inversor de 4 etapas y 81 niveles. El trabajo se dividió principalmente en cuatro actividades: i) el diseño y construcción de la tarjeta de control del circuito de potencia, ii) el diseño y construcción del circuito de potencia iii) el diseño y construcción de las fuentes de alimentación de 5V , 15V y 80V DC y iv) el diseño y construcción de la caja y distribución de componentes.

5.1. Diseño y Construcción del Circuito de Control

Se hará una pequeña explicación del control que se desarrolló para poner en funcionamiento el inversor. Para esto se programó el microcontrolador PIC16F877 de Microchip (figura 44), perteneciente a una gran familia de microcontroladores de 8 bits (bus de datos), el cual se encarga de generar las señales de encendido de los transistores en los puentes "H", para sintetizar la onda sinusoidal deseada.



Figura 44. Microcontrolador PIC16F877.

El control se basa en generar los estados de encendidos y apagados de los 16 transistores de potencia (IGBT) del inversor de 4 etapas, esta secuencia debe ser de acuerdo a la tabla 10. Como el microcontrolador solo tiene puertos de 8 bits, se ocuparon 2 puertos para generar las 16 señales de control.

Una de las dificultades para realizar el programa fue la difícil situación de generar en el PIC una función sinusoidal que nos permitiera saber cuanto tiempo debía de durar cada uno de los 81 niveles del inversor al recorrer un periodo completo de la señal seno deseada. Para solucionar esto nos auxiliamos de la simulación del inversor de 4 etapas, específicamente de la señal de salida, midiendo el tiempo que tarda cada uno de los escalones que componen la señal de salida en todo un periodo.

Una vez superada la dificultad antes mencionada, se procedió a realizar el programa, el cual va a generar las 16 señales de control a través de los puertos B y C; dicho programa consiste en utilizar una subrutina de retardo para generar el tiempo de duración de cada escalón o peldaño para un ciclo completo, y para que se pueda repetir cada período se utilizó un lazo infinito, el programa completo puede verse en el anexo I. En la tabla 12 podemos observar la distribución de pines del puerto B

y C por donde saldrán las señales de control para cada uno de los transistores IGBT.

PUERTO B								PUERTO C							
ETAPA AUXILIAR 2				ETAPA AUXILIAR 3				ETAPA PRINCIPAL				ETAPA AUXILIAR 1			
B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C0
Q7	Q5	Q8	Q6	Q3	Q1	Q4	Q2	Q15	Q13	Q16	Q14	Q11	Q9	Q12	Q10

Tabla 12. Distribución de pines del puerto B y puerto C.

Otro aspecto a tomar en cuenta en el programa es que cuando un IGBT de lado de alta pasa de encendido a apagado y el IGBT de lado de baja pasa de apagado a encendido; se debe de añadir un pequeño retardo en la transición, puesto que cada IGBT necesita un tiempo para apagarse y para encenderse y este tiempo de encendido y apagado no es el mismo, el tiempo de apagado suele ser por lo general mas grande. En nuestro caso el tiempo de retardo añadido en cada rama del puente 'H' fue de 16 μ s, este valor se determinó de acuerdo a una serie de pruebas realizadas en el laboratorio, pero ello no implica que pueda ser menor si se ocupan otro tipo de IGBT que sean más rápidos en conmutar.

Debido a que necesitamos ocupar dos puertos del microcontrolador; esto genera en ciertos niveles o peldaños, un retardo indeseable cuando hay un cambio tanto en el puerto B como en el puerto C y ocurre porque no se pueden enviar datos al puerto B y al puerto C al mismo tiempo, si no que primero enviamos los datos correspondientes al puerto B y luego los del puerto C, esta situación genera el retardo indeseable. Para solucionar un poco este hecho, utilizamos un cristal de 20MHz en lugar de ocupar uno de 4MHz con ello logramos reducir el tiempo de retardo indeseable, ya que entre mayor es la frecuencia de trabajo del microcontrolador, menor es el retardo indeseable, de tal manera que se logra un retardo mínimo de 0.4 μ s, si utilizáramos el de 4MHz obtendríamos un retardo de 2 μ s.

Con el objeto de proteger al microcontrolador de la parte del circuito de potencia, se hace una separación de las referencias de tierra de ambos circuitos y para ello se utilizan optoacopladores digitales modelo 6N137 (figura 45), de las cuales se ocupan una por cada señal de control, siendo un total de 16 optoacopladores a los cuales también les podemos llamar optonand debido a que niegan las señales que pasan por él y por esa característica necesitamos compuertas negadoras adicionales que restituyan la señal original, para ello ocupamos el integrado 74LS14 ó SN7404, el cual posee 6 compuertas inversoras.

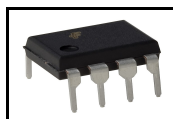


Figura 45. Optoacoplador 6N137.

El optoacoplador es un dispositivo electrónico diseñado con el propósito de aislar eléctricamente algunos dispositivos los cuales pueden ser muy sensibles a perturbaciones provocadas por otras etapas. Por lo general el uso de Optoacopladores se relaciona al aislamiento de etapas de potencia de circuitos TTL. En el inversor de voltaje éste es su propósito, el de aislar el circuito de potencia del circuito de Control. El diagrama esquemático de conexiones del Optoacoplador se muestra en la figura 46.

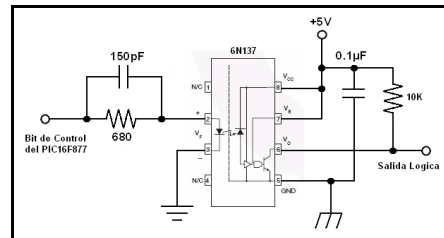


Figura 46. Diagrama de conexiones del optoacoplador 6N137.

El Optoacoplador recibe el dato proveniente del MCU (Microcontrolador) en la entrada por un Diodo Emisor de Luz (LED por sus siglas en inglés) y éste a su vez transmite el dato en forma de luz hacia la salida. Es aquí donde se produce el aislamiento eléctrico. El dato no es enviado en forma de tensión directa sino que viaja como un haz de luz y luego es recuperado como un valor de tensión por un dispositivo fotosensible en la salida. La salida del 6N137 está condicionada por una compuerta lógica. El dispositivo fotoeléctrico de la salida absorbe la luz y la transforma en corriente, la que a su vez genera una diferencia de potencial que será utilizada como valor de bit de entrada de la compuerta. Esta compuerta tiene dos entradas, la segunda entrada es externa y es usada como habilitador ("enable" en inglés) y se denota como V_E . Se puede observar la operación del Optoacoplador en la tabla de verdad de éste (tabla 13).

ENTRADA	ENABLE (V_E)	SALIDA (V_O)
H	H	L
L	H	H
H	L	H
L	L	H
H	NC	L
L	NC	H

Tabla 13. Tabla de verdad del optoacoplador 6N137.

Nomenclatura:

H: Nivel alto ó 1 lógico

L: Nivel bajo ó 0 lógico

NC: No conectado

La salida del optoacoplador, con la conexión mostrada en la figura 46, se comporta como una compuerta inversora (tal como se puede apreciar en la tabla 13) por lo que se debe tener cuidado de no realizar conexiones erróneas en los correspondientes bits de control provenientes del microcontrolador.

En la figura 47 se muestra el diagrama correspondiente al circuito de control, en él podemos observar la configuración de pines del microcontrolador y los elementos necesarios que debe tener el microcontrolador para funcionar adecuadamente con un cristal de 20MHz. Cabe mencionar que el programa fuente fue compilado con el programa PIC-Simulator y grabado en el PIC con el quemador Pipo2 de José Manuel García, el cual propone un circuito bastante bueno para quemar programas de varias familias de microcontroladores. Con el afán de tener un adecuado funcionamiento del circuito quemador, se decidió realizar un diseño del circuito impreso, ocupando el programa Eagle 4.16r2 (ver figura 48); con el objetivo de no tener problemas a la hora de grabar el programa control en el PIC. El circuito construido lo podemos ver en la figura 49.

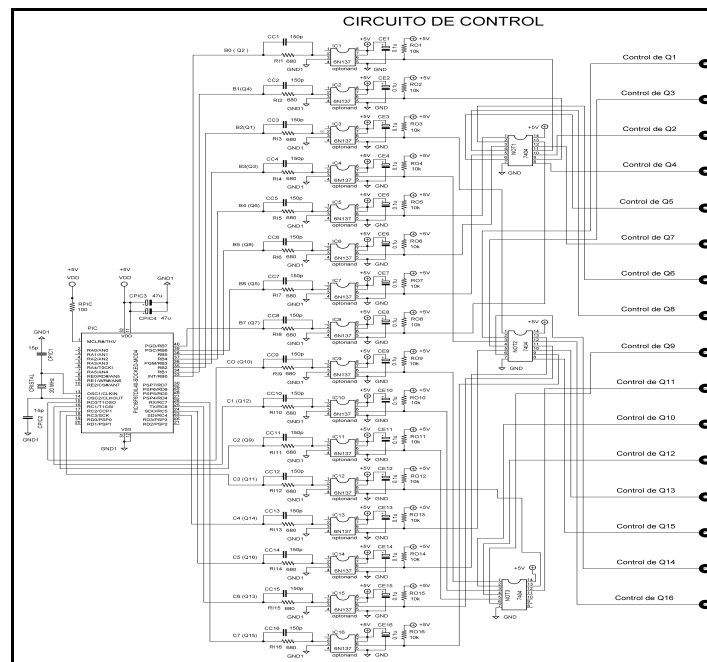


Figura 47. Diagrama del circuito de control.

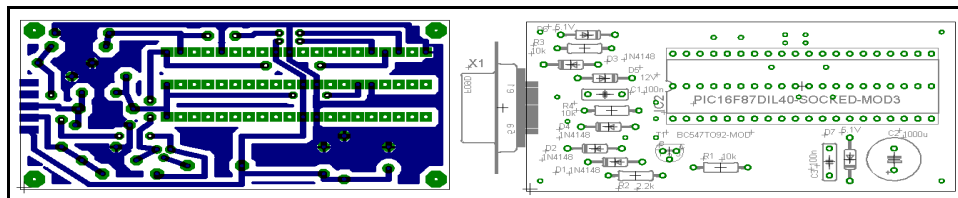


Figura 48. Circuito impreso quemador de PIC.

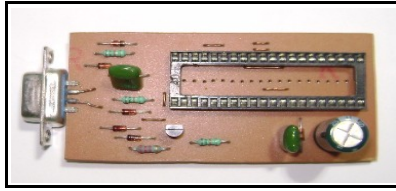


Figura 49. Quemador de PIC.

A partir del diagrama de la figura 47, se procedió a diseñar el circuito impreso, utilizando el programa de computadora Eagle, para este diseño y todos los demás siguientes; tratando de generar un impreso óptimo es decir que sea del menor tamaño, que el diseño sea de una sola cara de cobre y ocupando puentes de alambre en la parte superior de la tableta en la menor cantidad posible. El resultado final es el circuito impreso de la figura 50.

El circuito de control es alimentado por dos fuentes de alimentación de 5V DC; la primera sirve de alimentación para el microcontrolador y la segunda se utiliza para alimentación de los optoacopladores y las compuertas negadoras de los integrados 74LS14. Estas dos fuentes son conectadas a referencias de tierras diferentes es aquí donde obtenemos el aislamiento galvánico que protege al microcontrolador y por tal motivo es de suma importancia que las dos fuentes sean construidas independientemente con tierras diferentes.

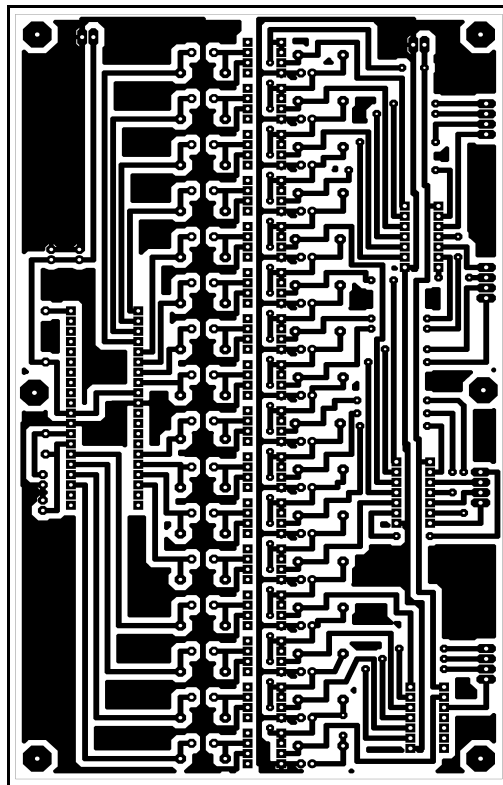


Figura 50. Circuito impreso de control.

Antes de probar el microcontrolador en el laboratorio para verificar su correcto funcionamiento, debemos primero asegurarnos que la prueba que se haga tenga la certidumbre de por lo menos un 95%, para ello nos auxiliamos de otro programa de computadora bastante interesante que nos permite simular de manera más real el microcontrolador PIC16f877, es el simulador Proteus V7sp3. La simulación necesita del programa compilado que ejecutará el microcontrolador, el lector puede investigar más de las funciones que posee este simulador entre las cuales podemos mencionar que puede generar el archivo compilado a partir del programa fuente. Esta simulación es importante ya que nos permite visualizar las señales de salida de cada puerto utilizado; en la figura 51 observamos la pantalla principal del simulador junto con el esquemático a simular y en la figura 52 observamos cuatro de las señales de salida correspondientes al puerto B. Haciendo un zoom podemos observar el retardo que deben tener las distintas ramas que componen los puentes 'H' (ver figura 53).

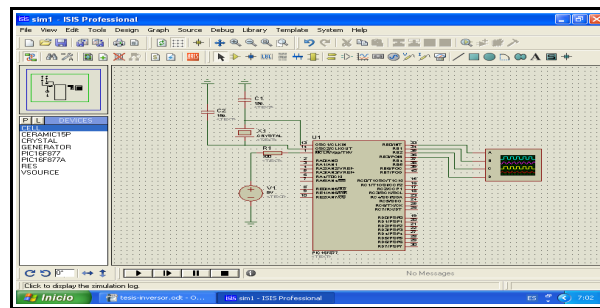


Figura 51. Simulación del microcontrolador en Proteus.

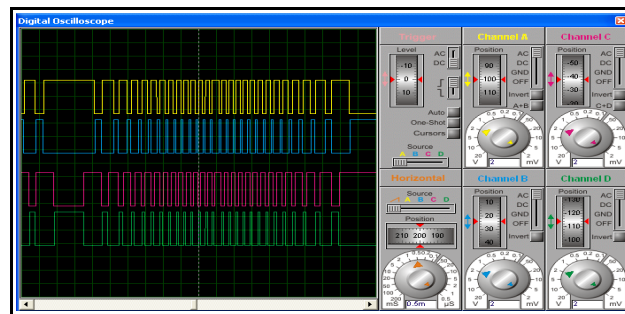


Figura 52. Señales de control del PIC en los pines B0 a B3.

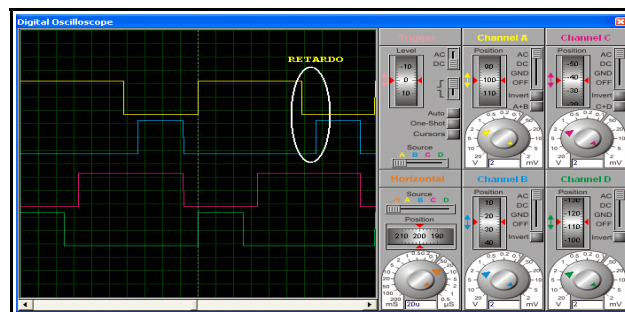


Figura 53. Retardo en las señales de control.

El circuito de control construido se ilustra en la figura 54 y 55, el tamaño final del circuito es de 11cm de ancho por 19cm de largo en la imagen se puede observar los conectores que llevarán las señales de control hasta la parte del circuito de potencia así como también los conectores de alimentación de 5V.

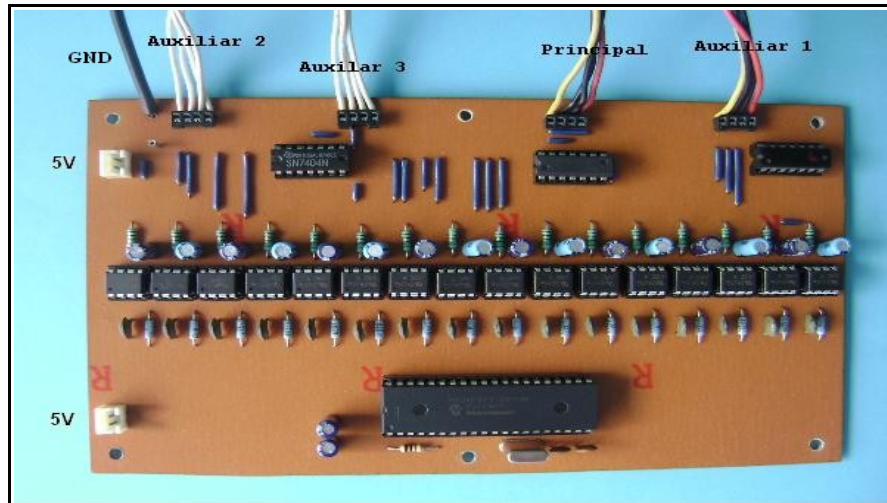


Figura 54. Circuito de control, vista superior.

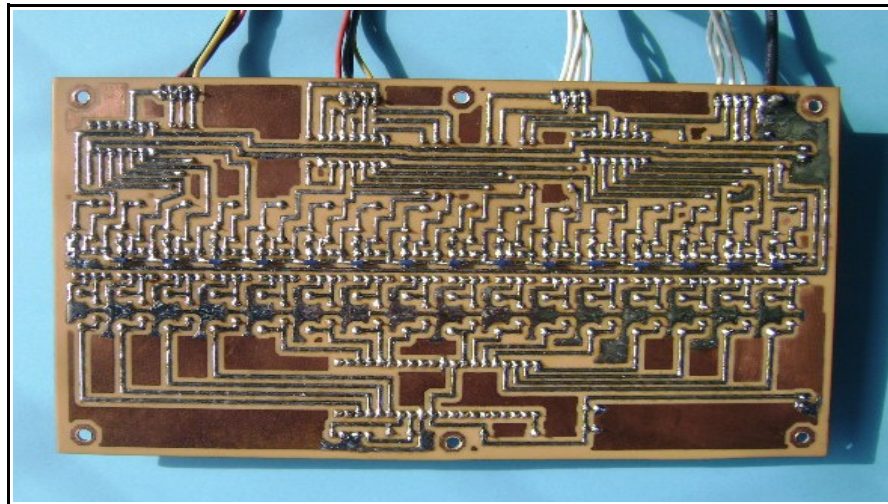


Figura 55. Circuito de control, vista inferior.

5.2. Diseño y Construcción del Circuito de Potencia

El circuito de potencia consta de dos componentes muy importantes: i) el driver controlador de la conmutación de cada IGBT y ii) el IGBT seleccionado como elemento interruptor.

Uno de los problemas que se tienen en la realidad con los IGBT conectados en configuración puente 'h', consiste en que los IGBT'S

tensión que soportan los terminales del circuito integrado que se conectan al punto intermedio del puente 'h', y por tanto, la máxima tensión de alimentación del puente si se hace uso de este driver.

La tensión V_{BS} ($V_B - V_S$) alimenta al driver que excita el transistor de la parte alta del puente o semipunto. Esta alimentación tiene que estar en el rango de 10-20V para asegurar que el transistor pueda estar en conducción o en estado 'ON'.

La tensión V_{BS} es una tensión flotante, que se expresa tomando como referencia V_S . Cuando se pretende poner en conducción el IGBT de la parte de arriba de una de las ramas del puente y el IGBT de abajo esta en 'OFF', la tensión en la terminal H_O con respecto a masa tomará un valor superior a $+V_{BUS}$. Idealmente toma el valor $V_{HO} = V_{BUS} + V_{GE(ON)}$.

Hay muchos métodos para conseguir esta tensión, pero el método común a todos los circuitos integrados comerciales es mediante la técnica bootstrap que se muestra en la figura 57, la alimentación bootstrap esta formada por un diodo bootstrap (D_{BS}) y un condensador bootstrap (C_{BS}) y que la frecuencia máxima de trabajo se limita al tiempo que dura la carga de dicho condensador.

El circuito bootstrap opera de la siguiente forma:

- Durante el tiempo que el transistor Q_1 esta en 'OFF' y el transistor Q_3 esta en 'ON', el condensador C_{BS} se carga a un valor de tensión aproximadamente de $+V_{DD}$ (figura 58). La carga es muy rápida porque la $T_{CARGA} = C_{BS} (r_{CE(ON) Q2} + r_{dBS})$ donde r_{dBS} es la resistencia en directa del diodo D_{BS} . El período de tiempo durante el cual se carga el condensador también recibe el nombre de tiempo de refresco.

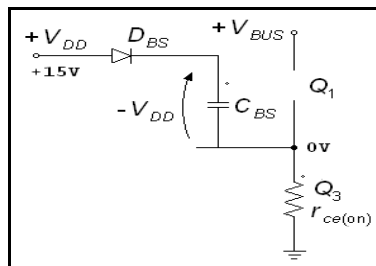


Figura 58. Circuito equivalente en el proceso de carga del C_{BS} .

- Cuando Q_3 pasa a 'OFF' y se desea que Q_1 pase a estado 'ON', el diodo D_{BS} queda polarizado en inversa (figura 59). Con la tensión

almacenada en C_{BS} durante el estado anterior, se polariza el driver superior del circuito de control con el que se excita a Q_1 , de tal forma que pasa a estado 'ON' Q_1 . En esta situación la tensión inversa que soporta el diodo D_{BS} es $V_{DBS} = V_{DD} - V_{CBS} - V_{BUS} \approx V_{BUS}$.

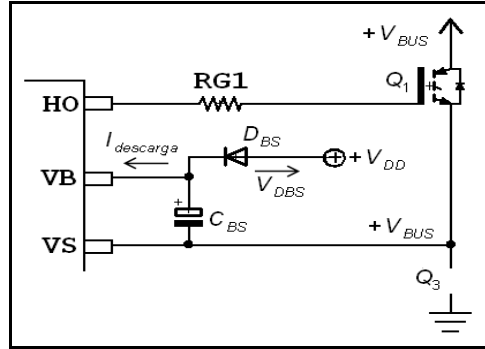


Figura 59. Circuito equivalente en el proceso de descarga de C_{BS} .

De lo mencionado anteriormente, se deduce que interesa que C_{BS} sea muy pequeña para que se cargue lo más rápidamente posible, pero por otro lado interesa que C_{BS} sea muy grande para que tarde mucho tiempo en descargarse. Por tanto es necesario tomar una solución de compromiso. Prácticamente el condensador C_{BS} debe ser de un tamaño 10 veces superior a la capacidad de entrada que presenta la compuerta del IGBT. De forma analítica este condensador se puede calcular a partir de la ecuación:

$$C_{BS} = \frac{Q_G + Q_{rr} + \frac{(I_{DR} + I_{QBS})}{f_{CONTROL}}}{V_{BS1} - V_{BS2}}$$

Donde :

I_{DR} : es la corriente inversa de pérdidas del diodo bootstrap.

I_{QBS} : es la corriente de polarización de driver que excita al transistor de la parte alta del puente.

Q_{rr} : es la carga de recuperación en inversa del diodo bootstrap.

Q_G : es la carga transferida a la carga en el paso de corte a conducción.

$f_{CONTROL}$: es la frecuencia de la señal de control.

V_{BS1} : es la tensión que tiene el condensador C_{BS} inmediatamente después del refresco.

V_{BS2} : es la tensión que tiene el condensador C_{BS} inmediatamente antes del refresco.

C_{BS} : es la capacidad bootstrap.

Por otra parte las características del diodo bootstrap son:

- V_{RRM} (tensión de ruptura en inverso) = tensión de alimentación del puente.
- t_{rrmax} (tiempo máximo de recuperación en inversa) = 100ns.
- I_F (corriente en directa del diodo) = $Q_{bs} \cdot f$.

El diodo escogido que cumple con las características mencionadas es el FR107.

También es conveniente elegir transistores con tensiones de bloqueo en directo superiores a $+V_{BUS}$. El transistor que se ha utilizado para la construcción de los puentes 'h' es el IGBT STGP10NC60H (figura 60) y sus características principales son las siguientes:

# SERIE	V_{CES} (V_{CE} Máx)	$V_{CE(SAT)}$ Máx @ 25°C	I_c @ 100°C
STGP10NC60H	600V	< 2.5V	100A

Tabla 14. Características principales del IGBT.

Se eligió trabajar con transistores discretos ya que de esta manera se economiza debido a los altos precios de los módulos conectados en Puente 'H' en relación al precio total de cuatro transistores discretos.

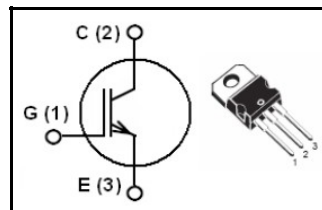


Figura 60. IGBT STGP10NC60H.

Debido a que estos transistores escogidos no traen en su encapsulado, el diodo de protección entre colector y emisor, que normalmente traen la mayoría de los IGBT. Por esa causa en el diseño del impreso se deja un espacio para colocar un diodo discreto de protección, el diodo a utilizarse puede ser el FR107.

El diagrama esquemático del circuito de potencia se muestra en la figura 61 y el diseño del circuito impreso se muestra en la figura 62. El diseño se hizo para una etapa, ya que de esta forma nos permite probar en el laboratorio de manera separada cada una de las 4 etapas del inversor, verificando así su correcto funcionamiento. Por otro lado permite también en el caso de un desperfecto, determinar con facilidad y rapidez el lugar donde se encuentra la falla para su respectiva reparación.

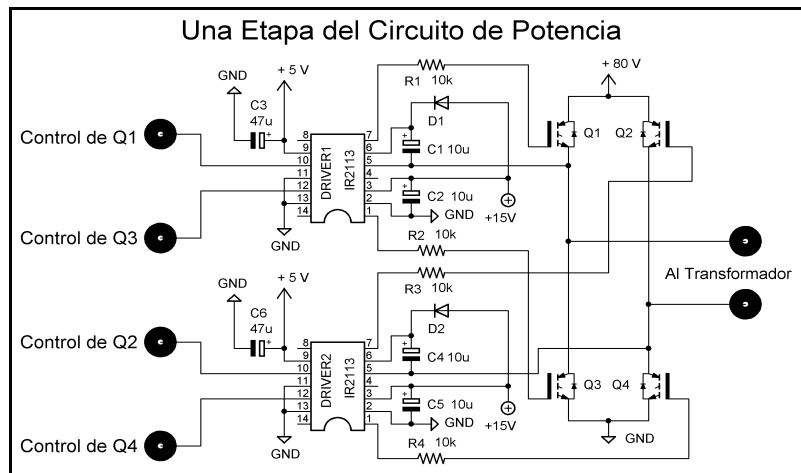


Figura 61. Diagrama esquemático de una etapa del circuito de potencia.

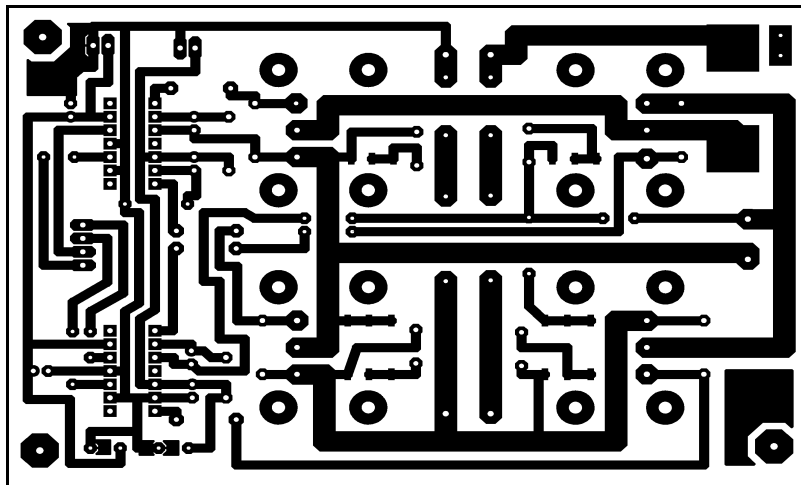


Figura 62. Circuito impreso de una etapa del circuito de potencia.

En el circuito impreso podemos observar que hay pistas con un grosor más ancho, esto se debe a que por ellas circulará la corriente de carga (5A máximo); por lo tanto la pista debe de soportar más de 5A. El grosor de esta pista es de 3.81mm, la cual teóricamente soporta 6A; pero para mayor seguridad se estaña la pista. También observamos en el impreso grandes círculos cerca de las pistas gruesas, estos sirven para los soportes del disipador.

A continuación, en las figuras 63, 64 y 65, se muestra el circuito de potencia construido, en él podemos observar la forma del disipador utilizado para la disipación de calor de cada uno de los IGBT'S, así mismo podemos observar el conector de salida del puente 'H', que irá al transformador; en esta figura sólo se ilustra una de las etapas del inversor; las otras tres etapas se construyen de la misma forma, exactamente igual, lo único que cambia son las señales de control que alimentan a cada una de las etapas.

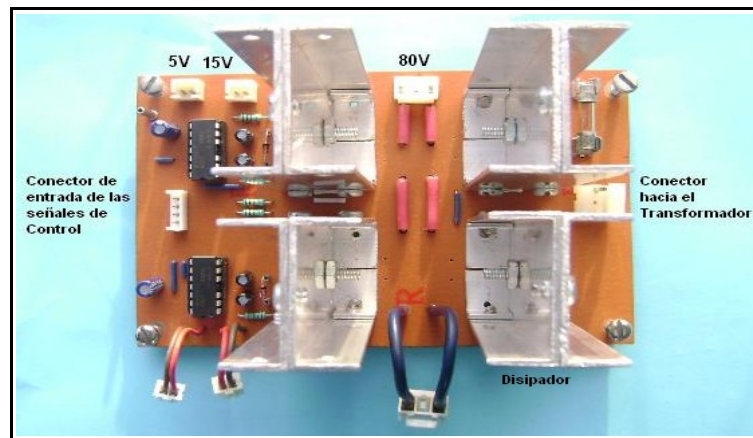


Figura 63. Una etapa del circuito de potencia, vista superior.

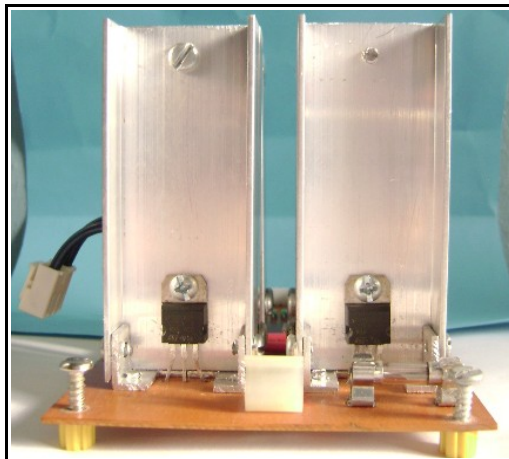


Figura 64. Una etapa del circuito de potencia, vista lateral.

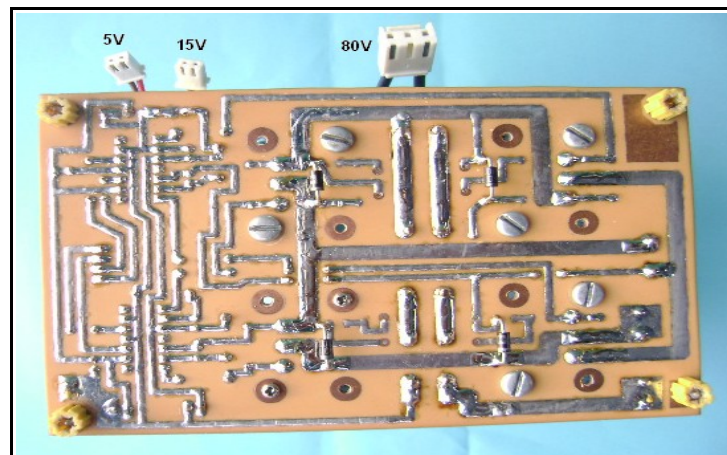


Figura 65. Una etapa del circuito de potencia, vista inferior

En las figuras 66 y 67 se muestran las 4 etapas construidas del circuito de potencia del inversor, las cuales han sido fijadas a dos

varilla de aluminio, y estas serán sujetadas a la caja del inversor.

