

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA INTERFAZ GRAFICA DE USUARIO EN MATLAB®
PARA CIRCUITOS CONVERTIDORES DE CC-CA.**

CRISTHIAN DAVID FERNÁNDEZ RAMÍREZ
COD. 1088251899

WILMAR RESTREPO MOSQUERA
COD. 1088243362

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, FÍSICA Y
SISTEMAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2013**

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO EN MATLAB®
PARA CIRCUITOS CONVERTIDORES DE CC-CA.**

CRISTHIAN DAVID FERNÁNDEZ RAMÍREZ
COD. 1088251899

WILMAR RESTREPO MOSQUERA
COD. 1088243362

Proyecto de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero
Electricista.

Director: Ing. Alfonso Álzate.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, FÍSICA Y
SISTEMAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2013

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA INTERFAZ GRAFICA DE USUARIO EN MATLAB®
PARA CIRCUITOS CONVERTIDORES DE CC-CA.**

Nota de aceptación

Ing. Alfonso Álzate.
Director

Jurado

MSc. Alberto Ocampo Valencia
Director Programa Ingeniería Eléctrica

DEDICATORIA

Dedicado al ser supremo que me ha dado fortaleza

Me ha dado ánimo y mucha Fe

A ese ser llamado Dios

Dedicado a esos seres que Dios escogió

Para que fuesen mis Padres

Los que incondicionalmente me han dado todo

Sin esperar nada a cambio

Solo por verme feliz y como profesional

Dedicado a mis hermanas por ser mis amigas

Y que siempre me dicen que yo puedo.

Dedicado a la persona que más amo

La persona que me entrego su amor

Por hoy, mañana y Siempre

Para ti mi novia amada

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos van al Ing. James Marulanda por su gran ayuda durante todo el proyecto, que desde un principio empleo parte de su tiempo para colaborarnos. A mis Padres José Fernández Y Luz Estela Ramírez, por su apoyo en todo momento, por inculcarme principios éticos y morales, enseñarme y darme ejemplo de honestidad y perseverancia en todo lo que hago, por su ayuda emocional y económica. A mi Novia Daniela de la Cruz por su amor y dedicación a cada instante, por sus caricias que me alentaron y me curaron mis heridas, por sus besos y abrazos que me dan paz y tranquilidad. A mis hermanas Jessica, Lady y Zara Fernández por decirme y repetirme que yo puedo superarlo todo, por hacerme reír y darme muchos abrazos. A mi tía Ángela por sus consejos. Al Ing. Alfonso Álzate por darnos la oportunidad de iniciar este proyecto de grado. Agradezco a mi Universidad por aguantarme y por haberse convertido en mi segundo hogar, por darme una formación académica con calidad. Y un agradecimiento muy especial y con humildad a **Dios** el que hizo posible mi existencia y mi formación espiritual.

CRISTHIAN DAVID FERNÁNDEZ

Primeramente le doy la honra y gloria a ti **Dios** por bendecirme y hacer que mis metas se cumplan, y porque hiciste realidad este sueño anhelado. A mis padres Marleny Mosquera y Carlos Restrepo, por apoyarme y brindarme sus consejos, que me han servido en todo el transcurso de la carrera. A la UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional. A mis directores de tesis, Ing. Alfonso Álzate por brindarme la oportunidad de trabajar con él la tesis, y al Ing. James Marulanda por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en mí que pueda terminar mis estudios con éxito. También me gustaría agradecer a mi compañero de tesis Cristian David Fernández por brindarme su amistad y quien compartió conmigo este trabajo de grado. Me gustaría agradecerles a muchas personas que me brindaron su amistad, consejos y compañía en los momentos difíciles de mi carrera. Fueron bastantes seres queridos que han formado parte de mi vida profesional, algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí.

WILMAR RESTREPO

RESUMEN

En este trabajo se muestra un software sobre la implementación de una interfaz gráfica de usuario (GUI) en el entorno de Matlab, para el análisis en simulación de los circuitos convertidores de CC – AC, de electrónica de potencia; de tipo monofásico y trifásico, con distintos tipos de modulación, como modulación de pulso múltiple, modulación sinusoidal SPWM, modulación por desplazamiento de fase, modulación con inyección de tercera armónica, y modulación vectorial entre otras; Tanto para cargas resistivas R, como cargas R-L y R-L-C. El análisis muestra las formas de onda a la salida de la corriente y la Tensión, el valor rms, el índice de distorsión armónica total, y el análisis de los armónicos.

En el capítulo uno se hace una breve introducción, se define el problema de investigación, su respectiva justificación, antecedentes y objetivos que se cumplirán.

En el capítulo dos se define acerca de los convertidores CC-CA (inversores), sobre los tipos de inversores y las clases de modulaciones que tienen. En el capítulo tres se describe que es una GUI en Matlab, cómo funciona y se detalla el programa implementado. En el capítulo cuatro se muestran los resultados arrojados por el software realizado de modulación de inversores.

En el capítulo cinco se hace la comparación entre el software y fuentes bibliográficas y otros programas para demostrar la confiabilidad de este.

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	17
1.1	Definición del problema	17
1.2	Justificación	18
1.3	Antecedentes	19
1.4	Objetivos	21
1.4.1	Objetivo general	21
1.4.2	Objetivos específicos	21
2	INVERSORES	22
2.1	Inversor de electrónica de Potencia	22
2.1.1	Configuración de Medio Puente Monofásico [7]:	23
2.1.2	Configuración de Puente Monofásico [7]:	24
2.1.3	Configuración de Puente Trifásico [5]:	25
2.1.4	Parámetros de Rendimiento	25
2.2	Tipos de Modulación de los inversores	26
2.2.1	Modulación por ancho de pulso único	26
2.2.2	Modulación por ancho de pulso múltiple	27
2.2.3	Modulación por ancho de pulso sinusoidal	29
2.2.4	Modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada	32
2.2.5	Modulación por desplazamiento de fase	33
2.2.6	Modulación PWM con tercer armónica	35
2.2.7	Modulación de espacio Vectorial	36
3	GUI (INTERFAZ GRAFICA DE USUARIO)	43
3.1	GUIDE	43
3.1.1	Características	43
3.1.2	Funcionamiento	43
3.1.3	Componentes de la GUI	43
3.1.4	Partes de la GUI	44
3.1.5	Propiedades de los controles	45
3.2	Implementación de la GUIDE	46
3.2.1	Partes del programa	46

3.2.2	Ejemplo de Aplicación	48
4	RESULTADOS	51
4.1	Modulación de Pulso Único (medio puente).....	51
4.1.1	Carga Resistiva	51
4.1.2	Carga Resistiva e Inductiva (R-L)	54
4.1.3	Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)	56
4.2	Modulación de Pulso Múltiple (medio puente).....	58
4.2.1	Carga Resistiva	58
4.2.2	Carga Resistiva e Inductiva (R-L)	61
4.2.3	Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)	63
4.3	Modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) (medio puente)	65
4.3.1	Carga Resistiva	65
4.3.2	Carga Resistiva e Inductiva (R-L)	68
4.3.3	Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)	70
4.4	Modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada (medio puente) ...	72
4.4.1	Carga Resistiva	72
4.4.2	Carga Resistiva e Inductiva (R-L)	75
4.4.3	Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)	77
4.5	Modulación por desplazamiento de fase (puente completo)	79
4.5.1	Carga Resistiva	79
4.5.2	Carga Resistiva e Inductiva (R-L)	82
4.5.3	Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)	84
4.6	Modulación de Pulso Único (puente completo)	86
4.6.1	Carga Resistiva	86
4.6.2	Carga Resistiva e Inductiva (R-L)	89
4.6.3	Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)	91
4.7	Modulación de Pulso Múltiple (puente completo)	93
4.7.1	Carga Resistiva	93
4.7.2	Carga Resistiva e Inductiva (R-L)	96
4.7.3	Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)	98
4.8	Modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) (puente completo)	100

4.8.1	Carga Resistiva	100
4.8.2	Carga Resistiva e Inductiva (R-L).....	103
4.8.3	Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)	105
4.9	Modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada	107
4.9.1	Carga Resistiva	107
4.9.2	Carga Resistiva e Inductiva (R-L).....	110
4.9.3	Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)	112
4.10	Modulación por ancho de pulso sinusoidal (Puente trifásico)	114
4.10.1	Carga Resistiva	114
4.10.2	Carga Resistiva e Inductiva (R-L).....	117
4.10.3	Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)	119
4.11	Modulación por ancho de pulso sinusoidal con tercer armónico (Puente trifásico).....	121
4.11.1	Carga Resistiva	121
4.11.2	Carga Resistiva e Inductiva (R-L).....	124
4.11.3	Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)	126
4.12	Modulación Vectorial (Puente trifásico).....	128
4.12.1	Carga Resistiva	128
4.12.2	Carga Resistiva e Inductiva (R-L).....	131
4.12.3	Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)	133
4.13	Modulación 180° (Puente trifásico)	135
4.13.1	Carga Resistiva e Inductiva.....	135
5	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	138
5.1	Comparación con Fuentes Bibliográficas.....	138
5.1.1	Inversor Medio puente monofásico con modulación de pulso único con delta de 180°	138
5.1.2	Inversor puente monofásico con modulación de pulso único con delta de 180°	139
5.1.3	Inversor puente monofásico con modulación de pulso único con delta de 180°	140
5.1.4	Inversor puente monofásico con modulación de pulso único con delta de 108°	141

5.1.5	Inversor trifásico con conducción a 180°	142
5.2	Comparación con software de simulación.....	143
5.2.1	Inversor puente monofásico con modulación SPWM.	143
5.2.2	Inversor con modulación de ancho de pulso sinusoidal (trifásico) ...	146
5.2.3	Inversor puente monofásico con modulación de múltiple pulsos. ...	149
5.2.4	Inversor trifásico con modulación Vectorial.	150
6	CONCLUSIONES	153
7	BIBLIOGRAFÍA	154

Lista de figuras

Figura 1.	Inversor de medio puente, Formas de la onda de salida.....	23
Figura 2.	Inversor de puente completo, Formas de la onda de salida.....	24
Figura 3.	Inversor de puente trifásico.	25
Figura 4.	Modulación por ancho de pulso único.	26
Figura 5.	Modulación por ancho de pulso múltiple.	28
Figura 6.	Modulación por ancho de pulso sinusoidal.....	30
Figura 7.	Modulación por ancho de pulso sinusoidal Trifásico	31
Figura 8.	Modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada	32
Figura 8.	Control por desplazamiento de fase.....	33
Figura 9.	Modulación PWM con Tercera armónica.	35
Figura 10.	Inversor trifásico de tres ramas.	37
Figura 11.	Estados de conmutación del inversor.....	37
Figura 12.	Diagrama vectorial de los ocho vectores obtenidos a partir de los estados de conmutación del inversor trifásico.....	38
Figura 13.	Transformación de coordenadas.....	39
Figura 14.	Diagrama Vectorial.....	40
Figura 15.	Secuencia de conmutación de los vectores para los seis sectores.....	42
Figura 16.	Inicializando una GUIDE	44
Figura 17.	Área de trabajo de la GUIDE.....	44
Figura 18.	Propiedades de los controles.	45
Figura 19.	Inicializando el programa de inversores.	46
Figura 20.	Menú de selección de tipo de inversor.	46
Figura. 21	47
Figura 22.	Primer paso del ejemplo de aplicación.....	48
Figura 23.	Segundo paso del ejemplo de aplicación	48
Figura 24.	Tercer paso del ejemplo de aplicación.	48

Figura 25. Tres opciones de cálculo.....	49
Figura 26. Formas de onda ejemplo de aplicación.....	50
Figura 27. Análisis Armónico ejemplo de aplicación	50
Figura 28. Esquema modulación pulso único con carga resistiva	51
Figura 29. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión ..	52
Figura 30. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	53
Figura 31. Esquema modulación pulso único con carga R-L	54
Figura 32. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	55
Figura 33. Esquema modulación pulso único con carga R-L-C	56
Figura 34. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	57
Figura 35. Esquema modulación pulso múltiple con carga resistiva	58
Figura 36. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión ..	59
Figura 37. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	60
Figura 38. Esquema modulación pulso múltiple con carga R-L	61
Figura 39. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	62
Figura 40. Esquema modulación pulso múltiple con carga R-L-C.....	63
Figura 41. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	64
Figura 42. Esquema modulación SPWM con carga resistiva	65
Figura 43. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión ..	66
Figura 44. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	67
Figura 45. Esquema modulación SPWM con carga R-L	68
Figura 46. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	69
Figura 47. Esquema modulación SPWM con carga R-L-C	70
Figura 48. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	71
Figura 49. Esquema modulación SPWM modificada con carga resistiva.....	72
Figura 50. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión ..	73
Figura 51. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	74
Figura 52. Esquema modulación SPWM modificada con carga R-L.....	75
Figura 53. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	76
Figura 54. Esquema modulación SPWM modificada con carga R-L-C	77

Figura 55. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	78
Figura 56. Esquema modulación desplazamiento de fase con carga resistiva	79
Figura 57. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión ..	80
Figura 58. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	81
Figura 59. Esquema modulación desplazamiento de fase con carga R-L.....	82
Figura 60. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	83
Figura 61. Esquema modulación desplazamiento de fase con carga R-L-C.....	84
Figura 62. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	85
Figura 63. Esquema modulación pulso único con carga resistiva	86
Figura 64. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión ..	87
Figura 65. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	88
Figura 66. Esquema modulación pulso único con carga R-L	89
Figura 67. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	90
Figura 68. Esquema modulación pulso único con carga R-L-C	91
Figura 69. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	92
Figura 70. Esquema modulación pulso múltiple con carga resistiva	93
Figura 71. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión ..	94
Figura 72. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	95
Figura 73. Esquema modulación pulso múltiple con carga R-L	96
Figura 74. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	97
Figura 75. Esquema modulación pulso múltiple con carga R-L-C.....	98
Figura 76. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	99
Figura 77. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal con carga resistiva	100
Figura 78. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión	101
Figura 79. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	102
Figura 80. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal con carga R-L .	103
Figura 81. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	104

Figura 82. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal con carga R-L-C	105
Figura 83. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión	106
Figura 84. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada con carga resistiva	107
Figura 85. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión	108
Figura 86. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	109
Figura 87. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada con carga R-L.....	110
Figura 88. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	111
Figura 89. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada con carga R-L-C.....	112
Figura 90. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	113
Figura 91. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal con carga resistiva	114
Figura 92. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión	115
Figura 93. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	116
Figura 94. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal con carga R-L.	117
Figura 95. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	118
Figura 96. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal con carga R-L-C	119
Figura 97. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	120
Figura 98. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal 3cer armónico carga resistiva	121
Figura 99. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión	122
Figura 100 (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	123
Figura 101. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal 3cer armónico con carga resistiva	124
Figura 102. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	125
Figura 103. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal 3cer armónico con carga R-L-C.....	126
Figura 104. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	127

Figura 105. Esquema modulación Vectorial con carga resistiva	128
Figura 106. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión	129
Figura 107. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	130
Figura 108. Esquema modulación Vectorial con carga R-L	131
Figura 109. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	132
Figura 110. Esquema modulación Vectorial con carga R-L-C.....	133
Figura 111. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	134
Figura 112. Esquema modulación 180°	135
Figura 113. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión	136
Figura 114. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente	137
Figura 115. A) Forma de onda corriente GUI. B) Forma de onda Voltaje GUI. C) Forma de onda corriente y voltaje Toolbox Simulink.....	145
Figura 116. A) Forma de onda Voltaje de Línea B) Forma de onda Voltaje de Fase C) Forma de onda corriente por toolbox de simulink.....	147
Figura 117. A) Forma de onda Voltaje de Línea B) Forma de onda Voltaje de Fase C) Forma de onda corriente de la GUI.	148
Figura 118. A) Forma de onda Voltaje de Línea B) Forma de onda Voltaje de Fase C) Forma de onda corriente por toolbox de simulink.....	151
Figura 119. A) Forma de onda Voltaje de Línea B) Forma de onda Voltaje de Fase C) Forma de onda corriente por la GUI	152

Lista de tablas

Tabla 1. Vectores activos y nulos del inversor.	38
Tabla 2. Tiempos de los seis estados del inversor.....	41
Tabla 3. Datos de entrada.....	138
Tabla 4. Comparación y resultados.....	138
Tabla 5. Datos de entrada.....	139
Tabla 6. Comparación y resultados.....	139
Tabla 7. Datos de entrada.....	140
Tabla 8. Comparación y resultados.....	140
Tabla 9. Datos de entrada.....	141
Tabla 10. Comparación y resultados.....	141
Tabla 11. Datos de entrada.....	142

Tabla 12. Comparación y resultados.....	142
Tabla 13. Datos de entrada.....	143
Tabla 14. Comparación y resultados.....	144
Tabla 15. Datos de entrada.....	146
Tabla 16. Datos de entrada.....	146
Tabla 17. Datos de entrada.....	149
Tabla 18. Comparación y resultados.....	149
Tabla 19. Datos de entrada.....	150
Tabla 20. Comparación y resultados.....	150

ABREVIATURAS

GUI: (Graphical user interface). Interfaz gráfica de usuario.

INVERSOR: Dispositivo de electrónica de potencia cuya función es cambiar un voltaje continuo DC a un voltaje alterno AC.

I_s = Corriente promedio de alimentación.

I_q = Corriente promedio en cada transistor.

m_a = Constante de Modulación en Amplitud. (En otros casos llamada delta).

m_f = Constante de Modulación en Frecuencia.

MEDIO PUENTE: Configuración de un circuito convertidor que involucra dos transistores con diodos en antiparalelo, carga y fuente.

PUENTE: Configuración de un circuito convertidor que involucra cuatro transistores con diodos en antiparalelo, carga y fuente.

PWM: Modulación por Ancho de pulsos.

P_o = Potencia en la carga.

R = Representa una carga Resistiva.

R-L = Representa una carga Resistiva, Inductiva.

R-L-C = Representa una carga Resistiva, Inductiva y Capacitiva.

rms = Valor medio cuadrático.

SVPWM: Modulación por ancho de pulso del vector de espacio.

SPWM: Modulación PWM con ancho de pulso sinusoidal.

THD: Distorsión armónica total. Es una medida de la coincidencia de formas entre una onda y su componente fundamental.

TIRISTOR: es un componente electrónico constituido por elementos semiconductores que utiliza realimentación interna para producir una conmutación.

V_o (rms) = Voltaje a la salida del inversor rms.

V_{o1} (rms) = Voltaje de la componente fundamental rms.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del problema

La electrónica de potencia en la actualidad ha adquirido mucha importancia y se ha convertido en la herramienta imprescindible y esencial para la operación y trabajo en todos los ámbitos de la sociedad, (industrial, Servicios, hogar) la electrónica de potencia puede contribuir al ahorro energético mejorando de forma útil el consumo. Es también la tecnología clave para la puesta en marcha y poder suministrar la energía de fuentes renovables como la eólica y la fotovoltaica (Usando Inversores). Otro campo fuerte de ella en la industria es la regulación de la velocidad de los motores, Utilizando los convertidores CA/CC. [1]

Ahora gracias a las herramientas informáticas se logra afianzar el conocimiento y mejorar los procesos de aprendizaje en los cursos de electrónica de potencia por medio de la simulación por computador, ya que le agrega un punto adicional al proceso de aprendizaje difícil de concebir por medio de la estricta manipulación de las ecuaciones algebraicas [2], y por medio de la simulación se puede apreciar la diferencia entre los circuitos que se estudian.

El proyecto consiste en implementar una interfaz gráfica de usuario GUI (*de sus siglas en inglés, Graphical User Interface*) en el entorno MATLAB® [3], para el análisis en simulación de los inversores monofásicos y trifásicos. Los inversores que se analizarán son: El inversor de medio puente, El inversor de puente completo, El inversor Trifásico, todos estos, con varios tipos de modulaciones, como la modulación PWM, modulación por inyección de armónica, modulación por vector espacial, entre otras.

La GUI diseñada dará una facilidad al análisis de los circuitos de inversores, para que se pueda realizar un diseño adecuado y el cual ahorrará el tiempo que se dedica en la práctica, ya que solo con ingresar el valor de unos parámetros se verá la respuesta de corriente, voltajes, la potencia eficaz, la distorsión armónica total, etc.

1.2 Justificación

Con la evolución y avance de la electrónica de potencia en estas últimas décadas, se ha establecido como una de las más importantes actualmente; Ya que ahora están presentes desde pequeñas fuentes de alimentación para computadores, hasta aplicaciones industriales para controlar la alta potencia [4]

A la hora de explicar los temas de electrónica de potencia; El estudiante en algunos casos no tiene una visión clara sobre lo que se explica allí; Hay momentos que el tema se complica por eso es necesario tener de una forma didáctica la explicación de estos temas, lo cual ha dado como resultado programas de simulación, convirtiéndose en un soporte de la materia. Como se ha visto [5], se han estado implementando guías y métodos para la enseñanza de la electrónica de potencia.

Hay cursos que se vuelven menos atractivos por los estudiantes o se consideran que no son necesarios, por eso se han buscado estrategias y se ha revisado en como renovar la forma de enseñanza de la teoría y la práctica. Ya se han implementado métodos de enseñanza, donde se hace el seguimiento a estudiantes de la materia electrónica de potencia para ver su rendimiento y mejorarlo con las nuevas alternativas propuestas, entre ellas un programa didáctico de la materia de electrónica de potencia [6].

Los inversores convierten una señal continua (DC) a una señal Alterna (AC), algunas de sus ventajas, es que disminuyen los costos, aumentan la eficiencia, reducen el número de elementos, no contienen partes móviles y tienen un mejor rendimiento, En ellos se controla el voltaje, la frecuencia o Ambos. Las aplicaciones más notables que los hacen relucir, es que con ellos se puede controlar la velocidad de un motor para evitar la saturación del núcleo, control de la relación entre el voltaje en la carga y de la fuente de alimentación [7]. También son los que se emplean para la conversión de energía de corriente continua generada por fuentes renovables como la fotovoltaica, la Eólica a corriente alterna [1].

Con el proyecto se busca que el usuario interactúe y vea la solución de forma inmediata de algunos problemas de circuitos convertidores de DC/AC comúnmente llamados inversores tanto monofásicos como trifásicos.

Se desea que este proyecto sea un soporte y orientación a los estudiantes de la materia de Electrónica de Potencia, o de los estudios que conlleven la utilización de inversores para que contrasten sus resultados y puedan gracias a este proyecto obtener un diseño acorde.

1.3 Antecedentes

Sintiendo la necesidad de controlar los motores y mejorar estos sistemas de control y los componentes electromecánicos que contenían, surgió la electrónica de potencia, nace a principio del siglo XX, con la introducción del tiratrón y toma fuerza con el rectificador de mercurio y en el transcurso del tiempo fueron apareciendo nuevos rectificadores con nuevos y mejores dispositivos, los cuales fueron usados en el control de energía hasta el año 1950. [8].

La electrónica de Potencia trata con la conversión y control de la potencia eléctrica para diferentes aplicaciones usando los dispositivos de estado sólido.

En 1925 David Prince nombra la palabra inversor en la revista de GE (General Electric), donde él decía, que era tomar el rectificador e invertirlo, [9] Donde se menciona que un inversor se utiliza para convertir la corriente continua DC a corriente AC monofásica y trifásica.

En 1948 inicio la primera revolución electrónica con la invención del transistor de silicio, el cual ahora está en muchas de las tecnologías avanzadas. La microelectrónica ha avanzado con los semiconductores de silicio. Otro acontecimiento que marco fue en 1956 con la creación del transistor de disparo PNP, el cual se definió como un tiristor o rectificador controlado de silicio (SCR).[8].

En 1958 empezó la segunda revolución electrónica con el desarrollo del tiristor comercial, de ahí han entrado diversos dispositivos semiconductores de potencia y técnicas de conversión. La revolución microelectrónica dio la capacidad de procesar una gran información a una alta velocidad, También ha logrado dar el poder de controlar grandes capacidades de energía. [8].

Los circuitos convertidores DC-AC llamados inversores son uno de los dispositivos más importantes actualmente en la electrónica de potencia, ya que estos se usan en muchas aplicaciones industriales, en el control de motores DC y AC, Fuentes de Alimentación y en Energías Renovables.

Desde hace varios años se ha visto un crecimiento en el simular las aplicaciones, ya que es una forma económica y eficiente, sin necesidad de tener el elemento físico. Por eso se ha trabajado con GUI de MATLAB® [10]. Se destacan algunos trabajos realizados con esta herramienta.

En [11] Se usa la interfaz Gráfica de Usuario (GUI) en el entorno MATLAB®, para la simulación de varias topologías de los convertidores dc-dc, convertidores ac-dc y compensadores de potencia reactiva, Los circuitos son simulados por el Toolbox de Potencia de Matlab. En la GUI el usuario proporciona datos de voltaje, frecuencia, fase, resistencia, inductancia, capacitor. Escoge un tipo de circuito de los que se disponen y corre el programa y puede visualizar las formas de onda.

En el artículo [12] Usaron la interfaz gráfica de usuario (GUI) en el entorno MATLAB®, para la simulación de circuitos básicos de los convertidores electrónicos de potencia, como rectificadores, inversores, convertidores DC-DC Y AC-AC. La función del programa permite un análisis sencillo del circuito, donde el usuario asigna valores a los parámetros que se utilizan en el esquema del circuito simulado y para establecer las condiciones de ejecución de simulación dentro de un dominio de tiempo. Después de ejecutarlo el programa le muestra las formas de onda del circuito.