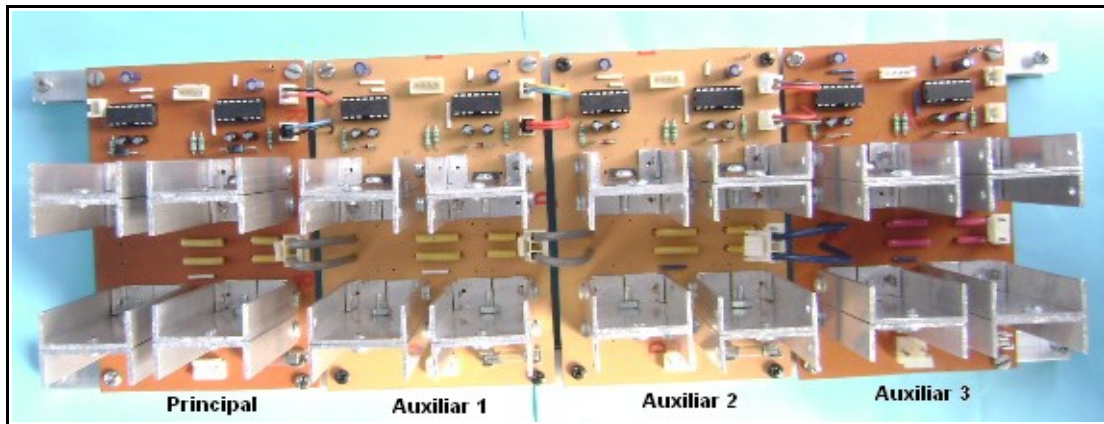


Figura 66. Circuito de potencia, vista superior.

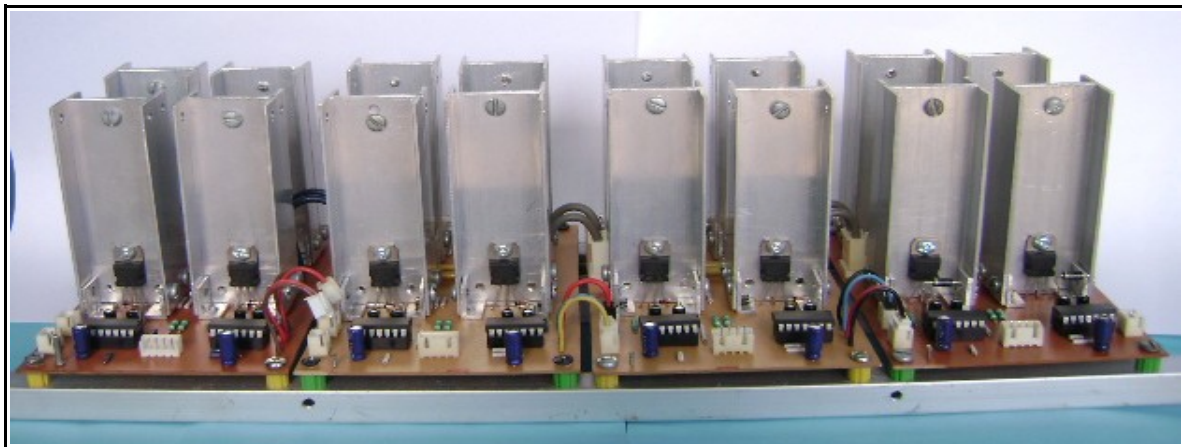


Figura 67. Circuito de potencia, vista lateral.

5.3. Transformadores

Los transformadores, como ya sabemos, son dispositivos formados por dos devanados o arrollamientos de alambre de cobre barnizado (bobinas), aislados físicamente uno de otro con el propósito de inducir un voltaje desde el devanado primario hacia el devanado secundario. La proporción de voltaje inducido depende de la razón conocida como relación de transformación ' a '. La relación de transformación se obtiene de la división entre los voltajes de los devanados primario-secundario. En el circuito del inversor de voltaje que se desarrolla, los transformadores tienen la función de complementar a los puentes 'H'. Cada transformador es conectado a los terminales de salida de un puente 'H' a través de su devanado primario. El circuito de esta conexión se observa en la figura 68.

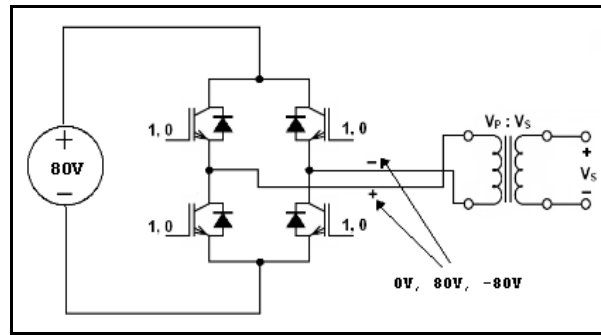


Figura 68. Conexión entre puentes 'H' y Transformadores.

Los puentes 'H' por sí solos no pueden llevar a cabo la construcción de una señal sinusoidal debido a que todos ellos están alimentados por la misma fuente de tensión DC. Para poder generar un voltaje de salida con una buena aproximación sinusoidal, cada Puente 'H' debería aportar un valor diferente de voltaje en su salida y no todos tener el mismo valor como es el caso para la conexión que estamos utilizando. Es aquí donde toma importancia el uso del transformador.

Para llevar a cabo la tarea de formar los niveles o gradas de la señal sinusoidal, todos los voltajes secundarios de cada transformador, de cada etapa, deberán ser conectados en serie, como se ilustró en la figura 20.

Cada transformador debe tener un voltaje que lo relacione con el siguiente transformador por una razón de tres veces. El voltaje base se obtiene calculando el valor de tensión del nivel más bajo (primera "grada"), éste será el valor de incremento o decremento de cada nivel según corresponda en el tiempo y también será el valor del voltaje del devanado secundario del transformador más pequeño, el cual pertenece a la etapa Auxiliar 3.

El transformador con el mayor nivel de voltaje de salida se encuentra ubicado en la Etapa Principal, la cual debe su nombre al hecho de aportar la mayor cantidad de potencia a la salida.

Para calcular el primer nivel de la señal (nivel más pequeño) analizamos el semiciclo positivo. Se toma este semiciclo ya que por simetría el semiciclo negativo es igual en magnitud. Para este semiciclo se asignan 40 niveles de voltaje de los 81 niveles en total. El nivel 40 representa el máximo voltaje de la onda. Después del voltaje máximo se repiten los 39 niveles anteriores, otra vez, pero ahora en orden inverso. Si el nivel 40 corresponde a 169.7056V, entonces el voltaje del primer nivel será:

$$V_{NIVEL1} = V_{A3} = V_{SECUNDARIO\ AUXILIAR3} = \frac{V_{MAX}}{40} = \frac{169.7056}{40}$$

$$V_{A3} = 4.2426$$

Este valor de voltaje calculado es el que debe tener el transformador de la etapa del Auxiliar 3, en el devanado secundario. De esta forma hemos calculado el transformador del Auxiliar 3. El voltaje del primario para este y todos los demás transformadores es de 80V; pero estos valores son cantidades instantáneas, ya que estos transformadores serán alimentados con señales no sinusoidales, estas formas de señales se mostraron en la figura 37, por lo tanto para cálculos de diseño se emplearán valores rms, manteniendo la misma relación de voltajes instantáneos.

Basándonos en el hecho de que cada transformador debe tener un voltaje de salida tres veces mayor que el transformador anterior podemos calcular los voltajes secundarios de los otros tres, los cuales corresponderán a las etapas Auxiliar 2, Auxiliar 1 y Principal respectivamente. La forma de calcular dichos voltajes es la siguiente:

$$V_{NIVEL3} = V_{A2} = V_{SECUNDARIO \text{ AUXILIAR2}} = 3 * V_{A3} = 3 * 4.2426 \\ V_{A2} = 12.7278$$

$$V_{NIVEL9} = V_{A1} = V_{SECUNDARIO \text{ AUXILIAR1}} = 3 * V_{A2} = 3 * 12.7278 \\ V_{A1} = 38.1834$$

$$V_{NIVEL27} = V_P = V_{SECUNDARIO \text{ PRINCIPAL}} = 3 * V_{A1} = 3 * 38.1834 \\ V_P = 114.5502$$

En la tabla 15, hacemos un resumen de todos los resultados, indicando el parámetro de relación de voltajes 'a', así como también los valores rms utilizados para los cálculos en la construcción de cada transformador.

	Valores instantáneos			Valores rms para los cálculos en la construcción de cada transformador	
Transformador	V _p (V)	V _s (V)	Parámetro a	V _p (V)	V _s (V)
Auxiliar 3	80	4.24	18.86	120	6.36
Auxiliar 2	80	12.72	6.28	120	19.09
Auxiliar 1	80	38.18	2.09	56.56	27.00
Principal	80	114.55	0.69	71	101.67

Tabla 15. Valores de voltaje primario y secundario de los transformadores

El método de cálculo de los transformadores se muestra en el anexo D, y en la figura 69, observamos una fotografía de los transformadores construidos; donde podemos ver que el transformador con el núcleo más grande corresponde a la etapa principal y viceversa el

núcleo más pequeño corresponde al auxiliar 3; tal como se esperaba.

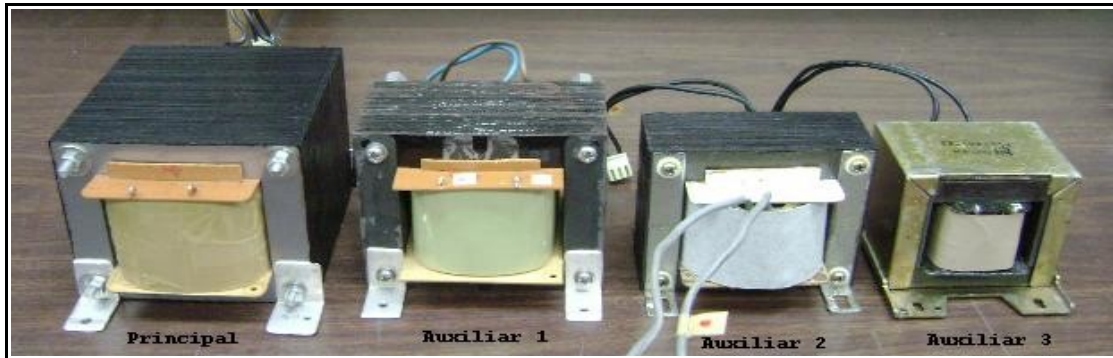


Figura 69. Transformadores contruidos.

Un aspecto importante a mencionar es que debido a que el transformador de la etapa principal es un transformador elevador, ocasiona que la corriente por el primario sea mayor que en secundario; cuando se demanden los 5A del secundario; en el primario habrá 7.6A aproximadamente, por lo que los IGBT seleccionados deben de soportar ésta cantidad de corriente; el IGBT utilizado es de 10A; pero para esta etapa específicamente podemos utilizar otro de IGBT de mayor corriente nominal.

5.4. Filtro de Salida

Con el objeto de mejorar la señal de salida del inversor, y debido a las pruebas realizadas en el laboratorio, las cuales mostraban que la señal sinusoidal del inversor tenía alteraciones o perturbaciones; la causa principal de esta situación se genera principalmente por los tiempos de retardo que se introducen de forma controlada en cada una de las ramas de los diferentes puentes 'H', adicionalmente también contribuyen los transformadores, así mismo los IGBT'S cuando estos conmutan de encendido a apagado o viceversa, también contribuye el retardo indeseable de $0.4\mu s$ del cual hablábamos en la sección 5.1.

El filtro utilizado para solucionar la situación mencionada, corresponde a un filtro paso bajo LC (figura 70); un filtro muy sencillo y fácil de construir. La elección de este filtro se hizo porque las señales a eliminar son de alta frecuencia.

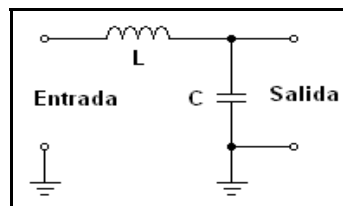


Figura 70. Filtro LC.

Después de realizar una serie de pruebas en el laboratorio con diferentes valores tanto para el inductor como para el condensador, se logró determinar que los valores idóneos para obtener un filtrado adecuado y correcto son: $L=25.3\mu\text{H}$ y $C=5\mu\text{F}$; con estos valores obtenemos una frecuencia de corte de 14.15KHz. El condensador debe ser de polipropileno y el inductor fue construido con alambre esmaltado calibre 13, sobre un núcleo de ferrita, con 25 vueltas. En la figura 71 se muestran ambos elementos.



Figura 71. Capacitor e inductor utilizados para el filtro LC.

5.5. Circuito Completo del Inversor de 4 etapas

Hasta este momento se ha descrito las diferentes partes que consta el inversor monofásico multinivel de 4 etapas, 81 niveles. Al juntar cada una de las parte podemos generar un diagrama completo del inversor para tener una mayor claridad y comprensión del mismo. En la figura 72 podemos observar el circuito completo.

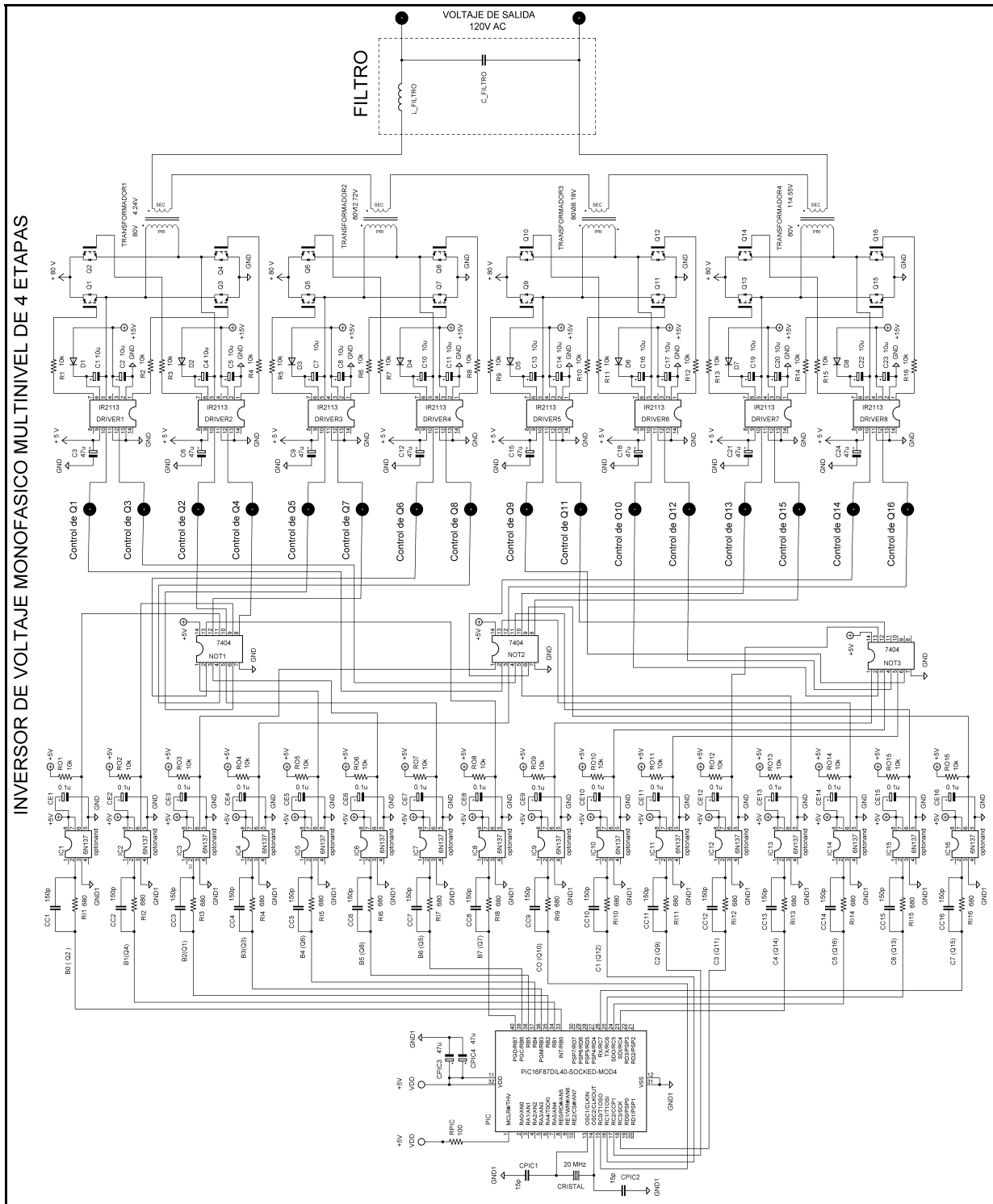


Figura 72. Diagrama esquemático completo del inversor de 4 etapas.

VI. FUENTES DE ALIMENTACIÓN DC

El inversor monofásico multinivel de 4 etapas construido requiere de fuentes de alimentación continua para su funcionamiento, estas fuentes deben ser estables y regulables ya que de lo contrario el funcionamiento del inversor no sería correcto y hasta podría dañarse algún elemento del circuito. Las fuentes que se requieren son tres de 5V, una de 15V y una de 80V.

6.1. Diseño y Construcción de las fuentes de 5V y 15V

La construcción de fuentes de 5V y 15V no son un problema ya que existen reguladores de voltaje, que son construidos en un sólo integrado con valores que van desde los 5V hasta los 40V; por esa razón se utilizaron los integrados LM7805 y el LM7815, pertenecientes a la familia LM78XX, los cuales pueden suministrar hasta 1A de corriente; el esquema básico de cada fuente se ilustra en la figura 73.

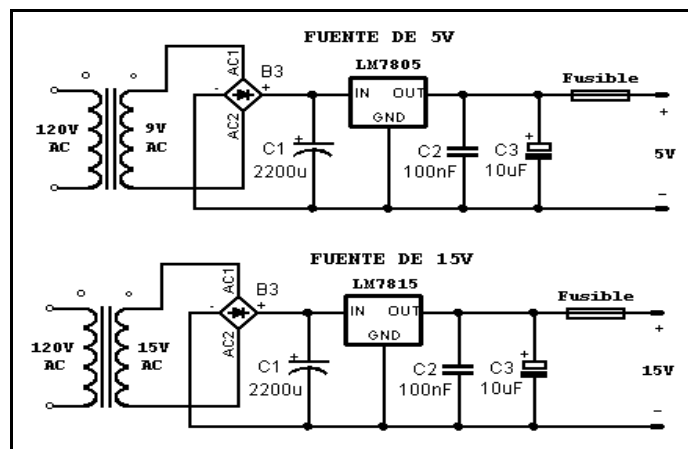


Figura 73. Diagrama esquemático de las fuentes de 5V y 15V.

Dentro de los reguladores de voltaje con salida fija, se encuentran los pertenecientes a la familia LM78xx, donde "xx" es el voltaje de la salida. Estos son 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18 y 24V, entregando una corriente máxima de 1 Amperio y soporta consumos pico de hasta 2.2 Amperios. Poseen protección contra sobrecargas térmicas y contra cortocircuitos, que desconectan el regulador en caso de que su temperatura de juntura supere los 125°C.

Los LM78xx son reguladores de salida positiva, mientras que la familia LM79xx son para voltajes equivalentes pero con salida negativa. Así, un LM7805 es capaz de entregar 5 voltios positivos, y un LM7909 entregara 9 voltios negativos. La capsula que los contiene es una TO-220, igual a la de muchos transistores de mediana potencia. Para alcanzar la corriente máxima de 1 Amperio es necesario dotarlo de un disipador de calor adecuado, sin el solo obtendremos una fracción de esta corriente

antes de que el regulador alcance su temperatura máxima y se desconecte. La potencia además depende de la tensión de entrada, por ejemplo, si tenemos un LM7812, cuya tensión de salida es de 12V, con una tensión de entrada de 20V, y una carga en su salida de 0.5A, multiplicando la diferencia entre la tensión de entrada y la tensión de salida por la corriente que circulara por la carga nos da los vatios que va a tener que soportar el integrado: $(V_i - V_o) \cdot I_o = (20 - 12) \cdot 0.5 = 4W$

La tensión de entrada es un factor muy importante, ya que debe ser superior en unos 3 voltios a la tensión de salida (es el mínimo recomendado por el fabricante), pero todo el exceso debe ser eliminado en forma de calor. Si en el ejemplo anterior en lugar de entrar con 20 volts solo usamos 15V (los 12V de la salida mas el margen de 3V sugerido) la potencia disipada es mucho menor: $(V_i - V_o) \cdot I_o = (15 - 12) \cdot 0.5 = 1.5W$

De hecho, con 15V la carga del integrado es de 1.5W, menos de la mitad que con 20V, por lo que el calor generado será mucho menor y en consecuencia el disipador necesario también menor.

El voltaje máximo que soportan en la entrada es de 35 voltios para los modelos del LM7805 al 7815 y de 40 voltios para el LM7824. Por ultimo, debemos mencionar que existen versiones de estos reguladores para corrientes menores y mayores a 1 Amperio. Efectivamente, los que tienen como nombre LM78Lxx disponibles en capsula TO-92 entregan una corriente máxima de 100 mili amperes, y proveen tensiones de salida de 3.3; 5; 6; 8; 9; 12; 15; 18 y 24V. Luego del nombre llevan un sufijo, que puede ser "AC" o "C", que indican el error máximo en su salida, que es de +/-5% en el primer caso y de +/-10% en el segundo. Así, un LM78L05AC es un regulador de voltaje positivo, de salida 5 volts/100mA, con un error máximo del 5%. En caso de necesitar manejar corrientes mayores, las versiones en capsula TO-3 soportan una corriente de salida máxima de 5A.

Las fuentes de 5V sirven para alimentar al PIC, a los optoacopladores, a los drivers y los 15V sirven para hacer encender los diferentes IGBT'S los cuales son manejados por los drivers. En la figura 74 se ilustran las 4 fuentes de alimentación DC.



Figura 74. Fuentes de voltajes DC, tres de 5V y una de 15V.

6.2. Diseño y Construcción de la Fuente de 80V

La fuente de alimentación de 80V, es la que se utiliza para generar la salida alterna del inversor y debe suministrar hasta un máximo de hasta 10A. Esta característica se debe cumplir para que la salida del inversor pueda suministrar hasta un máximo de 5A. De esta forma se cumple con el requisito de diseño de dicho inversor. Debido al valor de corriente que debe suministrar la fuente de 80V, su diseño no fue tan fácil como las otras fuentes descritas anteriormente. Después de probar varias opciones de diseño se logró obtener el diseño más óptimo para esta aplicación, para ello se tuvo que realizar previamente una simulación por medio del programa Proteus (Simulador de circuitos) para comprobar el buen funcionamiento de esta fuente. El diseño de esta fuente implica la utilización de transistores bipolares de potencia y de un regulador; el transistor sirve para manejar la corriente de carga y el regulador fija un voltaje de salida estable. El diseño se ha hecho en dos partes ya que se pretende utilizar elementos comunes y fáciles de comprar en el mercado nacional, es por eso que se ha ocupado el transistor 2N3055 y el regulador LM317T y se hace en dos partes ya que el regulador solo puede proporcionar un voltaje de salida de hasta 40V, en otras palabras se harán dos fuentes de 40V que al sumarse nos darán los 80V que necesitamos. El regulador LM317T tiene un pin de ajuste que sirve para variar el valor de voltaje de salida que deseemos, por medio de un resistor variable, de tal manera que podemos variar el voltaje de salida total desde 1.5V hasta 80V. En la figura 75 se muestra el diagrama esquemático.

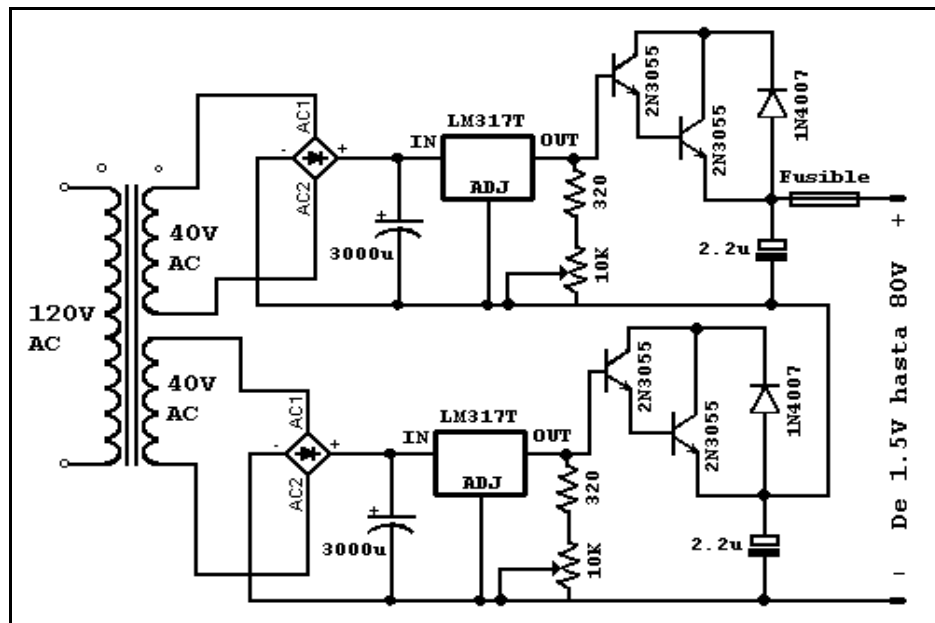


Figura 75. Diagrama esquemático de la fuente de 80V.

Los resultados de la simulación se presentan a continuación en la figura 76.

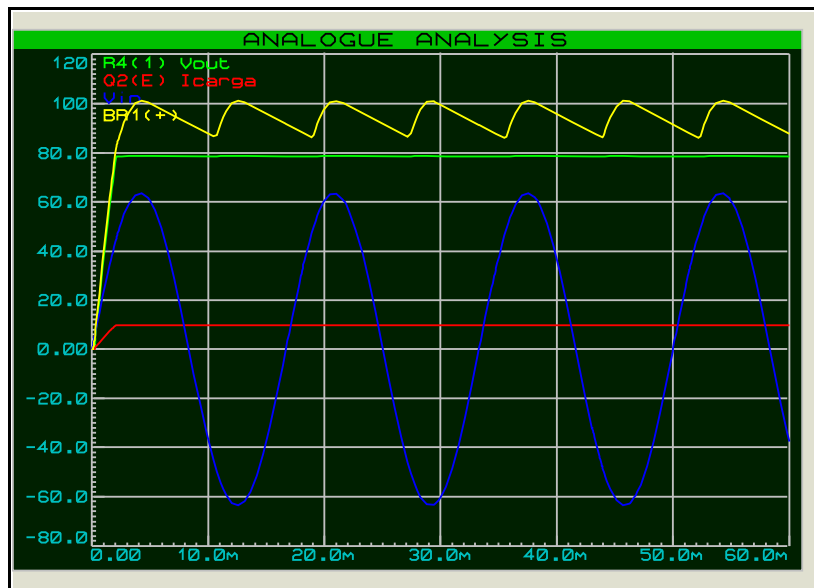


Figura 76. Señal de salida (Vout), corriente de carga (Icarga), señal de entrada al regulador (BR1+) y señal de entrada al puente rectificador (Vin).

En la simulación de la figura 76 podemos observar que cuando a la fuente se le demandan los 10A el voltaje de salida no se ve alterado y se mantiene constante a 80V.

El resultado final de la fuente se muestra en la figura 77, en donde podemos observar la salida de voltaje DC y las perillas que controlan los potenciómetros de 10K, estas perillas se utilizarán para variar el voltaje de salida, de tal forma que en la salida del inversor podamos apreciar la variación de la señal alterna con respecto a la fuente de entrada DC.



Figura 77. Fuente de voltaje de 80V DC.

VII. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LABORATORIO

En este Capítulo, se mostrarán los resultados obtenidos con el inversor multinivel de 4 etapas, 81 niveles implementado en el laboratorio (figura 78).

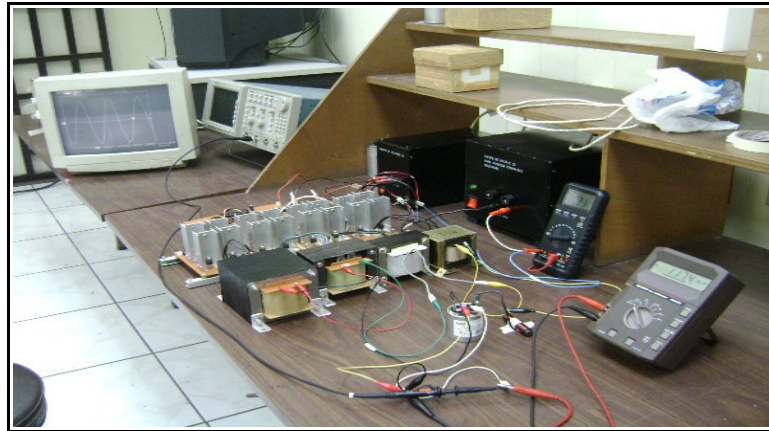


Figura 78. Pruebas del inversor implementado en el laboratorio.

7.1. Suma de los Voltajes Secundarios

En las figuras siguientes podemos observar, el resultado de la sumatoria de cada uno de los voltajes secundarios entre si, origina la señal sinusoidal a la salida del inversor. Las mediciones fueron realizadas por dos equipos, el osciloscopio y el fluke 196C.

7.1.1 Auxiliar 3

A continuación se muestra el voltaje secundario del transformador de la etapa auxiliar 3.

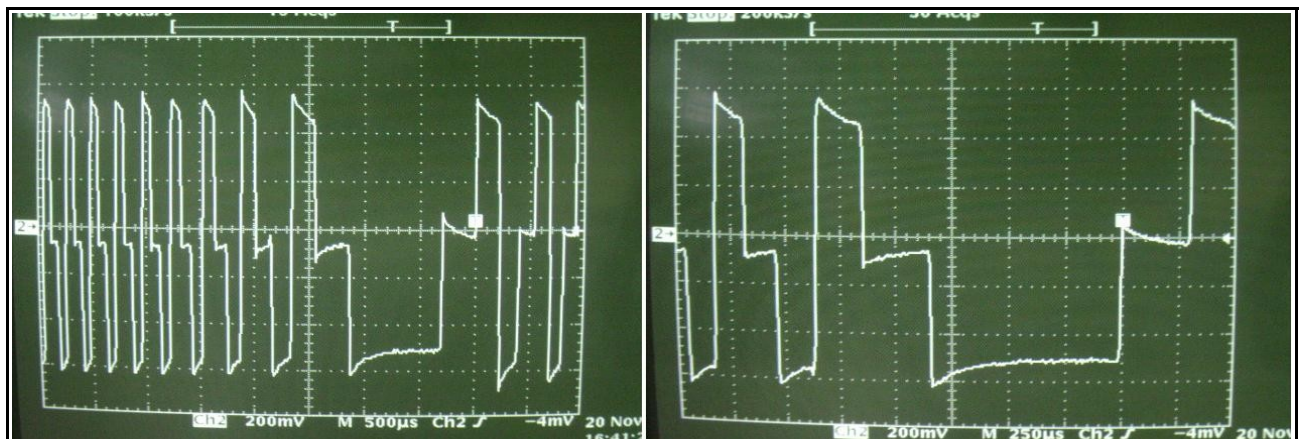


Figura 79. Auxiliar 3 medido con el osciloscopio.

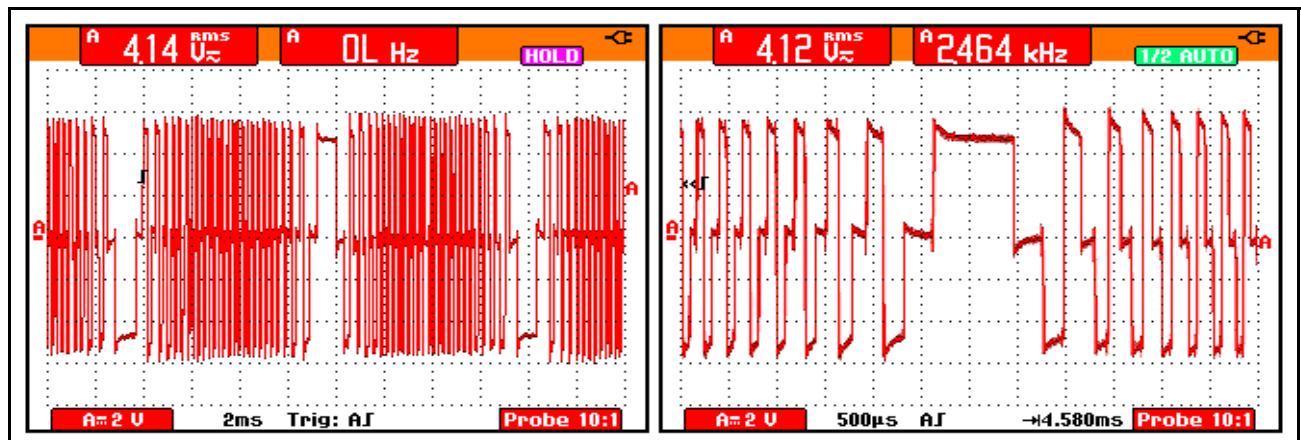


Figura 80. Auxiliar 3 medido con el fluke.

7.1.2 Suma de los Voltajes Secundarios del Auxiliar 3 y Auxiliar 2

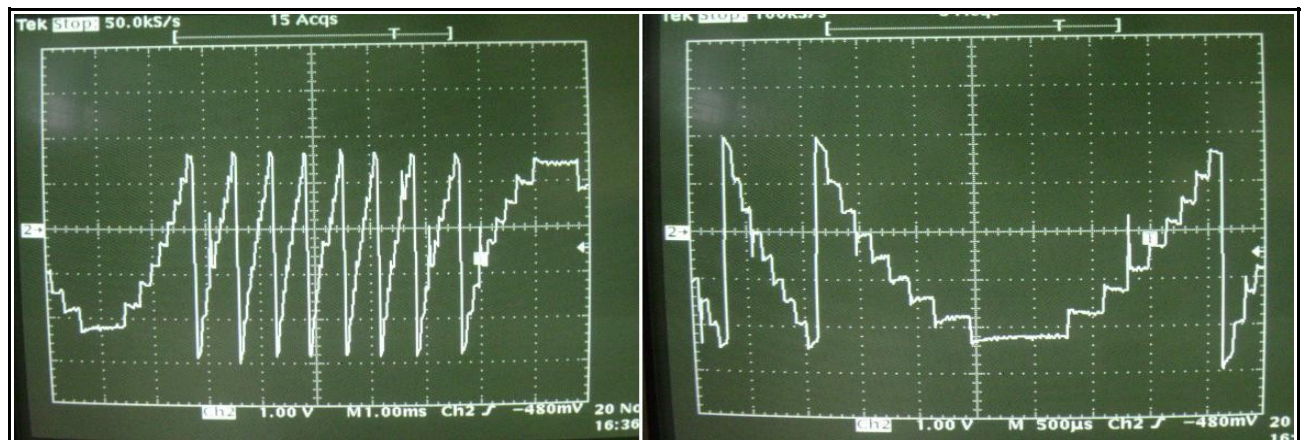


Figura 81. Auxiliar 3 + Auxiliar 2, medido con el osciloscopio.

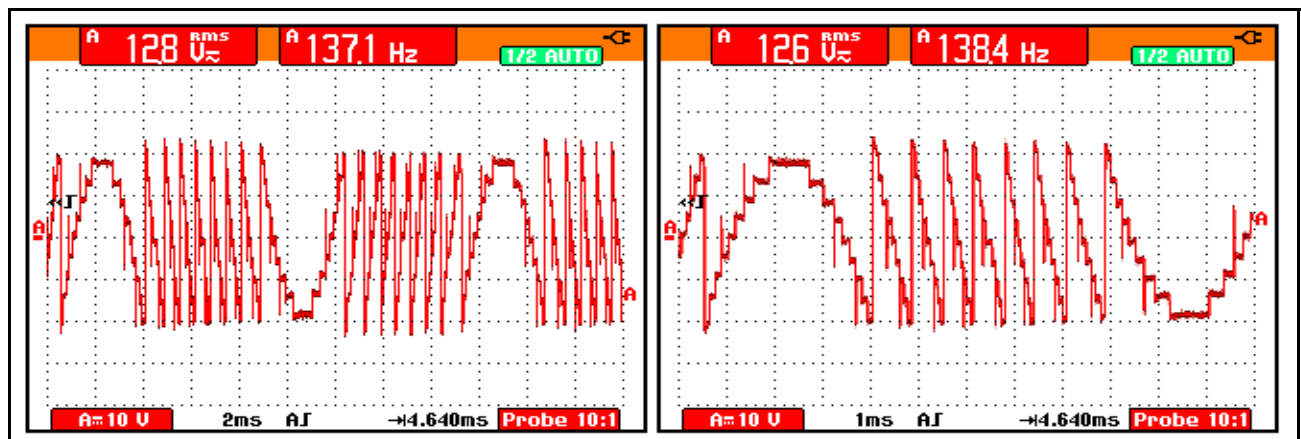


Figura 82. Auxiliar 3 + Auxiliar 2, medido con el fluke.

7.1.3 Suma de los Voltajes Secundarios del Auxiliar 3, Auxiliar 2 y Auxiliar 1

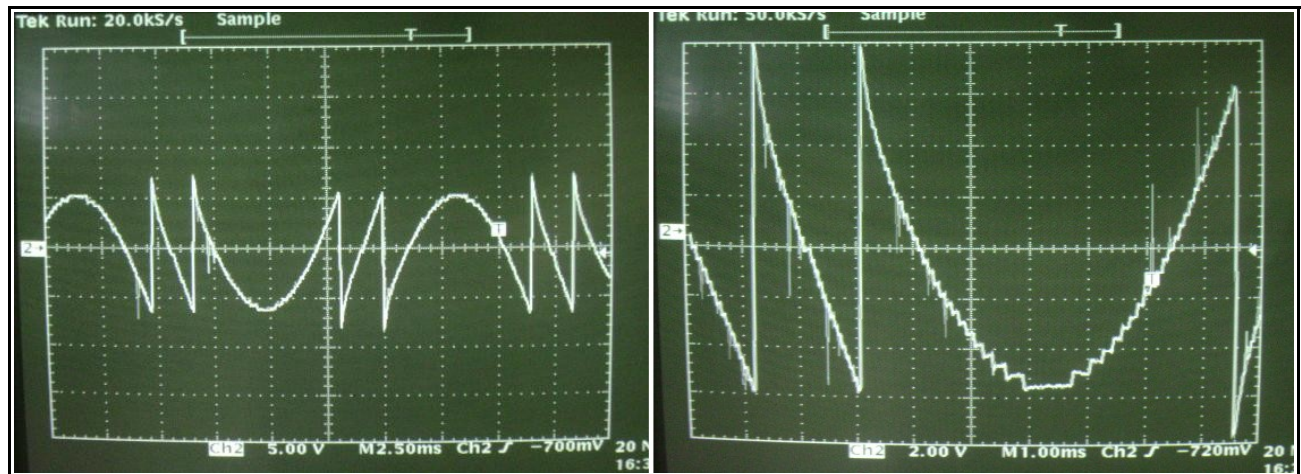


Figura 83. Auxiliar 3 + Auxiliar 2 + Auxiliar 1, medido con el osciloscopio.

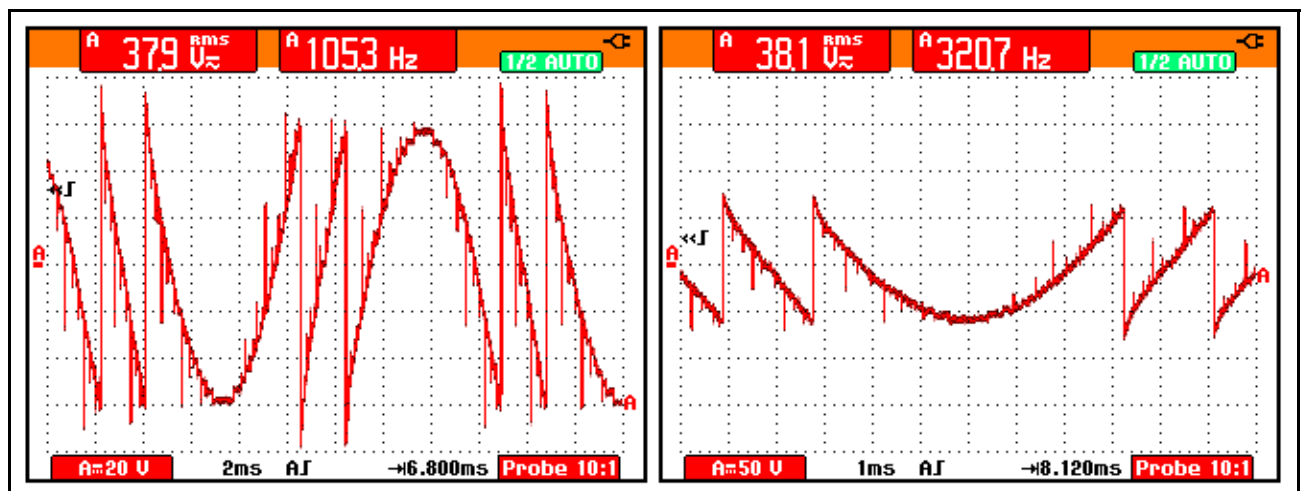


Figura 84. Auxiliar 3 + Auxiliar 2 + Auxiliar 1, medido con el fluke.

La suma de las 4 etapas, generará la onda sinusoidal, la cual puede observarse en la siguiente sección.

7.2. Voltaje de Salida y Distorsión Armónica Total Sin Filtro

En las figuras 85, 86; podemos observar la señal sinusoidal medida a través del osciloscopio y con fluke 196C, en ellas se puede apreciar las alteraciones de frecuencias altas que tiene dicha señal.

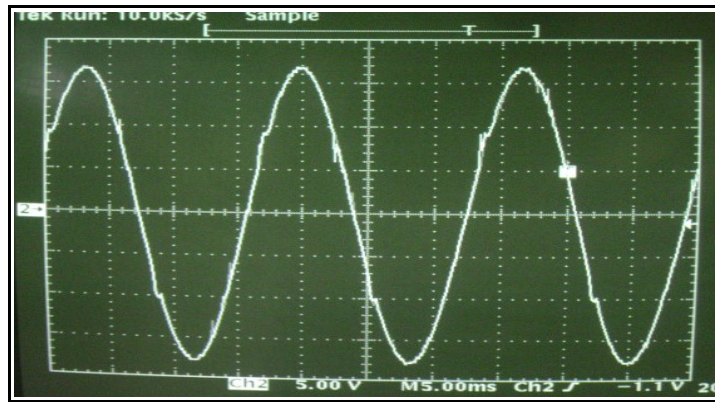


Figura 85. Voltaje de salida sin filtro, medido con el osciloscopio.

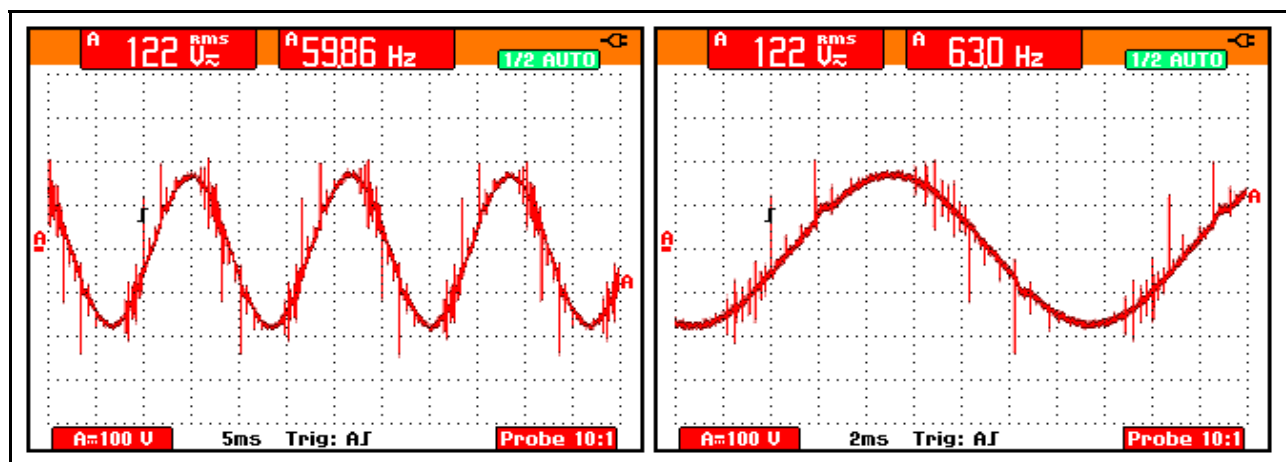


Figura 86. Voltaje de salida sin filtro, medido con el fluke.

En la figuras 87, se ilustra el espectro armónico medido con el Amprobe, el cual es un instrumento que nos permite medir los armónicos impares desde 3 hasta el 19, tal como se ve en la figura 87, y también nos permite medir la distorsión armónica total (THD), cuyo valor es 3.3%. También con este instrumento podemos medir la forma de la señal de salida, indicando así mismo la magnitud y frecuencia, lo cual se ilustra en la figura 88.

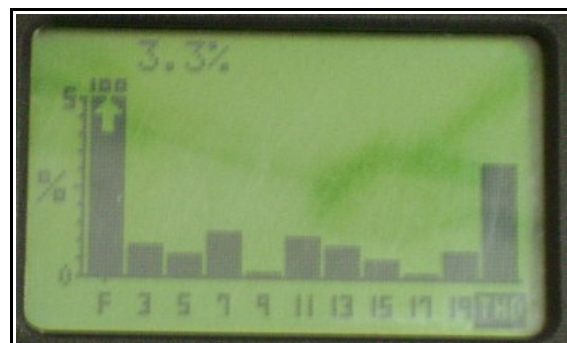


Figura 87. Espectro armónico y THD sin filtro.

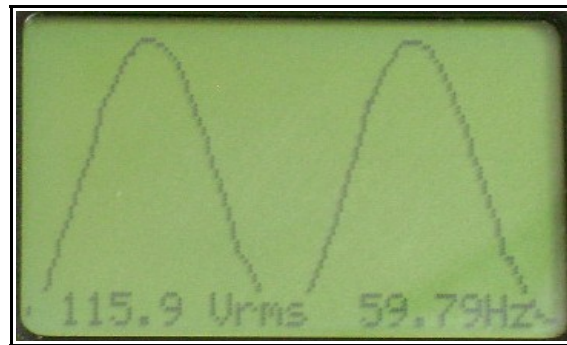


Figura 88. Forma, magnitud y frecuencia de la señal de salida sin filtro.

7.3. Voltaje de Salida y Distorsión Armónica Total Con Filtro

En la figura 89 Se muestra el voltaje de salida medido con el osciloscopio y en la figura 90 Se ilustra la misma señal con el fluke 196C. La señal de salida mejora notablemente en comparación con la señal sin filtro.

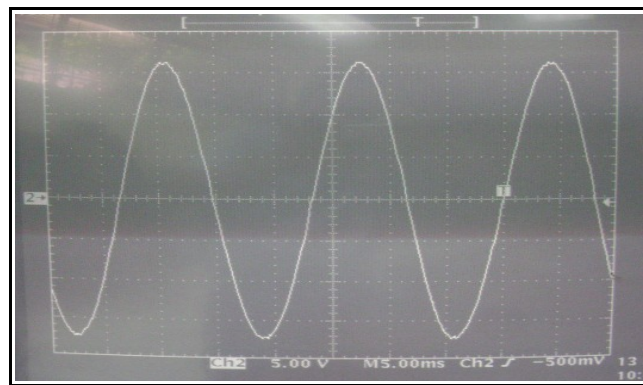


Figura 89. Voltaje de salida con filtro, medido con el osciloscopio.

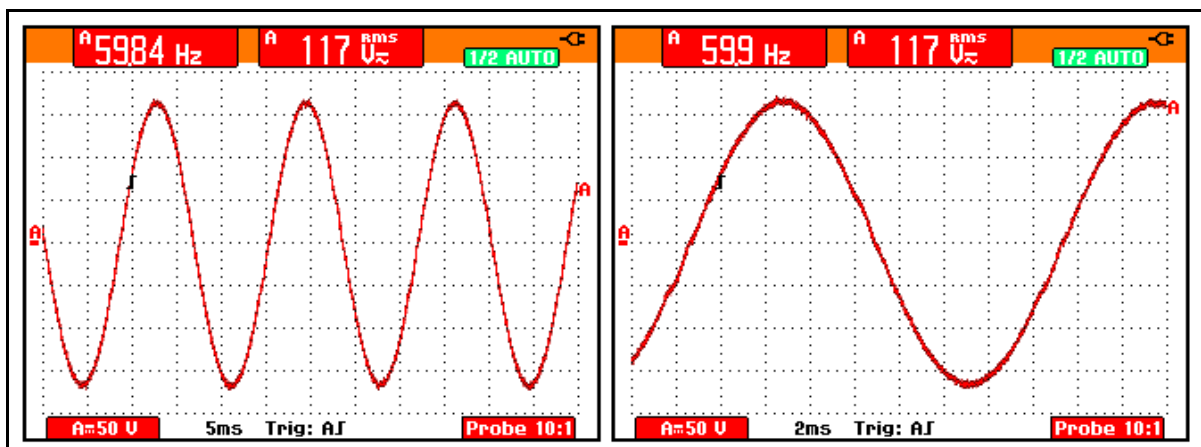


Figura 90. Voltaje de salida con filtro, medido con el fluke.

Utilizando el fluke 196C se midió el contenido armónico, el cual se observa en la figura 91.

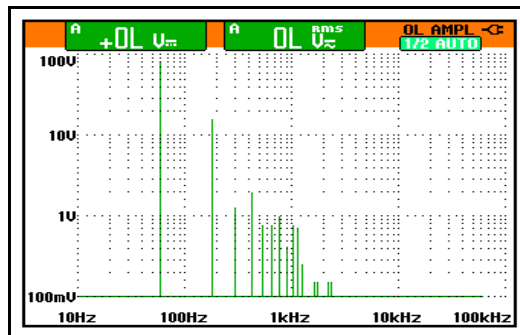


Figura 91. Espectro armónico de la señal de salida con filtro, medido con el fluke.

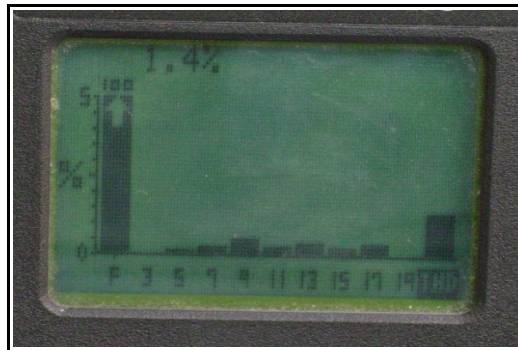


Figura 92. Espectro armónico de la señal de salida con filtro, medido con el amprobe.

De la figura 92 observamos que la distorsión armónica total tiene un valor de 1.4%, cuando no se incluía el filtro teníamos un valor de 3.3%, lo que significa que se redujo en 1.9%, un poco más de la mitad.

7.4. Comparación de La Señal AC del Inversor Con La Señal AC de La Red

Para poder comparar la señal seno del inversor, se midió el THD de la red eléctrica, el resultados obtenido se muestra en la figura 93. Dicha medición demuestran que el inversor construido tiene un THD menor que la señal de la red eléctrica.



Figura 93. THD de la red eléctrica.

7.5. Inversor Construido

El inversor construido debía cumplir con algunos requisitos indispensables. La base del inversor se construyó de metal para que pudiera soportar el peso de los transformadores de cada una de las cuatro etapas y a su alrededor cubierto por un material acrílico transparente que permitiera ver hacia el interior las diferentes partes con que se ha construido el inversor. En la figura 94 se muestra el inversor construido.



Figura 94. Inversor multinivel de 4 etapas, 81 niveles construido.

El costo total invertido en la construcción del inversor multinivel de 4 etapas, 81 niveles monofásico es de US\$712.23 dolares. Los detalles de dichos costos se detallan en el anexo J.

A continuación un resumen de los datos de placa del inversor multinivel de 4 etapas.

Voltaje de Entrada (DC): 80V
Voltaje de Salida (AC): 120V
Corriente de Salida: 5A
Potencia de Salida: 600VA

VIII. CONCLUSIONES

- Al comparar los inversor en cascada simétrico y asimétrico de dos etapas con fuentes independientes de alimentación para cada etapa, con los inversores simétricos y asimétricos en cascada de fuente común, se observa una clara ventaja de estos últimos, ya que como lo confirman los resultados obtenidos de la simulación, estos presentan una Distorsión Armónica Total (THD, por sus siglas en ingles) mucho menor, con un valor de 0.49 aproximadamente, a un valor muy cercano a 1.0 de los primeros, es decir, la Distorsión Armónica Total se reduce casi a la mitad usando una fuente para alimentar las diferentes etapas. No obstante hay que mencionar que la topología de fuente común no es muy práctica en aplicaciones en frecuencia variable. Además a partir de los resultados obtenidos de la simulación puede decirse que al aumentar el número de etapas, aumentando de esta forma el número de niveles de la señal de salida se obtiene una señal que se aproxima cada vez más a una señal sinusoidal ideal, dependiendo el número de niveles que se deseen.
- Las señales de control generadas a través del microcontrolador PIC16f877, son obligatorias, las señales de control que gobiernan el IGBT superior y el IGBT inferior de una misma rama un retardo o tiempo muerto entre ambas señales de control; si no se incluye el retardo entonces se genera un pequeño cortocircuito en la fuente de alimentación continua de entrada al puente 'H' y por lo tanto el resultado final no será satisfactorio.
- Los Inversores Multinivel contruidos a partir de puentes 'H' deben 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 nuestro caso de cuatro etapas obtuvimos 81 niveles.
- Los puentes 'H' necesitan tener entradas de voltaje distintas para también producir salidas distintas, una el triple de la otra. Si se tiene una misma fuente de entrada se hecha mano de transformadores lo cuales deben tener relaciones de transformación que respeten la relación de múltiplos de tres.
- Al colocarse transformadores a la salida de los puentes 'H', serán los secundarios de éstos los que deberán conectarse en cascada.
- El driver de disparo de los transistores deberá tener la misma capacidad de voltaje de carga que los transistores, para evitar problemas con los voltajes de la carga.
- La etapa de control del inversor multinivel será la que administre los tiempos de disparo de los transistores, generando la tabla

respectiva para ello.

- Se deben usar optoacopladores, cuya función es la separación o aislamiento de tierras entre el circuito de control y el circuito de potencia con el objetivo de proteger la parte de control, que para este caso es el microcontrolador, de alguna falla o desperfecto en el circuito de potencia.
- Los resultados obtenidos de la simulación y los obtenidos con inversor implementado, demuestran una clara similitud entre las señales simuladas y las experimentales, sin embargo la señal de voltaje de salida del inversor construido presentaba una pequeña perturbación o alteración, lo que generó un THD de 3.3%; pero al incluir un filtro sencillo LC paso bajo se logró reducir el THD hasta 1.4%, cumpliendo de esta manera con los objetivos trazados en el trabajo de graduación.
- El inversor podría generar una señal mucho mejor sin necesidad de un filtro a la salida, si se utilizara un microcontrolador que tenga puertos de 16 bits, ya que de esta forma, las 16 señales de control se enviarían al mismo tiempo y no se generaría un retardo, tal como sucede en este caso, al utilizar un microcontrolador con puertos de 8 bits.

BIBLIOGRAFIA

- ♦ Rios, Felipe; (2003) Diseño y construcción de un Inversor Trifásico Multinivel; Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial, con Diploma en Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- ♦ Bretón, Alberto; (2003) Diseño y construcción de un Inversor Trifásico Multinivel de Cuatro Etapas Para Compensación Armónica Y de Reactivos; Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial, con Diploma en Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- ♦ Sabino, Manuel; (2006) Diseño e Implementación de una Interfaz de Potencia para un Variador de Velocidad de Motores de Inducción; Para Obtener el Grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional de México.
- ♦ Dixon, J; Morán; (2002) Multilevel Inverter, Based on Multi-Stage Connection of Three-Level Converters, Scaled in Power of Three. *IEEE Industrial Electronics Conference, IECON'02*, 5-8 Nov. 2002.
- ♦ Torres Carlos, Murillo Duberney, Patiño Carlos; (2008) Diseño Y Construcción de un Inversor Trifásico; Grupo de Investigación en Electrónica de Potencia, Universidad Tecnológica de Pereira.
- ♦ Gómez Sebastián; (2007) Diseño de un Módulo de Excitación de IGBT'S para Inversores Trifásicos de Potencia; Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional del Sur, Argentina.
- ♦ Ing. Gamboa Benítez, Ing. Quelal Analuisa, Ing. Rivera Argoti; (2005) Diseño Y Construcción de un Variador de Velocidad con el Microcontrolador 80C196MC; Escuela Politécnica Nacional.
- ♦ Guía 2; Introducción a los Inversores Multinivel usando PSIM; Departamento de electrónica, Área de Electrónica de Potencia.
- ♦ J. Sandoval, W. Salamanca, V. Cardozo, J. Duarte Y F. Fernández; DESARROLLO DE UN INVERSOR MONOFÁSICO DIDÁCTICO; Facultad Seccional Duitama. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- ♦ Powersim Technologies. PSIM Version 6.0, for Power Electronics Simulations. User Manual. Powersim Technologies, Vancouver, Canada, Web: <http://www.powersimtech.com>.
- ♦ CadSoft Computer Inc, EAGLE (EASILY APPLICABLE GRAPHICAL LAYOUT EDITOR); Web: <http://www.cadsoftusa.com>.

ANEXO A: INVERSOR ACOPLADO POR DIODO E INVERSOR ACOPLADO POR CONDENSADOR

A.1. Inversor Acoplado por Diodo (Diode-Clamped Inverter)

Este inversor se caracteriza por dividir el voltaje de la fuente DC en una cierta cantidad de niveles por medio de condensadores conectados en serie. La cantidad de diferentes niveles de voltaje caracteriza al inversor. En la figura A.1.1(a) se muestra un Inversor de tres niveles, obtenidos con los condensadores C_1 y C_2 conectados en serie y en la A.1.1(b) uno de cinco niveles.

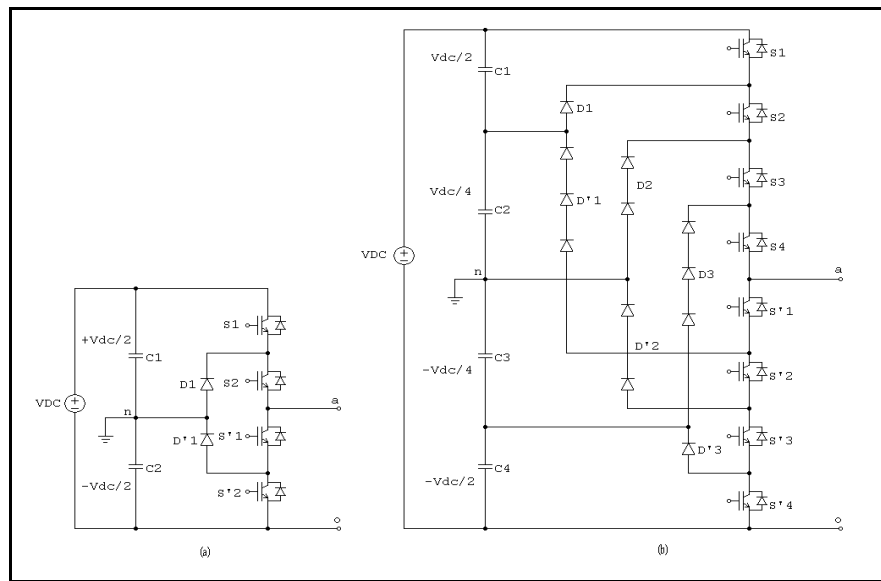


Figura A.1.1. Esquema de Inversor Acoplado por Diodo. (a) Tres niveles. (b) Cinco niveles.

El punto medio n entre los dos condensadores se puede definir como punto neutro. El voltaje de salida V_{an} se caracteriza por tener tres estados o niveles: $+V_{dc}/2$, 0 , y $-V_{dc}/2$ con respecto al punto neutro. En la tabla A.1.1 se muestra la secuencia de encendido de los semiconductores que se debe utilizar para generar los diferentes voltajes de salida para el inversor de la figura A.1.1.

V_{an}	S_1	S_2	S'_1	S'_2
$+V_{dc}/2$	1	1	0	0
0	0	1	1	0
$-V_{dc}/2$	0	0	1	1

Tabla A.1.1. Secuencia de encendido para el inversor de la figura A.1.1.

En este tipo de inversor, los diodos (D_1 y D_2) son componentes claves que no se encuentran en los inversores de dos niveles comunes. Estos diodos acoplan el voltaje de conmutación para dividir el nivel de voltaje de la barra DC. Cuando S_1 y S_2 están simultáneamente cerrados, el voltaje entre a y 0 es $+V_{dc}$. En este caso, D_1 balancea el voltaje entre S'_1 y S'_2 haciendo que S'_1 bloquee el voltaje en C_1 y que S'_2 bloquee el voltaje en C_2 .

La figura A.1.1(b) representa un Inversor de cinco niveles, generados por los condensadores C_1 , C_2 , C_3 y C_4 conectados en serie. Para una fuente DC de voltaje $+V_{dc}$, el voltaje de cada condensador será $+V_{dc}/4$.

Considerando el punto n como referencia del voltaje, se puede explicar mediante la tabla A.1.2 como se forman los diferentes nivel de tensión para el Inversor de la figura A.1.1(b).

V_{an}	S_1	S_2	S_3	S_4	S'_1	S'_2	S'_3	S'_4
$+V_{dc}/2$	1	1	1	1	0	0	0	0
$+V_{dc}/4$	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0
$-V_{dc}/4$	0	0	0	1	1	1	1	0
$-V_{dc}/2$	0	0	0	0	1	1	1	1

Tabla A.1.2. Secuencia de encendido para el inversor de la figura A.1(b).

Asumiendo que el voltaje inverso de cada diodo es el mismo que el de los semiconductores, el número de diodos que se requiere para una fase del inversor será: $(m-1)*(m-2)$. Este número crece cuadráticamente a medida que aumenta m y por lo tanto, cuando m se hace suficientemente grande, el número de diodos necesarios para implementar el inversor lo hacen impracticable.

A.2. Inversor Acoplado por Condensador (Capacitor Clamped Inverter)

En la figura A.2.1 se muestra el diagrama esquemático de un inversor acoplado por Condensador. El inversor de la figura A.2(a) corresponde a uno de tres niveles, el cual genera entre los terminales a y n los siguientes voltajes: $+2V_{dc}/2$, 0 , y $-V_{dc}/2$. En la tabla A.2.1 se pueden ver las combinaciones de los semiconductores que deben estar conduciendo para generar los diferentes niveles de tensión.

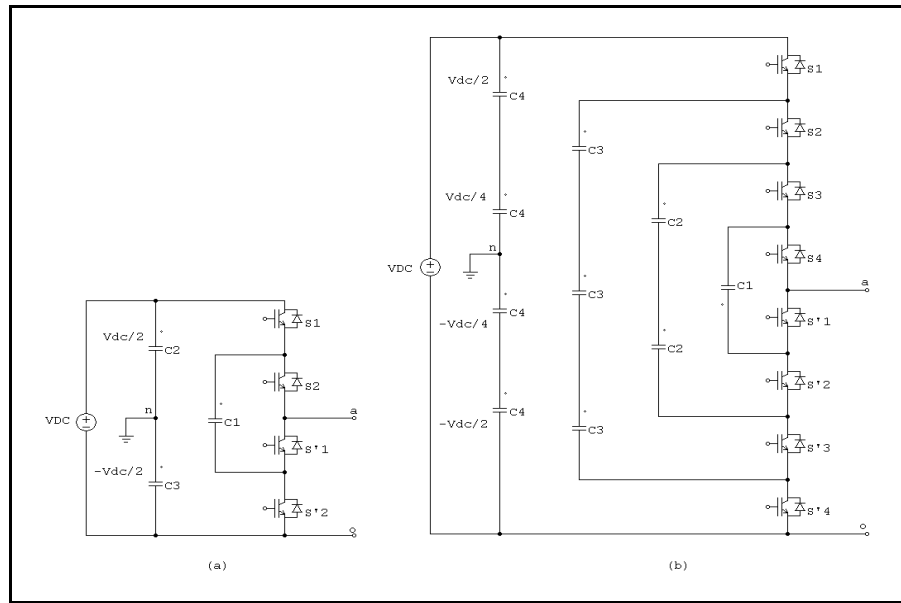


Figura A.2.1. Esquema Inversor Acoplado por Condensador. (a) Tres niveles. (b) Cinco niveles.