En [13] Usan la plataforma de simulación empleando una interfaz de usuario (GUI) en el entorno MATLAB®, para el control y gestión de la energía en Edificios Zero-Energy (ZEBs, Edificios que se alimentan de la propia energía que producen por fuentes renovables) , donde el usuario da los valores que gestionara. Apoyado de un sistema de control de multilinguaje (PSO).

En este trabajo de grado [2] desarrollaron una simulación e implementación de una interfaz gráfica de usuario GUI en el entorno MATLAB®, para el análisis en simulación de los circuitos rectificadores de electrónica de potencia. Como rectificadores controlados y no controlados según el tipo de fuente de alimentación trifásico o monofásico y con alguna combinación de un tipo de carga (R-L-FEM). Donde Realizan un análisis armónico de su corriente de entrada y salida, y el resultado de diferentes valores de diseño como lo son voltaje y corriente rms en la fuente y la carga, potencia activa y aparente del circuito con el factor de potencia.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Desarrollo de una interfaz gráfica de usuario (GUI) en Matlab® - Simulink para convertidores de CC a CA. (Inversores)

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar una interfaz gráfica de usuario (GUI) para el ajuste de los parámetros de convertidores CC- CA implementados.
- Ser una plataforma de simulación práctica y útil para la solución de los circuitos con inversores (Monofásicos, Trifásicos).
- Mostrar el funcionamiento de algunas topologías básicas de inversores.
- Mostrar el efecto de algunas técnicas de control de la tensión.
- Mostrar el impacto de los armónicos en las topologías.

2 INVERSORES

2.1 Inversor de electrónica de Potencia.

El inversor es un dispositivo electrónico cuya función es convertir una señal de Tensión de corriente continua a su entrada a una señal de Tensión simétrica de corriente Alterna a su salida con el valor de frecuencia y magnitud deseadas. [7]

El inversor tiene muchas aplicaciones, y algunas que se pueden destacar son:

- Fuentes de alimentación de emergencia (Hospitales, Subestaciones, central de telecomunicaciones).
- Fuentes de alimentación de potencia AC ininterrumpida para suplir cargas de dispositivos eléctricos, electrónicos a bordo de camiones, embarcaciones, autos, casas rodantes [14], [15].
- Aprovechar la tensión continua de Energías Renovables.
- Variadores de Velocidad para máquinas de corriente alterna.
- Calentamientos por inducción.
- Filtros Activos.
- Dispositivos FACTS (Sistemas Flexibles en corriente alterna).

La salida de Señal de los inversores de potencia es una señal rectangular, donde por medio de unas técnicas de modulación, como la modulación SPWM mejoran esta señal dejándola de forma casi sinusoidal y después por medio de unos filtros se obtiene la señal sinusoidal requerida para la operación. Ya que el valor de los armónicos afecta mucho los dispositivos electrónicos y los dispositivos eléctricos de potencia como los motores.

El inversor es uno de los dispositivos, que ahora es de lo más importantes en la electrónica de potencia, diversos estudios se han hecho sobre él [2],[4].[16], [17],[18],[19] , su importancia no es solo en su eficacia si no en el factor económico [20], el cual prima en la hora de realizar un proyecto.

Se pueden clasificar en general en dos topologías:

- Monofásicas (Medio Puente, Puente completo).
- Trifásicas.

2.1.1 Configuración de Medio Punte Monofásico [7]:

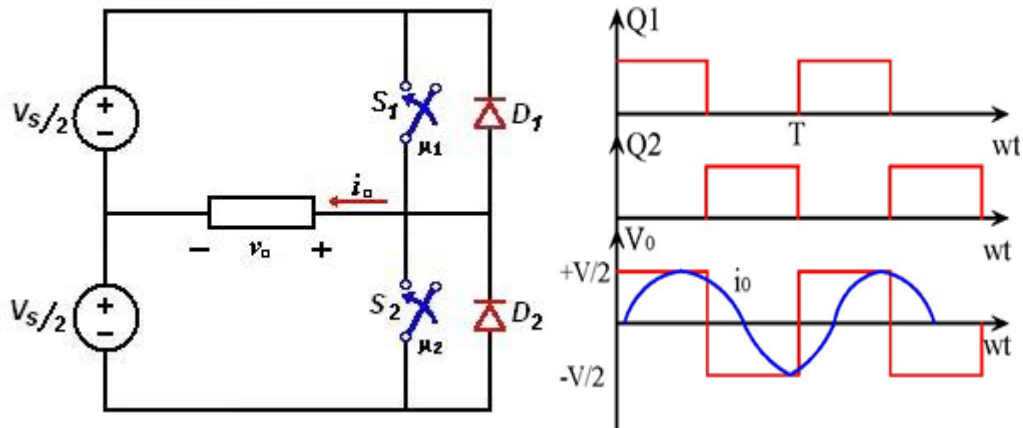


Figura 1. Inversor de medio puente, Formas de la onda de salida.

Esta es la configuración básica de un inversor monofásico. Donde solo hay dos transistores y conducen en intervalos diferentes, Cada uno tiene un diodo en anti paralelo para ayudar en los instantes de encendido y apagado donde circulara la corriente ya que por lo general hay cargas inductivas y capacitivas.

La tensión Eficaz en la carga es:

$$V_{oR} = \sqrt{\frac{2 \int_0^{T/2} V_s^2 d(wt)}{T \cdot 4}} = \frac{V_s}{2}$$

La tensión en la carga en forma general se puede expresar:

$$v_o(wt) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \text{sen}(nwt)$$

La corriente media entregada al circuito por cada mitad de alimentación es:

$$I_{oS} = \frac{I_p}{2\pi} [\text{COS}(\varphi) - \text{COS}(\pi - \varphi)]$$

2.1.2 Configuración de Puentes Monofásico [7]:

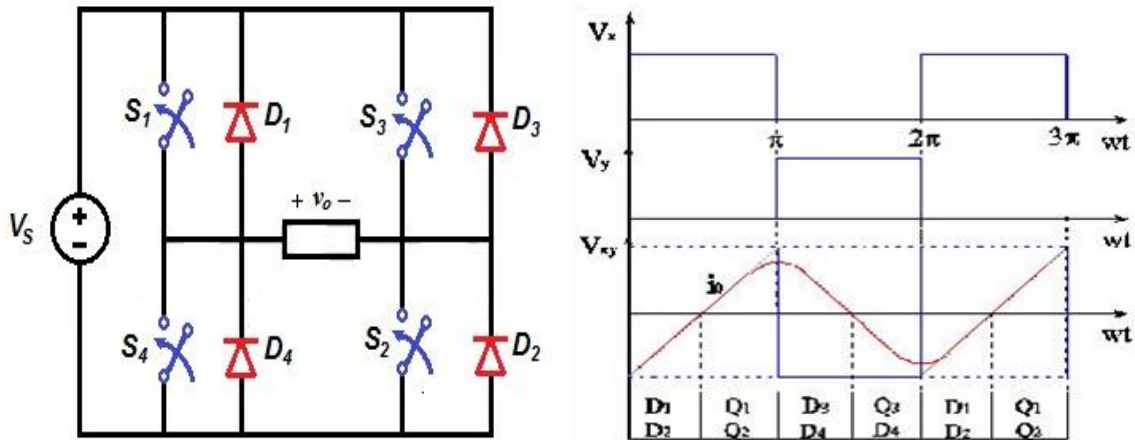


Figura 2. Inversor de puente completo, Formas de la onda de salida.

Esta configuración cuenta con cuatro transistores y dos conductores cada medio intervalo de tiempo, También Cada uno tiene un diodo en anti paralelo para ayudar en los instantes de encendido y apagado donde circulara la corriente ya que por lo general hay cargas inductivas y capacitivas.

La tensión Eficaz en la carga es:

$$V_{oR} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_s^2 d(wt)} = V_s$$

La tensión en la carga en forma general se puede expresar:

$$v_o(wt) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \text{sen}(nwt)$$

La corriente media entregada al circuito por cada mitad de alimentación es:

$$I_{oS} = \frac{I_p}{\pi} [\text{COS}(\varphi) - \text{COS}(\pi - \varphi)]$$

2.1.3 Configuración de Puente Trifásico [5]:

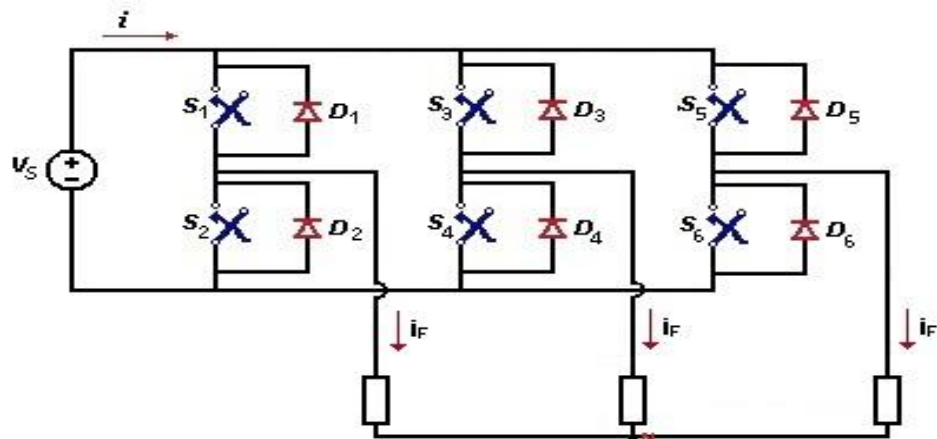


Figura 3. Inversor de puente trifásico.

Esta configuración consta de seis transistores y diodos conectados en anti paralelo que permiten que fluya la corriente que está desfasada con respecto a los voltajes. Para los inversores trifásicos existen dos posibles patrones para las señales de control de los dispositivos interruptores de potencia, los cuales son:

Tres interruptores encendidos en todo momento; lo que origina voltajes de salida que son definidos para cualquier condición en la carga.

Dos interruptores encendidos en todo momento; lo que resulta en voltajes de salida no definidos para algunas condiciones en la carga.

Las cargas que se conectan a los inversores son cargas R, RL, RLC.

2.1.4 Parámetros de Rendimiento

Los parámetros de rendimiento más usados en los inversores son:

2.1.4.1 Factor armónico de la n-esima armónica (Hfn)

$$HF_n = \frac{V_{on}}{V_{o1}} \quad \text{para } n > 1$$

V_{o1} es el V_{rms} de la componente fundamental, V_{on} es el valor eficaz de la n-esima componente armónica.

2.1.4.2 Distorsión Armónica Total (THD).

Es una medida de la coincidencia de forma entre una onda y su componente fundamental.

$$THD = \frac{1}{V_{o1}} * \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_{on}^2}$$

En este caso se representó el THD de voltaje, pero para la corriente es de igual forma.

2.2 Tipos de Modulación de los inversores.

2.2.1 Modulación por ancho de pulso único

Para el control de la modulación por ancho de pulso único, existe un único pulso en cada medio ciclo, modificando su ancho para así poder controlar la tensión de salida del inversor. En la figura 4. Se observa señales de control junto con la tensión de salida de los puentes inversores monofásicos completos.

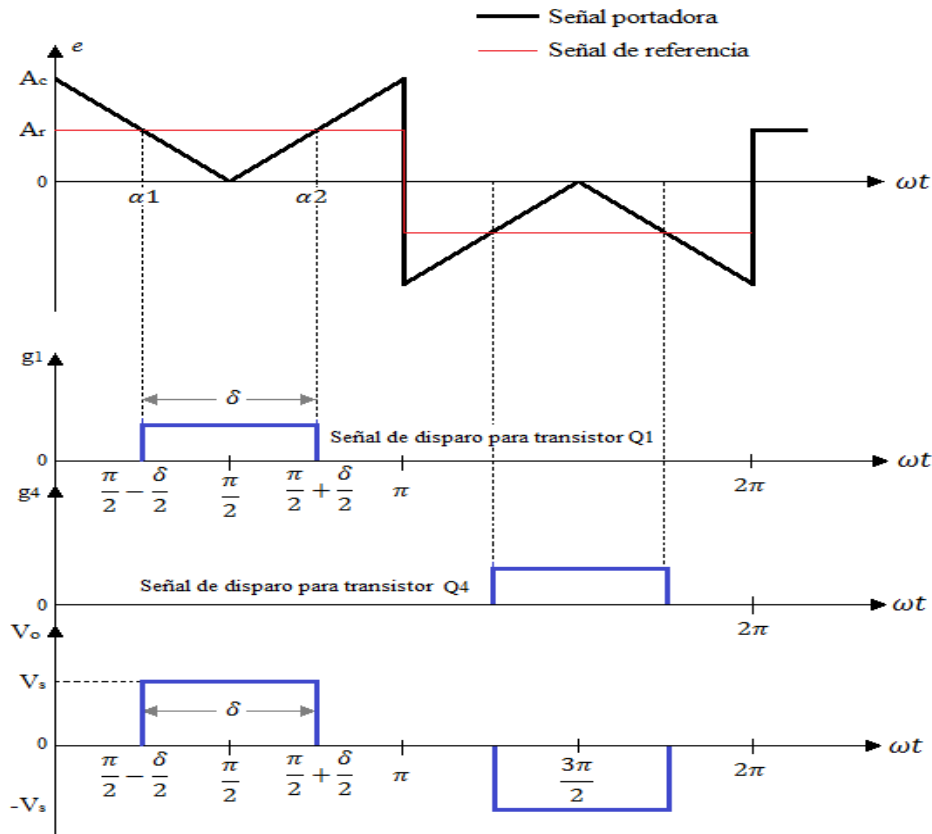


Figura 4. Modulación por ancho de pulso único.

Para generar la señal de disparo se necesita comparar la señal de referencia rectangular de amplitud A_r , con una señal portadora de amplitud A_c . Al relacionar las amplitudes A_r y A_c se obtiene el índice de modulación de amplitud mostrado a continuación:

$$M = \frac{A_r}{A_c}$$

La frecuencia de la señal de referencia determina la frecuencia fundamental de la tensión de salida, así la tensión instantánea de salida es $v_o = V_s(g_1 - g_4)$.

El voltaje rms de salida se puede determinar con:

$$V_o = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{(\pi-\delta)/2}^{(\pi+\delta)/2} V_s^2 d(\omega t) \right]^{1/2} = V_s \sqrt{\frac{\delta}{\pi}} \quad (1) [8]$$

Variando A_r desde cero hasta A_c , se logra cambiar el ancho de pulso δ , de 0° a 180° , y el voltaje rms de salida de V_o hasta V_s .

La serie de Fourier del voltaje de salida es:

$$v_o(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \text{sen} \frac{n\delta}{2} \text{sen}(n\omega t) \quad (2)$$

Por consiguiente los armónicos pares ($n=2,4,6\dots$) están ausentes debido a la simetría del voltaje de salida respecto al eje x.

2.2.2 Modulación por ancho de pulso múltiple

Si se aumenta los pulsos por cada medio ciclo podemos reducir en un margen los armónicos. La generación de señales de disparo (ver figura 5), para encender y apagar los transistores se ve en la figura 5a, comparando una señal de referencia contra una onda portadora triangular. Las señales de disparo se ven en la figura 5b. La frecuencia de la señal de referencia establece la frecuencia de salida f_o y la frecuencia de la portadora f_c determina la cantidad de pulsos p por cada medio. El índice de modulación controla el voltaje de salida. A esta clase de modulación se le llama modulación por ancho de pulso uniforme (UPWM). La cantidad de pulsos por medio ciclo se determina con:

$$p = \frac{f_c}{2f_o} = \frac{m_f}{2} \quad (3)$$

$m_f = f_c / f_o$ es la relación de modulación de frecuencia. El voltaje instantáneo se define como $v_o = v_s(g_1 - g_4)$. En la figura 5c, se muestra el voltaje de salida para los puentes inversores completos (UPWM).

Para calcular el voltaje rms de salida si se sabe que el ancho de cada pulso es δ , se utiliza la siguiente ecuación:

$$v_o = \left[\frac{2p}{2\pi} \int_{(\pi/p-\delta)/2}^{(\pi/p+\delta)/2} V_s^2 d(\omega t) \right]^{1/2} = V_s \sqrt{\frac{p\delta}{\pi}} \quad (4)$$

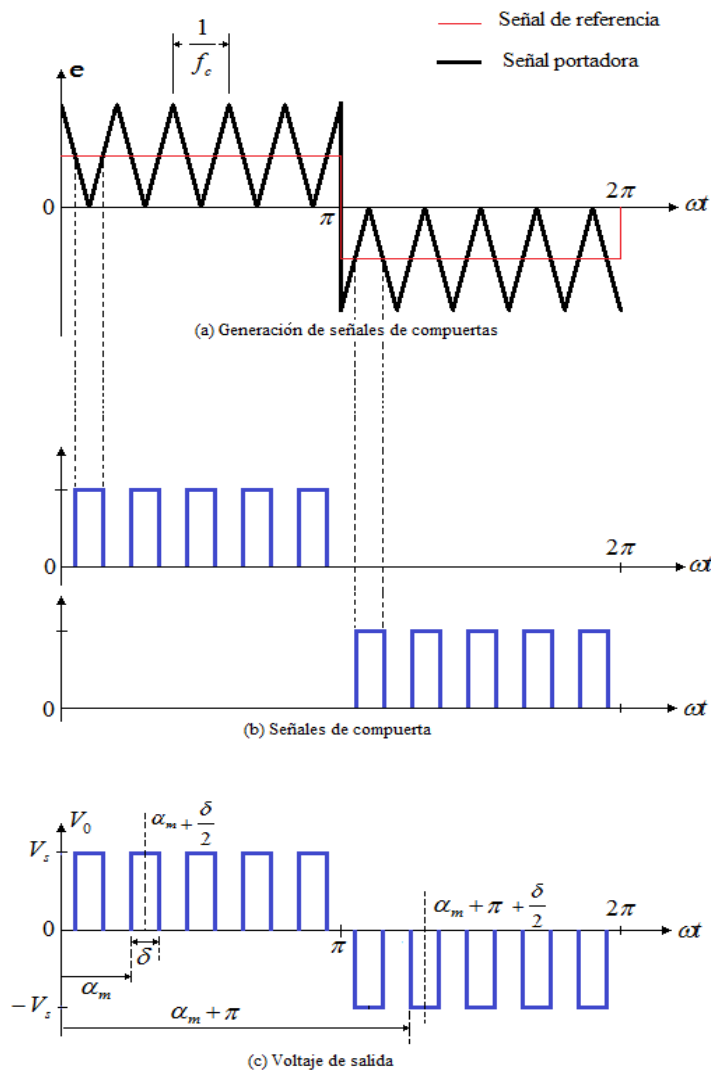


Figura 5. Modulación por ancho de pulso múltiple.

El índice de modulación varía de 0 a 1, este modifica el ancho de pulso desde 0 hasta $T/2p$ (0 a π/p), y el voltaje rms de salida de V_o hasta V_s . El voltaje instantáneo de salida en su forma general (serie de Fourier) es:

$$v_o(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} B_n \text{sen}(n\omega t) \quad (5)$$

Para determinar el coeficiente B_n de la ecuación anterior hay que considerar un par de pulsos tal que la duración δ del pulso positivo comience en $\omega t = \alpha$ y la del negativo, del mismo ancho comience en $\omega t = \pi + \alpha$; esto se puede apreciar en la Figura 5. Para que un pulso positivo del m-esimo par comience en $\omega t = \alpha_m$ y termine en $\omega t = \alpha_m + \delta$, el coeficiente de Fourier para un par de pulsos debe ser:

$$b_n = \frac{4V_s}{n\pi} \text{sen} \frac{n\delta}{4} \left[\text{sen} n \left(\alpha_m + \frac{3\delta}{4} \right) - \text{sen} n \left(\pi + \alpha_m + \frac{3\delta}{4} \right) \right] \quad (6)$$

Por otro lado en el coeficiente B_n de la ecuación (5) se puede determinar los efectos de todos los pulsos:

$$B_n = \sum_{m=1}^{2p} \frac{4V_s}{n\pi} \text{sen} \frac{n\delta}{4} \left[\text{sen} n \left(\alpha_m + \frac{3\delta}{4} \right) - \text{sen} n \left(\pi + \alpha_m + \frac{\delta}{4} \right) \right] \quad (7)$$

2.2.3 Modulación por ancho de pulso sinusoidal

En la modulación de múltiple pulsos se mantiene igual el ancho de todos los pulsos, pero en esta modulación se hace variar el ancho de cada pulso en simetría con la amplitud de una onda sinusoidal evaluada en el centro del mismo pulso.

En la figura 6a se muestran las señales de control que se originan comparando a una señal sinusoidal de referencia con una onda triangular de frecuencia f_c . La frecuencia de salida f_o del inversor es definida por la frecuencia f_r de la señal de referencia, y la amplitud pico A_r de esta señal controla el índice de modulación M , y en consecuencia también voltaje rms de salida v_o .

Si comparamos dos señales de referencia v_r y $-v_r$ con una señal portadora bidireccional, como se muestra en la figura 6a, se generan unas señales de disparo g_1 y g_4 , como se muestra en la figura 6b, estas señales de disparo no se pueden liberar al mismo tiempo, depende de la frecuencia de la señal portadora. Dentro de las restricción de que dos transistores de la misma rama (Q1 y Q4) no pueden conducir al mismo tiempo, se ve reflejado en la figura 6c donde se muestra el voltaje de salida instantáneo.

En la figura 6d se evidencia que al aplicar una onda portadora triangular unidireccional se pueden originar iguales señales de disparo, esto quiere decir que es más fácil implementar este método. Variando el índice de modulación M , se puede modificar el voltaje rms de salida. Si se mira detalladamente la gráfica 6a se puede notar que el área de cada pulso corresponde en forma aproximada al área bajo la onda sinusoidal, entre los puntos medios adyacentes de los periodos de apagado de las señales de disparo.