V_{an}	S_1	S_2	S'_1	S'_2
$+V_{dc}/2$	1	1	0	0
0	1	0	1	0
0	0	1	0	1
$-V_{dc}/2$	0	0	1	1

Tabla A.2.1. Secuencia de encendido para el inversor de la figura A.2.1(a).

La forma de conseguir los diferentes niveles de tensión en el inversor acoplado por condensador es más flexible comparado con el Inversor acoplado por diodo. Esto se nota aún más en el caso del inversor de cinco niveles, en el cual existen diferentes combinaciones de encendido para obtener un mismo nivel de tensión. Utilizando como ejemplo la figura A.2.1(b), el voltaje del inversor de cinco niveles, V_{an} , puede ser obtenido con las combinaciones de la tabla A.2.2. De manera similar como ocurre con el inversor acoplado por diodo, el inversor acoplado por condensador requiere un gran número de condensadores para hacer flotar el voltaje. De esta forma, un Inversor de ***m-niveles*** requerirá un total de $(m-1)*(m-2)/2$ condensadores de flotación, además del condensador de alto voltaje que seguramente se requerirá como filtro de entrada. Este último deberá ser implementado con una cadena de condensadores en serie si el voltaje continuo es demasiado alto. En la figura A.2.1(b) se observan cadenas de condensadores en serie, esto se debe a que los tensión continua obligan hacer esto para aumentar la tensión soportada por los condensadores.

V_{an}	S_1	S_2	S_3	S_4	S'_1	S'_2	S'_3	S'_4
$+V_{dc}/2$	1	1	1	1	0	0	0	0
$+V_{dc}/4$	1	1	1	0	1	0	0	0
$+V_{dc}/4$	0	1	1	1	0	0	0	1
$+V_{dc}/4$	1	0	1	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0
0	0	0	1	1	0	0	1	1
0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1
0	0	1	1	0	1	0	0	1
$-V_{dc}/4$	1	0	0	0	1	1	1	0
$-V_{dc}/4$	0	0	0	1	0	1	1	1
$-V_{dc}/4$	0	0	1	0	1	0	1	1
$-V_{dc}/2$	0	0	0	0	1	1	1	1

Tabla A.2.2. Secuencia de encendido para el inversor de la figura A.2.1(b).

ANEXO B: CÁLCULO DE LAS SECUENCIAS DE CONMUTACIÓN

A continuación se presenta los cálculos de la secuencia de conmutación para los inversores multinivel de 3 y 4 etapas.

B.1. Inversor Multinivel de 3 Etapas

El primer cálculo que se hace es determinar el número de niveles posibles a partir del número de etapas, cuyo valor es conocido e igual a 3 ($n=3$). Aplicando la formula 3^n obtenemos:

$$N=3^n=3^3$$

$$N=27 \text{ Niveles}$$

De los cuales 13 son niveles positivos, 13 niveles negativos y por último el cero.

Denotamos a la señal de salida del inversor como V_{OUT} , el cual tiene su valor expresado en rms, así que calculamos el valor máximo de dicha señal de la siguiente manera: $V_{MAX}=\sqrt{2}V_{OUT}$.

Ahora calculamos el nivel 1 ó mínimo de la señal sinusoidal a la salida del inversor, que es igual al voltaje secundario de la etapa Auxiliar 2.

$$\text{Nivel } \pm V_{A2} = \frac{V_{MAX}}{\frac{(N-1)}{2}} = \frac{V_{MAX}}{\frac{(27-1)}{2}} = \frac{1}{13} V_{MAX}$$

Aplicamos la siguiente formula para encontrar los demás niveles:

$$\text{Nivel } i+1 = i * \text{Nivel}$$

$$\text{Nivel } 2 = 2 * \text{Nivel } 1 = 2 \frac{1}{13} V_{MAX} = \frac{2}{13} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 8 = 8 * \text{Nivel } 1 = 8 \frac{1}{13} V_{MAX} = \frac{8}{13} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 3 = 3 * \text{Nivel } 1 = 3 \frac{1}{13} V_{MAX} = \frac{3}{13} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 9 = 9 * \text{Nivel } 1 = 9 \frac{1}{13} V_{MAX} = \frac{9}{13} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 4 = 4 * \text{Nivel } 1 = 4 \frac{1}{13} V_{MAX} = \frac{4}{13} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 10 = 10 * \text{Nivel } 1 = 10 \frac{1}{13} V_{MAX} = \frac{10}{13} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 5 = 5 * \text{Nivel } 1 = 5 \frac{1}{13} V_{MAX} = \frac{5}{13} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 11 = 11 * \text{Nivel } 1 = 11 \frac{1}{13} V_{MAX} = \frac{11}{13} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 6 = 6 * \text{Nivel } 1 = 6 \frac{1}{13} V_{MAX} = \frac{6}{13} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 12 = 12 * \text{Nivel } 1 = 12 \frac{1}{13} V_{MAX} = \frac{12}{13} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 7 = 7 * \text{Nivel } 1 = 7 \frac{1}{13} V_{MAX} = \frac{7}{13} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 13 = 13 * \text{Nivel } 1 = 13 \frac{1}{13} V_{MAX} = V_{MAX}$$

Los niveles negativos se encuentran anteponiéndoles el signo

"-" a todos los niveles positivos.

Con la determinación de cada uno de los niveles se construye la tabla 9 del capítulo III de este documento de acuerdo a la combinación que se requiera para encontrar el nivel deseado.

B.2. Inversor Multinivel de 4 Etapas

El primer cálculo que se hace es determinar el número de niveles posibles a partir del número de etapas, cuyo valor es conocido e igual a 4 ($n=4$). Aplicando la fórmula 3^n obtenemos:

$$N=3^n=3^4$$

$$N=81 \text{ Niveles}$$

De los cuales 40 son niveles positivos, 40 niveles negativos y por último el cero.

Denotamos a la señal de salida del inversor como V_{OUT} , el cual tiene su valor expresado en rms, así que calculamos el valor máximo de dicha señal de la siguiente manera: $V_{MAX}=\sqrt{2}V_{OUT}$.

Ahora calculamos el nivel 1 o mínimo de la señal sinusoidal a la salida del inversor, que es igual al voltaje secundario de la etapa Auxiliar 3.

$$\text{Nivel } \pm V_{A3} = \frac{V_{MAX}}{\frac{(N-1)}{2}} = \frac{V_{MAX}}{\frac{(81-1)}{2}} = \frac{1}{40} V_{MAX}$$

Aplicamos la siguiente fórmula para encontrar los demás niveles:

$$\text{Nivel } i+1 * \text{Nivel } i$$

$$\text{Nivel } 22 * \text{Nivel } \pm 2 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{1}{20} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 88 * \text{Nivel } \pm 8 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{1}{5} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 33 * \text{Nivel } \pm 3 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{3}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 99 * \text{Nivel } \pm 9 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{9}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 44 * \text{Nivel } \pm 4 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{1}{10} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 1010 * \text{Nivel } \pm 10 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{1}{4} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 55 * \text{Nivel } \pm 5 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{5}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 1111 * \text{Nivel } \pm 11 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{11}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 66 * \text{Nivel } \pm 6 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{6}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 1212 * \text{Nivel } \pm 12 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{12}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 77 * \text{Nivel } \pm 7 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{7}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 1313 * \text{Nivel } \pm 13 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{13}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 1414 * \text{Nivel } \pm 14 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{14}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 1515 * \text{Nivel } \pm 15 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{15}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 1616 * \text{Nivel } \pm 16 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{16}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 1717 * \text{Nivel } \pm 17 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{17}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 1818 * \text{Nivel } \pm 18 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{9}{20} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 1919 * \text{Nivel } \pm 19 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{19}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 2020 * \text{Nivel } \pm 20 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{1}{2} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 2121 * \text{Nivel } \pm 21 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{21}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 2222 * \text{Nivel } \pm 22 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{11}{20} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 2323 * \text{Nivel } \pm 23 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{23}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 2424 * \text{Nivel } \pm 24 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{3}{5} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 2525 * \text{Nivel } \pm 25 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{5}{8} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 2626 * \text{Nivel } \pm 26 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{13}{20} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 2727 * \text{Nivel } \pm 27 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{27}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 2828 * \text{Nivel } \pm 28 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{7}{10} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 2929 * \text{Nivel } \pm 29 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{29}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 3030 * \text{Nivel } \pm 30 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{3}{4} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 3131 * \text{Nivel } \pm 31 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{31}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 3232 * \text{Nivel } \pm 32 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{4}{5} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 3333 * \text{Nivel } \pm 33 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{33}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 3434 * \text{Nivel } \pm 34 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{17}{20} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 3535 * \text{Nivel } \pm 35 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{7}{8} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 3636 * \text{Nivel } \pm 36 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{9}{10} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 3737 * \text{Nivel } \pm 37 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{37}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 3838 * \text{Nivel } \pm 38 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{19}{20} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 3939 * \text{Nivel } \pm 39 \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{39}{40} V_{MAX}$$

$$\text{Nivel } 4040 * \text{Nivel } \pm 40 \frac{1}{40} V_{MAX} = V_{MAX}$$

Los niveles negativos se encuentran anteponiéndoles el signo “-” a todos los niveles positivos.

El siguiente paso consiste en construir la tabla de secuencias de conmutación de acuerdo a la combinación que se requiera para encontrar el nivel deseado. La combinación se encuentra aplicando el método de simple inspección, esta tabla es la número 10, la cual se encuentra en el capítulo III.

ANEXO C: SIMULACIONES

A continuación se presentan las simulaciones realizadas a los inversores multinivel de 2, 3 y 4 etapas. Teniendo en cuenta que el voltaje de entrada DC es de 80V y la salida requerida de 120V alternos. Por último también se presenta la simulación del inversor PWM.

C.1. Simulación del inversor multinivel de 2 Etapas

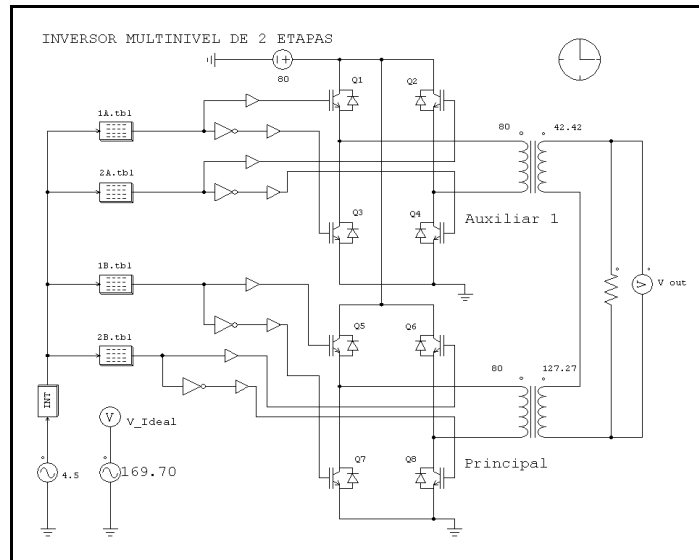


Figura C.1.1. Simulación del inversor multinivel de 2 etapas.

La señal de salida y la distorsión armónica total se ilustra en la figura C.1.2

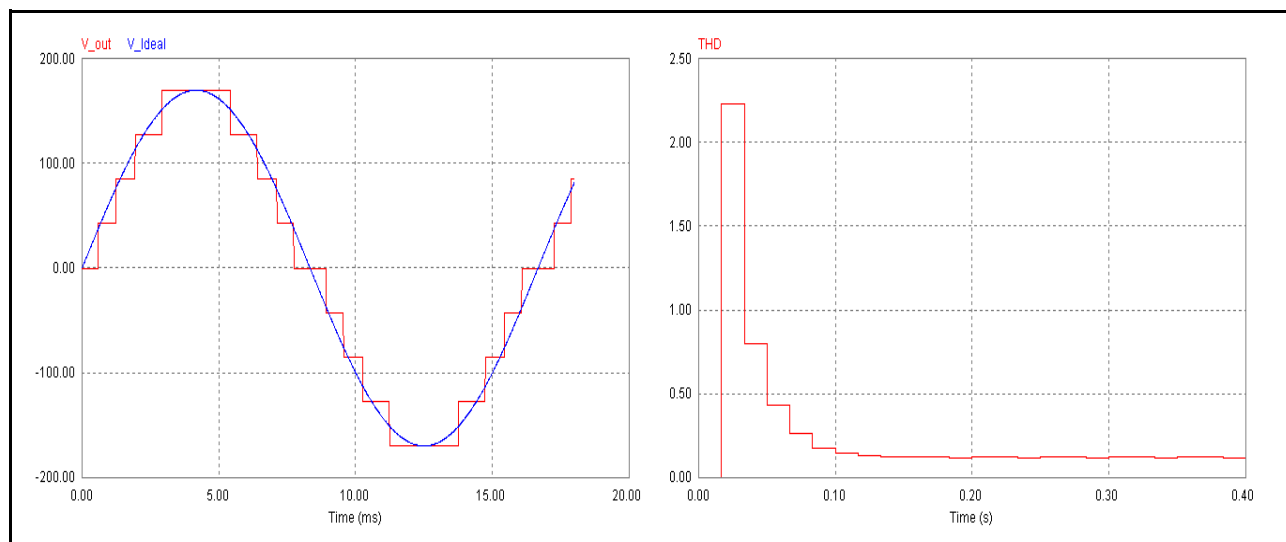


Figura C.1.2. Señal de salida y THD del inversor de 2 etapas.

El THD medido a partir de la figura C.1.2 tiene un valor de 12.3%

C.2. Simulación del Inversor Multinivel de 3 Etapas

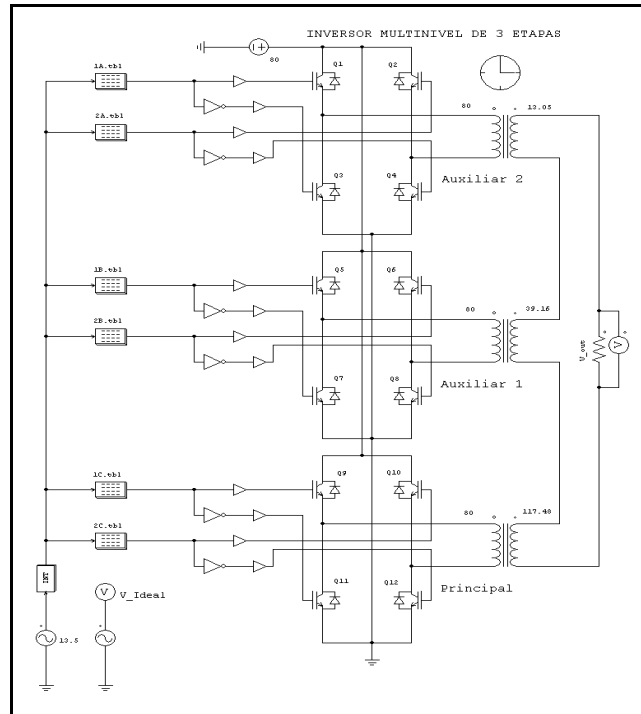


Figura C.2.1. Simulación del inversor multinivel de 3 etapas.

La señal de salida y la distorsión armónica total se ilustran en las figuras C.2.2 y figura C.2.3.

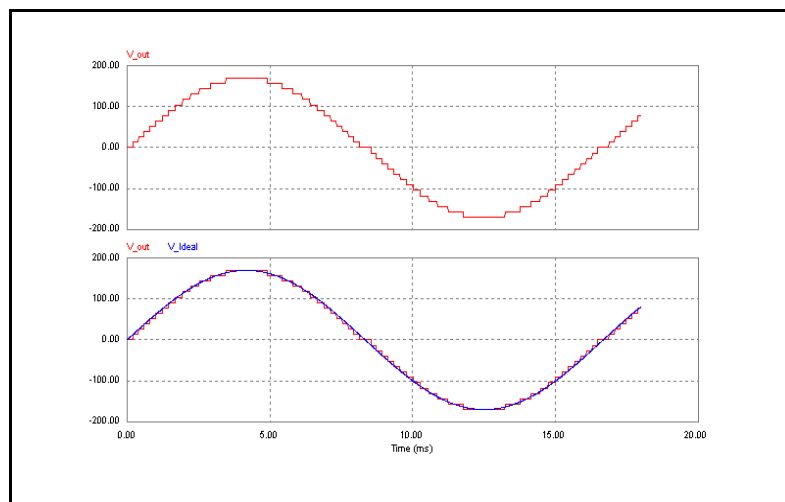


Figura C.2.2. Voltaje de salida del inversor de 3 etapas.

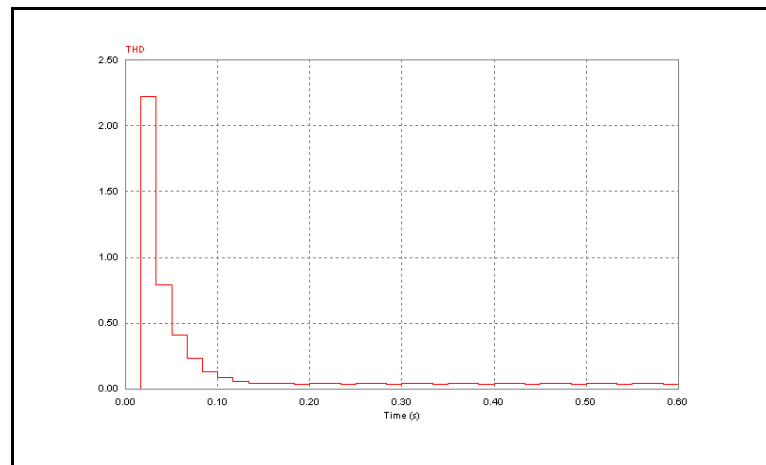


Figura C.2.3. THD del inversor de 3 etapas.

El THD medido a partir de la figura C.2.3 tiene un valor de 4.17%

C.3. Simulación del Inversor Multinivel de 4 Etapas

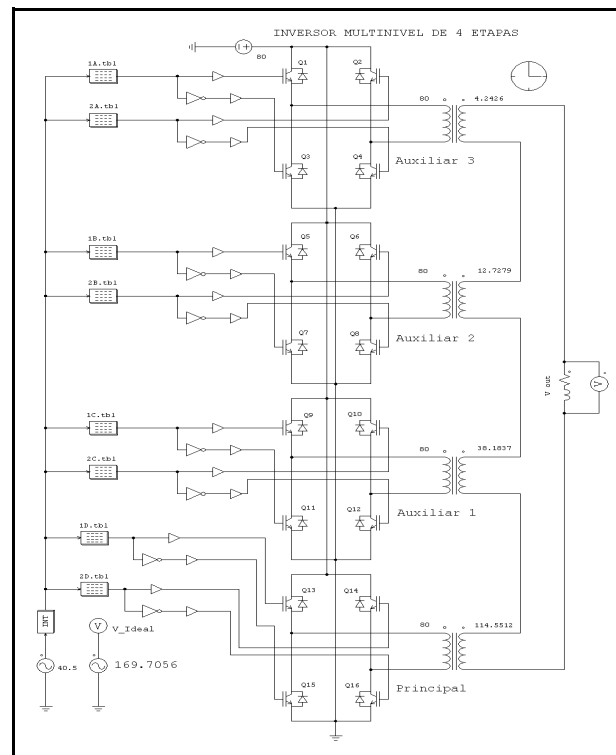


Figura C.3.1. Simulación del inversor multinivel de 4 etapas.

La señal de salida y la distorsión armónica total se ilustran en las figuras C.3.2 y figura C.3.3.

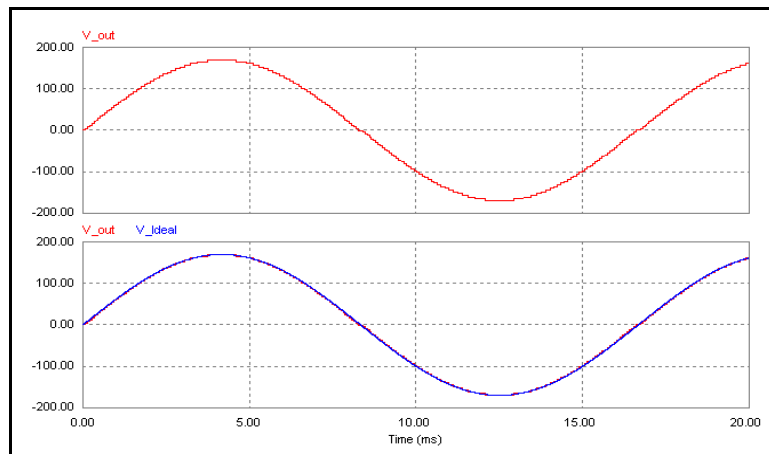


Figura C.3.2. Voltaje de salida del inversor de 4 etapas.

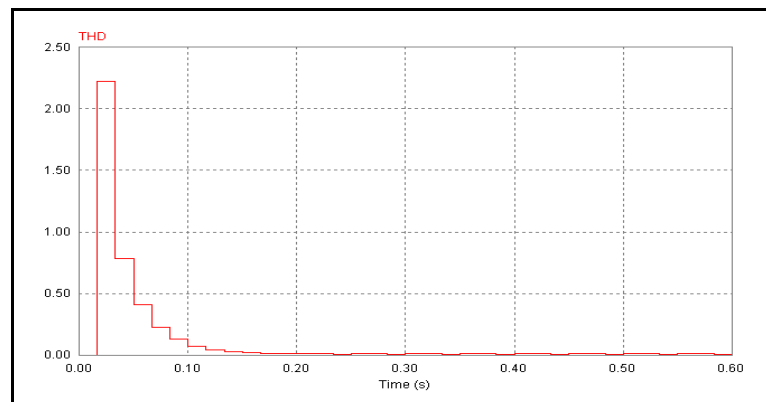


Figura C.3.3. THD del inversor de 4 etapas.

El THD medido a partir de la figura C.3.3 tiene un valor de 1.3%.

C.4. Simulación del Inversor PWM

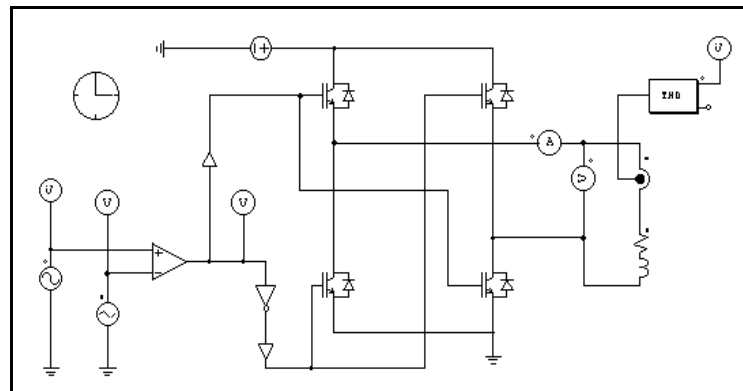


Figura C.4.1. Simulación del Inversor PWM.

El voltaje de salida y la corriente de carga para este inversor se ilustra en las figuras C.4.2 y figura C.4.3.

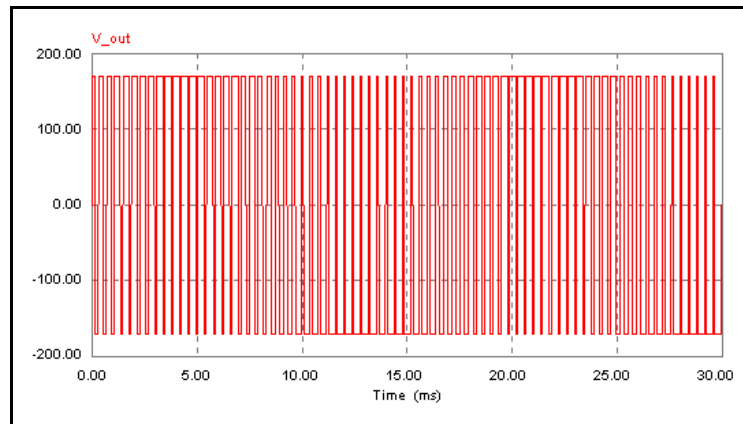


Figura C.4.2. Voltaje de salida del inversor PWM.

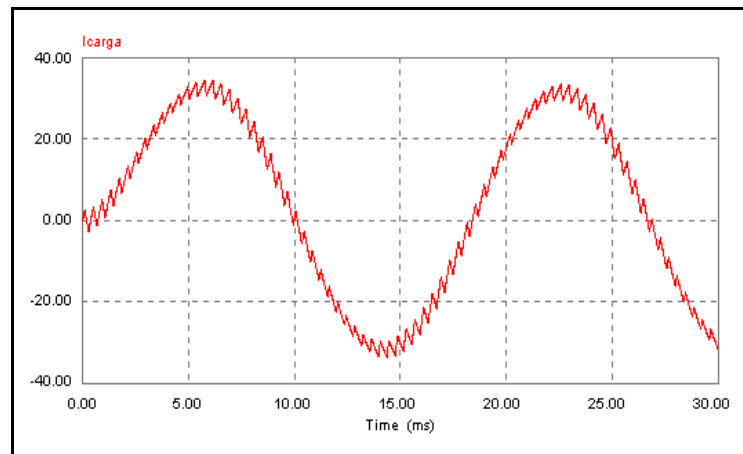


Figura C.4.3. Corriente de carga del inversor PWM.

ANEXO D: CALCULO DE LOS TRANSFORMADORES DE CADA ETAPA DEL INVERSOR

En este anexo damos a conocer uno de los cálculos empleados en la construcción de los transformadores, que se utilizan en cada una de las etapas del inversor multinivel.

Los voltajes nominales que deben tener cada uno de los transformadores se resumen en la tabla D1.

Transformador	Valores instantáneos		Parámetro α	Valores rms para los cálculos en la construcción de cada transformador	
	V_p (V)	V_s (V)		V_p (V)	V_s (V)
Auxiliar 3	80	4.24	18.86	120	6.36
Auxiliar 2	80	12.72	6.28	120	19.09
Auxiliar 1	80	38.18	2.09	56.56	27.00
Principal	80	114.55	0.69	71	101.67

Tabla D1. Valores de voltaje primario y secundario de los transformadores

En la tabla D2. Se muestran los calibres de alambres esmaltados, con su respectivo diámetro en mm. Esta tabla se utiliza para calcular el calibre adecuado de cada transformador.

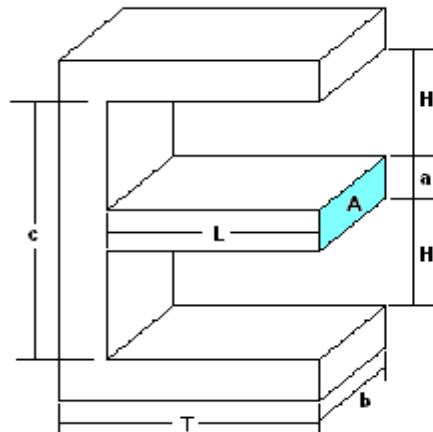
Calibre	Diámetro en mm	Calibre	Diámetro en mm	Calibre	Diámetro en mm
1	7.348	16	1.291	31	0.227
2	6.554	17	1.15	32	0.202
3	5.827	18	1.024	33	0.18
4	5.189	19	0.911	34	0.16
5	4.621	20	0.811	35	0.143
6	4.115	21	0.722	36	0.127
7	3.665	22	0.643	37	0.113
8	3.264	23	0.573	38	0.101
9	2.906	24	0.511	39	0.089
10	2.588	25	0.455	40	0.079
11	2.305	26	0.405	41	0.071
12	2	27	0.361	42	0.063
13	1.8	28	0.321	43	0.056
14	1.628	29	0.286	44	0.05
15	1.45	30	0.255	45	0.045

Tabla D2. Calibres y diámetros de alambres esmaltados

Los cálculos fueron realizados en una plantilla de Mathcad,

para facilitar el trabajo. Aquí sólo se mostrará el cálculo para el transformador de la etapa Auxiliar 3; los demás fueron calculados empleando el mismo método.

CALCULO DEL TRANSFORMADOR AUXILIAR 3



UNIDADES

Voltaje en Voltios

Longitud en cm

Potencia en Watt

Area en cm^2

Corriente en Amperios

Diametro en mm

DATOS DE ENTRADA

DATOS

$a := 2.3$ $b := 5.3$ $c := 5$ $L := 3.7$ $H := 1.3$ $T := 4.9$

Voltaje primario = V_p Voltaje secundario = V_s $V_p := 120$ $V_s := 6.3649$ $I_s := 5$

Corriente del secundario = I_s

AREA Y POTENCIA MAXIMA DEL NUCLEO

$A := a \cdot b$ $A = 12.19 \text{ cm}^2$ Potencia máxima del nucleo = P_{nmax}

$P_{nmax} := \left(\frac{A}{1.2} \right)^2$ $P_{nmax} = 103.192 \text{ Watt}$

POTENCIA DEMANDADA EN EL PRIMARIO Y SECUNDARIO

$P_{secundario} := V_s \cdot I_s$ $P_{secundario} = 31.8 \text{ Watt}$

La potencia en el primario se calcula añadiendo un porcentaje del 15% de la potencia del secundario

$P_{primario} := P_{secundario} + (0.15 \cdot P_{secundario})$ $P_{primario} = 36.598 \text{ Watt}$

Entonces se debe cumplir que la potencia del nucleo debe ser mayor que la del primario

$comp1 := P_{nmax} > P_{primario}$ $comp1 = 1$ Si $comp1$ es igual a 1 cumple
Si $comp1$ es igual a 0 no cumple

ESPIRAS POR VOLTIOS

Necesitamos definir el parametro B $B := 8000$

$espiras_por_voltio := \frac{450000}{(A \cdot B)}$ $espiras_por_voltio = 4.614$

NUMERO DE VUELTAS DEL DEVANADO PRIMARIO

$$N_p := V_p \cdot \text{espiras_por_voltio} \quad N_p = 553.733 \quad N_p = 554$$

NUMERO DE VUELTAS DEL DEVANADO SECUNDARIO

$$N_s := V_s \cdot \text{espiras_por_voltio} \quad N_s = 29.37 \quad N_s = 29$$

CALIBRE DEL DEVANADO PRIMARIO

Primero necesitamos saber la corriente en el devanado primario

$$I_p := \frac{P_{\text{primario}}}{V_p} \quad I_p = 0.305$$

El Diametro se determina usando la formula:

$$\text{Diametro_primario} := 0.57 \cdot \sqrt{I_p} \quad \text{Diametro_primario} = 0.315 \quad \text{mm}$$

CALIBRE DEL DEVANADO SECUNDARIO

$$\text{Diametro_secundario} := 0.57 \cdot \sqrt{I_s} \quad \text{Diametro_secundario} = 1.275 \quad \text{mm}$$

Luego consultamos la tabla D2. de conductores y calibres del anexo, obteniendo el diametro del calibre real

CALIBRE DEL PRIMARIO

$$\text{calibre_primario} := 28 \quad \text{Diametro_real_primario} := 0.321 \quad \text{mm}$$

CALIBRE DEL SECUNDARIO

$$\text{calibre_secundario} := 16 \quad \text{Diametro_real_secundario} := 1.291 \quad \text{mm}$$

NUMERO DE VUELTAS POR CAPA DE CADA DEVANADO

Primero debemos pasar L a mm

$$L_1 := L \cdot 10 \quad L_1 = 37 \quad \text{mm}$$

$$\text{vueltas_por_capa_prim} := \frac{(L_1 - 2)}{\text{Diametro_real_primario}} \quad \text{vueltas_por_capa_prim} = 109.034$$

$$\text{vueltas_por_capa_sec} := \frac{(L_1 - 2)}{\text{Diametro_real_secundario}} \quad \text{vueltas_por_capa_sec} = 27.111$$

NUMERO DE CAPAS POR DEVANADO

$$n_{\text{capas_por_devanado_primario}} := \frac{N_p}{\text{vueltas_por_capa_prim}}$$

$$n_{\text{capas_por_devanado_primario}} = 5.079$$

$$n_{\text{capas_por_devanado_secundario}} := \frac{N_s}{\text{vueltas_por_capa_sec}}$$

$n_{\text{capas_por_devanado_secundario}} = 1.083$

ESPACIO OCUPADO POR CADA DEVANADO EN LA VENTANA

Este se calcula en función del número de capas de este devanado que estarán presentes incluyendo además capas de papel separador entre capa y capa (papel mantequilla)

DEVANADO PRIMARIO

Cada capa ocupa un espacio vertical igual al diámetro del calibre usado

$\text{espacio_por_calibre1} := \text{Diametro_real_primario} \cdot n_{\text{capas_por_devanado_primario}}$

$\text{espacio_por_calibre1} = 1.63$

$\text{espacio_por_papel_mantequilla1} := 0.1 \cdot n_{\text{capas_por_devanado_primario}}$

$\text{espacio_por_papel_mantequilla1} = 0.508$

$\text{espacio_devanado_primario} := \text{espacio_por_calibre1} + \text{espacio_por_papel_mantequilla1}$

$\text{espacio_devanado_primario} = 2.138$

DEVANADO SECUNDARIO

Cada capa ocupa un espacio vertical igual al diámetro del calibre usado

$\text{espacio_por_calibre2} := \text{Diametro_real_secundario} \cdot n_{\text{capas_por_devanado_secundario}}$

$\text{espacio_por_calibre2} = 1.399$

$\text{espacio_por_papel_mantequilla2} := 0.1 \cdot n_{\text{capas_por_devanado_secundario}}$

$\text{espacio_por_papel_mantequilla2} = 0.108$

$\text{espacio_devanado_secundario} := \text{espacio_por_calibre2} + \text{espacio_por_papel_mantequilla2}$

$\text{espacio_devanado_secundario} = 1.507$

RESUMEN DE ESPACIO UTILIZADO

Entre cada devanado se utiliza papel pescado de 0.5 mm

Además se utilizará un carrete de 2 mm

$\text{espacio_total} := 0.5 + 2 + \text{espacio_devanado_primario} + \text{espacio_devanado_secundario}$

$\text{espacio_total} = 6.145$

Convirtiendo el espacio_total en cm

$\text{espacio_total_en_cm} := \frac{\text{espacio_total}}{10} \quad \text{espacio_total_en_cm} = 0.614$

COMPARANDO EL ESPACIO DISPONIBLE QUE TENEMOS CON LA VARIABLE H

$\text{comp} := H > \text{espacio_total_en_cm} \quad \text{comp} = 1 \quad \begin{array}{l} \text{Si comp es igual a 1 cumple} \\ \text{Si comp es igual a 0 no cumple} \end{array}$

ANEXO E: CIRCUITOS IMPRESOS

Para diseñar los circuitos impresos se utilizó el programa de computadora EAGLE 4.16r creado por Cadsoft Computer Inc. El programa consta de tres módulos, un Diagramador, un Editor de esquemas y un Autorouter que están integrados por lo que no hay necesidad de convertir los netlist entre esquemas y diseños. Es una potente aplicación con la cual podemos diseñar circuitos impresos y realizar esquemas electrónicos. Eagle son las siglas de Easily Aplicable Graphical Layout Editor (Editor fácil aplicable a entorno gráfico). Gracias a este editor se pueden diseñar esquemas y placas de circuito impreso con autorouter, con esta función se automatiza el dibujo de pistas en la placa de circuitos impresos; sin embargo no siempre es posible que el programa logre un diseño de pistas óptimo, especialmente cuando el esquema del circuito es grande; para estos casos es más factible realizar el diseño de pistas en forma manual. Por tal razón se decidió realizar el diseño de las pistas del inversor en forma manual, ya que de este modo se obtuvo un diseño muchísimo mejor que el generado por el autorouter; aunque esto significa que se invierta más tiempo en el diseño. En conclusión recomendamos que para circuitos pequeños, utilizar el autorouter; pero para circuitos grandes es mejor utilizar la forma manual. Para realizar el diseño del circuito impreso, primero se edita el esquemático del circuito y luego a partir de éste se dibujan las pistas de la placa ya sea aplicando el método manual o el automático (autorouter).