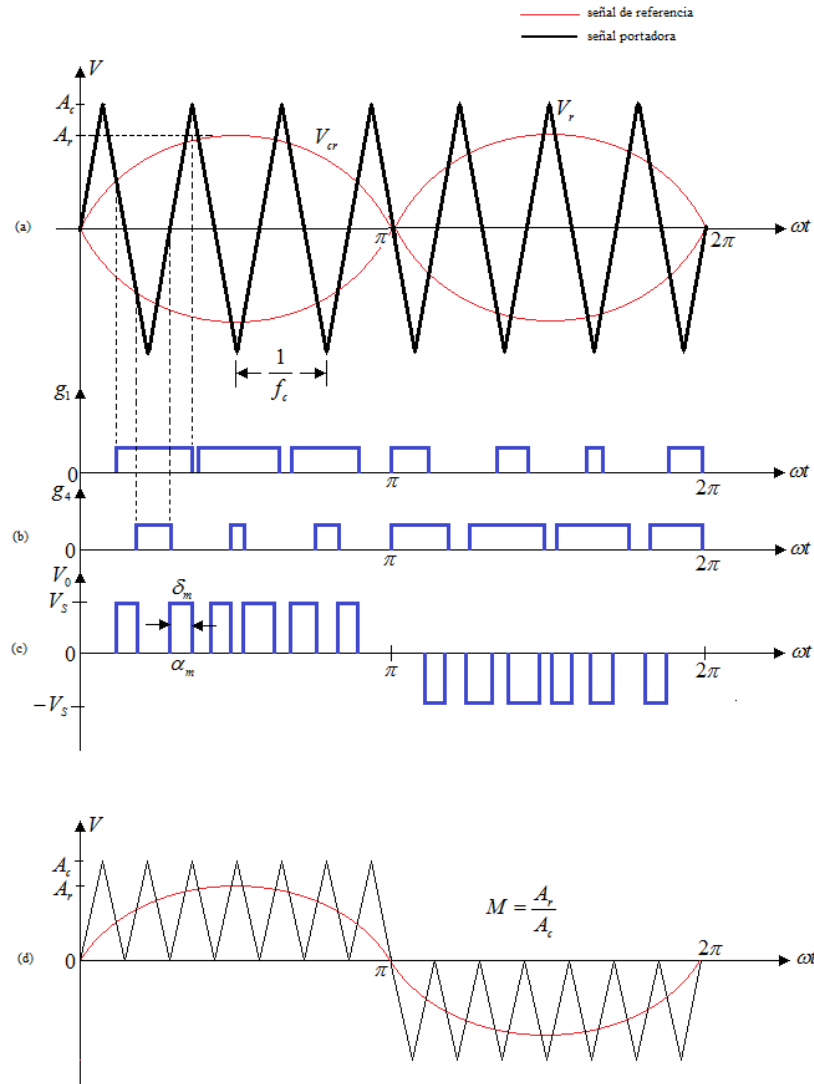


Figura 6. Modulación por ancho de pulso sinusoidal

Si δ_m es el ancho del m-esimo pulso, se puede ampliar la ecuación (4) para determinar el voltaje de salida.

$$V_o = V_s \left(\sum_{m=1}^{2p} \frac{\delta_m}{\pi} \right)^{1/2}$$

En consecuencia la ecuación (7) se puede aplicar para determinar el coeficiente de Fourier del voltaje de salida como se muestra a continuación:

$$B_m = \sum_{m=1}^{2p} \frac{4V_s}{n\pi} \text{sen} \frac{n\delta_m}{4} \left[\text{sen} n \left(\alpha_m + \frac{3\delta_m}{4} \right) - \text{sen} n \left(\pi + \alpha_m + \frac{\delta_m}{4} \right) \right] \quad (7)$$

Se puede visualizar el inversor trifásico, como tres fases monofásicas desfasadas 120°, por tanto los análisis anteriores sirven para la simulación SPWM trifásica. Como se puede ver en la gráfica 7. Se puede notar como es dicha modulación:

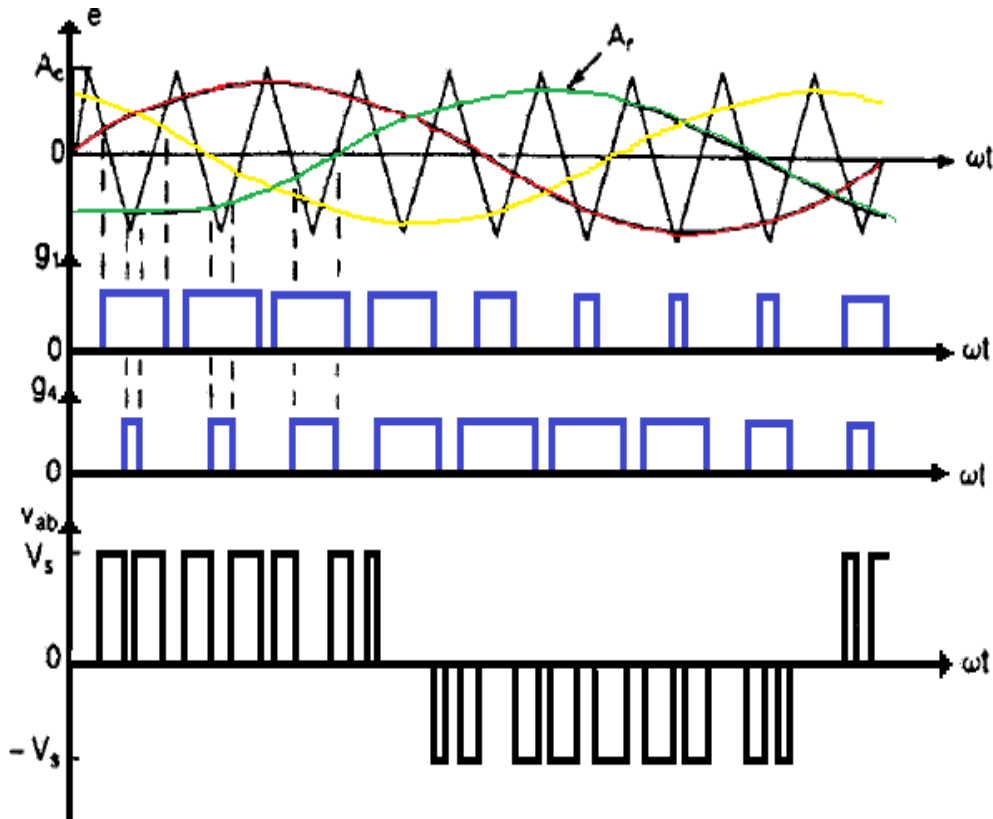


Figura 7. Modulación por ancho de pulso sinusoidal Trifásico

2.2.4 Modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada

La figura 6c indica que los anchos de los pulsos más cercanos al pico de la onda sinusoidal no cambia mucho al variar el índice de modulación. Esto se debe a las características de una onda sinusoidal, y la técnica de SPWM se puede modificar para que se aplique la onda portadora durante los primeros y últimos intervalos de 60° por medio ciclo (es decir, de 0° a 60° y de 120° a 180°). esta modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada (MSPWM, de modified sinusoidal pulse-width modulation) se ve en la figura 8. Aumenta la componente fundamental, y de potencia, y también reduce las pérdidas por conmutación.

El m -ésimo tiempo, t_m , y ángulo α_m , de intersección se puede determinar con

$$t_m = \frac{\alpha_m}{\omega} = t_x + m \frac{T_s}{2} \quad \text{para } m=1,2,3,\dots,p \quad (8)$$

En donde t_x se puede despejar de

$$1 - \frac{2t}{T_s} = M \text{sen} \left[\omega \left(t_x + \frac{mT_s}{2} \right) \right] \quad \text{para } m=1,3,\dots,p \quad (9)$$

$$\frac{2t}{T_s} = M \text{sen} \left[\omega \left(t_x + \frac{mT_s}{2} \right) \right] \quad \text{para } m=2,4,\dots,p \quad (10)$$

Las intersecciones con el tiempo, durante los últimos intervalos de 60° se determinan con

$$t_{m+1} = \frac{\alpha_{m+1}}{\omega} = \frac{T}{2} - t_{2p-m} \quad \text{para } m=p,p+1,\dots,2p-1 \quad (11)$$

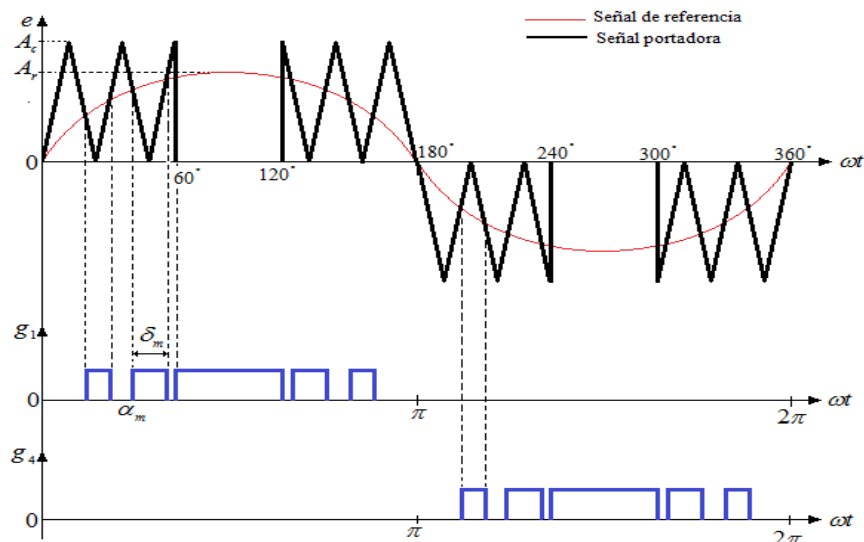


Figura 8. Modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada

en donde $T_s = T/6(p+1)$. El ancho d_m del m-ésimo pulso (o el Angulo δ_m del pulso) se pueden determinar con

$$d_m = \frac{\delta_m}{\omega} = t_{m+1} - t_m \quad (12)$$

2.2.5 Modulación por desplazamiento de fase

Se puede tener control de voltaje usando varios inversores y sumando los voltajes de salida de los inversores individuales. Se puede concebir que un puente inversor monofásico completo, sea la suma de dos medio puentes inversores. Un desplazamiento de fase de 180° produce un voltaje de salida como el que se ve en la figura 9c,

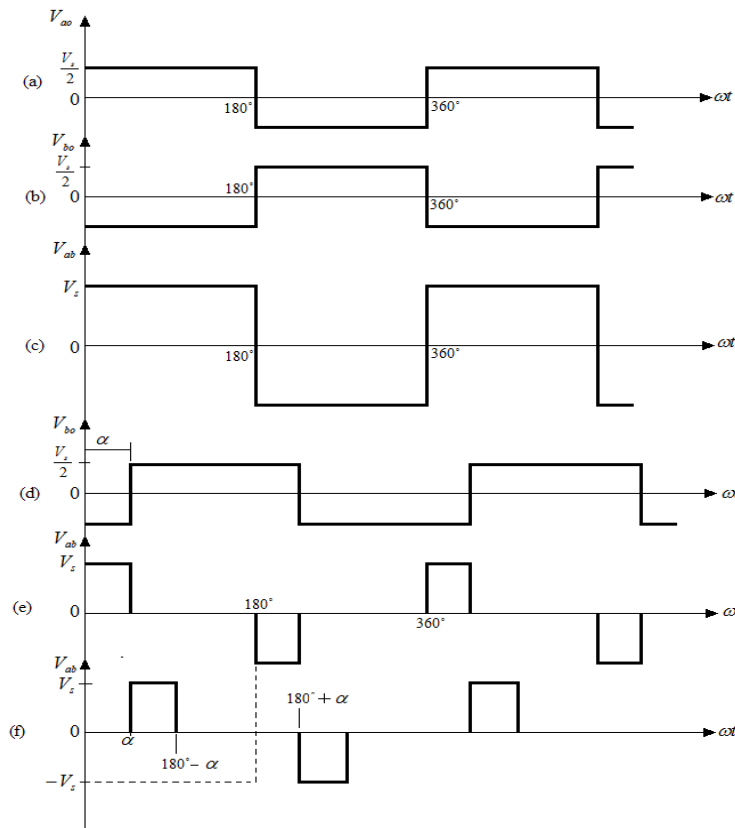


Figura 8. Control por desplazamiento de fase

Mientras que en un ángulo de retardo (o desplazamiento) de α produce una salida como la de la figura 9e. Por ejemplo la señal de compuerta g1 para el puente inversor medio se puede retardar el ángulo α para producir la señal de compuerta g2.

El voltaje de salida es:

$$V_o = V_s \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \quad (13)$$

Si

$$V_{ao} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \text{sen } n\omega t$$

Entonces

$$V_{bo} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \text{sen } n(\omega t - \alpha)$$

El voltaje de salida es

$$V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} (\text{sen } n\omega t - \text{sen } n(\omega t - \alpha))$$

Usando identidades trigonométricas se puede simplificar a

$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \text{sen } \frac{n\alpha}{2} \cos n\left(\omega t - \frac{\alpha}{2}\right) \quad (14)$$

El valor ms del voltaje de salida es

$$V_{o1} = \frac{4V_s}{\sqrt{2}} \text{sen } \frac{\alpha}{2} \quad (15)$$

La ecuación 15 indica que el voltaje de salida se puede variar cambiando el ángulo de retardo. Esta clase de control tiene utilidad especial para aplicaciones con grandes potencias que requieren una gran cantidad de dispositivos de conmutación en paralelo.

Si las señales de compuerta g_1 y g_2 , se retardan los ángulos $\alpha_1 = \alpha$ y $\alpha_2 = \pi - \alpha$, el voltaje de salida V_{ab} tiene simetría de cuarto de onda en $\pi/2$, como se ve en la figura 9f y así se obtiene:

$$\begin{aligned} V_{ao} &= \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \text{sen } n(\omega t - \alpha) \quad \text{para } n = 1,3,5,\dots \\ V_{bo} &= \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \text{sen } n(\omega t - \pi + \alpha) \quad \text{para } n = 1,3,5,\dots \\ V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} &= \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \text{sen}(n\omega t) \cos(n\alpha) \quad \text{para } n = 1,3,5,\dots \quad (16) \end{aligned}$$

2.2.6 Modulación PWM con tercer armónica.

Esta modulación es muy similar a la modulación SPWM, su diferencia radica en la señal de referencia sinusoidal; En la modulación con tercera armónica, a la señal de referencia sinusoidal se le agrega la componente de tercer armónica.

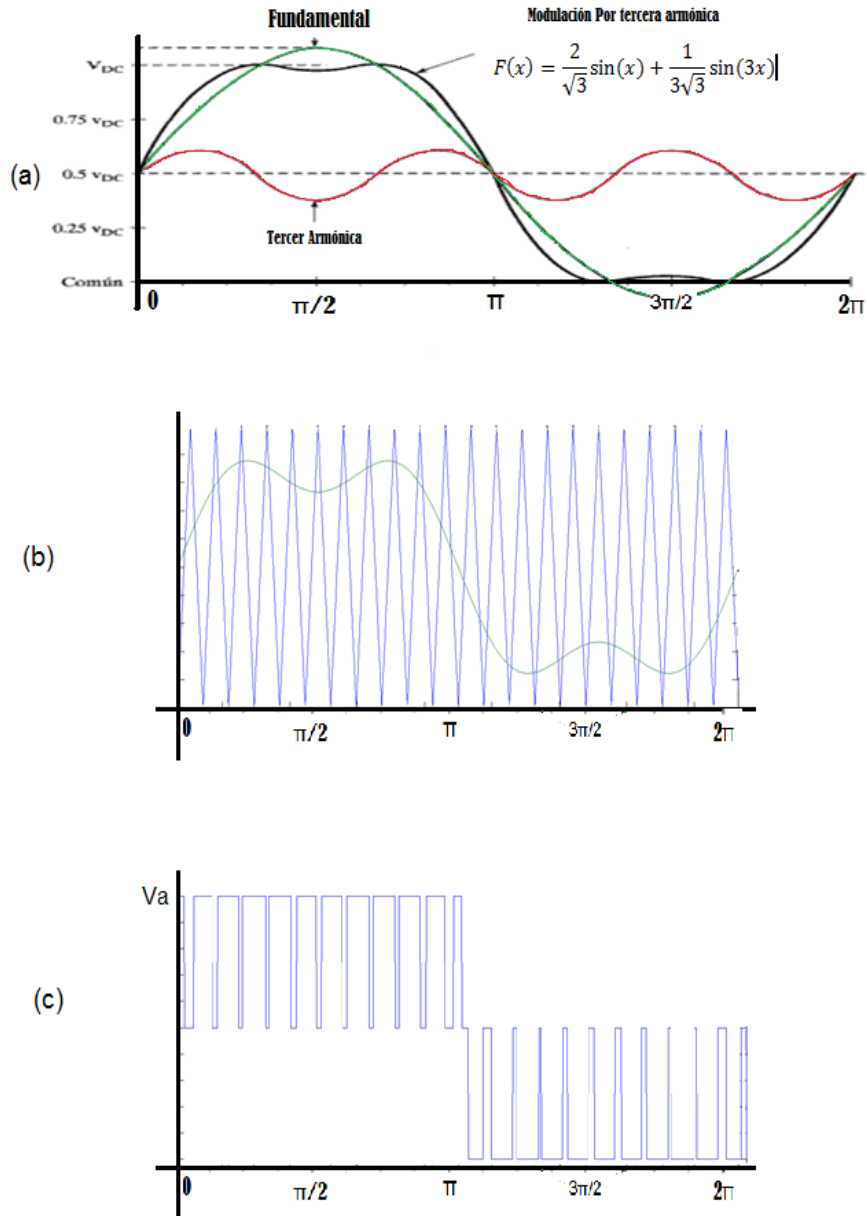


Figura 9. Modulación PWM con Tercera armónica.

En la figura 9a. Se aprecia la forma de la señal sinusoidal y la componente de tercer armónica, la comparación se hace con esa señal y con una señal triangular (Figura 9b), y el resultado de la modulación en este caso sobre la fase a se nota en la figura 9c.

2.2.7 Modulación de espacio Vectorial.

Resumen: La modulación vectorial consiste en primero calcular las componentes del vector de referencia V_a y V_b ; Después se determina el sector donde se encuentra el vector, Se determina los tiempos de estados de vectores adyacentes, se calculan el tiempo total del vector nulo, se prosigue con generar la secuencia de bloques del algoritmo de control, y al final se visualizan los voltajes de fase.

Al modular o controlar los inversores, se ha visto distintos tipos de modulación, el tipo de método a elegir depende de las variables que caracterizan a la aplicación como: Los dispositivos semiconductores, el nivel de potencia a controlar, las características de la forma de onda y los requerimientos de la carga.

Se comparan las modulaciones para inversores trifásicos que usan la PWM con la modulación vectorial (SVPWM) y se puede notar una diferencia [21]; En la modulación PWM se toma al inversor como 3 moduladores, uno por cada fase y desfasado 120° uno del otro. En cambio la SVPWM sustituye todo el sistema trifásico por un vector, donde la frecuencia está reflejada en la velocidad de giro con el paso del tiempo.

Se toma en un instante de tiempo el valor de la tensión del sistema trifásico, V_a , V_b , V_c y se reduce por medio de una suma vectorial a un vector único \vec{V} . El vector espacial complejo gira con una frecuencia angular ω alrededor del origen en el sentido de las agujas del reloj. [8]

La expresión matemática para el vector resultante es:

$$\vec{V} = \frac{2}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c); \quad a = e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \quad a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (1)$$

El valor de $2/3$ es un valor de escala.

Si los voltajes son sinusoidales desfasados uno del otro 120° el vector queda así:

$$\vec{V} = V_p * e^{j\omega t} \quad (2)$$

Este es un vector rotatorio con amplitud constante que gira en el plano complejo con una velocidad de giro ω . Las salidas del inversor hacia la carga no son sinusoidales, estas dependen de los estados de conducción de los dispositivos que contiene el inversor. El inversor puede tener 8 estados de conducción el cual

genera los vectores $V_0, V_1, V_2, \dots, V_6, V_7$. Estos son los obtenidos en el estudio de funcionamiento del inversor trifásico de tres ramas como el mostrado en la figura 10. [22]

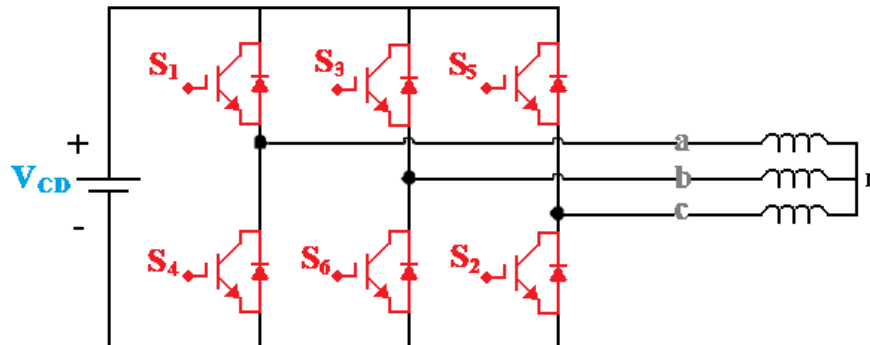


Figura 10. Inversor trifásico de tres ramas.

El vector V_1 se obtiene cuando se activa los dispositivos S_1, S_2, S_6 . Los voltajes de fase serían:

$$V_a = \frac{2}{3}V_{cc} \qquad V_b = \frac{2}{3}V_{cc} \qquad V_c = \frac{2}{3}V_{cc} \quad (3)$$

Y el vector correspondiente es:

$$\vec{V}_1 = \frac{2}{3}V_{cc} \quad (4)$$

Lo mismo sucederá para los demás vectores, ahora se representan los estados de conducción para conocer cual dispositivo se activa por vector, se muestra en la Figura 11.

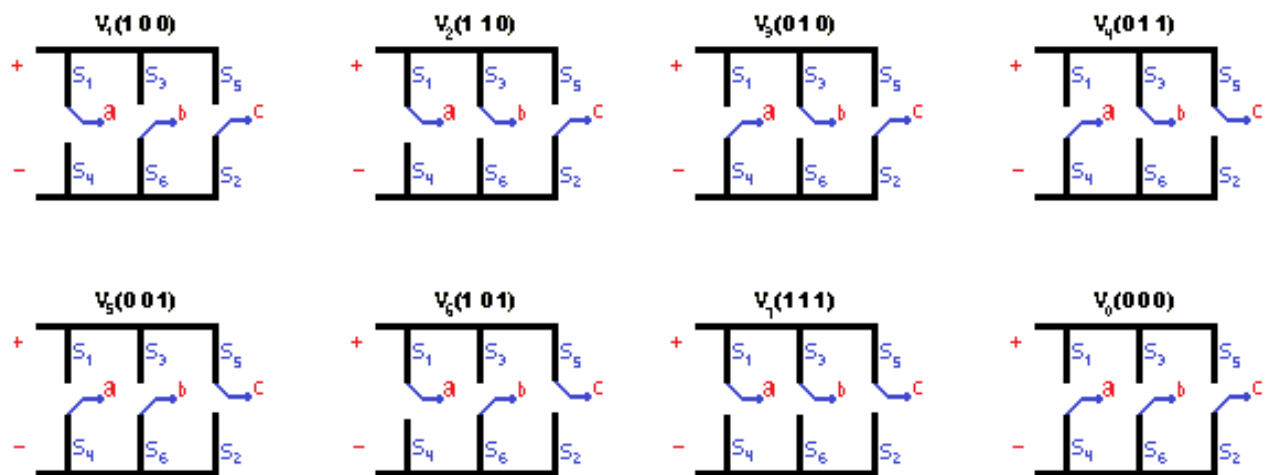


Figura 11. Estados de conmutación del inversor

Por tanto en la siguiente tabla se muestra el resultado de cada vector:[23]

\vec{V}_1	$\vec{V}_1 = \frac{2}{3} \left(+\frac{E}{2} - \frac{E}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} - \frac{E}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right)$	$\frac{2}{3} E$
\vec{V}_2	$\vec{V}_2 = \frac{2}{3} \left(+\frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} - \frac{E}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right)$	$\frac{2}{3} E e^{j\frac{\pi}{3}}$
\vec{V}_3	$\vec{V}_3 = \frac{2}{3} \left(-\frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} - \frac{E}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right)$	$\frac{2}{3} E e^{j\frac{2\pi}{3}}$
\vec{V}_4	$\vec{V}_4 = \frac{2}{3} \left(-\frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{E}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right)$	$\frac{2}{3} E e^{j\pi}$
\vec{V}_5	$\vec{V}_5 = \frac{2}{3} \left(-\frac{E}{2} - \frac{E}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{E}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right)$	$\frac{2}{3} E e^{j\frac{4\pi}{3}}$
\vec{V}_6	$\vec{V}_6 = \frac{2}{3} \left(+\frac{E}{2} - \frac{E}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{E}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right)$	$\frac{2}{3} E e^{j\frac{5\pi}{3}}$
\vec{V}_7	$\vec{V}_7 = \frac{2}{3} \left(+\frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{E}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right)$	0
\vec{V}_0	$\vec{V}_0 = \frac{2}{3} \left(-\frac{E}{2} - \frac{E}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} - \frac{E}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right)$	0

Tabla 1. Vectores activos y nulos del inversor.

Se generaron seis vectores activos (V_1 a V_6) y dos vectores más, denominados vectores nulos (V_0 y V_7). Si se ubica los vectores en un plano complejo, se obtiene la siguiente figura:

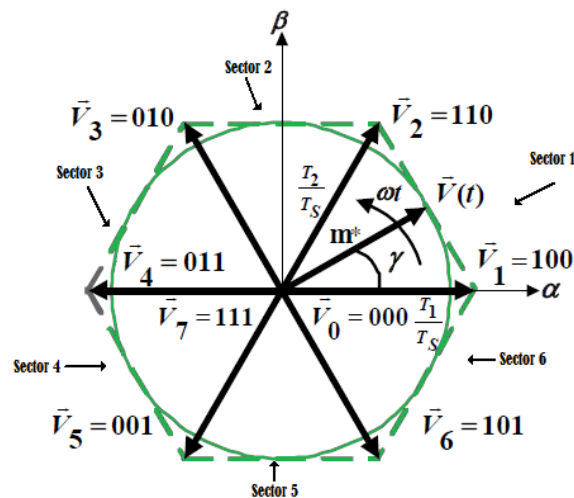


Figura 12. Diagrama vectorial de los ocho vectores obtenidos a partir de los estados de conmutación del inversor trifásico.

2.2.7.1 Estrategia de la modulación de espacio Vectorial. [7]

El método es generar un vector de referencia mediante una combinación de dos vectores adyacentes (vectores activos) y el vector nulo, como se ve en la figura [12], si se ubica el vector en uno de los 6 estados y se toma como ejemplo el vector de referencia en el sector 1, el vector estará compuesto por los vectores adyacentes V_1 y V_2 y el vector nulo. Para generar el vector de referencia se puede hacer en tres pasos:

- I. Calcular los valores de V_d , V_q , V_{ref} y ángulo α .
- II. Calcular el tiempo de muestreo de cada vector de tensión T_1 , T_2 , T_0 .
- III. Determinar las secuencias de conmutación de los dispositivos del inversor.

2.2.7.1.1 Cálculos de los valores de V_d , V_q , V_{ref} y ángulo α .

Para poder calcular estos valores se debe hacer una transformación de los sistemas de coordenadas, Tomando como referencia el vector \vec{V}_{ref} y haciendo la transformación del sistema de 3 ejes a 2 ejes ($a-b-c \rightarrow d-q$) como se ve en la figura 13.

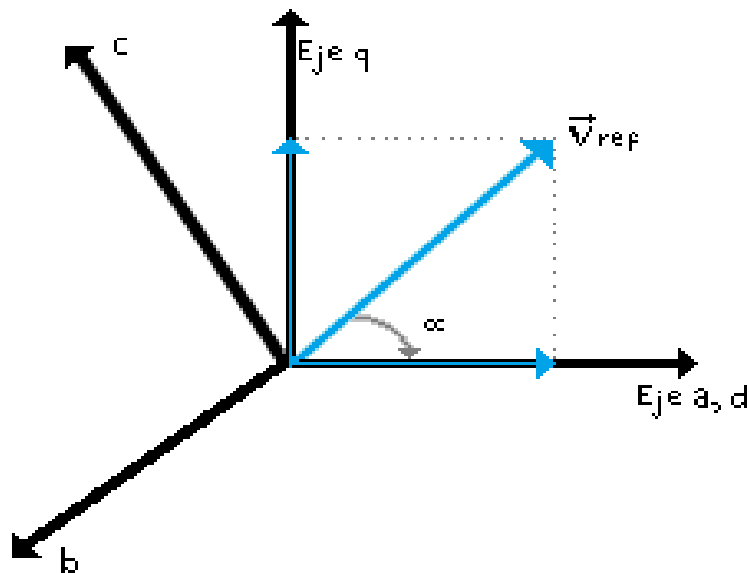


Figura 13. Transformación de coordenadas

La transformación queda así:

$$V_d = v_{an} - v_{bn} \cos(60^\circ) - v_{cn} \cos(60^\circ) = v_{an} - \frac{1}{2}v_{bn} - \frac{1}{2}v_{cn} \quad (5)$$

$$V_q = 0 + v_{bn} \cos(30^\circ) - v_{cn} \cos(30^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2}v_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{cn} \quad (6)$$

Se puede expresar vectorialmente así:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Finalmente la magnitud de la tensión y el ángulo está expresada así:

$$|V_{ref}| = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} ; \quad \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_q}{V_d}\right) = \omega_s t = 2\pi f_s t; \quad (8)$$

f_s Es la frecuencia fundamental.

2.2.7.1.2 Calculo de los tiempos T_1 , T_2 , y T_0 . (sector 1).

Para calcular los tiempo tomando como referencia el vector V_{ref} que se ve en la figura, donde los vectores V_a y V_b serían V_1 y V_2 respectivamente.

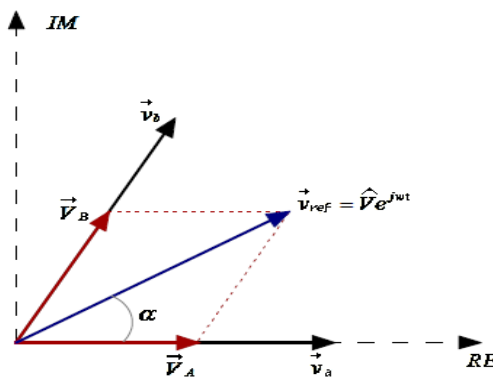


Figura 14. Diagrama Vectorial.

Se asume que el V_{ref} es constante y estacionario en el tiempo de muestreo. Entonces el V_{ref} es igual al promedio de los valores aplicados a la carga en el periodo T ($T=1/f_s$), el cual se expresa como:

$$\int_0^T \overrightarrow{v_{ref}} dt = \int_0^{T_1} v_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} v_2 dt + \int_0^{T_0} V_0 dt \quad (9)$$

Por tanto el v_{ref} es igual a:

$$\overrightarrow{v_{ref}} = \frac{1}{T}(v_1 T_1 + v_2 T_2 + v_0 T_0) \quad (10)$$

El tiempo T_1 está activo cuando lo está la tensión V_1 , T_2 está activo cuando lo está la tensión V_2 , y T_0 activo cuando está activa la tensión V_0 . Y todos estos tiempos cumplen con la restricción: $T = T_1 + T_2 + T_0$; (11).

Si se toma la figura 14, se analiza y se reemplaza en la ecuación (10) se obtiene:

$$T|\overrightarrow{v_{ref}}| \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix} = T_1 \frac{2}{3} v_{cc} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \frac{2}{3} v_{cc} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Se despeja T_1 y T_2 y se resuelve el sistema de ecuaciones se obtiene:

$$T_1 = T \left[\frac{|\overrightarrow{v_{ref}}|}{\frac{2}{3} v_{cc}} \right] \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)} ; \quad T_2 = T \left[\frac{|\overrightarrow{v_{ref}}|}{\frac{2}{3} v_{cc}} \right] \frac{\sin(\alpha)}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)} ; \quad (13)$$

Ahora para el cálculo de T_0 , se utiliza la ecuación (11) y da como resultado:

$$T_0 = T - (T_1 + T_2) \quad (14)$$

Los cálculos anteriores de T_1, T_2, T_0 eran para los vectores ubicados en el sector 1; Pero estos cálculos se pueden hacer igual para el resto de sectores, En la siguiente tabla (2) se muestra el resultado de los tiempos en los seis sectores.

Sector	T_a	T_b	T_0
Sector 1 ($0 \leq \omega t \leq \pi/3$)	$T_1 = M \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right)$	$T_2 = M \sin(\alpha)$	$T_0 = T_7 = (T - T_1 - T_2)/2$
Sector 2 ($\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$)	$T_2 = M \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \alpha\right)$	$T_3 = M \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right)$	$T_0 = T_7 = (T - T_2 - T_3)/2$
Sector 3 ($2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$)	$T_3 = M \sin\left(\frac{3\pi}{3} - \alpha\right)$	$T_4 = M \sin\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)$	$T_0 = T_7 = (T - T_3 - T_4)/2$
Sector 4 ($\pi \leq \omega t \leq 4\pi/3$)	$T_4 = M \sin\left(\frac{4\pi}{3} - \alpha\right)$	$T_5 = M \sin\left(\alpha - \frac{3\pi}{3}\right)$	$T_0 = T_7 = (T - T_4 - T_5)/2$
Sector 5 ($4\pi/3 \leq \omega t \leq 5\pi/3$)	$T_5 = M \sin\left(\frac{5\pi}{3} - \alpha\right)$	$T_6 = M \sin\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right)$	$T_0 = T_7 = (T - T_5 - T_6)/2$
Sector 6 ($5\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi$)	$T_6 = M \sin\left(\frac{6\pi}{3} - \alpha\right)$	$T_1 = M \sin\left(\alpha - \frac{5\pi}{3}\right)$	$T_0 = T_7 = (T - T_6 - T_1)/2$

Tabla 2. Tiempos de los seis estados del inversor

$$\text{Con: } M = \sqrt{3} T \frac{|\overrightarrow{v_{ref}}|}{v_{cc}}$$

2.2.7.1.3 Determinar las secuencias de conmutación.

Cuando ya se obtienen los tiempos de encendido de cada sector, se procede a determinar la secuencia de conmutación con base a los interruptores que se activan y los tiempos calculados; Las secuencias de conmutación de los dispositivos para cada uno de los seis sectores quedan así:

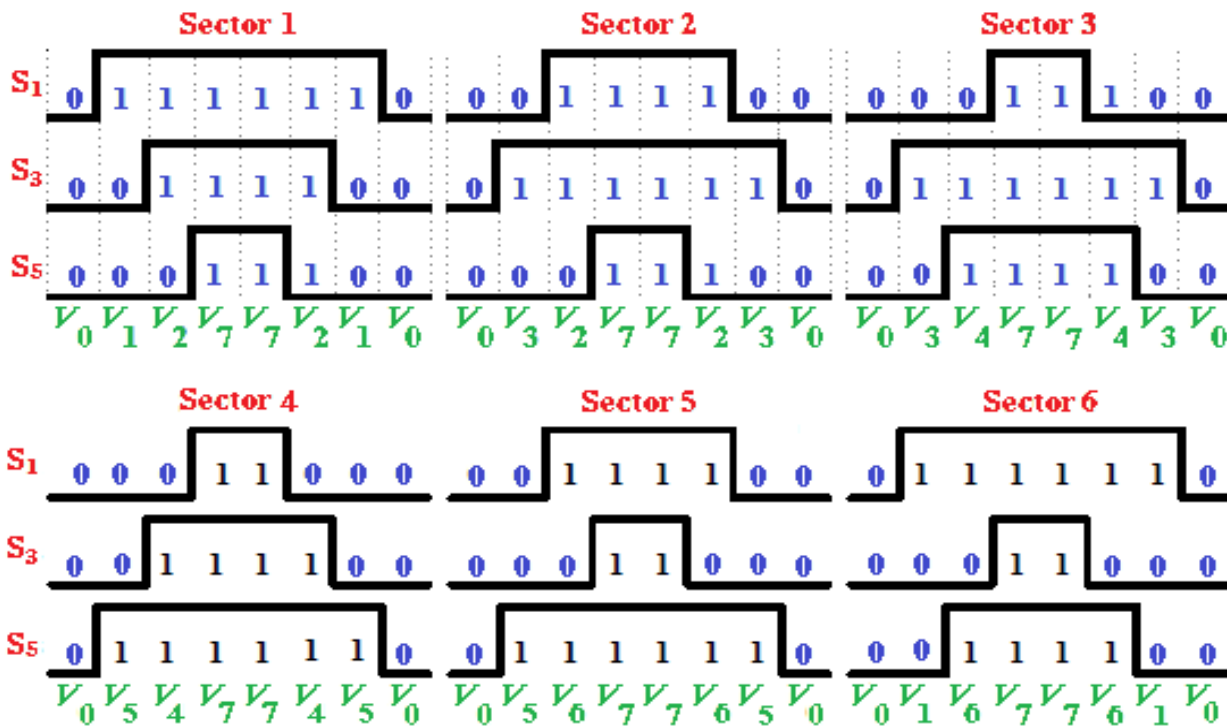


Figura 15. Secuencia de conmutación de los vectores para los seis sectores.

3 GUI (INTERFAZ GRAFICA DE USUARIO)

3.1 GUIDE.

3.1.1 Características.

Las interfaces gráficas de usuario (GUI – Grafical User Interface en inglés), es la forma en que el usuario interactúa con el programa o el sistema operativo de una computadora. Una GUI contiene diferentes elementos gráficos tales como: botones, campos de texto, gráficos, etc.

Uno de los lenguajes más habitual para crear GUI-s es Java, ya que tiene la enorme ventaja de funcionar en cualquier máquina, sin embargo Java resulta muy lento para hacer cálculos eficientemente, y es aquí donde MatLab es más útil. Las GUI-s son herramientas muy útiles para entregar aplicaciones a aquellas personas que no saben lo suficiente de programación y que quieren beneficiarse de las ventajas de un programa.

3.1.2 Funcionamiento

Una aplicación GUIDE consta de dos archivos: *.m* y *.fig*. El archivo *.m* es el que contiene el código con las correspondencias de los botones de control de la interfaz y el archivo *.fig* contiene los elementos gráficos. Cada vez que se adicione un nuevo elemento en la interfaz gráfica, se genera automáticamente código en el archivo *.m*.

Para ejecutar una Interfaz Gráfica, simplemente ejecutamos en la ventana de comandos >> *El nombre con el cual ha sido llamado*. O haciendo clic derecho en el m-file y seleccionando la opción *RUN*.

3.1.3 Componentes de la GUI

Es importantísimo entender las diferentes aplicaciones que tiene la GUI. Para ello es necesario entender el tipo de datos y variables que son introducidas por el usuario, así como las excepciones que puedan producirse, los casos que ocurren pocas veces pero que hay que tener en cuenta, etc.

Para crear una GUI en Matlab, desde la ventana de comandos se escribe la palabra GUIDE o lo ejecutamos del menú principal File\New\GUI, como se muestra en la Figura 16.

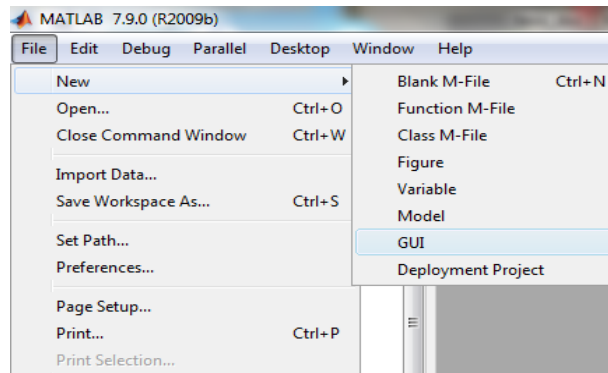


Figura 16. Inicializando una GUIDE

Una vez realizado el paso anterior, Matlab nos mostrará un área de diseño como se muestra en la figura 17. En la parte superior se encuentra los menús y opciones de la GUIDE, en la parte izquierda se aprecian los diferentes controles y en la parte central el área de diseño donde se ponen los controles a usar.

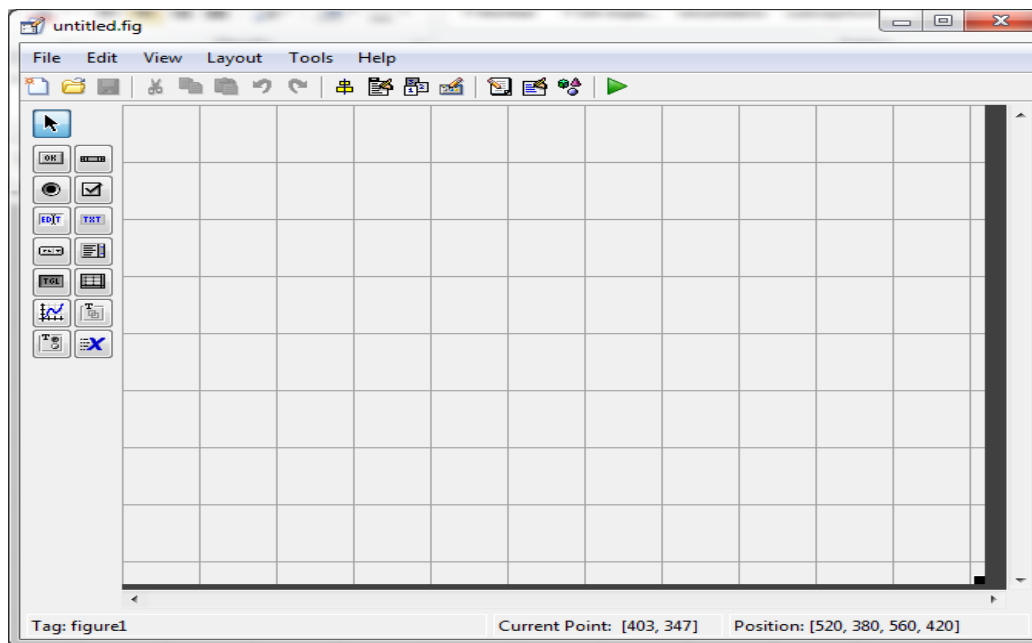


Figura 17. Área de trabajo de la GUIDE.

3.1.4 Partes de la GUI

A continuación se mencionara los controles más importantes de la GUI [3]:



Inspector de propiedades: Cada control cuenta con diferentes propiedades y es aquí donde podremos cambiar el color, el nombre, el tag, el valor, el callback entre otros.



Push Button: Crea un botón.



Radio Button: Crea un botón circular.



Check box: Crea una caja de selección.



Edit Text: Crea un campo de texto.



Axes: Crea un área para gráficas.



Panel: Crea un marco (panel) que puede contener otros controles.



Static Text: Crea un letrero de texto.

3.1.5 Propiedades de los controles

Las propiedades varían dependiendo del control a usar, a continuación se explica la más común. Para entender las propiedades de un control, se debe crear uno de estos controles y luego se activa el inspector de propiedades mencionado anteriormente donde se observan cada propiedad como se muestra en la figura 18.

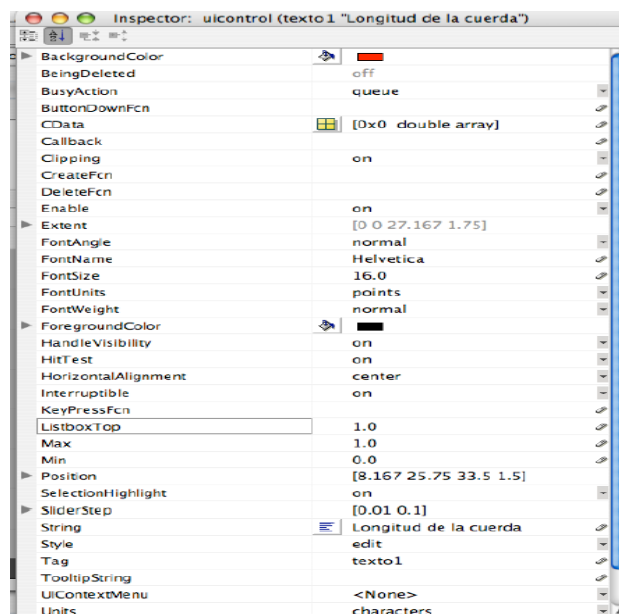


Figura 18. Propiedades de los controles.

3.2 Implementación de la GUIDE.

3.2.1 Partes del programa.

La implementación del programa de inversores se puede apreciar en la figura 19. Donde se divide el inicio después de ejecutarlo desde la ventana de comandos o directamente desde el menú de la guide (en Matlab).

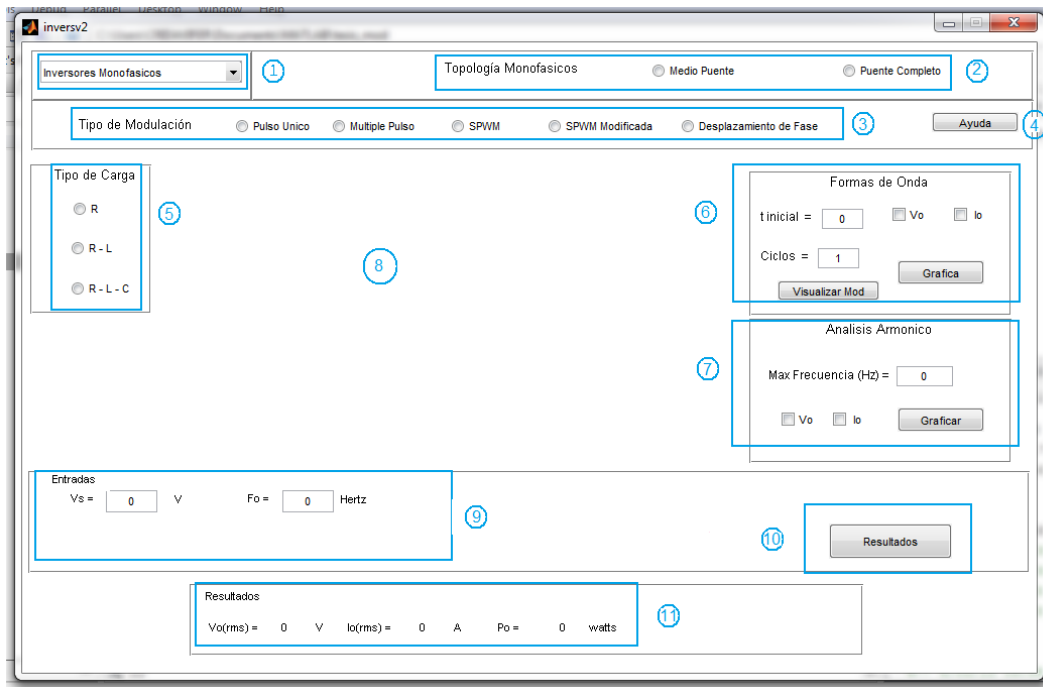


Figura 19. Inicializando el programa de inversores.

El programa implementado consta de varios menús, botones, text editables donde el usuario ingresa los valores para el cálculo. A continuación se explica detalladamente cada una de sus partes:

(1) En este menú se escoge que tipo de inversor se calculara, se puede escoger entre monofásico o trifásico. Figura 20.

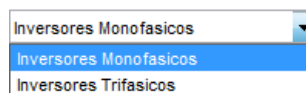


Figura 20. Menú de selección de tipo de inversor.

(2) Cuando se escoge el inversor monofásico se debe señalar que topología de monofásico se trabajara; las dos opciones son: Medio puente, puente completo.

(3) Tipo de modulación: Aquí se precisa la modulación que será el objetivo de análisis.

(4) Botón Ayuda: Este botón arrojará una ventana donde se hace una breve explicación sobre el programa de inversores.

(5) Tipo de Carga: Se selecciona una de las tres opciones que se puede analizar como carga Resistiva (R), carga resistiva e inductiva (R-L) o carga resistiva, inductiva y capacitiva (R-L-C).

(6) Formas de Onda: Para visualizar las formas de onda del voltaje o corriente; Se debe poner el tiempo inicial, el número de ciclos a graficar y escoger si se quiere ver el voltaje, la corriente, o el voltaje y corriente juntos.

(7) Análisis Armónico: Se muestra un análisis armónico al voltaje o corriente de salida, se debe especificar hasta que valor de frecuencia se desea analizar.

(8) Imagen: Cuando se selecciona el inversor monofásico en esta área aparece una imagen que representa la topología del inversor de medio puente o de puente completo; También cuando se selecciona el inversor trifásico aparece su respectiva imagen.

(9) Ingreso de datos: Es aquí donde el usuario ingresa los valores de entrada del voltaje c.c., frecuencia, resistencia, inductancia, capacitancia; y dependiendo de la modulación los datos de la constante de modulación en amplitud, frecuencia.

(10) Botón Resultados: Este botón sirve para arrojar los resultados rms de y corriente.

(11) Al darle clic en el botón resultados aquí es donde se visualizan los resultados rms de la tensión y la corriente.

Cuando seleccionamos del menú en (1), el tipo de inversor trifásico, aparece otro panel de selección (Fase / Línea), Donde se debe escoger que fase o línea se desea analizar, Fig. 21. (La carga a la salida del inversor trifásico está en conexión Estrella.)



Figura. 21

3.2.2 Ejemplo de Aplicación

Para la demostración del uso del programa, se considera un inversor de medio puente con modulación ancho de pulso sinusoidal SPWM, y el inversor tiene las siguientes características.

- Carga R-L con $R=20\ \Omega$, $L=15\ \text{H}$.
- Inversor monofásico tipo medio puente.
- $V=100\ \text{V}$. $F=60\ \text{Hz}$.
- $M_a=0.8$; $M_f=21$.

3.2.2.1 Primer Paso:

Para empezar se debe señalar el tipo de inversor monofásico y se escoge en la topología de puente completo. Figura 22.

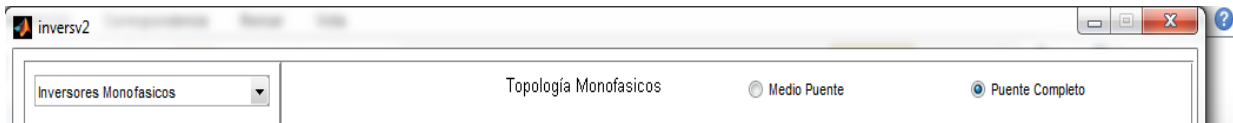


Figura 22. Primer paso del ejemplo de aplicación.

3.2.2.2 Segundo Paso:

Escoger el tipo de carga R-L. Figura 23.

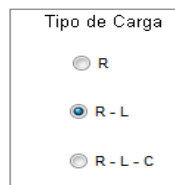


Figura 23. Segundo paso del ejemplo de aplicación

3.2.2.3 Tercer paso:

Ingresar los datos de entrada: voltaje, Resistencia, Inductancia, Frecuencia, m_a y m_f . Figura 24.

Entradas			
$V_s =$	<input type="text" value="100"/>	V	
$F_o =$	<input type="text" value="60"/>	Hertz	
$R =$	<input type="text" value="20"/>	ohms	
$L =$	<input type="text" value="15"/>	mH	
$M_a =$	<input type="text" value="0.8"/>		
$M_f =$	<input type="text" value="21"/>		

Figura 24. Tercer paso del ejemplo de aplicación.

3.2.2.4 Cuarto paso: Analizar.

Cuando se tienen todos los parámetros de entrada, ya solo se especifica lo que se desea analizar, hay tres opciones (figura 25): Grafica de las formas de onda, graficas de los armónicos, valores rms.

The screenshot shows the 'inversv2' software interface. At the top, it displays 'Inversores Monofasicos' and 'Topología Monofasicos' with radio buttons for 'Medio Puento' and 'Puento Completo' (selected). Below this, there are options for 'Tipo de Modulación': 'Pulso Unico', 'Multiple Pulso', 'SPWM' (selected), 'SPWM Modificada', and 'Desplazamiento de Fase'. An 'Ayuda' button is also present.

In the center, a circuit diagram of a full-bridge inverter is shown. It consists of a DC voltage source V_S connected to four thyristors (S_1, S_2, S_3, S_4) and four diodes (D_1, D_2, D_3, D_4). The load is connected across the bridge output, with output voltage v_o indicated.

On the left, 'Tipo de Carga' options are listed: 'R', 'R - L' (selected), and 'R - L - C'.

On the right, there are two main analysis sections:

- Formas de Onda:** Includes 't inicial = 0', 'Ciclos = 3', and checkboxes for 'Vo' and 'Io'. A 'Grafica' button is present.
- Analisis Armonico:** Includes 'Max Frecuencia (Hz) = 7000' and checkboxes for 'Vo' and 'Io'. A 'Graficar' button is present.

At the bottom, the 'Entradas' section contains input fields: $V_s = 100$ V, $F_o = 60$ Hertz, $R = 20$ ohms, $L = 15$ mH, $M_a = 0.8$, and $M_f = 21$.

A 'Resultados' button is located at the bottom right, and a 'Resultados' box at the bottom center displays the following values: $V_o(\text{rms}) = 71.3092$ V, $I_o(\text{rms}) = 2.7235$ A, and $P_o = 194.213$ watts.

Figura 25. Tres opciones de cálculo.

3.2.2.4.1 Análisis de las formas de onda de la corriente y voltaje.

Para visualizarlas se debe ingresar el número de ciclos que se quieren ver, El tiempo inicial y señalar el voltaje o la corriente: Para este caso se ponen 3 ciclos, tiempo inicial 0, y divisaremos voltaje y corriente. (Figura 26).

Se aprecia que hay dos botones: El botón Grafica (Con este se puede visualizar las formas de onda), Botón Visualizar Modulación (Este Botón muestra la gráfica de la modulación). Para el ejemplo damos clic en gráfica y nos mostrar los gráficos.

Formas de Onda

t inicial = Vo Io

Ciclos =

Figura 26. Formas de onda ejemplo de aplicación.

3.2.2.4.2 Análisis grafico de los armónicos.

Para visualizarlo se debe especificar hasta que valor de frecuencia se desea observar y señalar si se desea ver el voltaje o la corriente, por ultimo hacer clic en graficar. Figura (27).