El ancho de las pistas utilizadas en el circuito de control es de 1.27mm y para el circuito de potencia tenemos 1.6764mm y 3.81mm, esta última utilizada para la circulación de la corriente de carga. En la tabla E1. se muestra la corriente que soportan las diferentes pistas en una placa.

Ancho de pista (mm)	Ancho de pista (mil)	Corriente (A)
0.254	10	0.3
0.381	15	0.4
0.581	20	0.7
0.635	25	1.0
1.270	50	2.0
2.540	100	4.0
3.810	150	6.0
5.080	200	8.0
6.350	250	10.0

Tabla E1. Corriente que soportan los diferentes anchos de pista.

E.1. Circuito Impreso para el Control

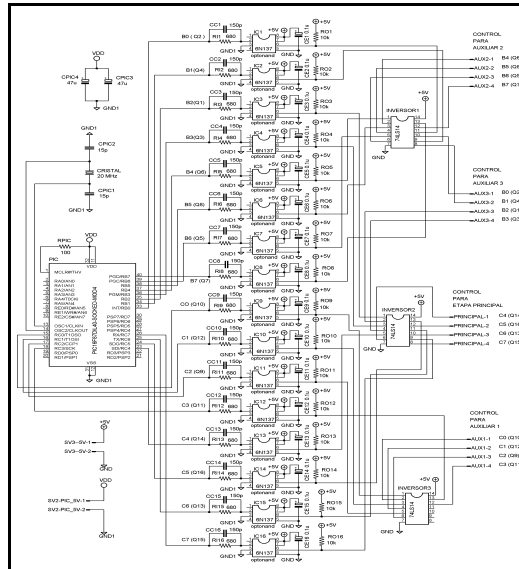


Figura E.1.1. Diagrama Esquemático del circuito de control.

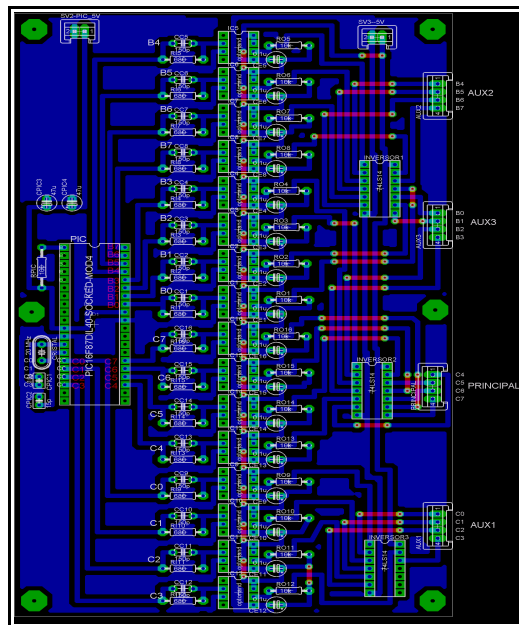


Figura E.1.2 Ubicación de los componentes en el circuito impreso de control.

El circuito impreso de la figura E.1.2, está diseñado para una sola capa, de color azul en la figura. El color rojo son puentes con alambre común, los cuales son ubicados en la parte superior de la placa cobreada, excepto aquellos que están ubicados junto con los optoacopladores, estos son colocados por debajo de la placa cobreada. En la figura E.1.3 se observa el circuito impreso que se utilizó para quemar la placa cobreada.

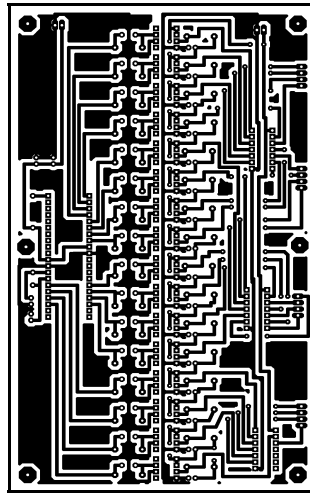


Figura E.1.3. Circuito impreso de control.

E.2. Circuito Impreso de Potencia

El circuito de potencia fue diseñado para una etapa del inversor, las otras 3 restantes fueron hechas exactamente de la misma forma, esto para lograr probar cada una de las cuatro etapas por separado. Por tal motivo se dejaron los conectores correspondientes para unir a cada una de la etapas del inversor.

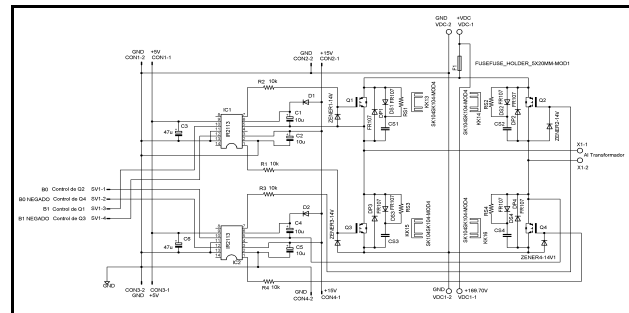


Figura E.2.1. Diagrama esquemático del circuito de potencia de una etapa.

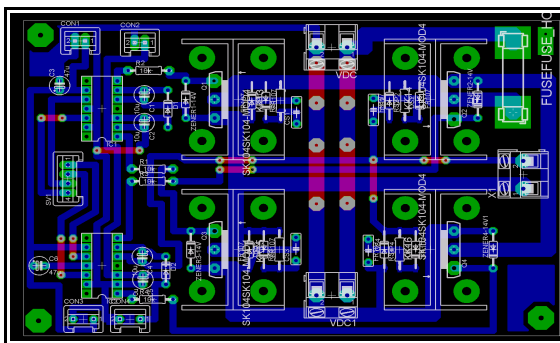


Figura E.2.2. Ubicación de los componentes en el circuito impreso de potencia

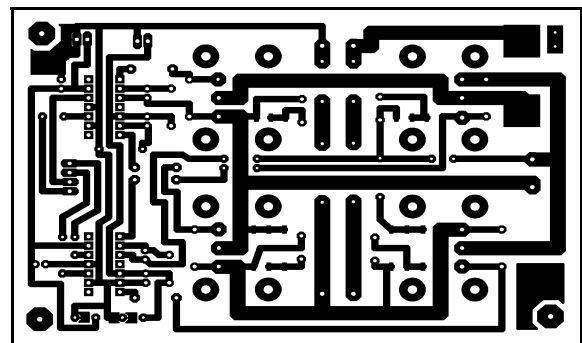


Figura E.2.3. Circuito impreso de potencia para una etapa

ANEXO F: LINKS PARA DATOS TÉCNICOS**1. Driver IR2113**

<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2110.pdf>

<http://www.datasheetarchive.com/IR2113-datasheet.html>

2. IGBT STGP10NC60H

<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/11861/stgp10nc60h.pdf>

3. Optoacoplador 6N137

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/hp/HCNW2611.pdf>

4. Microcontrolador PIC16f877

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30292c.pdf>

5. Regulador de Voltaje LM7805 y LM7815

<http://www.fairchildsemi.com/ds/LM%2FLM7805.pdf>

<http://www.synthdiy.com/files/2006/LM7812.pdf>

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/LM7805.pdf>

6. Regulador de Voltaje LM317T

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/1/03cgthpfat4t4ly5kfp5lpwladfy.pdf>

7. Transistor 2N3055

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/4079.pdf>

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/siemens/Q62702-U58.pdf>

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/2N3055.pdf>

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/microsemi/2n3055ne.pdf>

8. Diodo FR107

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/wte/FR106-TB.pdf>

http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/70/380014_DS.pdf

ANEXO G: MANUAL DE USUARIO

INVERSOR DE VOLTAJE



INDICE

Contenido	Página
I. Introducción	96
II. COMPONENTES Y ACCESORIOS	97
2.1. Accesorios Incluidos	97
2.2. Fuentes de Alimentación de 5V y 15V DC	97
2.3. Fuente de Alimentación de 80V DC	98
2.4. Cargas Inductiva y Resistiva	98
2.5. Módulo Principal	98
2.6. Descripción del Módulo Principal	99
III. PREPARACIÓN Y FUNCIONAMIENTO	99
VI. GUÍA DE REPARACIÓN	102

I. INTRODUCCIÓN

El inversor de voltaje monofásico multinivel de 81 niveles puede trabajar con un voltaje de entrada DC que puede variar desde 0V hasta 80V DC, obteniendo en la salida del inversor entre 0V y 120V AC. El inversor incluye todas las fuentes de alimentación continua y no se recomienda utilizar otras a menos que cumpla con las especificaciones descritas en este manual. El panel frontal del inversor incluye un medidor de voltaje AC analógico que permite medir el valor de voltaje en salida. También el inversor trae incorporado puntos de prueba en los cuales se puede medir diferentes señales tanto en la parte de control como en la parte de potencia; en esta parte se debe tener el debido cuidado a la hora de ejecutar la medición.

En este manual se describen todos los componentes y equipos involucrados en el funcionamiento del inversor de voltaje, tomando en cuenta todas las recomendaciones que aquí se detallan, antes de poner en marcha o energizar el inversor.

Por último el manual describe y enumera una serie de pasos a seguir en el caso, que el inversor de voltaje se dañe o sufra algún desperfecto por descuido humano o por falla interna propia del inversor.

II. COMPONENTES Y ACCESORIOS

2.1. Accesorios Incluidos



Espigas de conexión entre las fuentes de voltajes DC de 5V y 15V y el módulo principal (Inversor).



Espigas para conexión entre la fuente de 80V y el módulo principal (Inversor).



Espigas para conectar la salida del inversor a una carga de prueba.

2.2. Fuentes de Alimentación de 5V y 15V DC



Las fuentes de alimentación DC; tres de 5V y una 15V se encuentran en una sola caja tal como se muestra en la fig. Anterior, las cuales son utilizadas para alimentar al circuito de control del inversor y parte del circuito de potencia; la fuente de 15V es utilizada para la conmutación de cada uno de los IGBT'S del inversor. En la parte de atrás de la caja se encuentra ubicado un fusible de protección de entrada de las fuentes, con un valor de 1A, así mismo en la salida de cada fuente se tienen fusibles también de 1A sólo que estos están ubicados internamente. La fuente debe ser conectada únicamente a un toma de 120V AC.

2.3. Fuente de Alimentación de 80V DC



Esta fuente de alimentación DC es la que se utiliza de voltaje de entrada al inversor y a partir de la cual se generarán los diferentes niveles en la señal sinusoidal de salida. La fuente posee un fusible de entrada de 6A y un fusible de salida de 10A los cuales se encuentran ubicados en

la parte de atrás de la caja. La fuente debe ser alimentada con 120V AC a través de su respectivo cable de alimentación.

2.4. Cargas Inductivas y Resistivas



Esta caja contiene las cargas de prueba, una carga resistiva y dos cargas inductivas, la carga resistiva utilizada corresponde a un foco y las inductivas son dos bobinas de 382.4mH y 537.8mH.

2.5. Modulo Principal



El modulo principal es propiamente el inversor contiene los circuitos de control y de potencia los cuales se encargan de generar la señal alterna, además contiene los 4 transformadores correspondientes a cada etapa del inversor. Por ello la caja es bastante pesada, por lo que se debe tener el debido cuidado cuando se transporta de un lugar a otro. El modulo principal esta construido con una base de metal y a su alrededor con acrílico transparente que permite ver los diferentes elementos y partes principales del inversor, por lo cual se recomienda que durante se este usando; tener la precaución de no golpear el acrílico ya que podría quebrarse. También el inversor contiene bornes en los cuales se pueden medir diferentes señales que son importantes para el análisis y comprensión del funcionamiento del inversor.

2.6. Descripción del Módulo Principal

A continuación se detalla las diferentes entradas que posee el Inversor para su alimentación DC y las protecciones por medio de fusibles, los cuales actuarán en caso de cortocircuitos o sobrecarga. En la figura G.1 se muestra la parte de atrás y en la figura G.2, la parte frontal, en la que se incluye un medidor de voltaje AC que mide el voltaje de salida del inversor. Los puntos de prueba se muestran en la figura G.3.

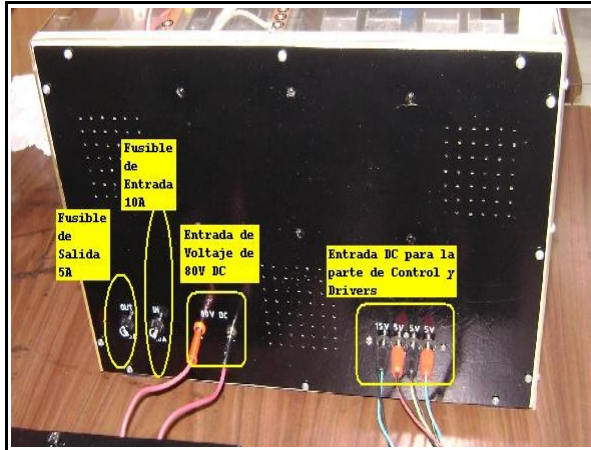


Figura G.1. Descripción de la Parte de atrás del Inversor



Figura G.2. Descripción de la parte frontal del Inversor

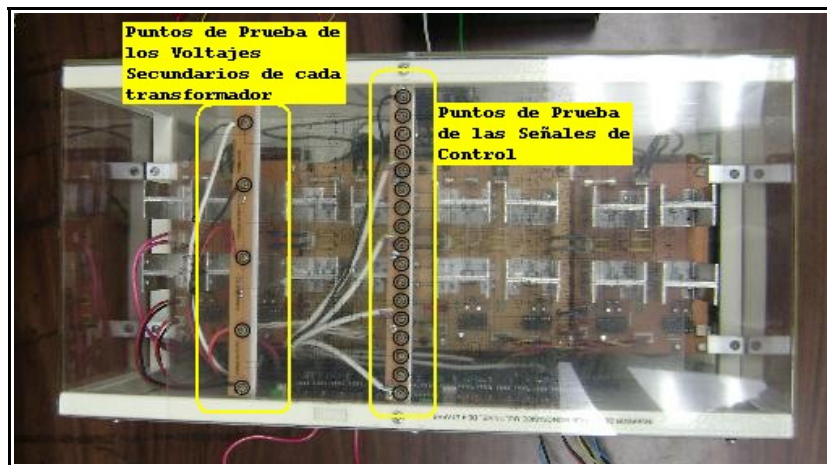


Figura G.3. Ubicación de los puntos de prueba del Inversor

III. PREPARACIÓN Y FUNCIONAMIENTO

En este capítulo se describe la puesta en marcha del inversor para que trabaje de forma óptima. Para ello debemos realizar las conexiones correctas de alimentación del inversor como se ilustra en la figura G.4 y figura G.5. Se debe tener cuidado en no conectar la fuente

de 15V en la entrada de 5V, ya que esto podría causar un daño permanente al inversor, tampoco se deben utilizar otras fuentes de voltaje continuo que tengan la misma referencia. Si por alguna razón se utilizan otras fuentes de voltaje DC, se debe asegurar que las referencias de tierras sean diferentes. Las referencias de tierras deben ser diferentes para generar aislamiento óptico entre la parte de control y de potencia, evitando así que el microcontrolador se dañe por alguna falla originada en la parte de potencia.

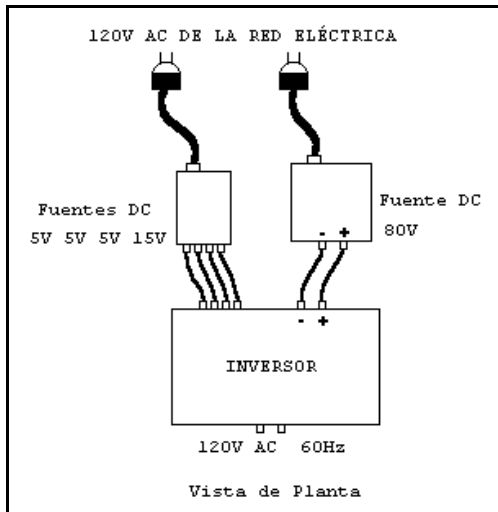


Figura G.4. Esquema de conexiones del inversor.



Figura G.5. Forma de Conectar las fuentes DC al inversor

En la cara superior del inversor se incluyen puntos de prueba, los cuales sirven para medir las señales de control y el voltaje en lado secundario de cada transformador. También se incluye el diagrama esquemático del inversor y en él se indican los puntos de medición, de manera que el usuario puede interpretar o verificar que puntos de medición esta realizando en el circuito inversor.

Nota Importante: Las mediciones que se realicen en los puntos de control pueden hacerse ocupando dos o más canales de un osciloscopio; pero en el caso de los puntos de medición de los voltajes secundarios de cada etapa se debe realizar la medición ocupando exclusivamente sólo un canal del osciloscopio, de no hacerse se haría un cortocircuito en el inversor; esto se debe a que el osciloscopio utiliza la misma referencia de tierra. En conclusión ocupar sólo un canal para todas las mediciones excepto en los puntos de control donde si podemos ocupar uno o más canales. Tampoco se deben medir los puntos de control y los demás puntos de prueba al mismo tiempo.

En la figura G.6 se ilustra la forma correcta de realizar las diferentes mediciones.

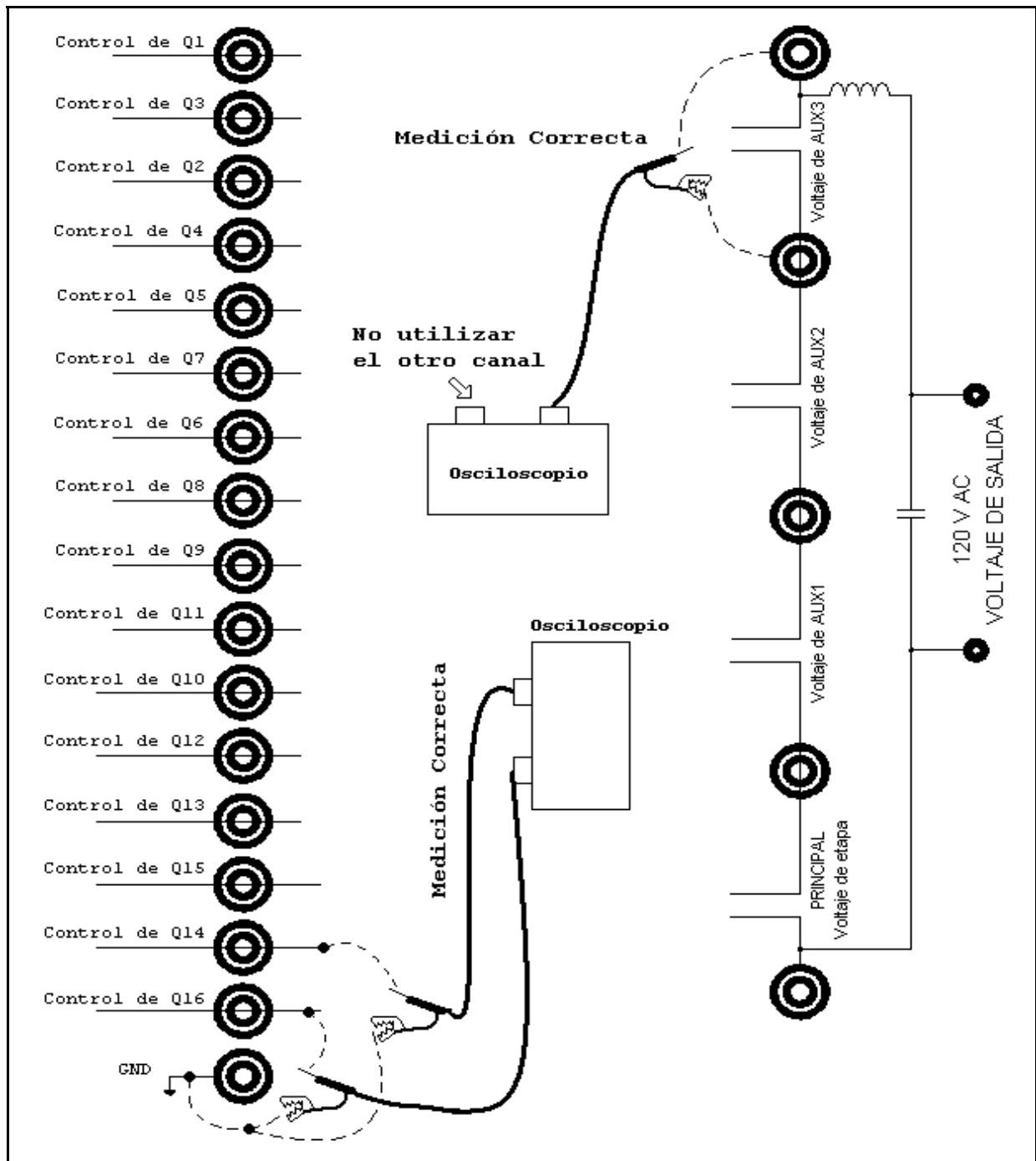


Figura G.6. Forma correcta de medir las diferentes señales.

A continuación en la figura G.7 se ilustran las formas de las señales que se obtienen al medir en cada uno de los puntos de prueba en lado secundario de cada transformador.

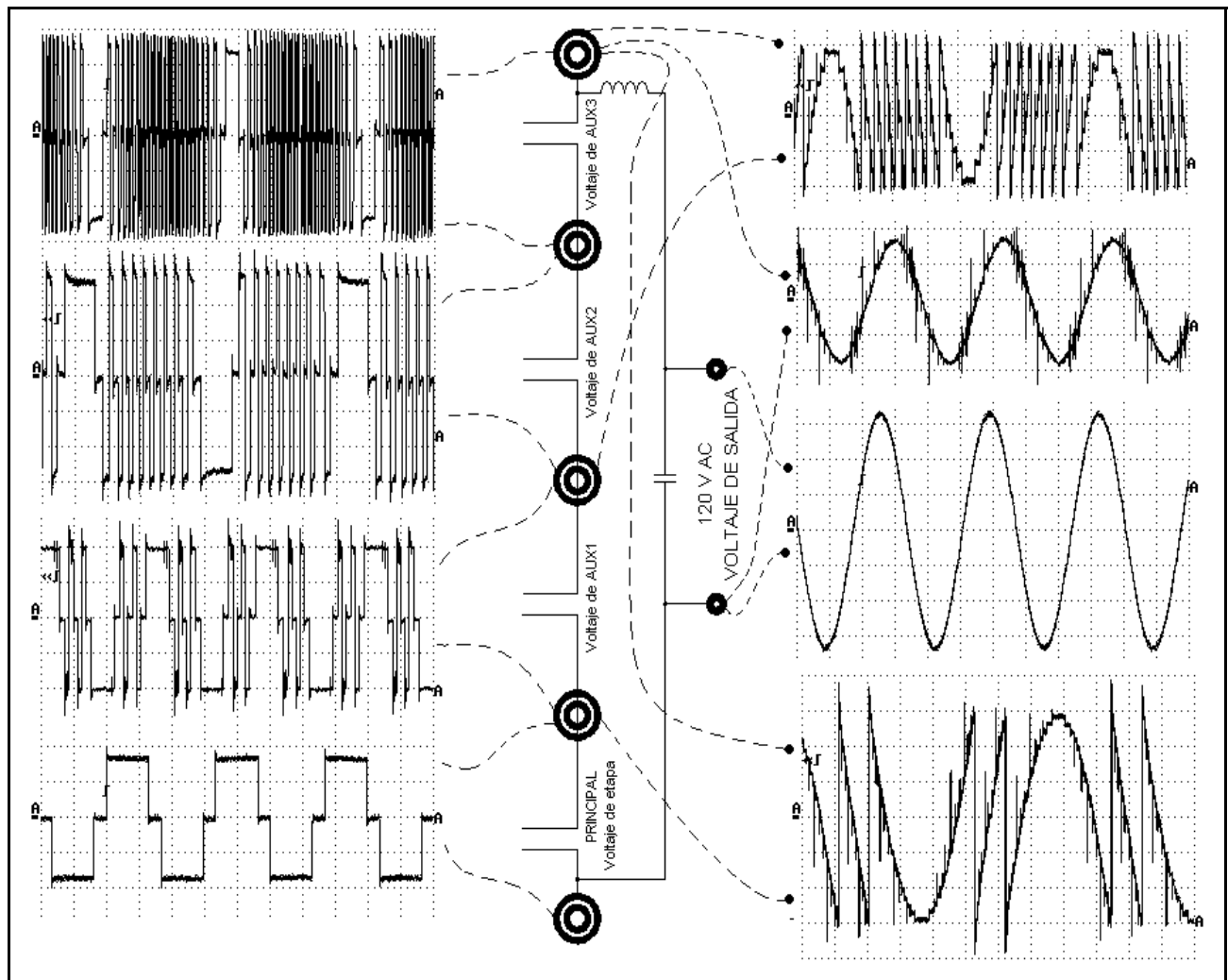


Figura G.7. Señales en los puntos de prueba de lado secundario de cada transformador.

VI. GUIA DE REPARACIÓN

En este capítulo se describen algunos pasos a seguir en el caso de existir una falla o daño en el inversor que altere su funcionamiento de manera permanente. Estos pasos se detallan a continuación:

1. El primer paso consiste en verificar y rastrear las señales de control de cada uno de los IGBT'S en el circuito de control, para ello se debe medir y corroborar la forma de la señal. Raras veces se arruina la parte de control, lo más común es que falle el circuito de potencia, ya que esta presenta la parte más sensible y difícil de proteger, nos referimos específicamente a los elementos bootstrap del driver IR2113. Si el circuito de control funciona correctamente entonces pasamos al segundo paso.

2. El segundo paso consiste en verificar el funcionamiento de cada una de las etapas del inversor por separado, para ello se deben desconectar unas de otras, de esta forma determinaremos cuantas y cuales funcionan bien. La prueba consiste en medir a la salida del puente 'H' la forma de onda correspondiente a esa etapa. Si todas las etapas funcionan correctamente entonces el problema se encuentra en los transformadores, por lo que habría que verificar el funcionamiento de cada uno.
3. Si encontramos una o más etapas en mal funcionamiento, entonces verificamos en ella, el diodo bootstrap, el cual se encuentra cerca del driver IR2113, este diodo es bastante común en arruinarse, en la figura G.8 se ilustra la ubicación del diodo en la placa impresa.

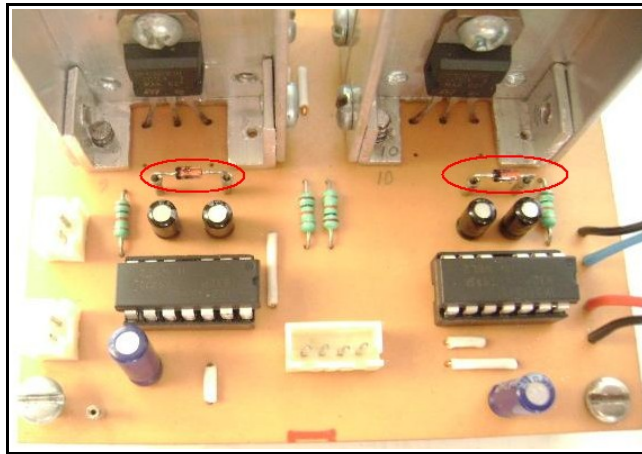


Figura G.8. Ubicación del diodo Bootstrap.

4. Si los diodos bootstrap están buenos entonces pasamos a verificar el driver IR2113, La forma de probarlo es muy sencilla, en la figura G.9 se puede observar el esquemático a construir para la prueba, el cual ha sido extraído de una de las etapas correspondientes a la configuración del driver IR2113 utilizada para controlar el IGBT superior e inferior del puente 'H' en el inversor implementado. Para realizar la prueba debemos inyectar una señal de 60HZ o más en los pines 10 y 12; en la salida del driver en los pines 7 y 1, medimos la forma de onda obtenida la cual debe ser la misma que en la entrada excepto por que la magnitud debe ser de 15V, tal como se muestra en la figura G.9. El diodo bootstrap puede ser el 1N4148 ó el FR107; en la fotografía aparece el 1N4148, pero para mejores resultados ocupar el FR107.

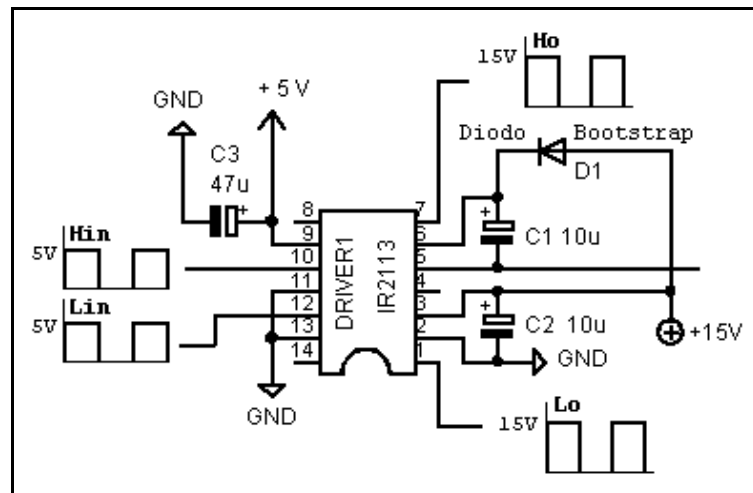


Figura G.9. Circuito para probar el driver IR2113.