Análisis Armónico

Max Frecuencia (Hz) =

Vo Io

Figura 27. Análisis Armónico ejemplo de aplicación

3.2.2.4.3 Resultados rms.

Con este botón se ven los resultados del valor rms de la corriente, voltaje y potencia.

Todo el código generado en el archivo .m se ha programado con archivos y script que se diseñaron especialmente para cada tipo de modulación.

4 RESULTADOS

4.1 Modulación de Pulso Único (medio puente)

4.1.1 Carga Resistiva

En la figura 28, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de medio puente, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 30 ohms, y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 180° .

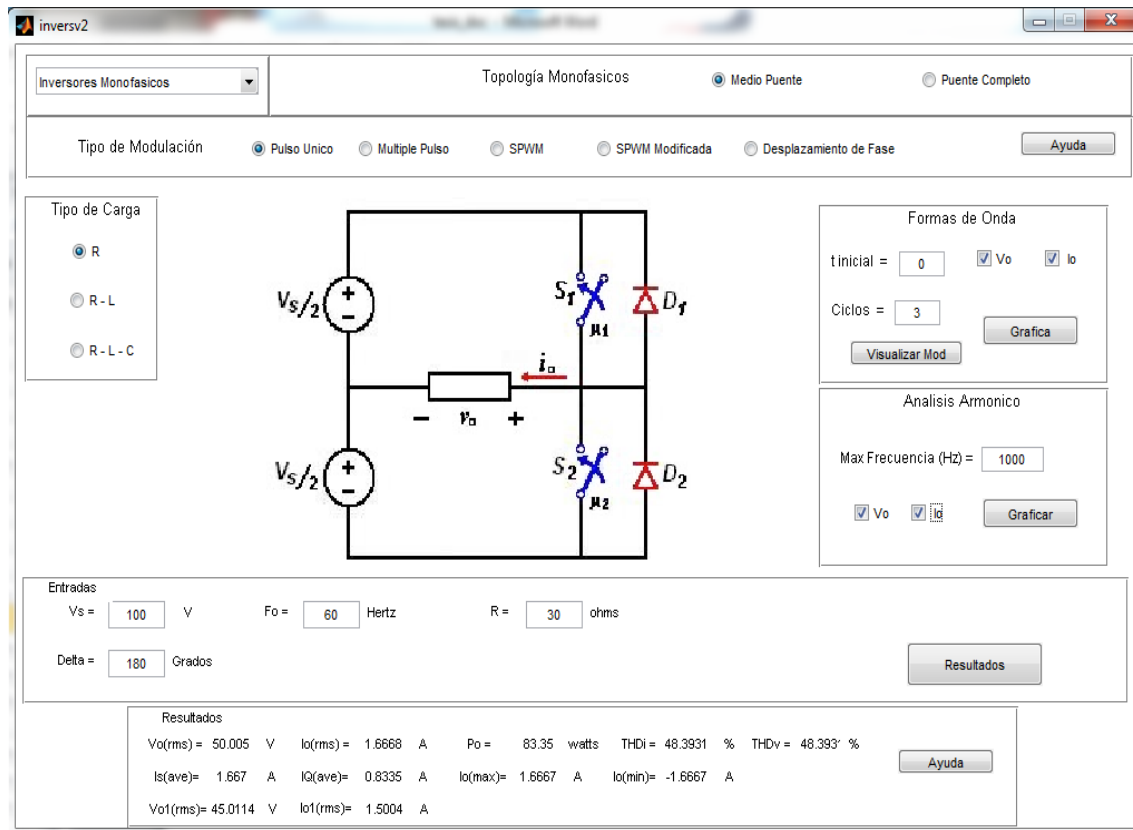
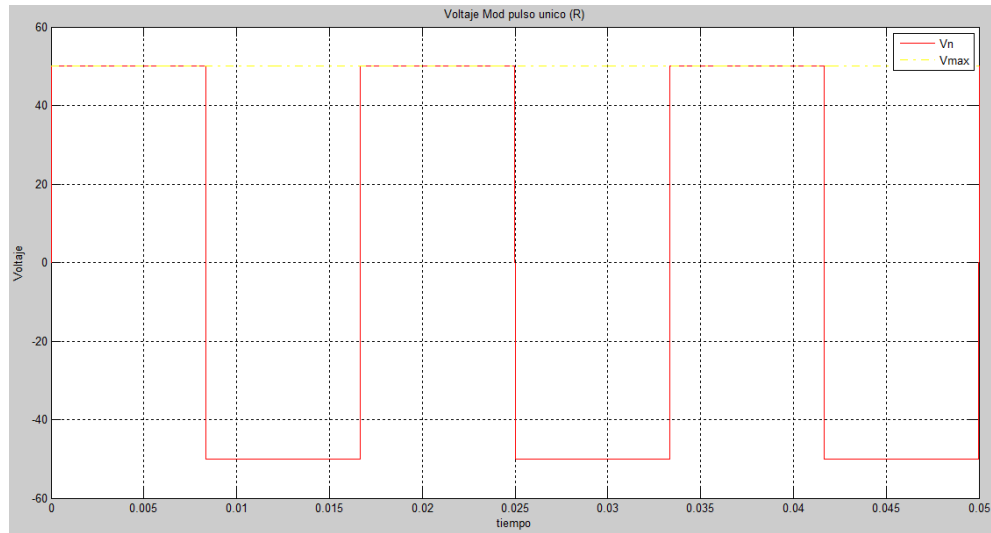


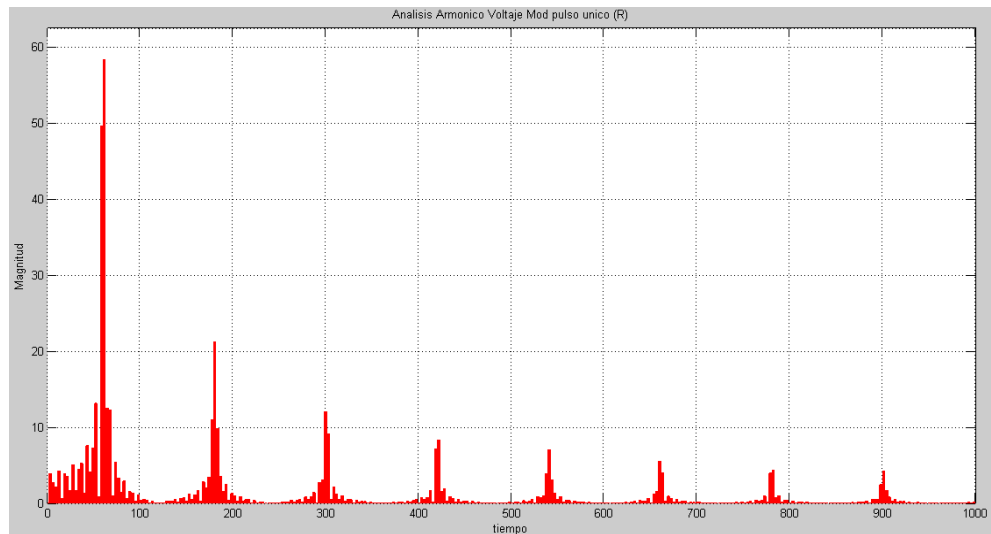
Figura 28. Esquema modulación pulso único con carga resistiva

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la tensión (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la tensión (con frecuencia máxima de 1000 Hz)



(a)

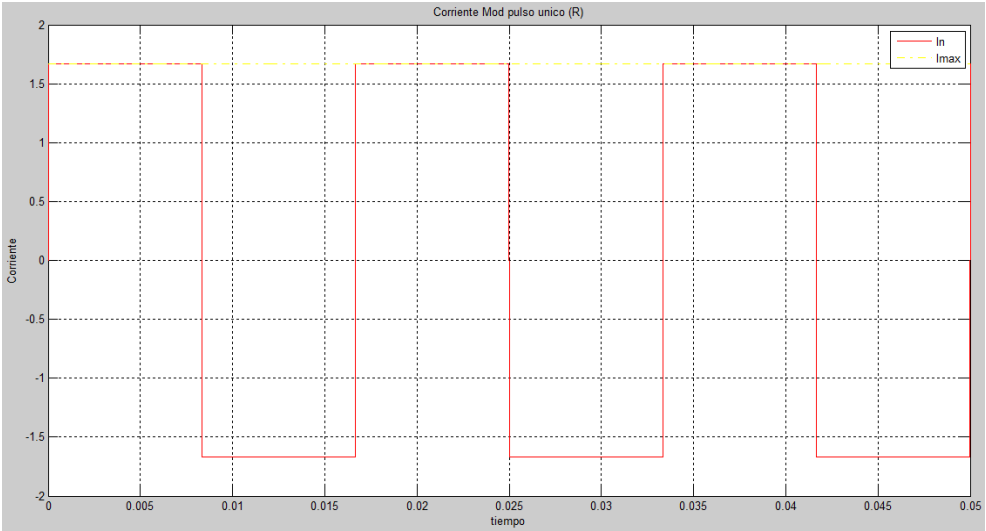


(b)

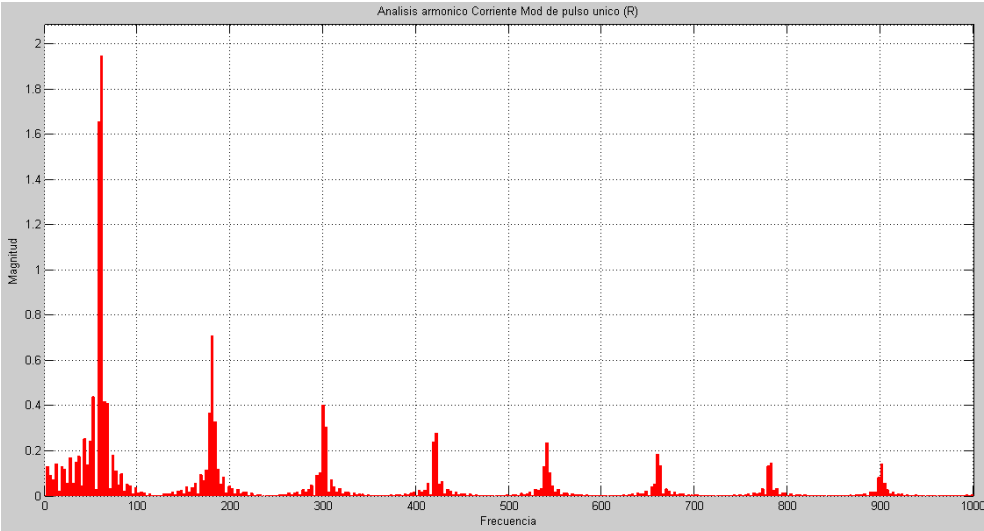
Figura 29. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

Estas formas de onda y Espectro de armónicos de la Tensión para la carga Resistiva (R) es la misma para las cargas R-L y R-L-C.

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 30. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.1.2 Carga Resistiva e Inductiva (R-L)

En la figura 31, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de medio puente, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 180° .

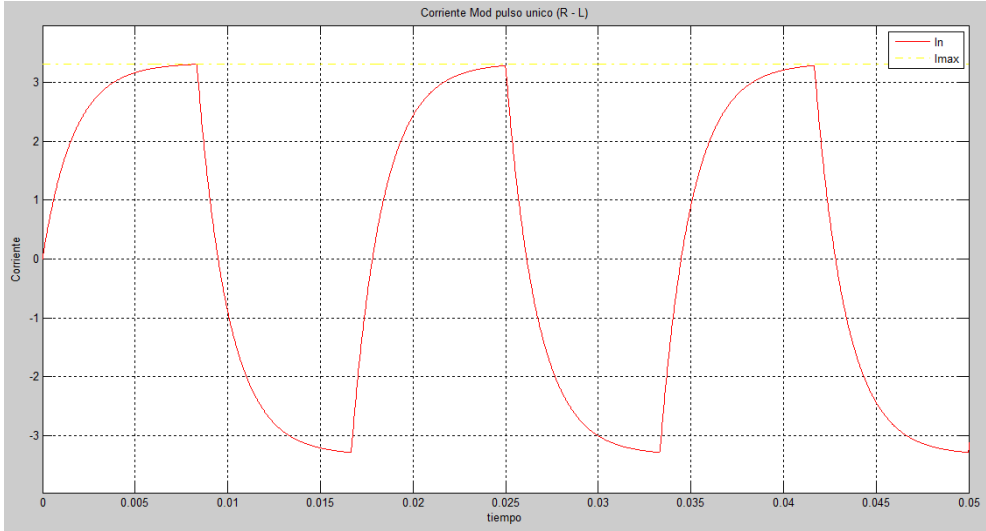
The screenshot shows the 'inversv2' software interface. At the top, it is set to 'Inversores Monofasicos' and 'Topología Monofasicos' with 'Medio Puento' selected. The modulation type is 'Pulso Unico'. The load type is 'R-L'. The circuit diagram shows two DC sources of $V_s/2$, two MOSFETs (S_1, S_2), two diodes (D_1, D_2), and an R-L load. The output current is i_o . The 'Formas de Onda' section shows $t_{inicial} = 0$, 'Ciclos = 3', and checkboxes for V_o and I_o . The 'Analisis Armonico' section shows 'Max Frecuencia (Hz) = 1000' and checkboxes for V_o and I_o . The 'Entradas' section shows $V_s = 100$ V, $F_o = 60$ Hertz, $R = 15$ ohms, $L = 25$ mH, and $\Delta = 180$ Grados. The 'Resultados' table is as follows:

Resultados					
$V_o(\text{rms}) = 50.005$ V	$I_o(\text{rms}) = 2.594$ A	$P_o = 100.931$ watts	$\text{THDi} = 20.4106$ %	$\text{THDv} = 48.393$ %	
$I_s(\text{ave}) = 2.0186$ A	$I_Q(\text{ave}) = 1.0093$ A	$I_o(\text{max}) = 3.3107$ A	$I_o(\text{min}) = -3.2887$ A		
$V_{o1}(\text{rms}) = 45.0114$ V	$I_{o1}(\text{rms}) = 2.5416$ A				

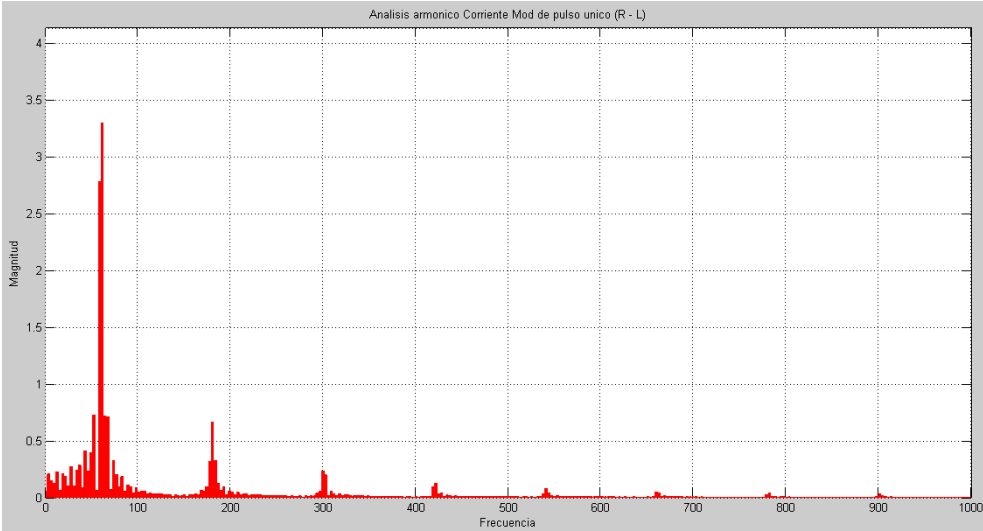
Figura 31. Esquema modulación pulso único con carga R-L

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 32. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.1.3 Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)

En la figura 33, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de medio puente, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH, capacitancia 112 uF y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 180°.

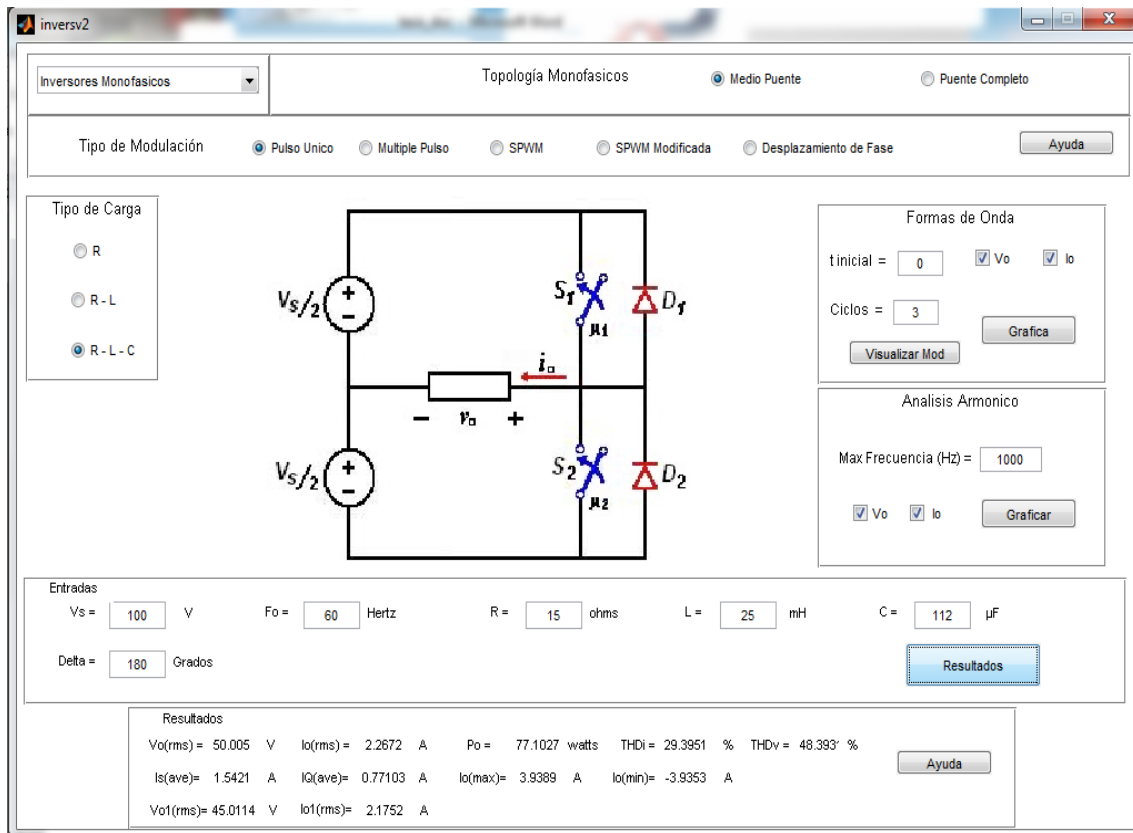
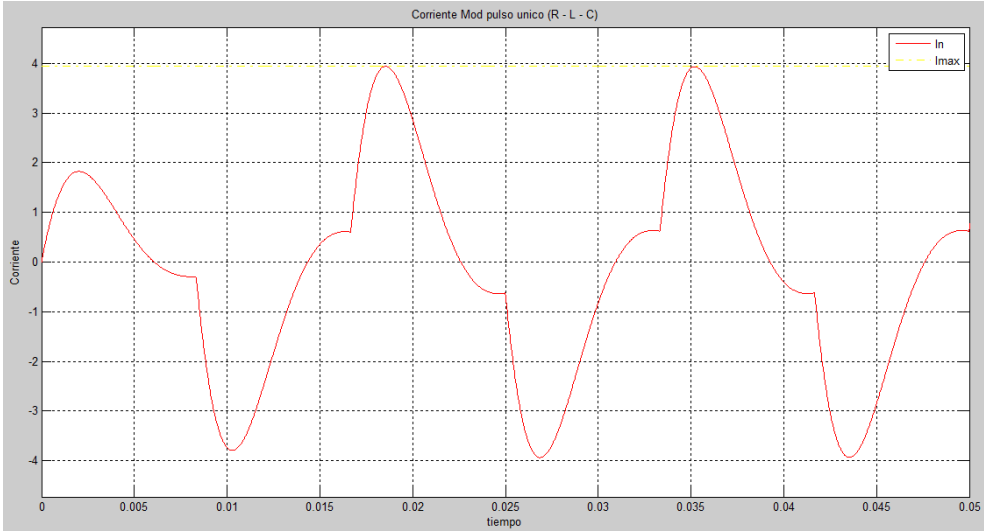


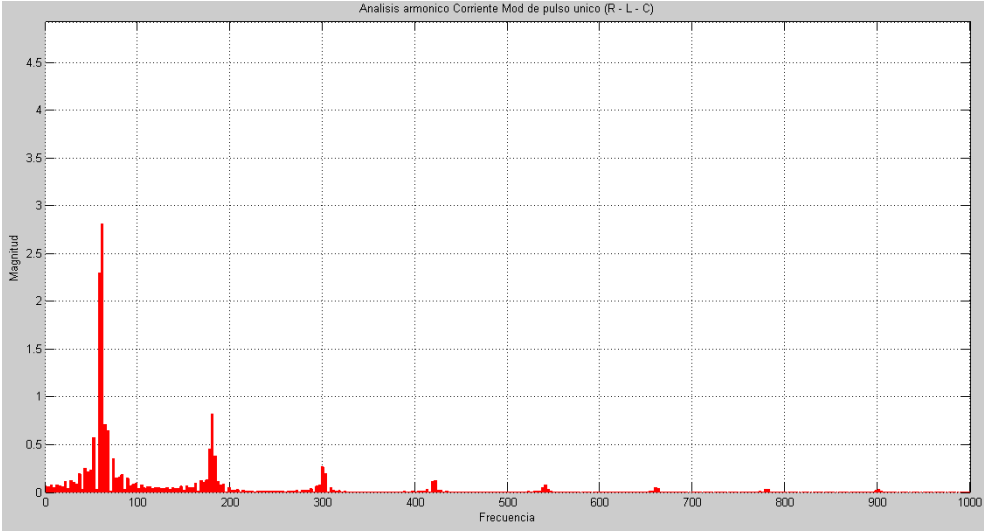
Figura 33. Esquema modulación pulso único con carga R-L-C

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 34. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.2 Modulación de Pulso Múltiple (medio puente)

4.2.1 Carga Resistiva

En la figura 35, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de medio puente, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 30 ohms, y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 108° y una mf de 21.

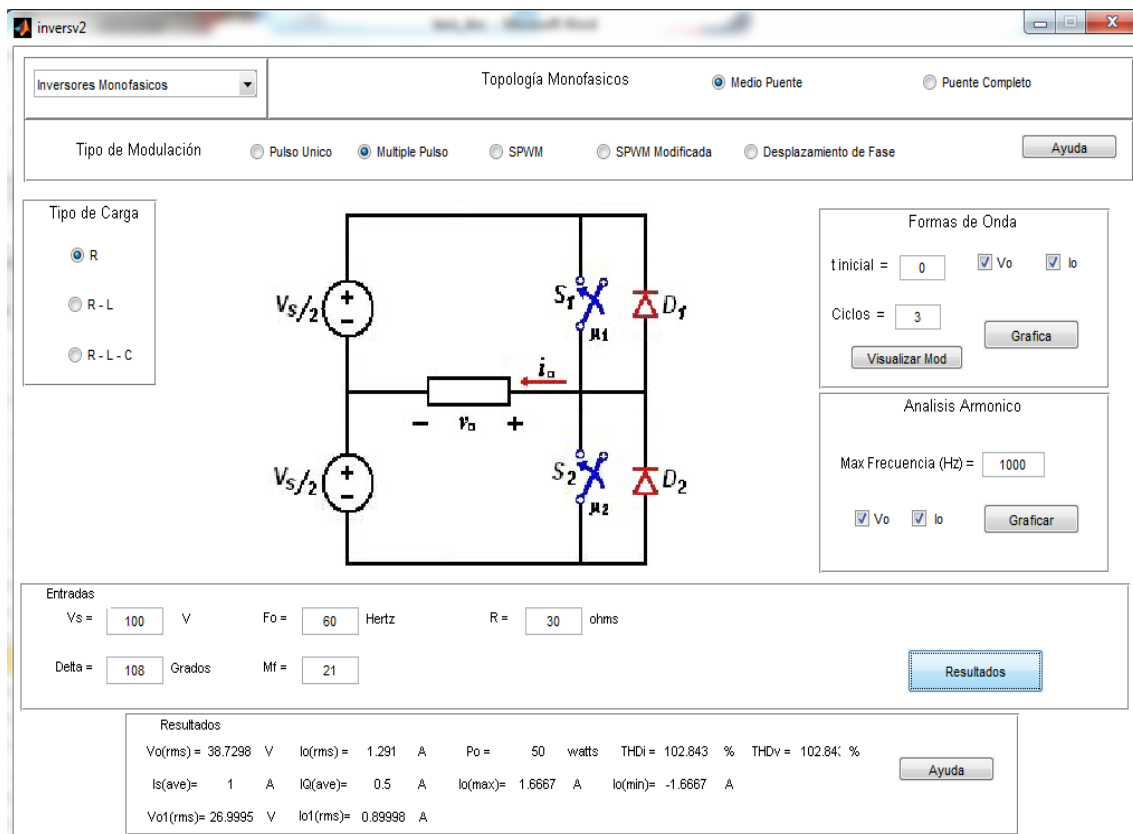
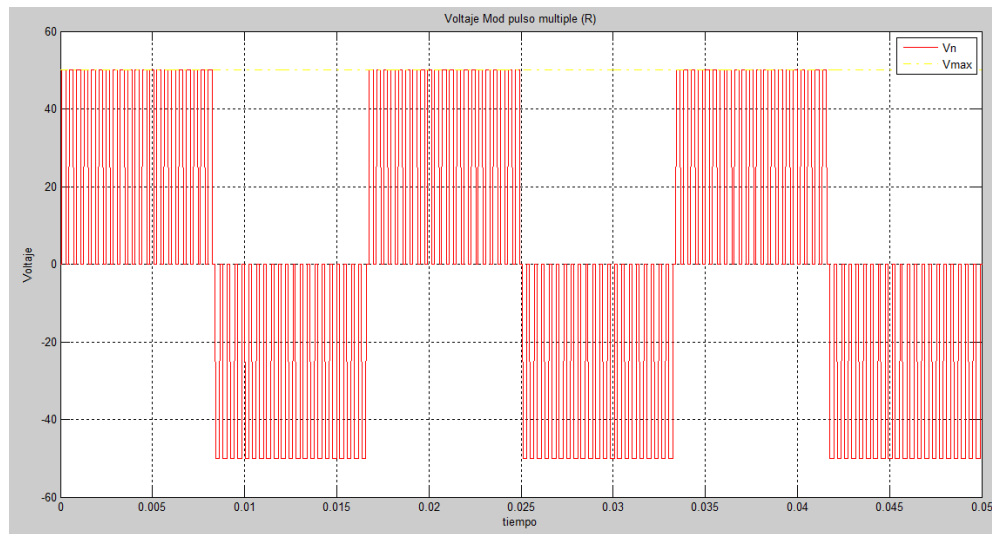


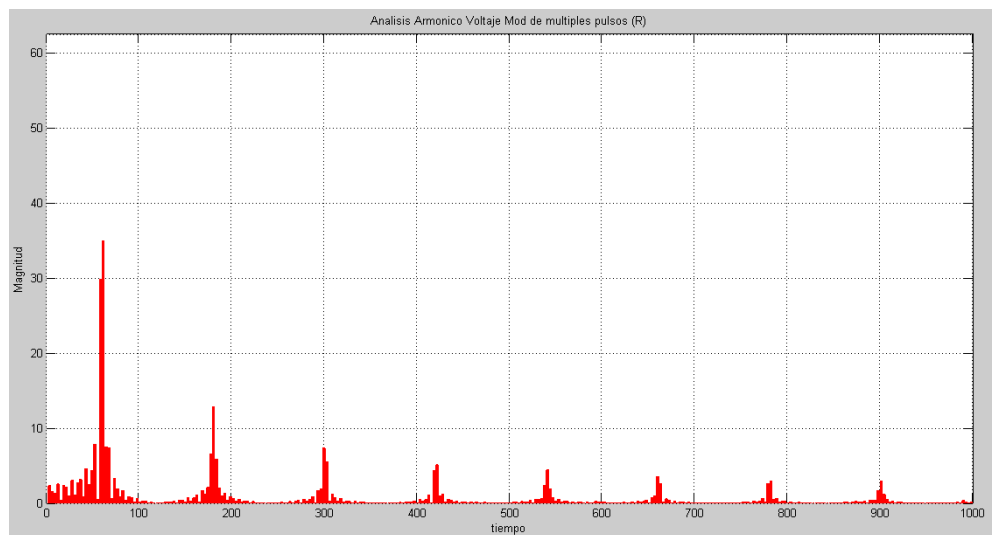
Figura 35. Esquema modulación pulso múltiple con carga resistiva

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la tensión (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la tensión (con frecuencia máxima de 1000 Hz)



(a)

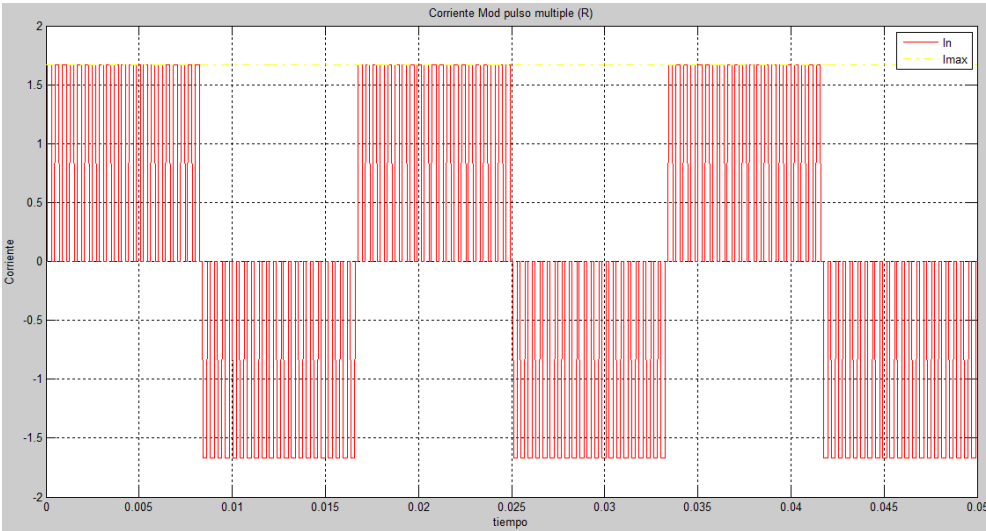


(b)

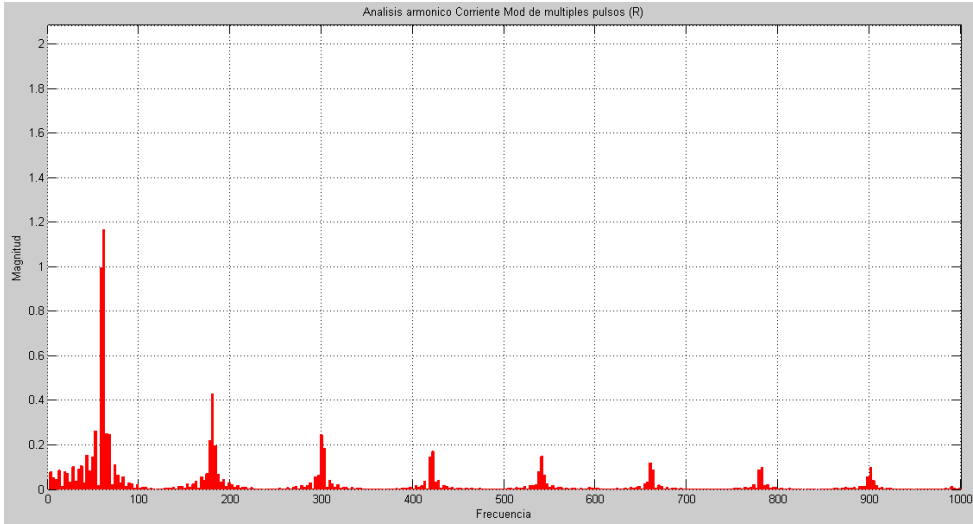
Figura 36. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

Estas formas de onda y Espectro de armónicos de la Tensión para la carga Resistiva (R) es la misma para las cargas R-L y R-L-C.

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 37. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.2.2 Carga Resistiva e Inductiva (R-L)

En la figura 38, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de medio puente, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 108° y una mf de 21.

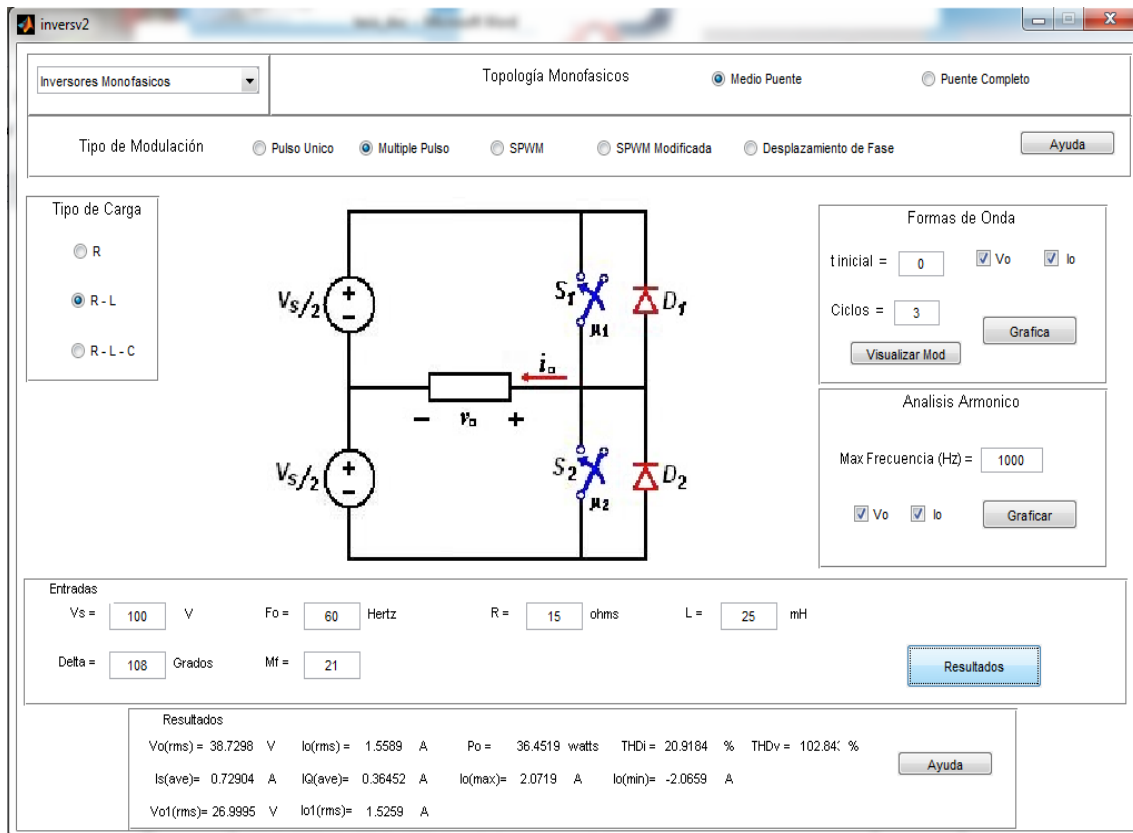
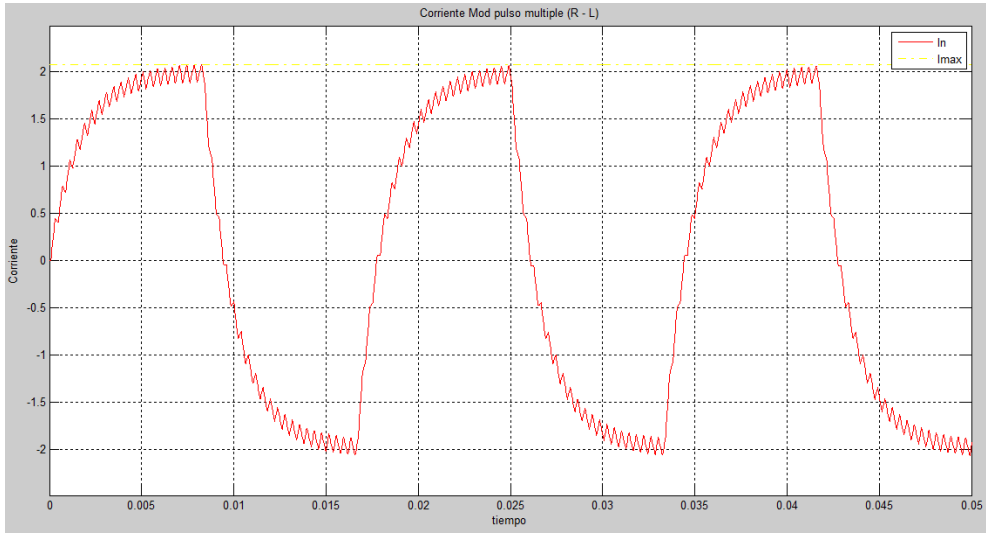


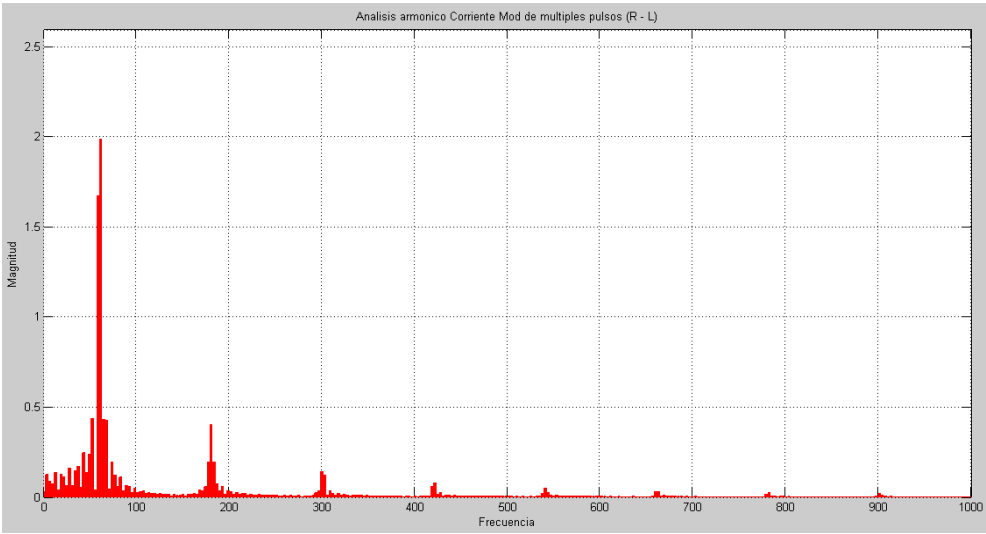
Figura 38. Esquema modulación pulso múltiple con carga R-L

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 39. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.2.3 Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)

En la figura 40, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de medio puente, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH, capacitancia 112 uF y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 108° y una mf de 21.

The screenshot shows the 'inversv2' software interface. The main window displays a circuit diagram of a single-phase half-bridge inverter. The circuit consists of two DC voltage sources labeled $V_s/2$, two MOSFETs labeled S_1 and S_2 (with gate drivers μ_1 and μ_2), two diodes labeled D_1 and D_2 , and a load consisting of a resistor R , an inductor L , and a capacitor C in series. The output voltage is V_o and the output current is i_o .

The interface includes the following sections:

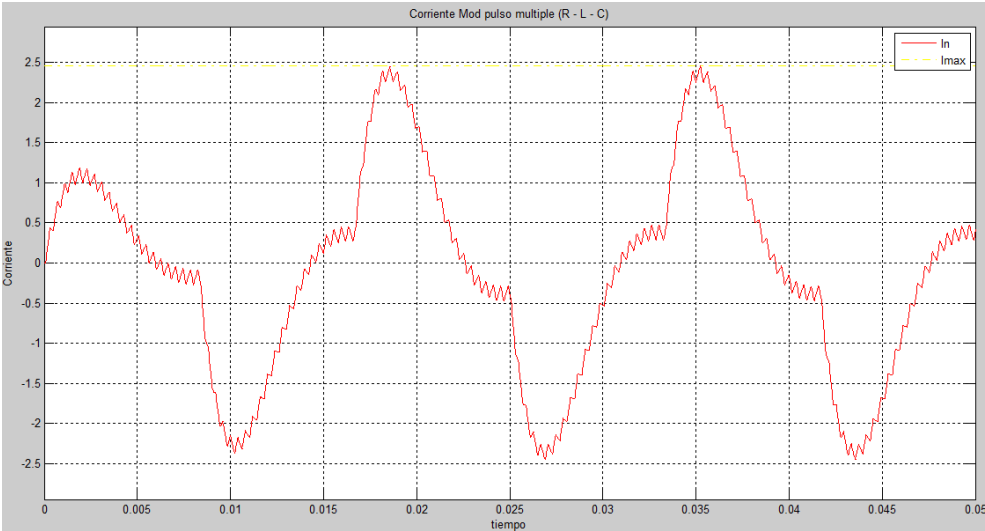
- Topología Monofasicos:** Medio Puento (selected), Puento Completo.
- Tipo de Modulación:** Pulso Unico, Multiple Pulso (selected), SPWM, SPWM Modificada, Desplazamiento de Fase.
- Tipo de Carga:** R, R-L, R-L-C (selected).
- Formas de Onda:** t inicial = 0, Ciclos = 3, Visualizar Mod, Grafica.
- Analisis Armonico:** Max Frecuencia (Hz) = 1000, Vo, Io (checked), Graficar.
- Entradas:** $V_s = 100$ V, $F_o = 60$ Hertz, $R = 15$ ohms, $L = 25$ mH, $C = 112$ μ F, Delta = 108 Grados, Mf = 21.
- Resultados:**

$V_o(\text{rms}) = 38.7298$ V	$i_o(\text{rms}) = 1.3631$ A	$P_o = 27.8715$ watts	THDi = 29.9355 %	THDv = 102.84 %
$i_s(\text{ave}) = 0.55743$ A	$i_g(\text{ave}) = 0.27872$ A	$i_o(\text{max}) = 2.4574$ A	$i_o(\text{min}) = -2.4572$ A	
$V_{o1}(\text{rms}) = 26.9995$ V	$i_{o1}(\text{rms}) = 1.3059$ A			

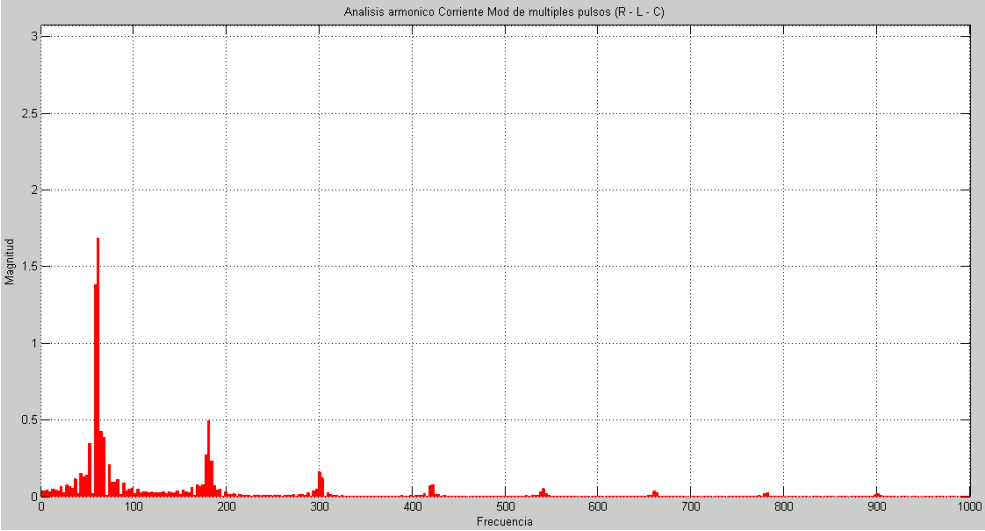
Figura 40. Esquema modulación pulso múltiple con carga R-L-C

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 41. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.3 Modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) (medio puente)

4.3.1 Carga Resistiva

En la figura 42, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de medio puente, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 30 ohms, y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

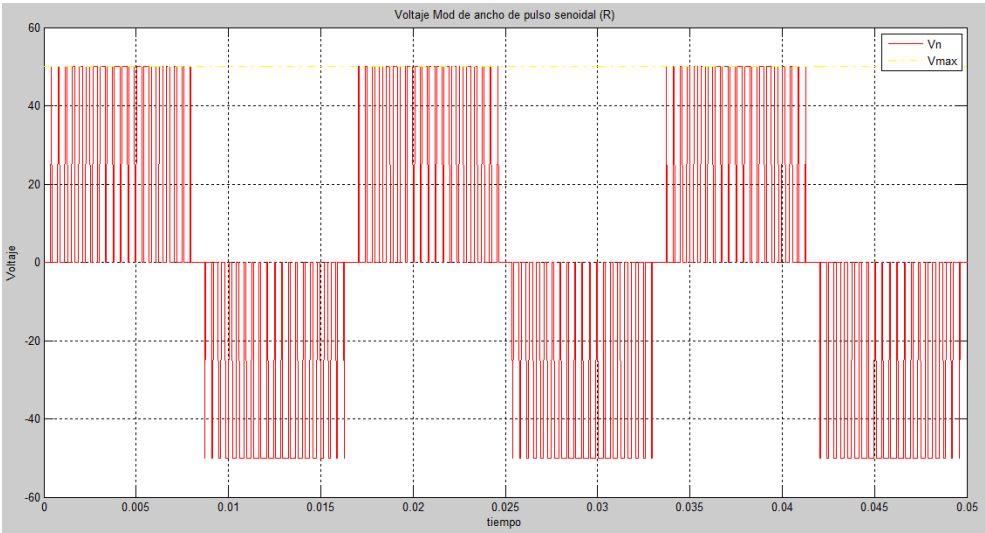
The screenshot displays the 'inversv2' software interface. At the top, it shows 'Inversores Monofasicos' and 'Topologia Monofasicos' with 'Medio Puento' selected. The 'Tipo de Modulación' is set to 'SPWM'. Under 'Tipo de Carga', 'R' is selected. The 'Formas de Onda' section shows 't inicial = 0', 'Ciclos = 3', and checkboxes for 'Vo' and 'Io'. The 'Analisis Armonico' section shows 'Max Frecuencia (Hz) = 1000' and checkboxes for 'Vo' and 'Io'. The 'Entradas' section contains: $V_s = 100$ V, $F_o = 60$ Hertz, $R = 30$ ohms, $M_a = 0.8$, and $M_f = 21$. A 'Resultados' button is visible. The 'Resultados' section at the bottom provides the following data:

Resultados							
$V_o(\text{rms}) = 35.6861$ V	$I_o(\text{rms}) = 1.1895$ A	$P_o = 42.45$ watts	$\text{THDi} = 76.7584$ %	$\text{THDv} = 76.7584$ %			
$I_s(\text{ave}) = 0.849$ A	$I_o(\text{ave}) = 0.4245$ A	$I_o(\text{max}) = 1.6667$ A	$I_o(\text{min}) = -1.6667$ A				
$V_o1(\text{rms}) = 28.3082$ V	$I_o1(\text{rms}) = 0.94361$ A						

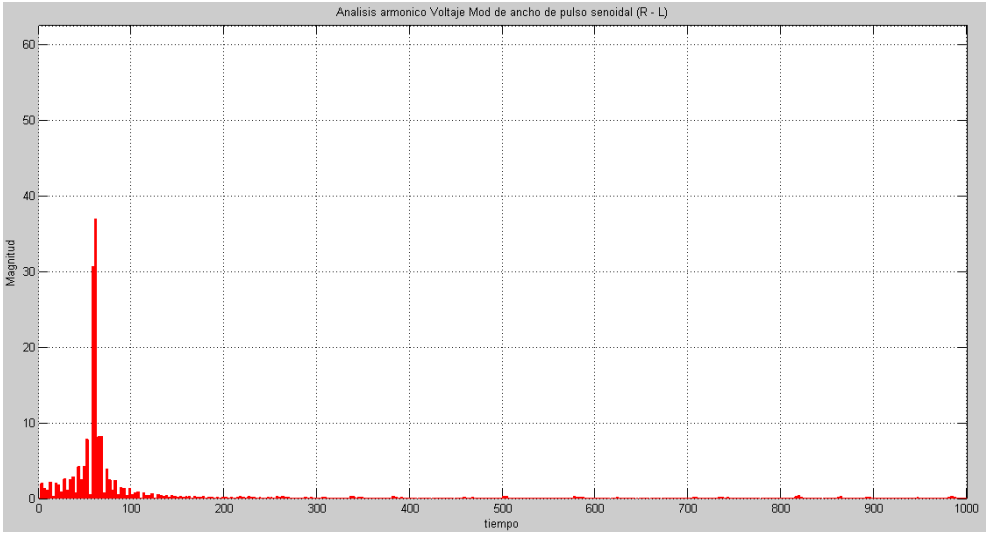
Figura 42. Esquema modulación SPWM con carga resistiva

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la tensión (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la tensión (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)

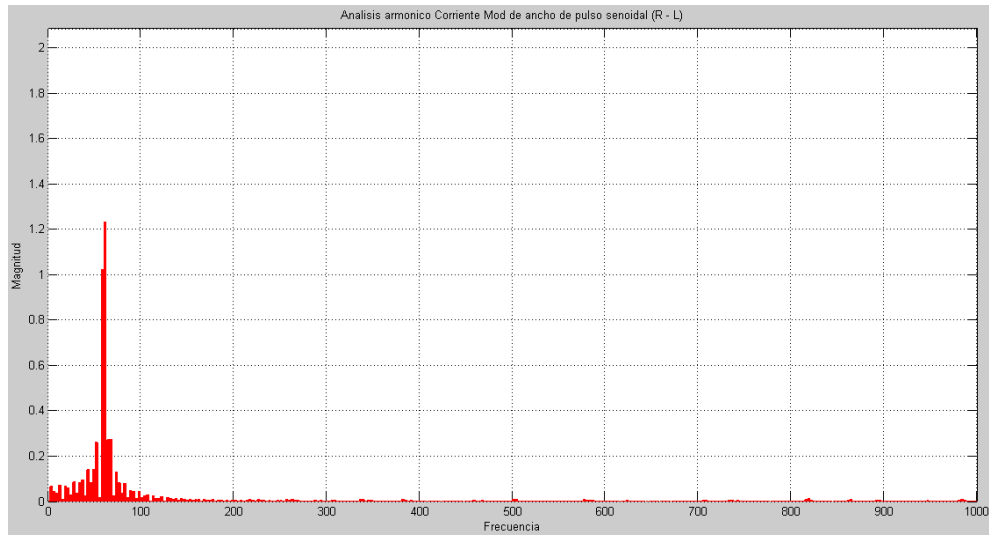


(b)

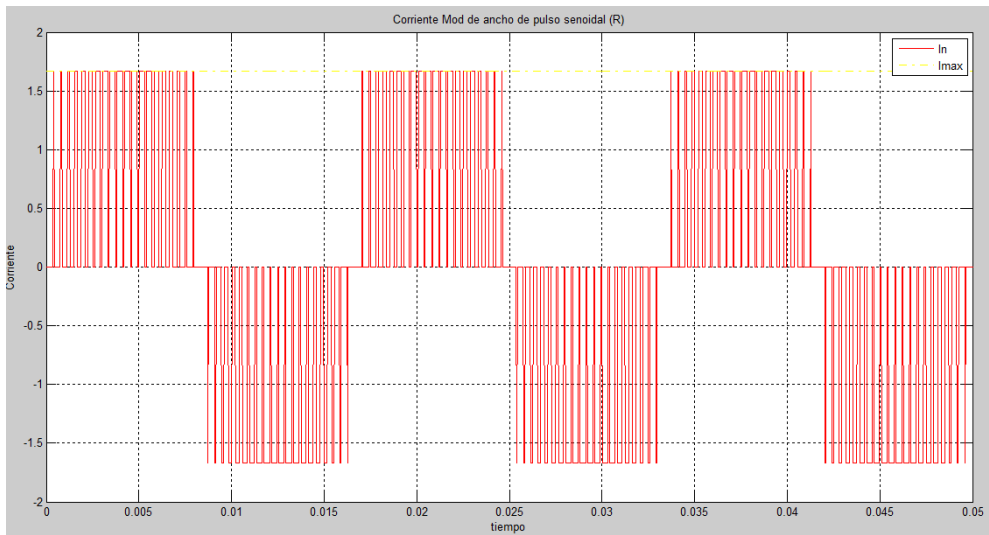
Figura 43. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

Estas formas de onda y Espectro de armónicos de la Tensión para la carga Resistiva (R) es la misma para las cargas R-L y R-L-C.