5. Si todas las pruebas anteriores han resultado positivas entonces solo queda por probar el IGBT de o las etapas que funcionan incorrectamente, para ello construimos el circuito del diagrama esquemático que se muestra en la figura G.10. La prueba se realiza alimentando con 15V al IGBT entre compuerta y emisor; en esta condición el IGBT debe conducir y encendiendo el LED lo que significa que el IGBT esta bueno. Si el LED no enciende significa que esta malo. Otra forma de probar el IGBT es con el tester en medición de OHM, la resistencia medida entre cualquiera de sus pines debe ser igual a infinito, esto para el caso particular del IGBT que no tiene en su encapsulado el diodo de protección. Para los IGBT'S que si tienen diodo de protección la medida sólo varia cuando medimos entre emisor y colector, en esta condición habrá cierta resistencia indicando que el diodo de protección esta conduciendo, pero en cualquier otra medición entre los demás pines indicará una resistencia muy elevada.

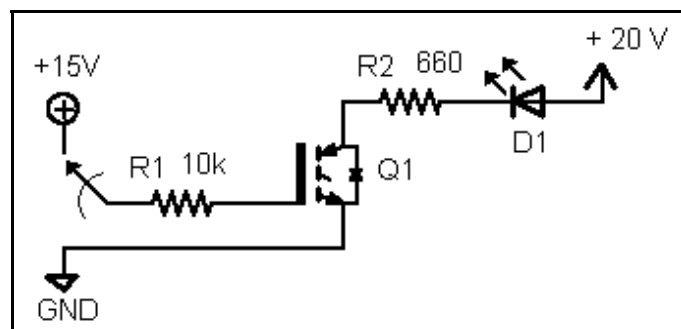


Figura G.10. Diagrama esquemático para probar el IGBT.

ANEXO H: GUÍAS DE LABORATORIO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



**GUIA # 1: SIMULACIÓN DEL INVERSOR MONOFÁSICO DE
CUATRO ETAPAS EN PSIM**

CATEDRATICO POR:
ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL 2010

ÍNDICE

Contenido	Página
1. Objetivos	107
1.1. Objetivo General	107
1.2. Objetivos Específicos	107
2. Marco Teórico	108
2.1. Introducción	108
2.2. Definición: Numero de niveles de un convertidor	108
2.3. Topologías Multinivel	109
2.4. Inversor de puente completo o puente H y su conexión en cascada	110
2.5. Calculo de los voltajes secundarios	112
3. Procedimiento	113
4. Asignaciones	121

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Simular el inversor monofásico de cuatro etapas haciendo uso del software PSIM.

1.2. Objetivos Específicos

- Obtener a través de simulación las señales de control para cada uno de los IGBT's del circuito del inversor monofásico de cuatro etapas.
- Obtener por medio de simulación los voltajes del lado secundario de los transformadores de cada etapa para el inversor monofásico de cuatro etapas.
- Obtener por medio de simulación la suma de los voltajes secundarios que dan origen a la señal de salida del inversor monofásico de cuatro etapas.
- Obtener por medio de simulación la señal de salida del inversor monofásico de cuatro etapas.
- Comparar por medio de simulación la señal de salida del inversor monofásico de cuatro etapas con una señal sinusoidal ideal y obtener el THD de la señal de salida del inversor monofásico de cuatro etapas y concluir a partir de este.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

En la actualidad los convertidores multinivel son una excelente opción para la conversión de energía en el rango de media-alta potencia, especialmente desde un punto de vista económico que hoy en día es quizá el factor con mayor peso a la hora de llevar a cabo cualquier proyecto. Los convertidores de potencia son la solución actual para poder adaptar las señales de control a los niveles de potencia requeridos por los diferentes procesos industriales accionados eléctricamente. Sin embargo, algunos de estos procesos han ido aumentando sus requerimientos de potencia (producción a mayor escala, procesos industriales nuevos y más grandes, etc.), hecho que no ha ido a la par de los semiconductores, los que no pueden operar a los niveles de voltaje requeridos. Por ello se han desarrollado nuevos circuitos de potencia, llamados Convertidores Multinivel, basados en arreglos de semiconductores y condensadores para alcanzar los valores de tensión deseados. Con ello no sólo se abre un nuevo campo que habilita aplicaciones industriales de mayor potencia, sino que además se puede aprovechar los grados de libertad adicionales que brinda el tener más semiconductores (por lo tanto más decisiones de control), para mejorar otros aspectos, como por ejemplo, el contenido armónico de la señal generada por el convertidor, disminuir los cambios amplios de tensión ($dv/dt's$), reducir filtros de salida, entre otras.

Por lo tanto, dada la importancia actual de los inversores se lleva a cabo esta práctica de laboratorio que consiste en la simulación de un inversor monofásico de cuatro etapas, haciendo uso del simulador para circuitos de potencia PSIM, a través de dicha simulación se obtendrán las señales de control para cada uno de los IGBT's que componen las diferentes etapas del inversor, así como también los voltajes en el lado secundario de los transformadores cada etapa, la suma de los mismos para observar como estos dan origen a la señal de salida del inversor, entre otras.

2.2. Definición: Número de niveles de un convertidor

Es la cantidad de valores de tensión diferentes que es capaz de generar el convertidor entre su salida y un punto interno de él, usualmente conocido como neutro N. En la figura H.1 se aprecian circuitos simplificados que ilustran el principio de funcionamiento que se pretende emular con los semiconductores para generar las formas de onda respectivas. Para efectos prácticos se denominará como convertidores multinivel a todos aquellos capaces de generar más de dos niveles.

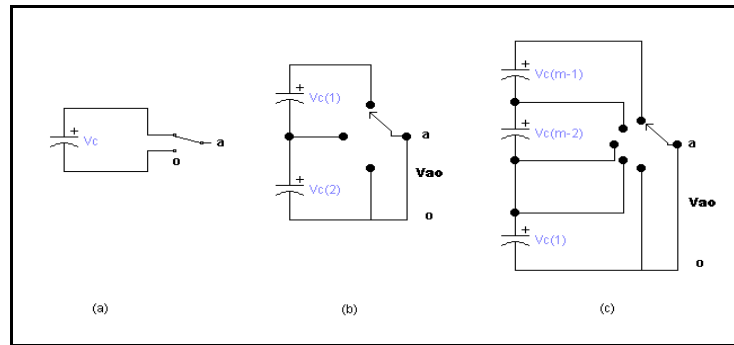


Figura H.1. Niveles de un convertidor: a) 2 Niveles; b) 3 Niveles; c) m Niveles.

Por lo tanto, en base a la figura H.1 puede generalizarse una fórmula para el número de niveles de la señal de salida m de un inversor con n fuentes de voltaje, de la siguiente forma: $m=n+1$

2.3. Topologías Multinivel

Existen diversos circuitos de potencia que pueden producir más de dos niveles de tensión de salida. Sin embargo, por razones técnicas y de costo los más aceptados en la industria y a nivel educativo pueden mencionarse las siguientes:

- Inversor Acoplado por Diodo (Diode-Clamped Inverter) mostrado en la figura H.2a en su configuración típica de 3 niveles.
- Inversor Acoplado por Condensador (Capacitor Clamped Inverter) mostrado en la figura H.2b en su configuración típica de 3 niveles.
- Inversor Puente H en cascada, mostrado en la figura H.2c con sólo dos etapas y 5 niveles.

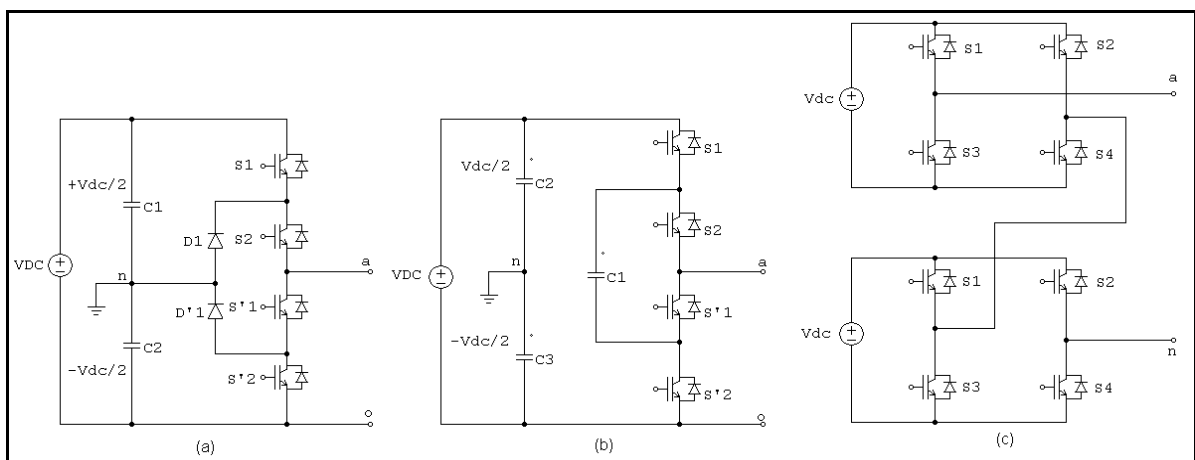


Figura H.2. Inversores Multinivel: a) Acoplado por Diodo (Diode-Clamped Inverter) de 3 niveles; b) Acoplado por Condensador (Capacitor Clamped Inverter) de 3 niveles; c) Puente H en cascada de 5 nivel.

2.4. Inversor de Puente Completo o Puente H y su Conexión en Cascada

El inversor de puente completo o puente 'H', que se presenta en la figura H.3, esta constituido por cuatro interruptores (S_1 , S_2 , S_3 y S_4), y su estrategia de control se define de la siguiente forma: cuando los interruptores S_1 y S_4 se activan simultáneamente, el voltaje de entrada V_s aparece a través de la carga. Si los interruptores S_2 y S_3 se activan al mismo tiempo el voltaje a través de la carga se invierte y adquiere el valor de $-V_s$.

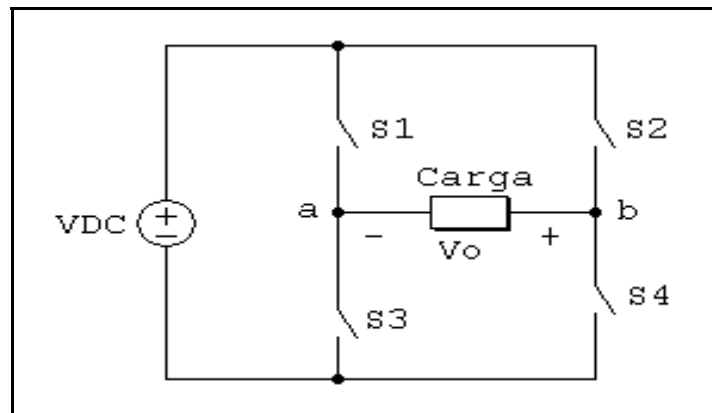


Figura H.3. Inversor de Puente Completo o Puente H.

Los posibles estados de conmutación se muestran a continuación en la tabla H.1.

Interruptores Cerrados	Voltaje V_{ab}
S_1 y S_4	$+V_s$
Todos abiertos	0
S_2 y S_3	$-V_s$

Tabla H.1. Control de un inversor de puente completo.

Estos puentes 'H' pueden conectarse en cascada, ya sea en serie o en paralelo, y dependiendo del número de puentes 'H' o etapas que se conecten así será el número de niveles de tensión que se obtengan a la salida. Además, el tipo de inversores puede separarse en simétricos y asimétricos. Los simétricos tienen todas las fuentes independientes con el mismo valor de tensión, mientras que los asimétricos tienen las fuentes independientes con diferentes valores de tensión.

Para entender mejor el funcionamiento del inversor multinivel se analizará una etapa por separado. En la figura H.4 se observa un

inversor de puente H. Debe considerarse que S_1 y S_3 nunca deben estar activos al mismo tiempo, ya que de estarlo se produciría un cortocircuito en la fuente de alimentación, lo mismo se aplica para S_2 y S_4 , entonces se tienen los siguientes niveles de salida:

$$v_{aN} = v_{dc} \text{ cuando : } S_1 = 1, S_2 = 0, S_3 = \bar{S}_1 = 0, S_4 = \bar{S}_2 = 1$$

$$v_{aN} = 0 \text{ cuando : } S_1 = S_2 = x \text{ y } S_3 = S_4 = \bar{x},$$

donde x puede tomar el valor de 0 ó 1

$$v_{aN} = -v_{dc} \text{ cuando : } S_1 = 0, S_2 = 1, S_3 = \bar{S}_1 = 1, S_4 = \bar{S}_2 = 0$$

Donde para el valor de "1" representa al transistor como un interruptor en "ON" o "cerrado" (color azul) y el valor de "0" representa al transistor como un interruptor "OFF" o "abierto" (color gris). Se obtienen tres niveles de tensión diferentes. Note que el nivel cero puede ser generado de dos formas, lo que es conocido como redundancia del inversor. Los cuatro estados se encuentran ilustrados con sus respectivos circuitos equivalentes en la figura H.4.

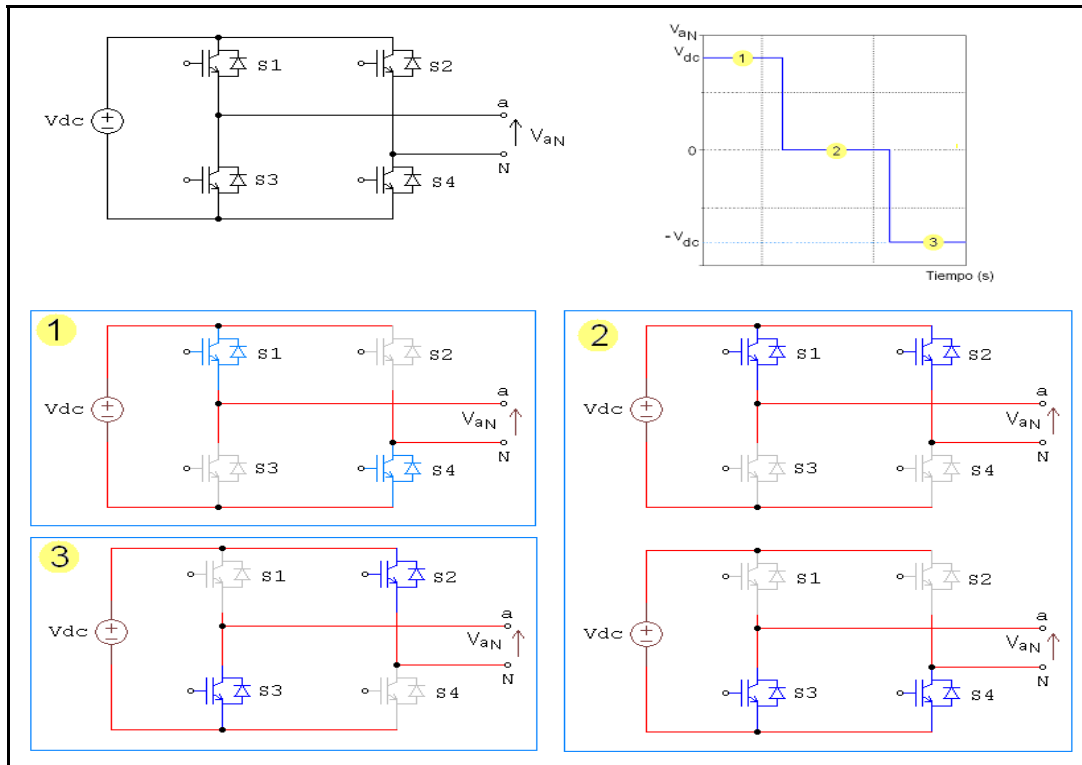


Figura H.4. Estados de conmutación de una etapa del puente H.

Si ahora se conectan en serie varios de estos inversores puente H, como por ejemplo los cuatro de la figura H.5, y se genera una

secuencia apropiada entre los tres niveles de cada etapa, se puede generar una salida multinivel total como la ilustrada en la figura H.5b.

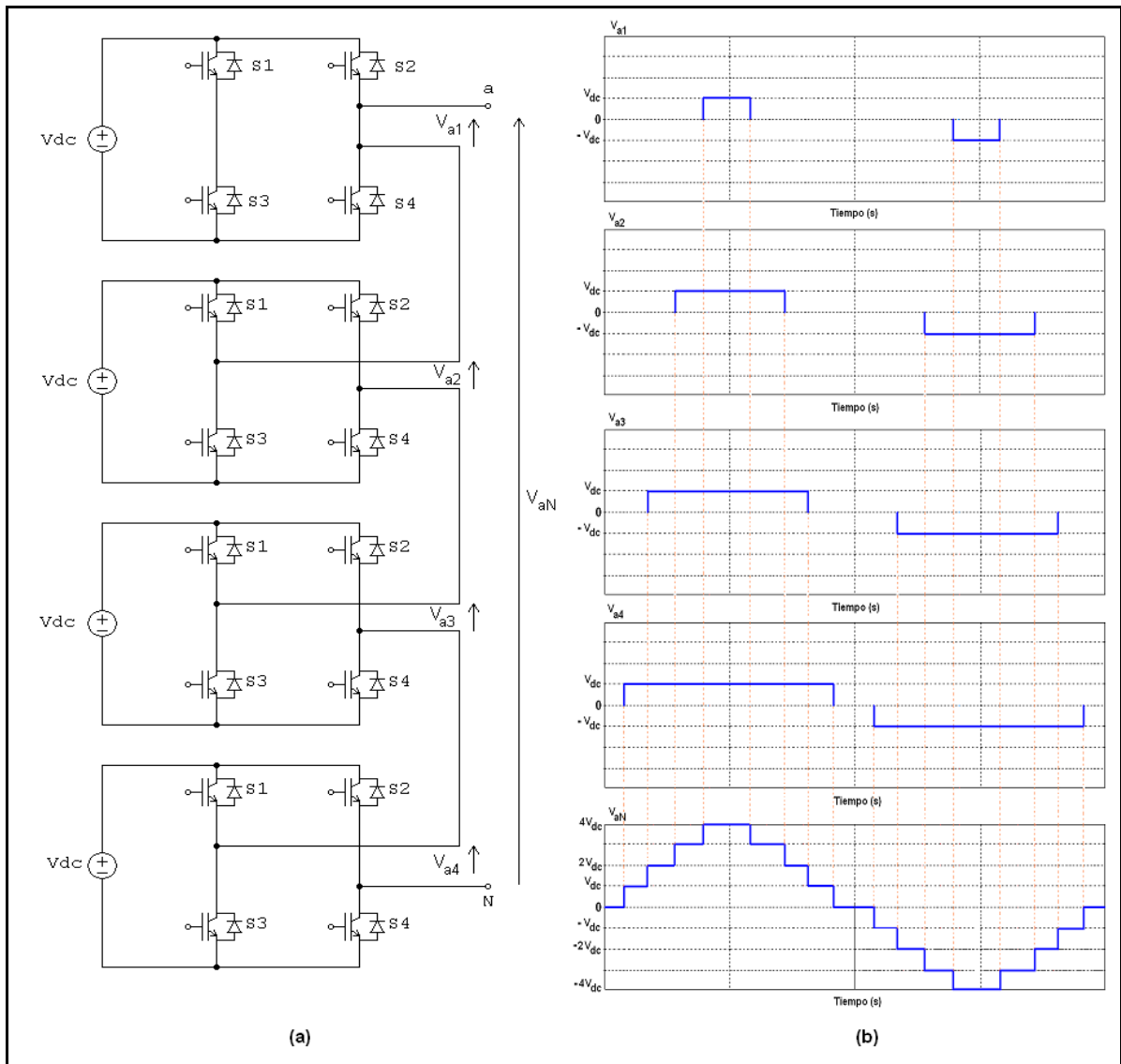


Figura H.5. a) Inversor multinivel puente H monofásico en cascada de 4 etapas, b) Voltajes de salida individual por etapa, y voltaje total generado de 9 niveles.

2.5. Cálculo de los voltajes secundarios

Para calcular los voltajes secundarios, necesitamos primero definir el voltaje de salida AC que deseamos nos genere el inversor, éste valor como ya se menciono es de 120V rms, aplicando las formulas antes vistas, obtenemos los resultados siguientes:

$$V_{MAX} = \sqrt{2} * V_{OUT} = \sqrt{2} * 120 = 169.7056V$$

- Voltaje secundario de Auxiliar 3: $V_{A3} = \frac{1}{40} V_{MAX} = \frac{1}{40} * 169.7056$
 $V_{A3} = 4.2426V$
- Voltaje secundario de Auxiliar 2: $V_{A2} = 3 * V_{A3} = 3 * 4.2426$
 $V_{A2} = 12.7279V$
- Voltaje secundario de Auxiliar 1: $V_{A1} = 3 * V_{A2} = 3 * 12.7279$
 $V_{A1} = 38.1837V$
- Voltaje secundario de Principal: $V_p = 3 * V_{A1} = 3 * 38.1837$
 $V_p = 114.5512V$

Teniendo en cuenta que el voltaje de entrada es de 80V continuos y con los voltajes secundarios ya definidos podemos encontrar la relación de voltajes para cada transformador:

- Transformador Auxiliar 3: $a_{A3} = \frac{V_{IN}}{V_{A3}} = 40 \frac{V_{IN}}{V_{MAX}} = 40 \frac{80}{169.7056}$
 $a_{A3} = 18.8561$
- Transformador Auxiliar 2: $a_{A2} = \frac{V_{IN}}{V_{A2}} = \frac{40}{3} \frac{V_{IN}}{V_{MAX}} = \frac{40}{3} \frac{80}{169.7056}$
 $a_{A2} = 6.2853$
- Transformador Auxiliar 1: $a_{A1} = \frac{V_{IN}}{V_{A1}} = \frac{40}{9} \frac{V_{IN}}{V_{MAX}} = \frac{40}{9} \frac{80}{169.7056}$
 $a_{A1} = 2.0951$
- Transformador Principal: $a_p = \frac{V_{IN}}{V_p} = \frac{40}{27} \frac{V_{IN}}{V_{MAX}} = \frac{40}{27} \frac{80}{169.7056}$
 $a_p = 0.6983$

3. PROCEDIMIENTO

Se recomienda antes de realizar la simulación leer el manual del simulador PSIM, lo cual permitirá familiarizarse con el mismo, facilitando el desarrollo de la práctica.

El circuito a simular se muestra a continuación en la figura H.6.

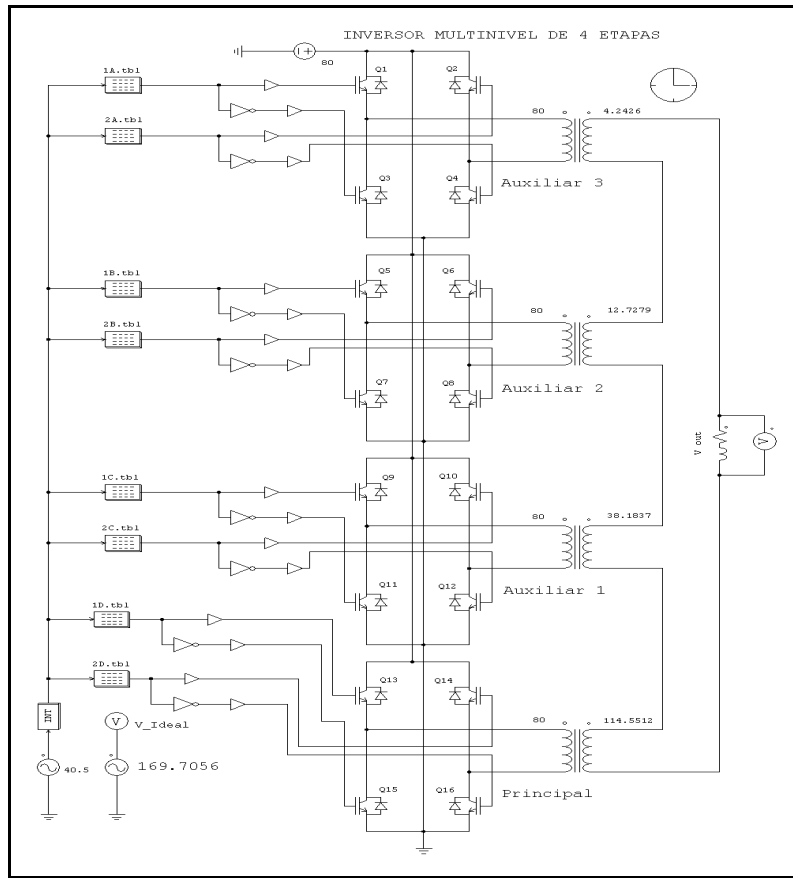


Figura H.6. Circuito a simular del inversor de 4 etapas.

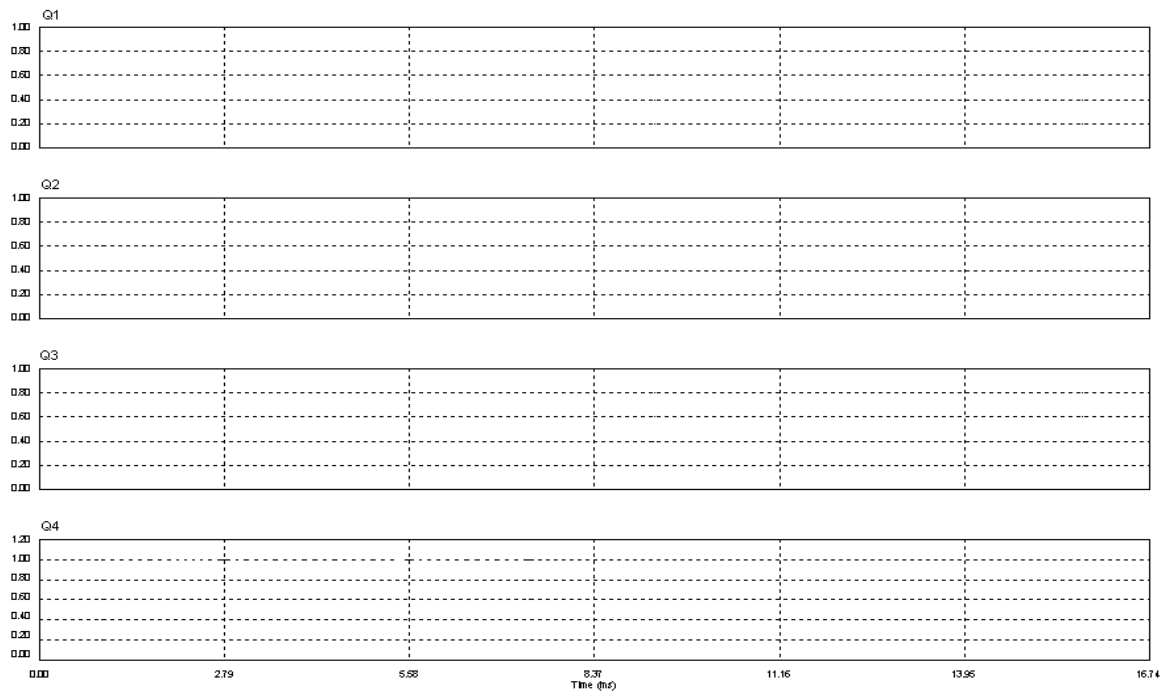
A continuación en la tabla H.2 se muestra el contenido de los archivo *.tbl, el cual es requerido por el bloque lookup table, que tiene como función seleccionar el valor de salida correspondiente al valor de entrada, cuyos valores se encuentran en dicho archivo y ordenados de tal manera que primero se escribe la entrada y luego la salida separados por coma(,). Para el caso de la simulación del inversor de 4 etapas, las entradas varían de -40 hasta 40 en pasos de 1 y las salidas sólo pueden ser 1 ó 0 (cero), como se observa en la tabla H.2. Cada bloque lookup table deberá tener su respectivo archivo *.tbl guardado en el mismo directorio donde se encuentra el archivo esquemático.