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 44. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.3.2 Carga Resistiva e Inductiva (R-L)

En la figura 45, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de medio puente, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

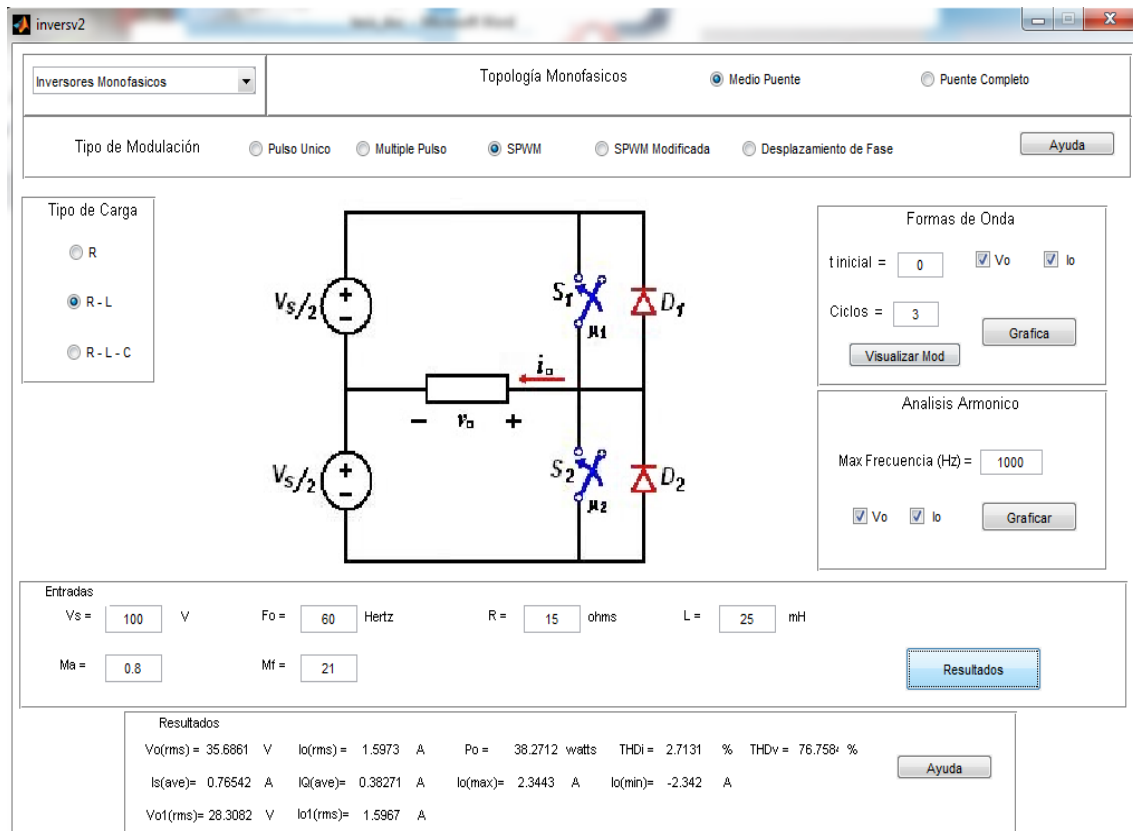
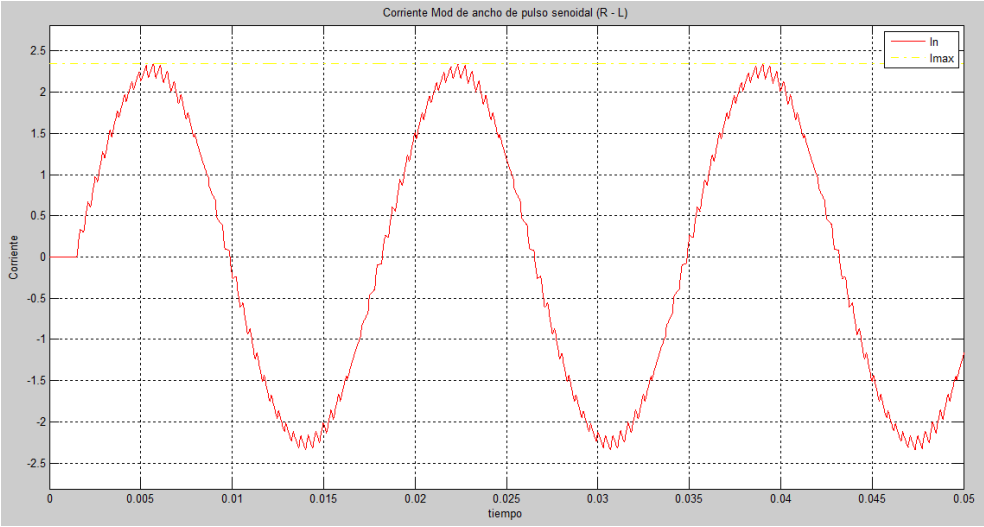


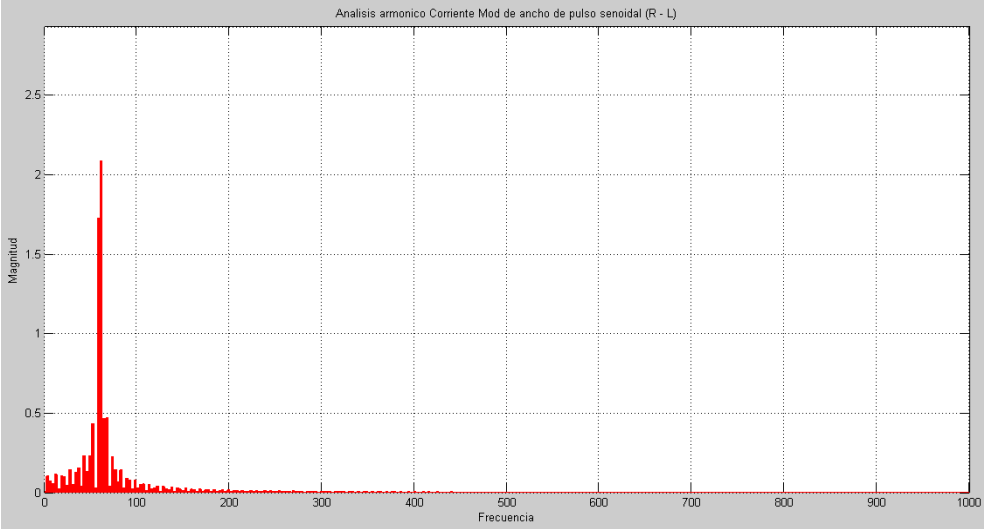
Figura 45. Esquema modulación SPWM con carga R-L

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 46. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.3.3 Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)

En la figura 47, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de medio puente, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH, capacitancia 112 uF y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

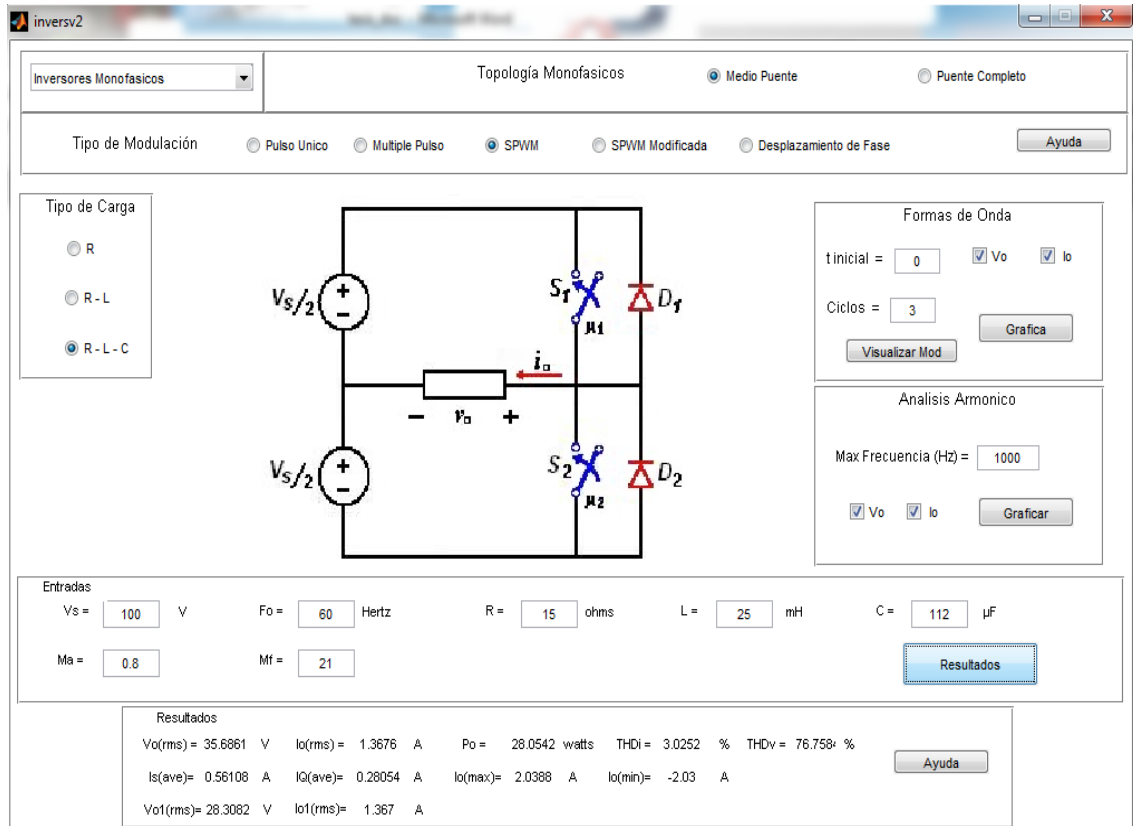
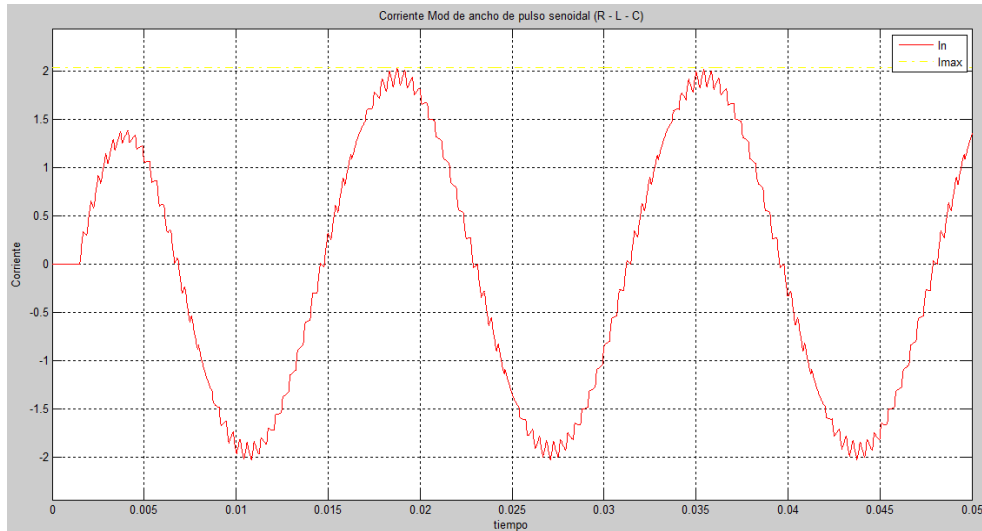


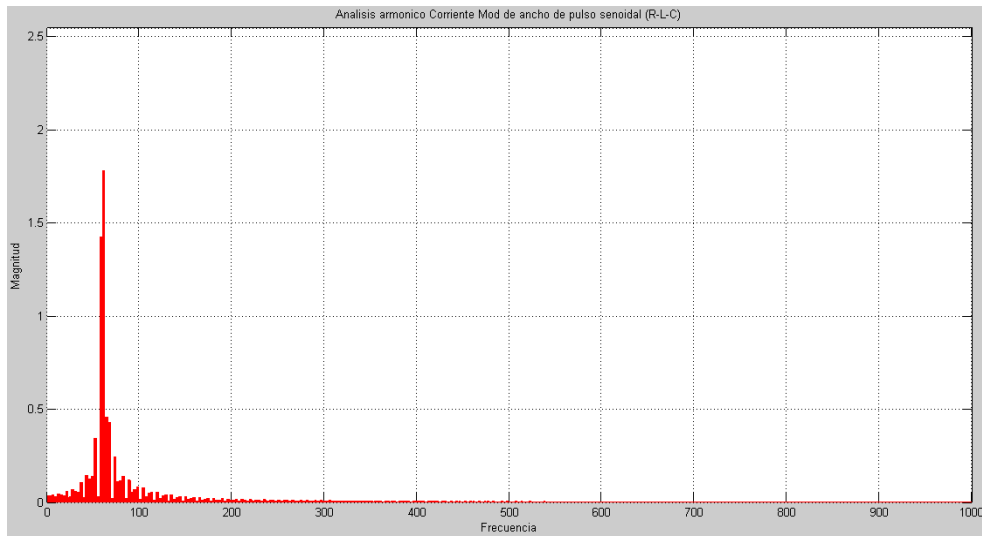
Figura 47. Esquema modulación SPWM con carga R-L-C

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 48. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.4 Modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada (medio puente)

4.4.1 Carga Resistiva

En la figura 49, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de medio puente, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 30 ohms, y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

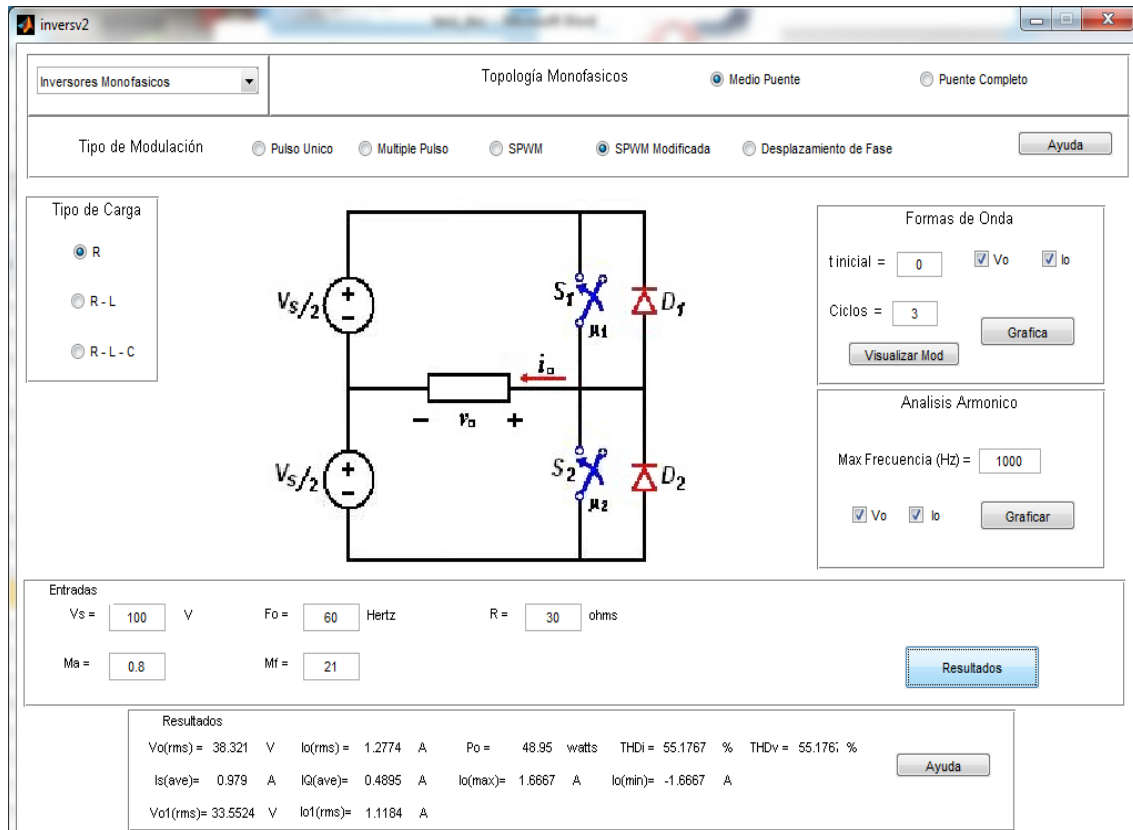
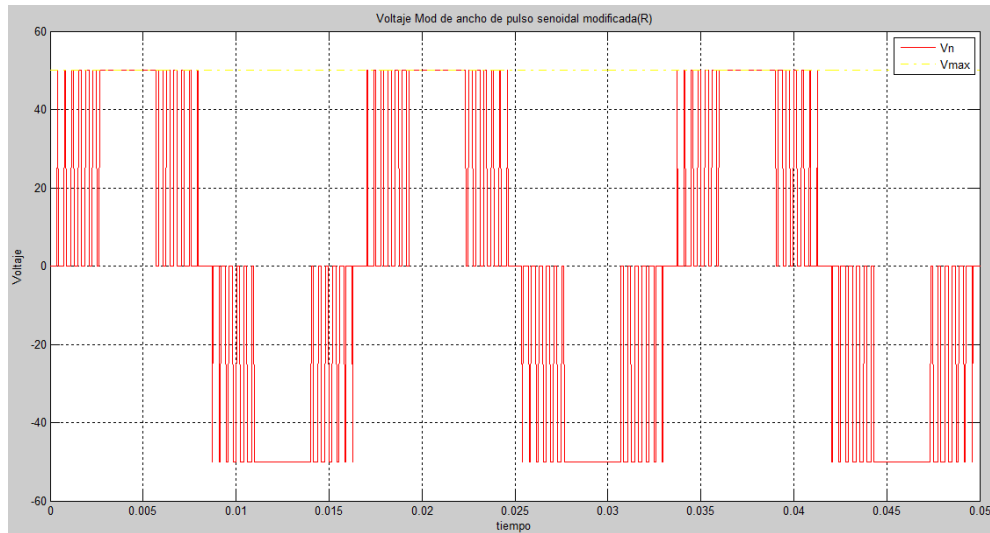


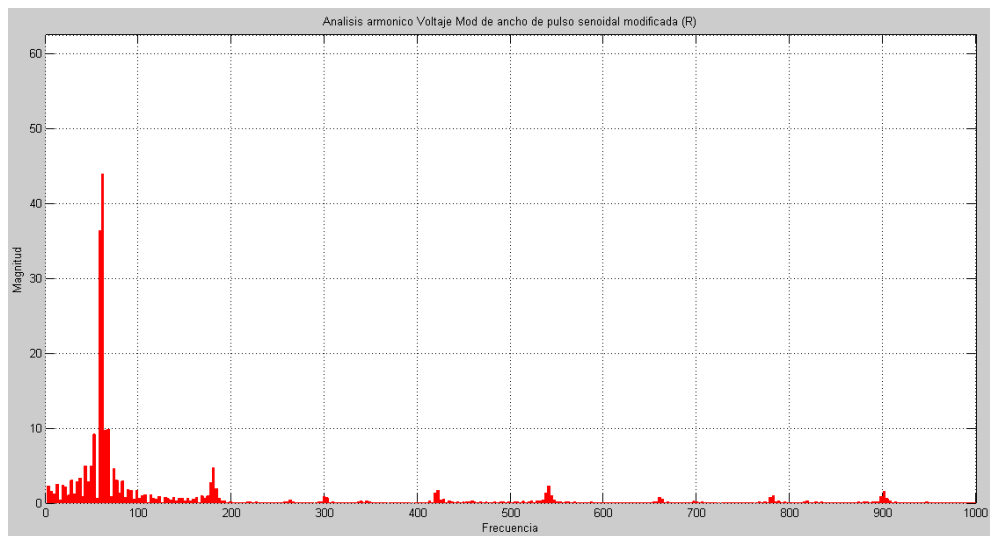
Figura 49. Esquema modulación SPWM modificada con carga resistiva

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la Tensión (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Tensión (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)

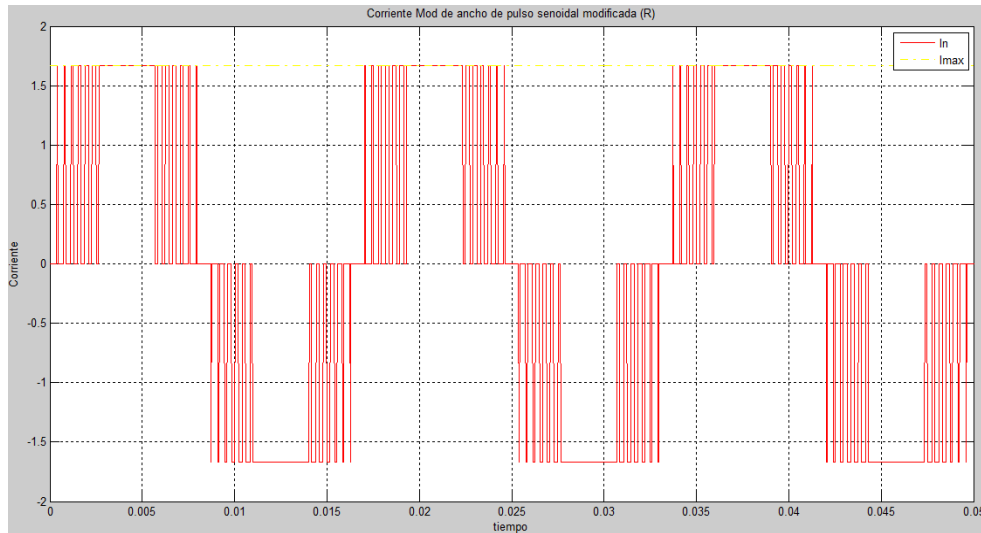


(b)

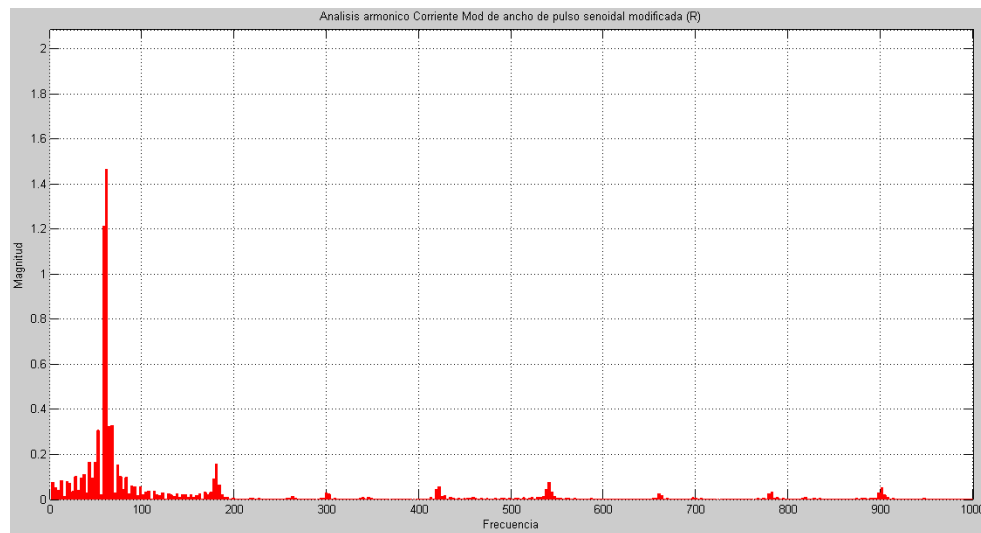
Figura 50. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

Estas formas de onda y Espectro de armónicos de la Tensión para la carga Resistiva (R) es la misma para las cargas R-L y R-L-C.