1A.tb1	2A.tb1	1B.tb1	2B.tb1	1C.tb1	2C.tb1	1D.tb1	2D.tb1
-40, 0	-40, 1	-40, 0	-40, 1	-40, 0	-40, 1	-40, 0	-40, 1
-39, 1	-39, 1	-39, 0	-39, 1	-39, 0	-39, 1	-39, 0	-39, 1
-38, 1	-38, 0	-38, 0	-38, 1	-38, 0	-38, 1	-38, 0	-38, 1
-37, 0	-37, 1	-37, 1	-37, 1	-37, 0	-37, 1	-37, 0	-37, 1
-36, 1	-36, 1	-36, 1	-36, 1	-36, 0	-36, 1	-36, 0	-36, 1
-35, 1	-35, 0	-35, 1	-35, 1	-35, 0	-35, 1	-35, 0	-35, 1
-34, 0	-34, 1	-34, 1	-34, 0	-34, 0	-34, 1	-34, 0	-34, 1
-33, 1	-33, 1	-33, 1	-33, 0	-33, 0	-33, 1	-33, 0	-33, 1
-32, 1	-32, 0	-32, 1	-32, 0	-32, 0	-32, 1	-32, 0	-32, 1
-31, 0	-31, 1	-31, 0	-31, 1	-31, 1	-31, 1	-31, 0	-31, 1
-30, 1	-30, 1	-30, 0	-30, 1	-30, 1	-30, 1	-30, 0	-30, 1
-29, 1	-29, 0	-29, 0	-29, 1	-29, 1	-29, 1	-29, 0	-29, 1
-28, 0	-28, 1	-28, 1	-28, 1	-28, 1	-28, 1	-28, 0	-28, 1

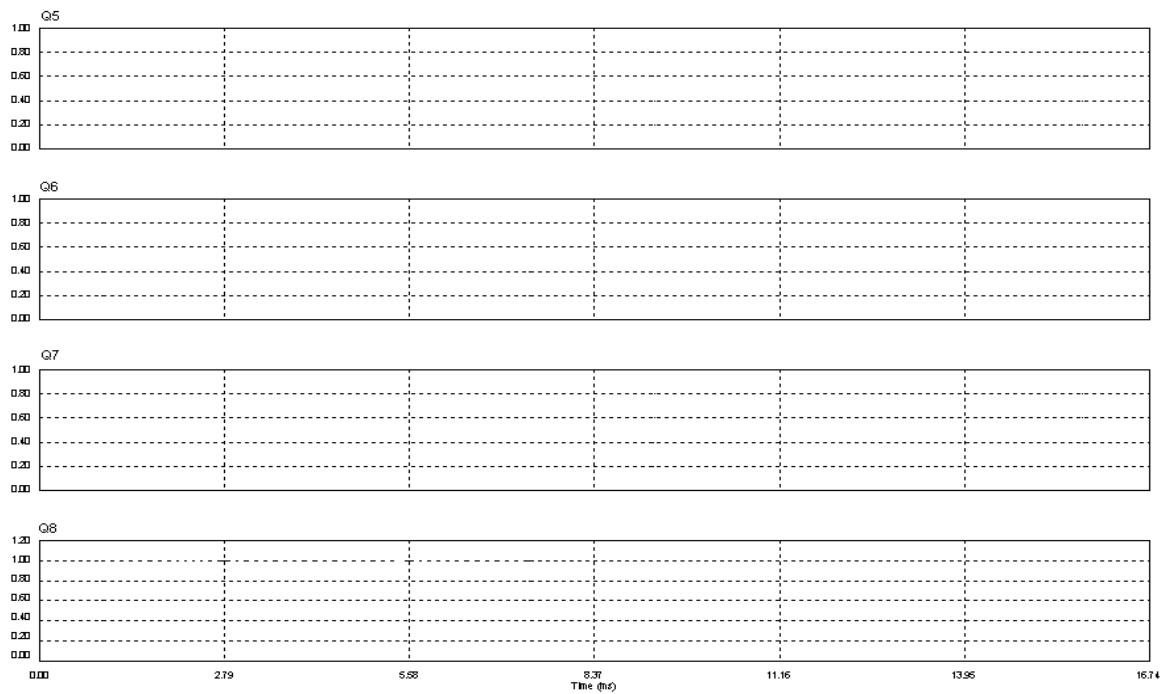
1A.tbl	2A.tbl	1B.tbl	2B.tbl	1C.tbl	2C.tbl	1D.tbl	2D.tbl
-27, 1	-27, 1	-27, 1	-27, 1	-27, 1	-27, 1	-27, 0	-27, 1
-26, 1	-26, 0	-26, 1	-26, 1	-26, 1	-26, 1	-26, 0	-26, 1
-25, 0	-25, 1	-25, 1	-25, 0	-25, 1	-25, 1	-25, 0	-25, 1
-24, 1	-24, 1	-24, 1	-24, 0	-24, 1	-24, 1	-24, 0	-24, 1
-23, 1	-23, 0	-23, 1	-23, 0	-23, 1	-23, 1	-23, 0	-23, 1
-22, 0	-22, 1	-22, 0	-22, 1	-22, 1	-22, 0	-22, 0	-22, 1
-21, 1	-21, 1	-21, 0	-21, 1	-21, 1	-21, 0	-21, 0	-21, 1
-20, 1	-20, 0	-20, 0	-20, 1	-20, 1	-20, 1	-20, 0	-20, 1
-19, 0	-19, 1	-19, 1	-19, 1	-19, 1	-19, 0	-19, 0	-19, 1
-18, 1	-18, 1	-18, 1	-18, 1	-18, 1	-18, 0	-18, 0	-18, 1
-17, 1	-17, 0	-17, 1	-17, 1	-17, 1	-17, 0	-17, 0	-17, 1
-16, 0	-16, 1	-16, 1	-16, 0	-16, 1	-16, 0	-16, 0	-16, 1
-15, 1	-15, 1	-15, 1	-15, 0	-15, 1	-15, 0	-15, 0	-15, 1
-14, 1	-14, 0	-14, 1	-14, 0	-14, 1	-14, 1	-14, 0	-14, 1
-13, 0	-13, 1	-13, 0	-13, 1	-13, 0	-13, 1	-13, 1	-13, 1
-12, 1	-12, 1	-12, 0	-12, 1	-12, 0	-12, 1	-12, 1	-12, 1
-11, 1	-11, 0	-11, 0	-11, 1	-11, 0	-11, 1	-11, 1	-11, 1
-10, 0	-10, 1	-10, 1	-10, 1	-10, 0	-10, 1	-10, 1	-10, 1
-9, 1	-9, 1	-9, 1	-9, 1	-9, 0	-9, 1	-9, 1	-9, 1
-8, 1	-8, 0	-8, 1	-8, 1	-8, 0	-8, 1	-8, 1	-8, 1
-7, 0	-7, 1	-7, 1	-7, 0	-7, 0	-7, 1	-7, 1	-7, 1
-6, 1	-6, 1	-6, 1	-6, 0	-6, 0	-6, 1	-6, 1	-6, 1
-5, 1	-5, 0	-5, 1	-5, 0	-5, 0	-5, 1	-5, 1	-5, 1
-4, 0	-4, 1	-4, 0	-4, 1	-4, 1	-4, 1	-4, 1	-4, 1
-3, 1	-3, 1	-3, 0	-3, 1	-3, 1	-3, 1	-3, 1	-3, 1
-2, 1	-2, 0	-2, 0	-2, 1	-2, 1	-2, 1	-2, 1	-2, 1
-1, 0	-1, 1	-1, 1	-1, 1	-1, 1	-1, 1	-1, 1	-1, 1
0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1
1, 1	1, 0	1, 1	1, 1	1, 1	1, 1	1, 1	1, 1
2, 0	2, 1	2, 1	2, 0	2, 1	2, 1	2, 1	2, 1
3, 1	3, 1	3, 1	3, 0	3, 1	3, 1	3, 1	3, 1
4, 1	4, 0	4, 1	4, 0	4, 1	4, 1	4, 1	4, 1
5, 0	5, 1	5, 0	5, 1	5, 1	5, 0	5, 1	5, 1
6, 1	6, 1	6, 0	6, 1	6, 1	6, 0	6, 1	6, 1
7, 1	7, 0	7, 0	7, 1	7, 1	7, 0	7, 1	7, 1
8, 0	8, 1	8, 1	8, 1	8, 1	8, 0	8, 1	8, 1
9, 1	9, 1	9, 1	9, 1	9, 1	9, 0	9, 1	9, 1
10, 1	10, 0	10, 1	10, 1	10, 1	10, 0	10, 1	10, 1
11, 0	11, 1	11, 1	11, 0	11, 1	11, 0	11, 1	11, 1
12, 1	12, 1	12, 1	12, 0	12, 1	12, 0	12, 1	12, 1
13, 1	13, 0	13, 1	13, 0	13, 1	13, 0	13, 1	13, 1
14, 0	14, 1	14, 0	14, 1	14, 0	14, 1	14, 1	14, 0
15, 1	15, 1	15, 0	15, 1	15, 0	15, 1	15, 1	15, 0
16, 1	16, 0	16, 0	16, 1	16, 0	16, 1	16, 1	16, 0
17, 0	17, 1	17, 1	17, 1	17, 0	17, 1	17, 1	17, 0
18, 1	18, 1	18, 1	18, 1	18, 0	18, 1	18, 1	18, 0
19, 1	19, 0	19, 1	19, 1	19, 0	19, 1	19, 1	19, 0
20, 0	20, 1	20, 1	20, 0	20, 0	20, 1	20, 1	20, 0
21, 1	21, 1	21, 1	21, 0	21, 0	21, 1	21, 1	21, 0
22, 1	22, 0	22, 1	22, 0	22, 0	22, 1	22, 1	22, 0
23, 0	23, 1	23, 0	23, 1	23, 1	23, 1	23, 1	23, 0
24, 1	24, 1	24, 0	24, 1	24, 1	24, 1	24, 1	24, 0
25, 1	25, 0	25, 0	25, 1	25, 1	25, 1	25, 1	25, 0
26, 0	26, 1	26, 1	26, 1	26, 1	26, 1	26, 1	26, 0
27, 1	27, 1	27, 1	27, 1	27, 1	27, 1	27, 1	27, 0
28, 1	28, 0	28, 1	28, 1	28, 1	28, 1	28, 1	28, 0
29, 0	29, 1	29, 1	29, 0	29, 1	29, 1	29, 1	29, 0
30, 1	30, 1	30, 1	30, 0	30, 1	30, 1	30, 1	30, 0
31, 1	31, 0	31, 1	31, 0	31, 1	31, 1	31, 1	31, 0
32, 0	32, 1	32, 0	32, 1	32, 1	32, 0	32, 1	32, 0
33, 1	33, 1	33, 0	33, 1	33, 1	33, 0	33, 1	33, 0
34, 1	34, 0	34, 0	34, 1	34, 1	34, 0	34, 1	34, 0
35, 0	35, 1	35, 1	35, 1	35, 1	35, 0	35, 1	35, 0
36, 1	36, 1	36, 1	36, 1	36, 1	36, 0	36, 1	36, 0
37, 1	37, 0	37, 1	37, 1	37, 1	37, 0	37, 1	37, 0
38, 0	38, 1	38, 1	38, 0	38, 1	38, 0	38, 1	38, 0
39, 1	39, 1	39, 1	39, 0	39, 1	39, 0	39, 1	39, 0
40, 1	40, 0	40, 1	40, 0	40, 1	40, 0	40, 1	40, 0

Tabla H.2. Contenido de los archivos *.tbl de cada bloque lookup table.

Obtener las señales de control para cada uno de los IGBT's para la etapa Auxiliar 3 y realizar un bosquejo de estas.

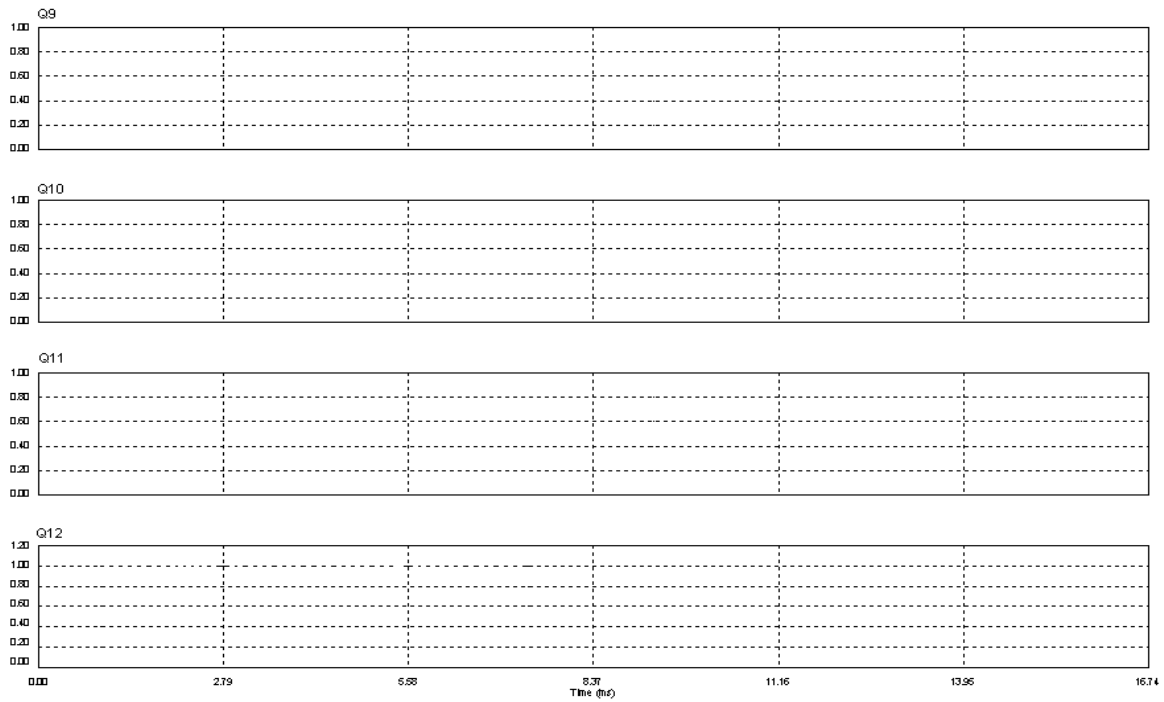


Obtener las señales de control para cada uno de los IGBT's para la etapa Auxiliar 2 y realizar un bosquejo de estas.

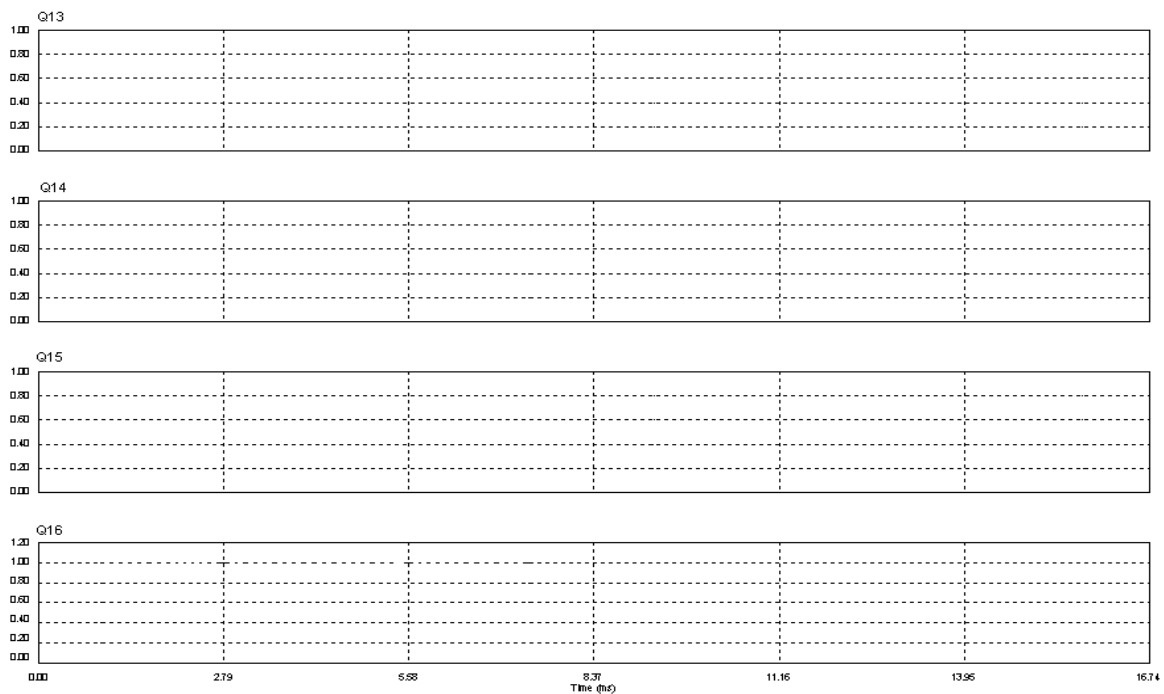


Obtener las señales de control para cada uno de los IGBT's para la etapa

Auxiliar 1 y realizar un bosquejo de estas.



Obtener las señales de control para cada uno de los IGBT's para la etapa etapa Principal y realizar un bosquejo de estas.

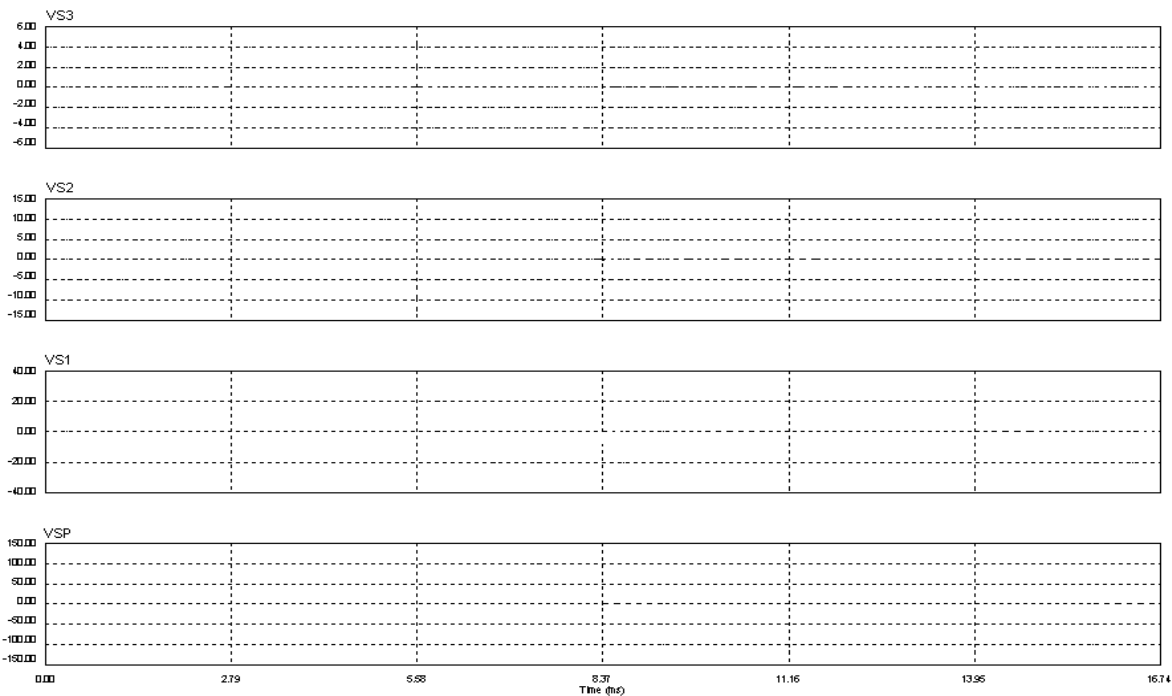


A partir de la simulación obtener los valores de frecuencia para cada una de las etapas y escribirlas en la siguiente tabla:

Etapas	Valor de frecuencia [Hz]
Auxiliar 3	
Auxiliar 2	
Auxiliar 1	
Principal	

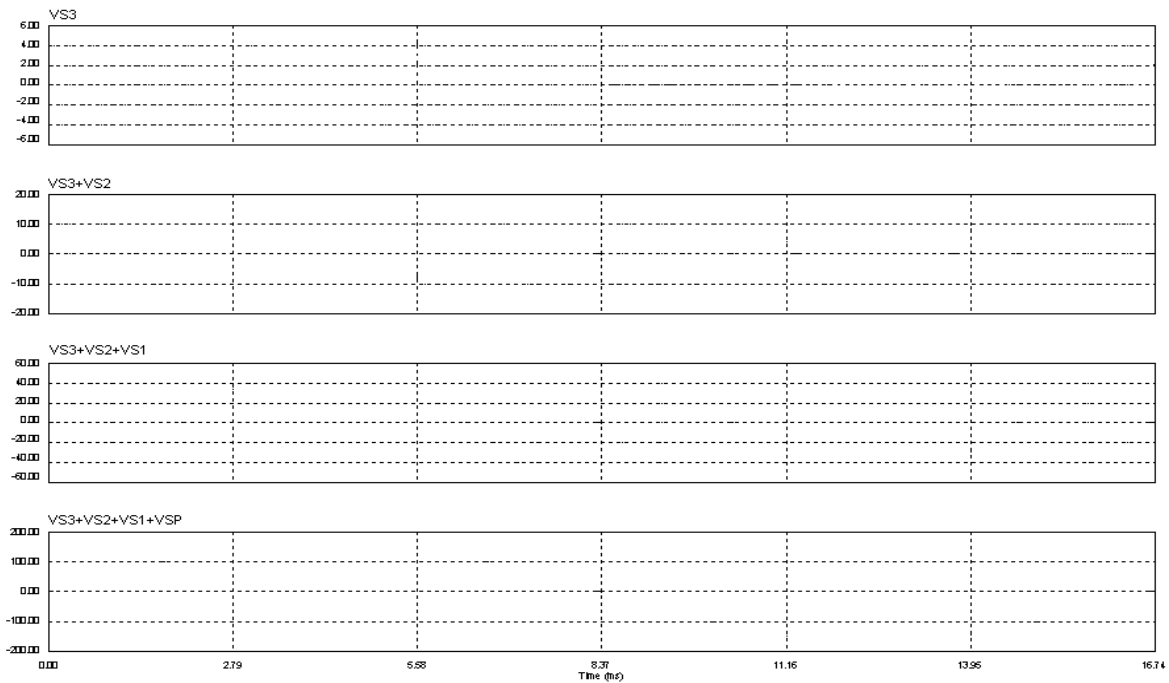
¿Qué etapa de control presenta la conmutación más alta?

Obtener los voltajes de lado secundario de los transformadores de cada etapa y dibujarlos a continuación:

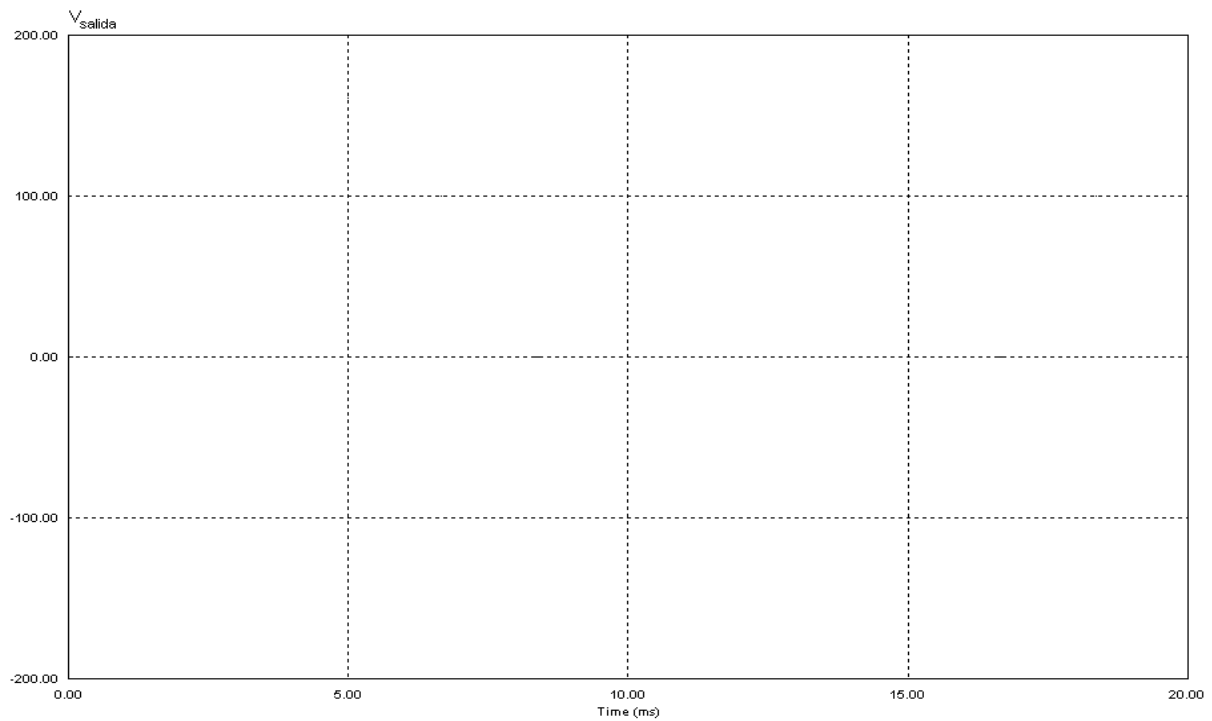


A partir de los gráficos anteriores, ¿cuál de las cuatro etapas proporciona la mayor potencia y por qué?

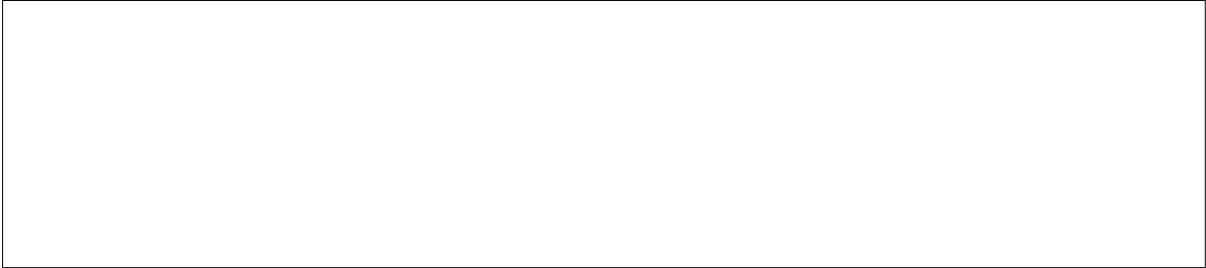
Obtener la suma de los voltajes secundarios de los transformadores para cada una de las etapas y realizar un bosquejo de estas:



Obtener la señal de salida del inversor de cuatro etapas y dibujarla:



Generar una señal sinusoidal ideal y compararla con la señal de salida de inversor de cuatro etapas, ¿qué puede concluirse a través de lo que se observa?



Obtener el valor del THD de la señal de salida del inversor de cuatro etapas:_____. ¿Qué puede concluirse a partir de este valor?



4. ASIGNACIONES

1.Simular la distribución de potencia ($I \times V$) para cada una de las cuatro etapas del inversor multinivel, alimentando cada una, con una carga resistiva de 25Ω , hacer un bosquejo de cada una de las señales observadas.

2.¿Qué etapa suministra la mayor potencia?.

3.¿Cuál es el porcentaje de potencia suministrado por cada etapa?

4.Investigar las principales diferencias entre el inversor multinivel y el inversor PWM. Escribir las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



**GUIA # 2: USO DEL MÓDULO DIDÁCTICO DEL INVERSOR
MONOFÁSICO DE CUATRO ETAPAS**

CATEDRATICO POR:
ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL 2010

ÍNDICE

Contenido	Página
5. Objetivos	123
5.1. Objetivo General	123
5.2. Objetivos Específicos	123
6. Marco Teórico	124
6.1. Introducción	124
6.2. Inversores Multinivel	125
6.3. Partes que Componen el Modulo Didáctico del Inversor Monofásico	127
6.3.1. Fuentes de Alimentación de 5V y 15V DC	127
6.3.2. Fuente de Alimentación de 80V DC	128
6.3.3. Cargas	129
6.3.4. Modulo Principal o Inversor Monofásico	129
6.3.5. Accesorios	130
7. Procedimiento	131

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

Usar el módulo didáctico del inversor monofásico de cuatro etapas para obtener diferentes tipos de señales que permitan la comprensión del funcionamiento de los inversores monofásicos multinivel.

5.2. Objetivos Específicos

- Obtener las señales de control para cada uno de los IGBT's del circuito del inversor monofásico de cuatro etapas.
- Obtener los voltajes del lado secundario de los transformadores de cada etapa para del inversor monofásico de cuatro etapas.
- Obtener la suma de los voltajes secundarios que dan origen a la señal de salida del inversor monofásico de cuatro etapas.
- Obtener la señal de salida del inversor monofásico de cuatro etapas.
- Alimentar cargas resistivas e inductivas por medio del inversor monofásico de cuatro etapas y observar el comportamiento del mismo.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Introducción

Recientemente los convertidores multinivel se han consolidado como una opción competitiva para la conversión de energía en el rango de media-alta potencia, principalmente desde el punto de vista económico, que en la actualidad es uno de los factores que más pesa a la hora de realizar un proyecto. Esta competitividad de la que hablamos se logra gracias a la capacidad de estos inversores para generar grandes cantidades de voltaje y corriente partiendo de topologías integradas de dispositivos semiconductores relativamente económicos y de uso comercial.

Los convertidores multinivel utilizan técnicas muy variadas para la conversión de energía, desde topologías básicas como el inversor de medio puente y puente completo, hasta convertidores con conexión en cascada de puentes 'H'. El uso de estos convertidores aplicado a diferentes áreas en la industria ha sido de vital importancia, tal es el caso de fuentes de potencia (UPS'S, calentadores por inducción, soldadores-cortadoras, fuentes de voltaje conmutadas, etc.) y drivers para motores (activación de robots, aire acondicionado, elevadores, servos de AC, etc.).

En la actualidad se esta utilizando mucho la técnica multinivel para el diseño de inversores de voltaje puesto que presenta características mejores comparadas con la técnica convencional PWM (Modulación por Ancho de Pulso), algunas de estas características son un contenido armónico menor, utilización de transistores de menor velocidad de conmutación, permite salidas de voltaje altos, entre otras.

Dado lo anterior, en esta guía se presenta como una continuación de guía 1: "Simulación en PSIM del Inversor Monofásico de Cuatro Etapas", y es una continuación, porque aquí se obtendrán de forma práctica, a través del módulo del inversor monofásico de cuatro etapas las señales que se obtuvieron por medio de simulación previamente, entre estas señales podemos encontrar entre otras, el control de cada uno de los IGBT's que conforman el inversor, las señales en el lado secundario de los transformadores, así como la sumatoria de cada uno de estos para observar como se da origen a la señal de salida del inversor. Además se alimentarán cargas resistivas e inductivas para observar el comportamiento del inversor monofásico de cuatro etapas ante este tipo de cargas.

6.2. Inversores Multinivel

Existen dos formas de generar una señal alterna en los inversores multinivel, la primera consiste en utilizar "n" fuentes por "n" etapas del inversor, es decir una fuente por cada etapa. La segunda opción consiste en utilizar transformadores a la salida de cada una de las etapas del inversor, dicho de otra manera "n" transformadores por "n" etapas. Como puede verse en la figura H.7.

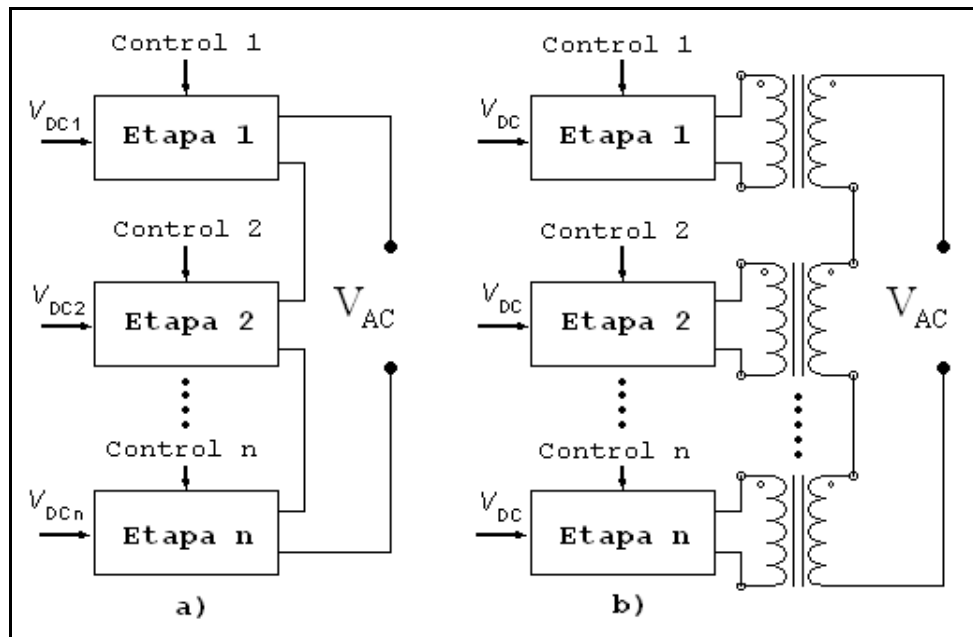


Figura H.7. Dos formas de generar una señal alterna, a) Con varias fuentes de DC y b) Con una fuente de DC.

Aquí se utiliza la segunda opción, ocupando una sola fuente de voltaje DC de 80V, esperando obtener a la salida un voltaje alterno de 120V AC.

Las etapas de un inversor multinivel se refieren básicamente al número de puentes 'H' utilizados, así por ejemplo un inversor de 2 etapas, utiliza 2 puentes 'H'; uno de 3 etapas utiliza 3 puentes 'H' y así sucesivamente. Un puente 'H' es llamado así por la forma como se representa esquemáticamente, adopta una forma similar a la de una H. Se utiliza este tipo de estructura principalmente para invertir la polaridad del voltaje de salida y de esta forma cambiar el sentido de giro de un motor DC. En la figura H.8 se presenta el esquema de un puente 'H'. El puente 'H' está formado por 4 transistores de potencia, los cuales pueden ser IGBT ó MOSFET, conectados uno sobre otro y estos a su vez en paralelo con otros dos transistores conectados de la misma manera. La H se forma cuando se conecta la carga en sus terminales de salida (V_{SAL}).

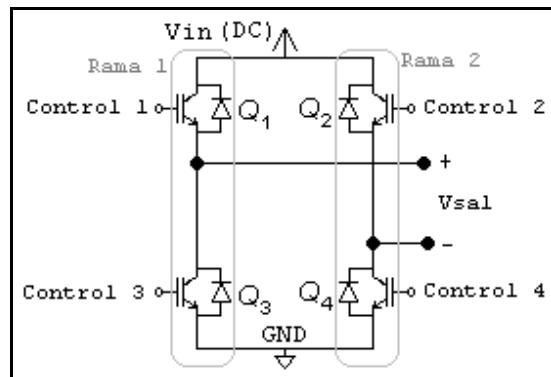


Figura H.8. Puente H con transistores IGBT.

Los inversores multinivel de n etapas, requieren de transformadores a la salida del puente 'H', con ello se logra generar un determinado valor de voltaje de referencia para esa etapa, permitiendo así tener una sola fuente de alimentación DC para n etapas de un inversor. Esta fuente de voltaje DC es de la cual se generarán los diferentes niveles que conformarán la señal sinusoidal a la salida del inversor. La forma como se determina el voltaje de referencia de una o más etapas, así como también la relación de voltajes de los transformadores, se ilustra en la figura H.9.

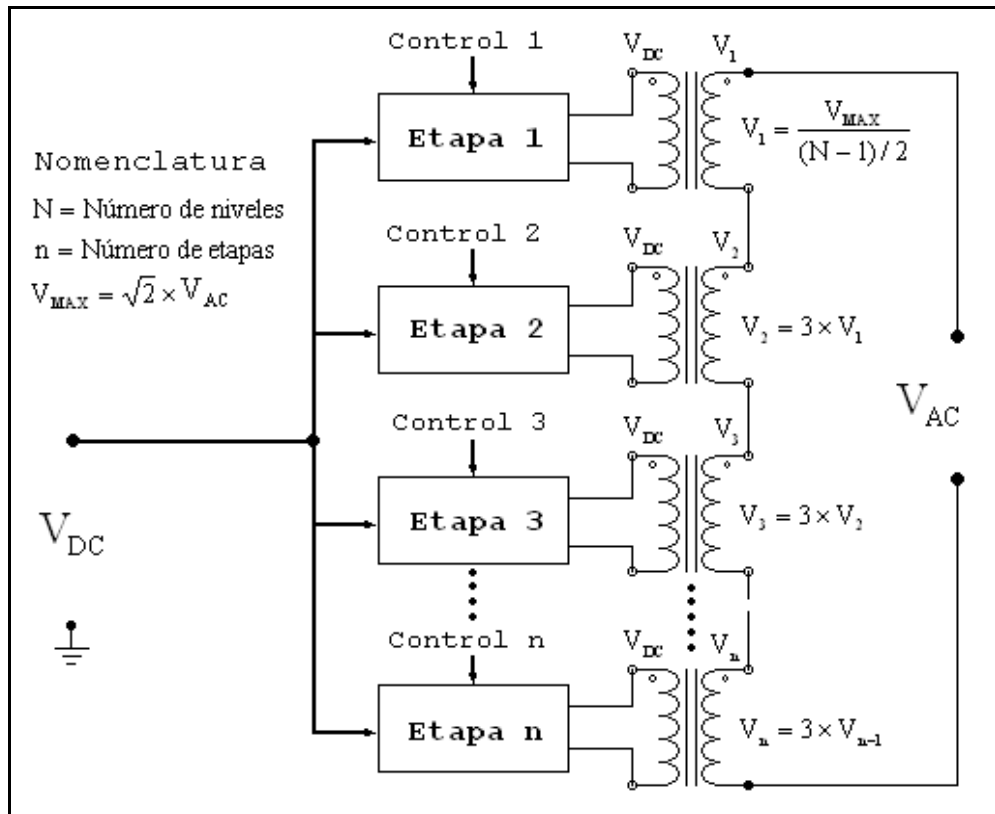


Figura H.9. Inversor monofásico multinivel de n etapas.

Como hemos visto en la figura H.9, el voltaje mínimo lo genera siempre la etapa 1 y por el contrario la etapa n genera siempre el voltaje mayor. Esto implica que la etapa 1, se combina muchísima más veces que las etapas restantes y significa que la etapa 1 tiene las señales de control con las frecuencias más altas comparadas con el resto de etapas, cuya frecuencia dependerá de la frecuencia de la señal seno deseada a la salida del inversor.

6.3 Partes que Componen el Modulo Didáctico del Inversor Monofásico

En esta práctica de laboratorio, lo que se hará básicamente es observar de una manera real, haciendo uso del módulo del inversor monofásico de cuatro etapas, las señales que se obtuvieron anteriormente a través de la simulación en PSIM. Para este propósito es necesario conocer las diferentes partes que componen el modulo didáctico del inversor monofásico de cuatro etapas.

El modulo didáctico del inversor monofásico de cuatro etapas esta formado por cuatro partes o cajas las cuales deben conectarse entre si para hacer que este funcione de manera óptima, dichas partes de describen a continuación:

6.3.1. Fuentes de Alimentación de 5V y 15V DC

Las fuentes de 5V (tres fuentes) se utilizan para alimentar al circuito de control y parte del circuito de potencia del inversor, mientras que la fuente de 15V se utiliza para la conmutación de los diferentes IGBT'S los cuales son manejados por los drivers. En la figura H.10 pueden observarse dichas fuentes tal como se verán en el laboratorio.

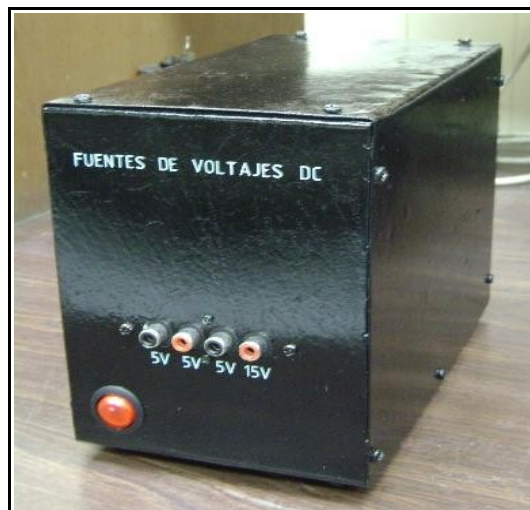


Figura H.10. Fuentes de alimentación DC de 5V y 15V.

Como puede verse en la figura H.10, las fuentes constan de un interruptor de Encendido/Apagado, así como de cuatro bornes tipo RCA, tres para las fuentes de 5 voltios y uno para la fuente de 15 voltios, los cuales deberán conectarse al modulo que contiene al inversor monofásico. Además, en su parte posterior la caja que contiene a las fuentes, posee un fusible de protección de entrada de las fuentes con un valor de 1A, así como un conector para tomar la alimentación de la red, el cual solo debe conectarse a un toma de 120 VAC.

6.3.2. Fuente de Alimentación de 80V DC

La fuente de alimentación de 80V, es la que se utiliza para generar la salida alterna del inversor, conectándose a la entrada del mismo y partir de la cual se generarán los diferentes niveles en la señal sinusoidal de salida, debe suministrar hasta un máximo de 10A. Esta característica se debe cumplir para que la salida del inversor pueda suministrar hasta un máximo de 5A. En la figura H.11, podemos observar la fuente de alimentación de 80V DC, el diseño se ha hecho en dos partes ya que se utilizaron elementos comunes y fáciles de comprar en el mercado nacional, es por eso que se ha ocupado el transistor 2N3055 y el regulador LM317T y se hace en dos partes, ya que el regulador solo puede proporcionar un voltaje de salida de hasta 40V, en otras palabras, se tienen dos fuentes de 40V que al sumarse nos darán los 80V que necesitamos. Como puede observarse arriba de los bornes de salida hay dos perillas, cada una de las cuales controla a una fuente de 40V. Posee también un interruptor de Encendido/Apagado y un piloto que indica cuando la fuente esta operando y cuando no opera.



Figura H.11. Fuente de alimentación de 80V DC.

En su parte posterior la fuente posee un fusible de entrada de 6A y un fusible de salida de 10A. La fuente debe ser alimentada con 120V AC a través de su respectivo cable de alimentación.

6.3.3. Cargas

Aquí se encuentran las cargas de prueba para el inversor monofásico de cuatro etapas, se cuenta con una carga resistiva representada por medio de un foco incandescente, y además, dos cargas inductivas representadas por dos bobinas cuyos valores corresponden a $L1 = 382.4 \text{ mH}$ y $L2 = 537.8 \text{ mH}$, estas bobinas pueden conectarse en serie o en paralelo para formar distintos valores de inductancia. En la figura H.12 se puede apreciar la caja que contiene las cargas tal como se observara en el laboratorio.



Figura H.12. Cargas para el inversor monofásico.

6.3.4. Modulo Principal o Inversor Monofásico

Esta es sin duda la parte más importante de las cuatro que posee el modulo didáctico del inversor monofásico, pues es aquí donde se encuentra el inversor monofásico propiamente, es decir, esta caja contiene los circuitos de control y de potencia, los cuales se encargan de generar la señal alterna, además contiene los 4 transformadores correspondientes a cada etapa del inversor. Por ello la caja es bastante pesada, por lo que se debe tener el debido cuidado cuando se transporta de un lugar a otro. El modulo principal esta construido con una base de metal y a su alrededor con acrílico transparente que permite ver los diferentes elementos y partes principales del inversor, por lo cual se recomienda que durante se este usando; tener la precaución de no golpear el acrílico ya que podría quebrarse. También el inversor contiene bornes en los cuales se pueden medir diferentes señales que son importantes para

el análisis y comprensión del funcionamiento del inversor. A continuación se detalla las diferentes entradas que posee el Inversor para su alimentación DC y las protecciones por medio de fusibles, los cuales actuarán en caso de cortocircuitos o sobrecarga. En la figura H.13 se muestra la parte de atrás y en la figura H.14, la parte frontal, en la que se incluye un medidor de voltaje AC que mide el voltaje de salida del inversor. Los puntos de prueba se muestran en la figura H.15.

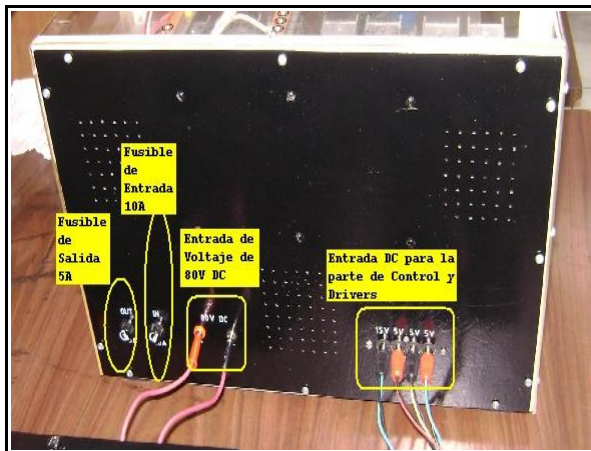


Figura H.13. Descripción de la Parte de atrás del Inversor



Figura H.14. Descripción de la parte frontal del Inversor

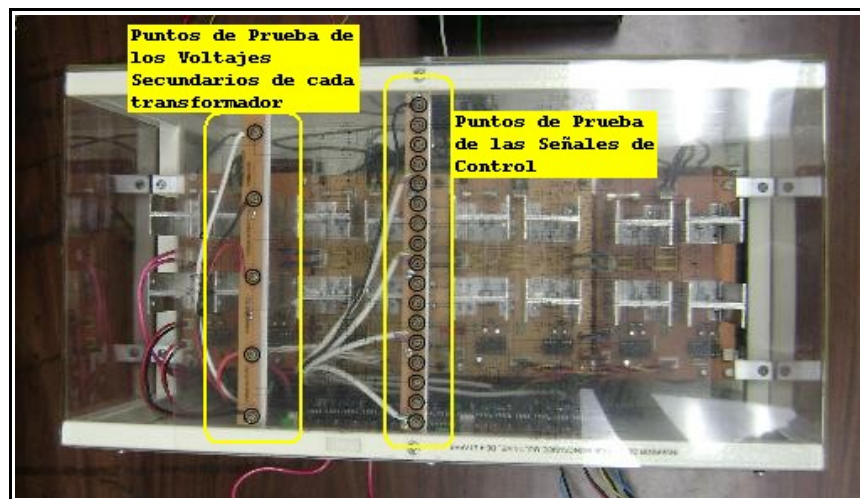


Figura H.15. Ubicación de los puntos de prueba del Inversor.

6.3.5. Accesorios

Los accesorios son todas aquellas cables que sirven para conectar entre si las diferentes partes que componen en modulo del inversor monofásico, como se describe a continuación:



Espigas de conexión entre las fuentes de voltajes DC de 5V y 15V y el módulo principal (Inversor).



Espigas para conexión entre la fuente de 80V y el módulo principal (Inversor).



Espigas para conectar la salida del inversor a una carga de prueba.

7. Procedimiento

Es importante contar con los resultados obtenidos en la práctica anterior, para poder comparar las señales de la simulación con las señales reales obtenidas del inversor monofásico de cuatro etapas.

1. Identificar las cuatro partes que conforman el modulo didáctico del inversor monofásico: a) fuentes de 5V y 15V; b) fuente de 80V; c) modulo principal o inversor monofásico y d) cargas.
2. Conectar la alimentación de 120V a las fuentes de 5V y 15V y verificar que estos sean los voltajes correctos, luego apagar las fuentes .
3. Conectar la alimentación de 120V a la fuente de 80V, comenzar a aumentar lentamente el voltaje por medio de las perillas, hasta alcanzar un voltaje los más cercano posible a 80V, luego apaga la fuente.
4. Conectar las fuentes de alimentación de 5V, 15V y 80V con el modulo

principal, como se muestra a continuación, en las figuras H.16 y H.17.

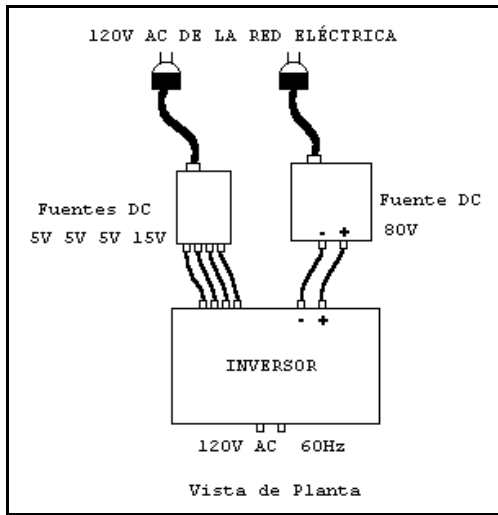


Figura H.16. Esquema de conexiones del inversor.

Figura H.17. Forma de Conectar las fuentes DC al inversor

Para que el inversor monofásico opere de manera correcta y óptima debemos realizar las conexiones correctas de alimentación del inversor como se ilustra en la figura H.16 y figura H.17. Se debe tener cuidado en no conectar la fuente de 15V en la entrada de 5V, ya que esto podría causar un daño permanente al inversor, tampoco se deben utilizar otras fuentes de voltaje continuo que tengan la misma referencia. Si por alguna razón se utilizan otras fuentes de voltaje DC, se debe asegurar que las referencias de tierras sean diferentes. Las referencias de tierras deben ser diferentes para generar aislamiento óptico entre la parte de control y de potencia, evitando así que el micro-controlador se dañe por alguna falla originada en la parte de potencia.

5. Obtener las señales de control del inversor monofásico.

En esta parte se obtendrán las señales de control del inversor monofásico para los IGBT's desde Q1 hasta Q16. En la cara superior del modulo principal se incluye un diagrama con los puntos de prueba tanto para las señales de control como para los voltajes en el lado secundario del inversor monofásico.

Para obtener las señales de control se hará como se muestra en la figura H.18. **Estas mediciones pueden hacerse utilizando dos o más canales del osciloscopio.**

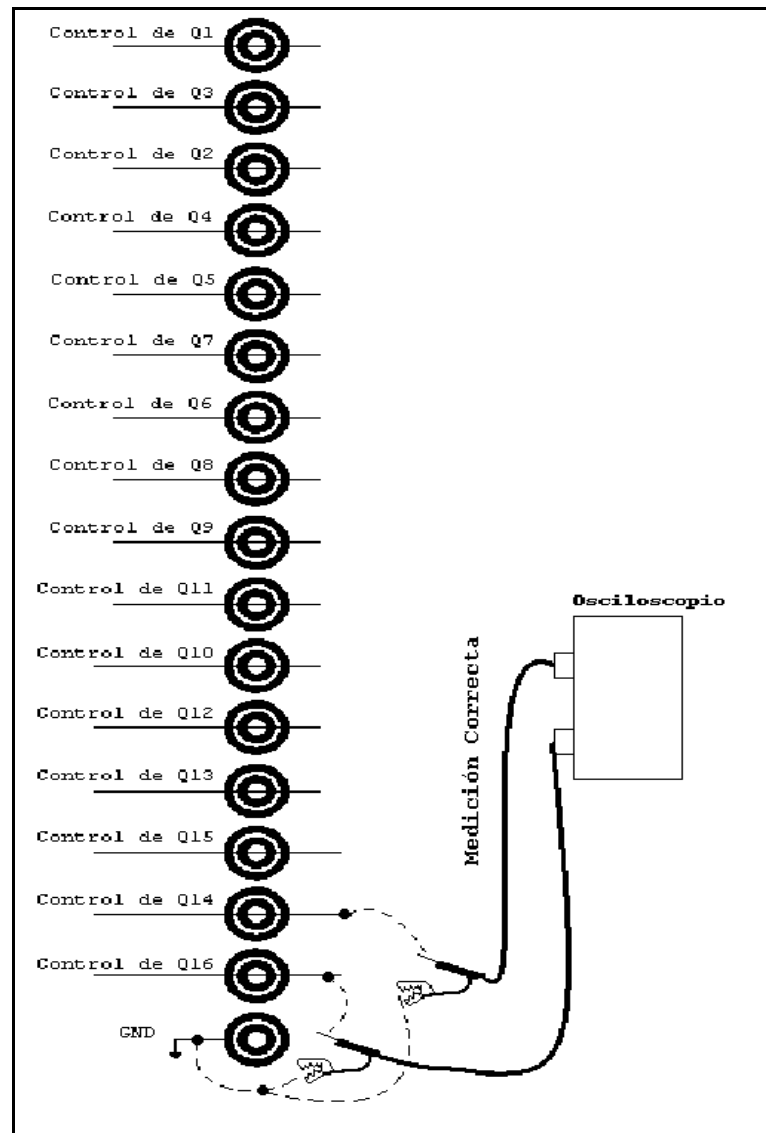


Figura H.18. Colocación de las puntas del osciloscopio para obtener las señales de control del inversor monofásico.

¿Qué puede decirse al comparar las señales de control obtenidas a través de la simulación y las obtenidas en el laboratorio?

6. Obtener las señales de voltaje en el lado secundario de cada transformador.

Se tomara primero la señal correspondiente al voltaje Auxiliar 3, luego el voltaje correspondiente al Auxiliar 2, después el voltaje correspondiente al Auxiliar 1, posteriormente el voltaje correspondiente a la Etapa Principal, para finalmente observar la señal de salida total del inversor monofásico que es la suma de todas las anteriores, esta se medirá en los dos puntos de prueba de los extremos. Un ejemplo de como obtener las señales en el lado secundario de los transformadores se muestra a continuación en la figura H19.

Nota Importante: En el caso de los puntos de medición de los voltajes secundarios de cada etapa se debe realizar la medición ocupando exclusivamente sólo un canal del osciloscopio, de no hacerse se haría un cortocircuito en el inversor; esto se debe a que el osciloscopio utiliza la misma referencia de tierra. En conclusión ocupar sólo un canal para todas las mediciones excepto en los puntos de control donde si podemos ocupar uno o mas canales. Tampoco se deben medir los puntos de control y los demás puntos de prueba al mismo tiempo.

¿Al comparar las señales del lado secundario de los transformadores obtenidas a través de la simulación y las obtenidas en el laboratorio, qué se puede decir de estas?



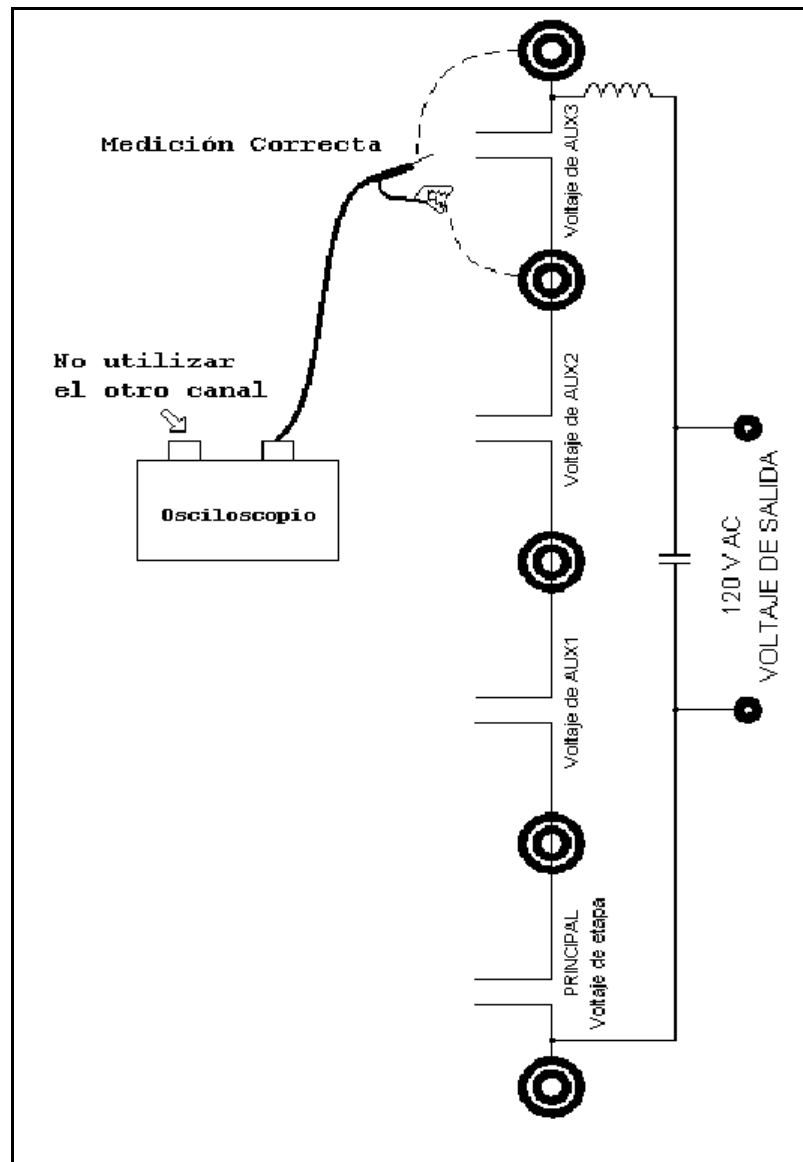


Figura H.19. Colocación de las puntas del osciloscopio para obtener las señales de los voltajes en el lado secundario de los transformadores para el inversor monofásico.

7. Aplicar la carga resistiva, la cual está representada por un foco incandescente, este debe conectarse previamente en la caja de las cargas. Para aplicar esta carga simplemente se conectará la salida del inversor monofásico, con los bornes para la carga resistiva como se indica a continuación en la figura H.20.



Figura H.20. Forma de conectar de la carga resistiva con el inversor monofásico.

¿Hay modificación de la señal de salida del inversor?, escribir lo que se observa:

8. Aplicar la bobina $L2 = 537.8 \text{ mH}$ a la salida del inversor, como se muestra a continuación en la figura H.21.



Figura H.21. Forma de conectar la bobina $L2 = 537.8 \text{ mH}$ al inversor monofásico.

¿Hay modificación de la señal de salida del inversor?, escribir lo que se observa:

9. Conectar en serie las bobinas L1 y L2, y aplicar la señal de salida del inversor, tal como se muestra a continuación en la figura H.22.



Figura H.22. Forma de conectar en serie las bobinas L1 y L2 para aplicarlas al inversor monofásico.

¿Hay modificación de la señal de salida del inversor?, escribir lo que se observa:

10. Conectar en paralelo las bobinas L1 y L2, y aplicar la señal de salida del inversor, tal como se muestra a continuación en la figura H.23.



Figura H.23. Forma de conectar en serie las bobinas L1 y L2 para aplicarlas al inversor monofásico.

¿Hay modificación de la señal de salida del inversor?, escribir lo que se observa:

	MOVWF PORTB		CALL TIMER		MOVWF PORTB
N21	MOVLW d'96'		MOVLW b'10011001'		MOVLW d'24'
	MOVWF COUNTER		MOVWF PORTB		MOVWF COUNTER
	CALL TIMER		MOVLW b'01011001'		CALL TIMER1
	MOVLW b'01100001'		MOVWF PORTC		MOVLW b'01100110'
	MOVWF PORTB	N148	MOVLW d'88'	N156	MOVWF PORTB
	MOVLW d'24'		MOVWF COUNTER		MOVLW d'81'
	MOVWF COUNTER		CALL TIMER		MOVWF COUNTER
	CALL TIMER1		MOVLW b'10010001'		CALL TIMER
	MOVLW b'01100101'		MOVWF PORTB		MOVLW b'00000000'
	MOVWF PORTB		MOVLW d'24'		MOVWF PORTB
N22	MOVLW d'101'		MOVWF COUNTER		MOVLW b'01010001'
	MOVWF COUNTER		CALL TIMER1		MOVWF PORTC
	CALL TIMER		MOVLW b'10010101'		MOVLW d'24'
	MOVLW b'01100100'		MOVWF PORTB		MOVWF COUNTER
	MOVWF PORTB	N149	MOVLW d'86'		CALL TIMER
	MOVLW d'24'		MOVWF COUNTER		MOVLW b'10011001'
	MOVWF COUNTER		CALL TIMER		MOVWF PORTB
	CALL TIMER1		MOVLW b'10010100'		MOVLW b'01010101'
	MOVLW b'01100110'		MOVWF PORTB	N157	MOVWF PORTC
	MOVWF PORTB		MOVLW d'24'		MOVLW d'81'
	.		MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER
	.		CALL TIMER1		CALL TIMER
	.		MOVLW b'10010110'		MOVLW b'10010001'
	.		MOVWF PORTB		MOVWF PORTB
	.	N150	MOVLW d'84'		MOVLW d'24'
	.		MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER
	.		CALL TIMER		CALL TIMER1
	.		MOVLW b'00010000'		MOVLW b'10010101'
	.		MOVWF PORTB		MOVWF PORTB
N143	MOVLW d'94'		MOVLW d'24'	N158	MOVLW d'81'
	MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER
	CALL TIMER		CALL TIMER1		CALL TIMER
	MOVLW b'01010100'		MOVLW b'01011001'		MOVLW b'10010100'
	MOVWF PORTB		MOVWF PORTB		MOVWF PORTB
	MOVLW d'24'	N151	MOVLW d'84'		MOVLW d'24'
	MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER
	CALL TIMER1		CALL TIMER		CALL TIMER1
	MOVLW b'01010110'		MOVLW b'01010001'		MOVLW b'10010110'
	MOVWF PORTB		MOVWF PORTB		MOVWF PORTB
N144	MOVLW d'91'		MOVLW d'24'	N159	MOVLW d'79'
	MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER
	CALL TIMER		CALL TIMER1		CALL TIMER
	MOVLW b'01000000'		MOVLW b'01010101'		MOVLW b'00010000'
	MOVWF PORTB		MOVWF PORTB		MOVWF PORTB
	MOVLW d'24'	N152	MOVLW d'83'		MOVLW d'24'
	MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER
	CALL TIMER1		CALL TIMER		CALL TIMER1
	MOVLW b'01101001'		MOVLW b'01010100'		MOVLW b'01011001'
	MOVWF PORTB		MOVWF PORTB		MOVWF PORTB
N145	MOVLW d'91'		MOVLW d'24'	N160	MOVLW d'81'
	MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER
	CALL TIMER		CALL TIMER1		CALL TIMER
	MOVLW b'01100001'		MOVLW b'01010110'		MOVLW b'01010001'
	MOVWF PORTB		MOVWF PORTB		MOVWF PORTB
	MOVLW d'24'	N153	MOVLW d'83'		MOVLW d'24'
	MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER
	CALL TIMER1		CALL TIMER		CALL TIMER1
	MOVLW b'01100101'		MOVLW b'01000000'		MOVLW b'01010101'
	MOVWF PORTB		MOVWF PORTB		MOVWF PORTB
N146	MOVLW d'89'		MOVLW d'24'	CERO	MOVLW d'94'
	MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER
	CALL TIMER		CALL TIMER1		CALL TIMER
	MOVLW b'01100100'		MOVLW b'01101001'		
	MOVWF PORTB		MOVWF PORTB		GOTO START
	MOVLW d'24'	N154	MOVLW d'83'	TIMER	
	MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER	LOOP	
	CALL TIMER1		CALL TIMER		DECFSZ COUNTER, F
	MOVLW b'01100110'		MOVLW b'01100001'		GOTO LOOP
	MOVWF PORTB		MOVWF PORTB		RETURN
N147	MOVLW d'88'		MOVLW d'24'	TIMER1	
	MOVWF COUNTER		MOVWF COUNTER		MOVLW b'00000000'
	CALL TIMER		CALL TIMER1		MOVLW b'00000000'
	MOVLW b'00000000'		MOVLW b'01100101'	LOOP1	
	MOVWF PORTB		MOVWF PORTB		DECFSZ COUNTER, F
	MOVLW b'00010000'	N155	MOVLW d'81'		GOTO LOOP1
	MOVWF PORTC		MOVWF COUNTER		RETURN
	MOVLW d'24'		CALL TIMER		END
	MOVWF COUNTER		MOVLW b'01100100'		

ANEXO J: COSTO DEL INVERSOR MULTINIVEL DE 4 ETAPAS

En este anexo se detalla el costo invertido en la construcción del inversor multinivel de 4 etapas.

COSTO DEL INVERSOR MULTINIVEL DE 4 ETAPAS MONOFASICO			
Parte 1: Control			
Elemento	Precio Unitario \$	Cantidad	Total
Microcontrolador PIC 16F877	9.18	1	9.18
Cristal de cuarzo de 20MHz	1.1	1	1.1
Optoacoplador 6N137	1.34	16	21.44
Resistencia de 100Ω x 1/4 Watt	0.12	1	0.12
Resistencia de 680Ω x 1/4 Watt	0.12	16	1.92
Resistencia de 10KΩ x 1/4 Watt	0.12	16	1.92
Capacitor cerámco de 15pF x 100V	0.23	2	0.46
Capacitor cerámco de 150pF x 50V	0.23	16	3.68
Capacitor electrolítico de 47uF x 25V	0.23	2	0.46
Capacitor electrolítico de 10uF x 25V	0.23	16	3.68
Capacitor electrolítico de 0.1uF x 50V	0.23	16	3.68
IC 74LS04	1	3	3
Conector de 2 pines para alimentacion DC	0.35	2	0.7
Conector de 4 pines para señales de control	0.55	4	2.2
Tableta cobreada	2.5	1	2.5
Percloruro (1 onza)	1.25	1	1.25
Estaño (10 yardas)	1.25	1	1.25
Alambre para puentes (1mts)	0.35	1	0.35
Una Base de 40 pines para el PIC 16F877	0.5	1	0.5
16 Bases de 8 pines para Optoacoplador	0.34	16	5.44
3 Bases de 14 pines para IC 74LS04	0.34	3	1.02
Subtotal 1			\$65.85

COSTO DEL INVERSOR MULTINIVEL DE 4 ETAPAS MONOFASICO			
Parte2: Potencia			
Elemento	Precio Unitario \$	Cantidad	Total
IGBT STGP10NC60H 20A 600V TO-220	2.1	16	33.6
DRIVER IR2113	5.4	8	43.2
Capacitor electrolítico de 47uF x 25V	0.23	8	1.84
Capacitor electrolítico de 10uF x 25V	0.23	16	3.68
Diodo FR107	0.33	24	7.92
Resistencia de 10KΩ x 1/4 Watt	0.12	16	1.92
Disipador para IGBT	1	16	16
Fusible de protección	0.15	4	0.6
Tableta cobreada	2.5	2	5
Percloruro (2 onzas)	1.25	2	2.5
Estaño (10 yardas)	1.9	1	1.9
Alambre para puentes (1 mts)	0.35	1	0.35
Conector de 2 pines para alimentación DC	0.35	16	5.6
Conector de 4 pines para señales de control	0.55	4	2.2
Conector de 2 pines para alimentacion DC de 80V y conexión a transformadores	0.4	24	9.6
Bases de 14 pines para IC 2113	0.34	8	2.72
Transformador Auxiliar 3	35	1	35
Transformador Auxiliar 2	35	1	35
Transformador Auxiliar 1	35	1	35
Transformador Principal	45	1	45
Inductancia con núcleo de ferrita para filtro LC	2	1	2
Capacitor de polipropileno para filtro LC	1.5	1	1.5
Subtotal 2			\$292.13

FUENTES DE ALIMENTACION DC			
Elemento	Precio Unitario \$	Cantidad	Total
Transformador de 120V / 9V	3.5	3	10.5
Transformador de 120V / 15V	4	1	4
Transformador de 120V / 40V (dos devanados secundarios)	45	1	45
Diodo puente rectificador de 6A x 200V	1.25	4	5
Diodo puente rectificador de 25A x 200V	3	2	6
Diodo 1N4007	0.35	2	0.7
Resistencia de 320Ω x 1/2 Watt	0.15	2	0.3
Potenciometro de 10KΩ	1.3	2	2.6
Capacitor electrolítico de 2200uF x 35V	1	4	4
Capacitor ceramico de 100nF X 100V	0.23	4	0.92
Capacitor electrolítico de 680uF x 200V	1.3	8	10.4
Capacitor electrolítico de 10uF x 25V	0.23	4	0.92
Capacitor electrolítico de 2.2uF x 50V	0.23	2	0.46
IC LM7805 (Regulador de Voltaje)	1	3	3
IC LM7815 (Regulador de Voltaje)	1	1	1
IC LM317T (Regulador de voltaje ajustable)	1.4	2	2.8
Transistor de potencia 2N3055	0.75	4	3
Fusibles de protección	0.15	9	1.35
Disipador para Regulador de voltaje	0.65	6	3.9
Disipador para transistores de potencia 2N3055	1.25	4	5
Tableta cobreada	2.5	2	5
Percloruro (2 onzas)	1.25	2	2.5
Estaño (10 yardas)	1.9	1	1.9
Subtotal 3			\$120.25

OTROS			
Elemento	Precio Unitario \$	Cantidad	Total
1 caja para fuentes de alimentación DC de 5V y 15V, incluyendo accesorios	15	1	15
1 caja para fuente de alimentación DC de 80V, incluyendo accesorios	24	1	24
1 caja para el Inversor, incluyendo accesorios	150	1	150
Cargo por envío de elementos comprados en el exterior	45	1	45
Subtotal 4			\$234

Sumando los Subtotales	
subtotal 1	65.85
subtotal 2	292.13
subtotal 3	120.25
subtotal 4	234
TOTAL	\$712.23

EL COSTO TOTAL DEL INVERSOR MULTINIVEL ES DE **US\$712.23 DOLARES.**