Análisis de la forma de onda de la Corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 51. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.4.2 Carga Resistiva e Inductiva (R-L)

En la figura 52, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de medio puente, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

The screenshot shows a software window titled 'inversv2' with the following components:

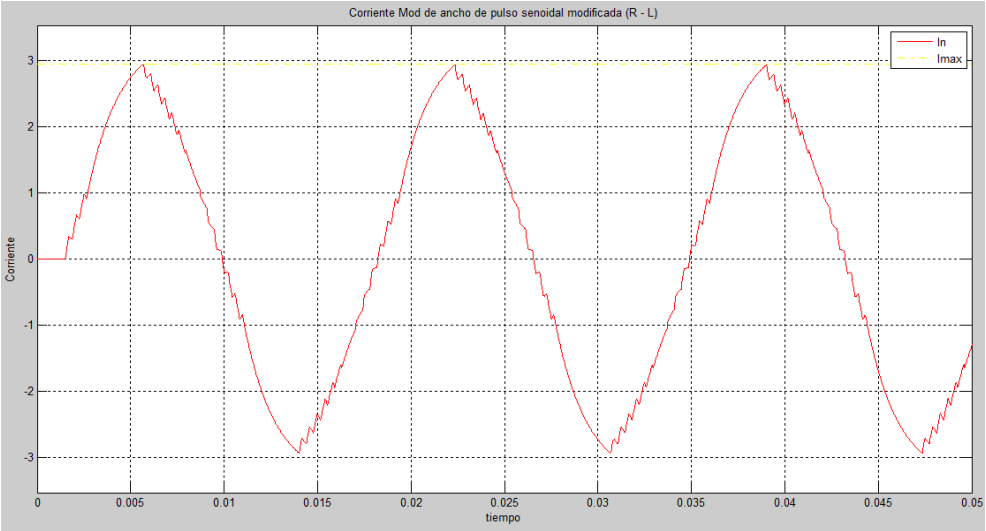
- Topología Monofásicos:** Medio Puento (selected), Puento Completo.
- Tipo de Modulación:** Pulso Unico, Multiple Pulso, SPWM, SPWM Modificada (selected), Desplazamiento de Fase.
- Tipo de Carga:** R, R-L (selected), R-L-C.
- Formas de Onda:** t inicial = 0, Ciclos = 3, checkboxes for Vo and Io.
- Analisis Armonico:** Max Frecuencia (Hz) = 1000, checkboxes for Vo and Io.
- Entradas:** Vs = 100 V, Fo = 60 Hertz, R = 15 ohms, L = 25 mH, Ma = 0.8, Mf = 21.
- Resultados:**

Vo(rms) = 38.321 V	Io(rms) = 1.8982 A	Po = 54.046 watts	THDi = 6.0738 %	THDv = 55.176 %
Is(ave) = 1.0809 A	Iq(ave) = 0.54046 A	Io(max) = 2.941 A	Io(min) = -2.9321 A	
Vo1(rms) = 33.5524 V	Io1(rms) = 1.8947 A			

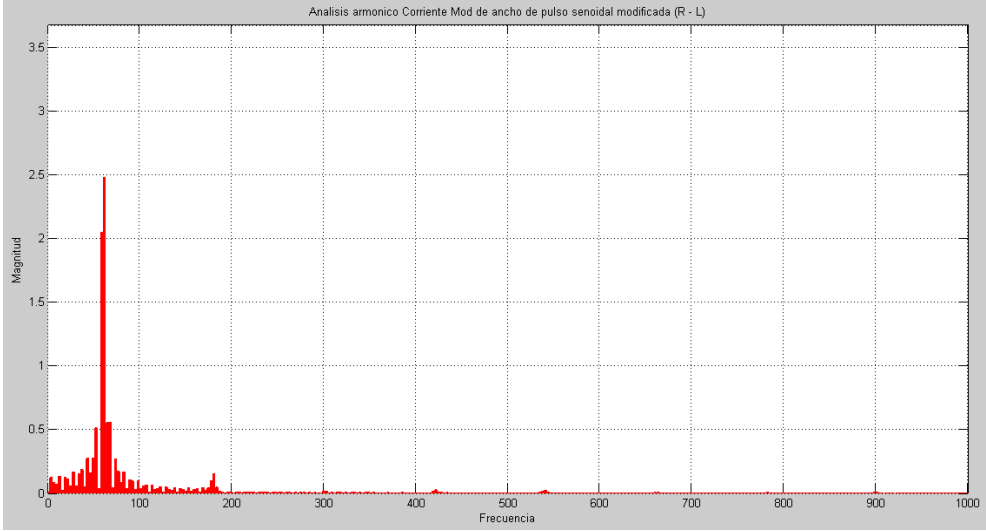
Figura 52. Esquema modulación SPWM modificada con carga R-L

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 53. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.4.3 Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)

En la figura 54, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de medio puente, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH, capacitancia 112 uF y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

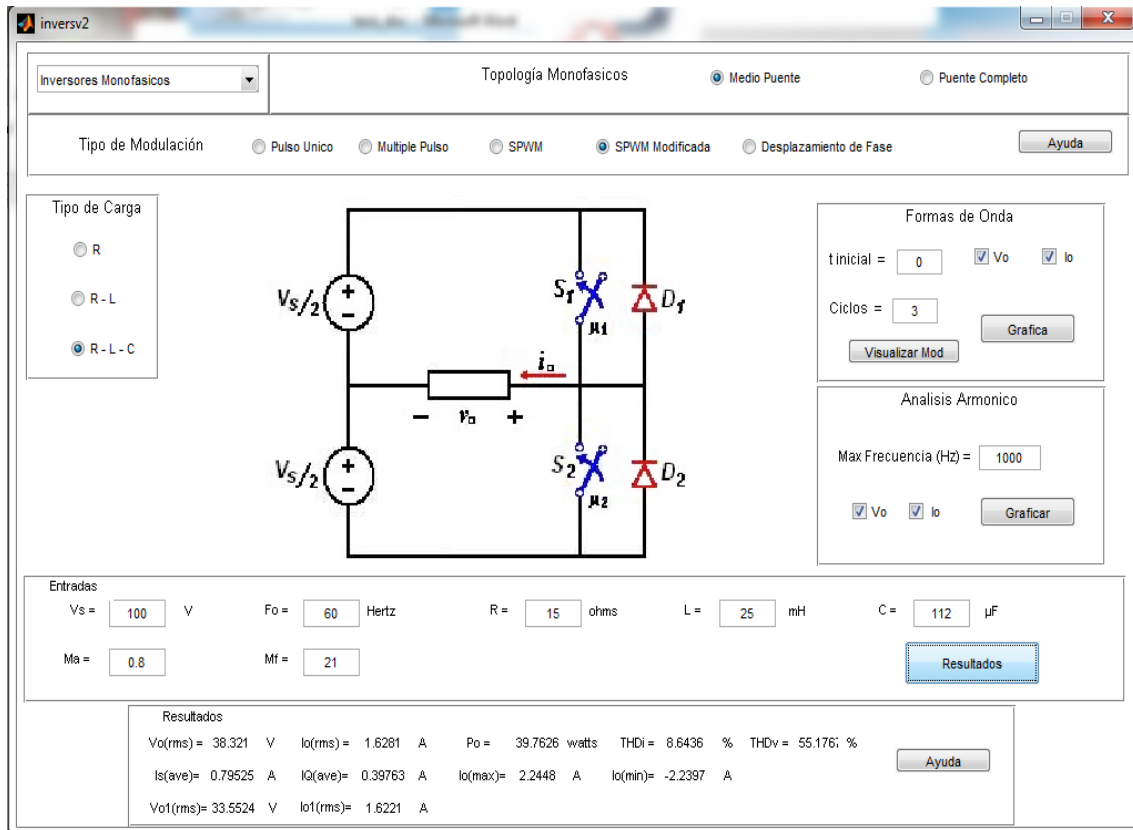
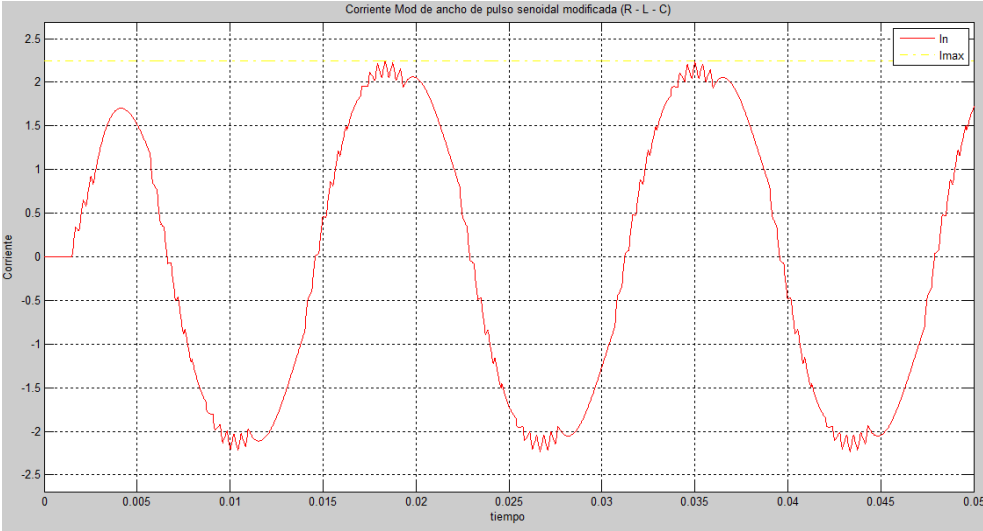


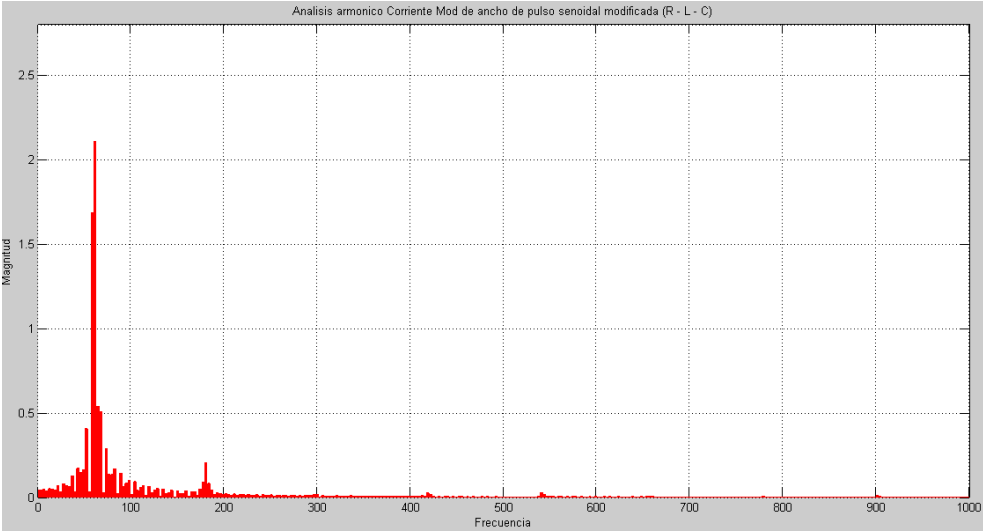
Figura 54. Esquema modulación SPWM modificada con carga R-L-C

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 55. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.5 Modulación por desplazamiento de fase (puente completo)

4.5.1 Carga Resistiva

En la figura 56, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 30 ohms, y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 108° .

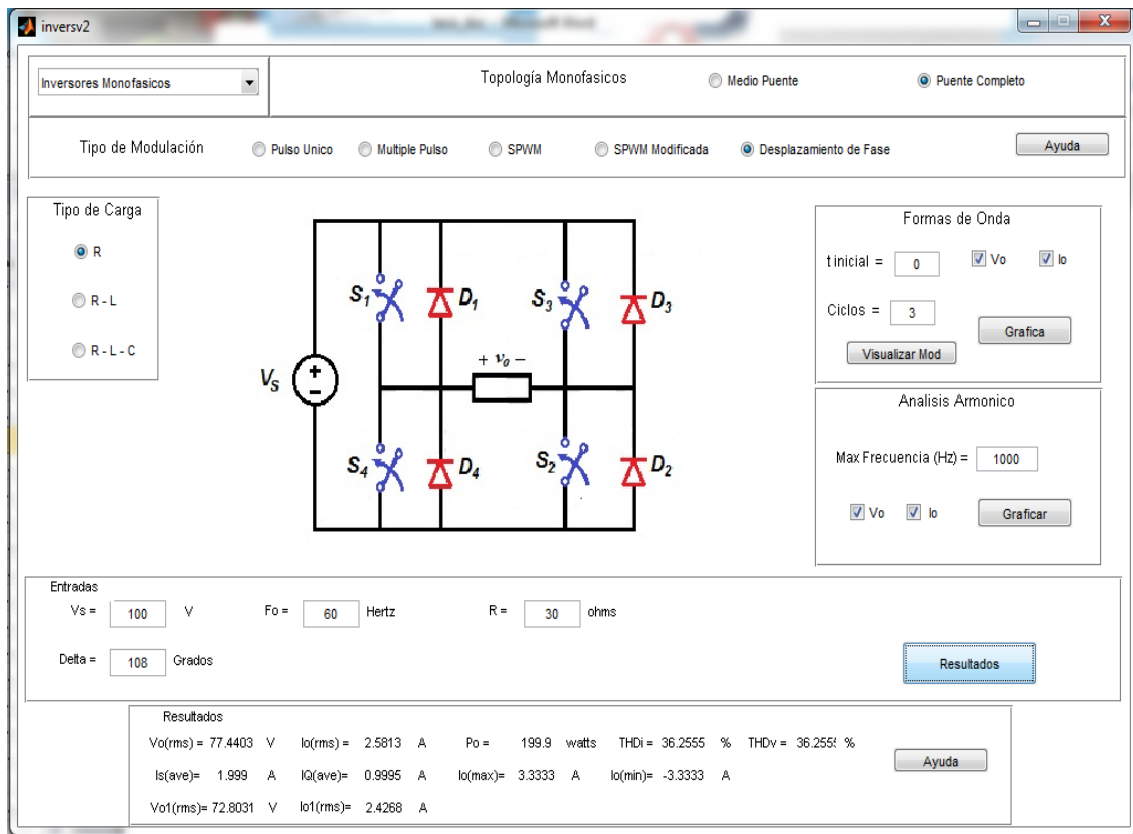
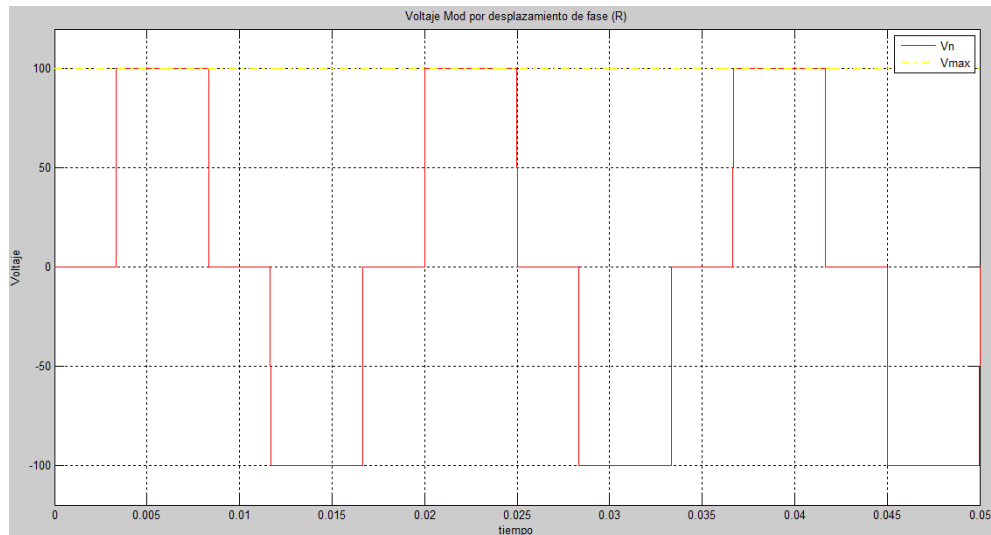


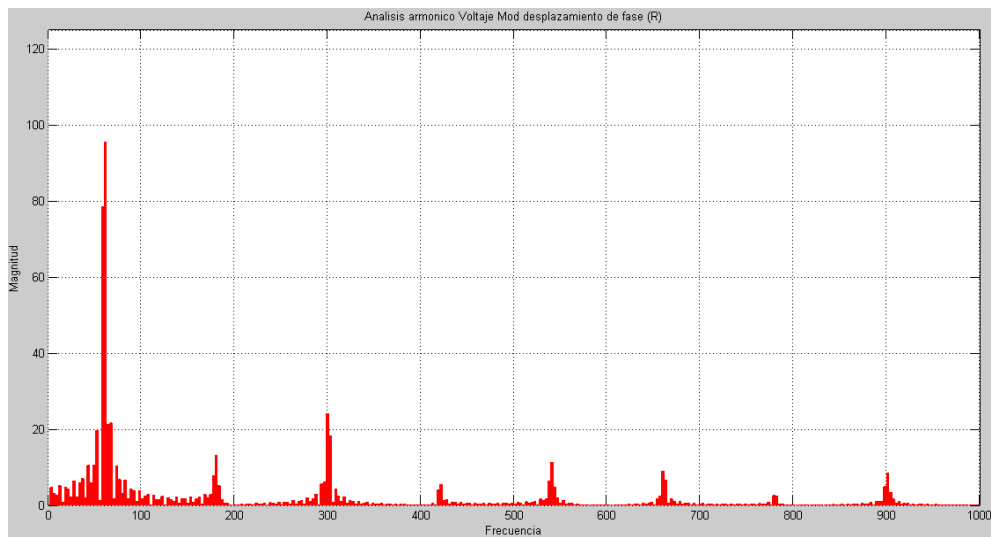
Figura 56. Esquema modulación desplazamiento de fase con carga resistiva

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la Tensión (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Tensión (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)

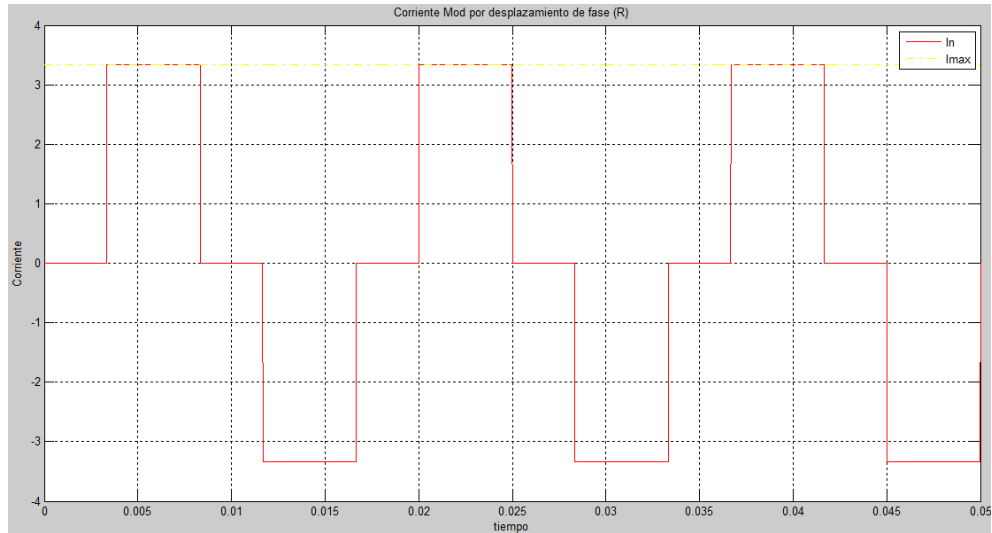


(b)

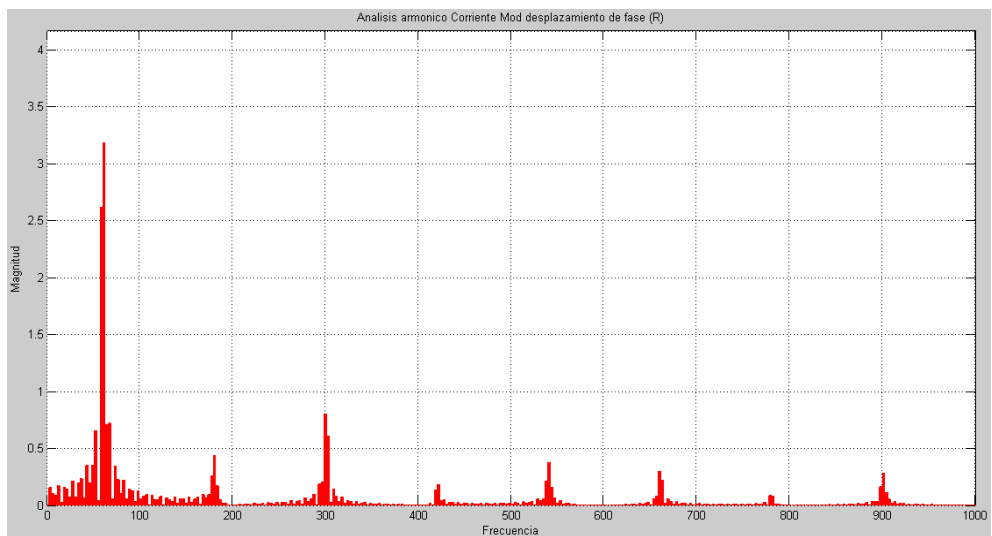
Figura 57. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

Estas formas de onda y Espectro de armónicos de la Tensión para la carga Resistiva (R) es la misma para las cargas R-L y R-L-C.

Análisis de la forma de onda de la Corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 58. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.5.2 Carga Resistiva e Inductiva (R-L)

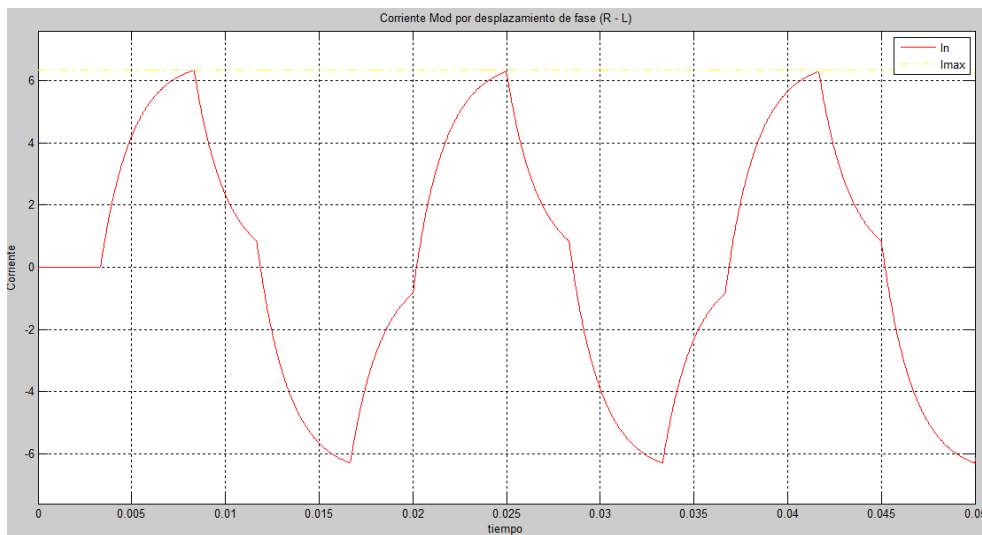
En la figura 59, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 108° .

The screenshot shows the 'inversv2' software interface. At the top, there's a dropdown menu for 'Inversores Monofásicos' and a section for 'Topología Monofásicos' with radio buttons for 'Medio Puente' and 'Puente Completo' (selected). Below that, 'Tipo de Modulación' has radio buttons for 'Pulso Unico', 'Multiple Pulso', 'SPWM', 'SPWM Modificada', and 'Desplazamiento de Fase' (selected). A 'Tipo de Carga' section has radio buttons for 'R', 'R-L' (selected), and 'R-L-C'. The central part is a circuit diagram of a full-bridge inverter with a DC source V_s and an R-L load. The load is connected between the two output terminals, with output voltage V_o indicated. The switches are labeled S_1, S_2, S_3, S_4 and diodes are labeled D_1, D_2, D_3, D_4 . To the right, there are sections for 'Formas de Onda' (Waveforms) and 'Analisis Armonico' (Harmonic Analysis). The 'Formas de Onda' section has 't inicial = 0', 'Ciclos = 3', and checkboxes for 'Vo' and 'Io'. The 'Analisis Armonico' section has 'Max Frecuencia (Hz) = 1000' and checkboxes for 'Vo' and 'Io'. At the bottom, there's an 'Entradas' section with input fields for $V_s = 100$ V, $F_o = 60$ Hertz, $R = 15$ ohms, $L = 25$ mH, and $\Delta = 108$ Grados. A 'Resultados' button is present. Below the button, the 'Resultados' section displays the following values: $V_o(\text{rms}) = 77.4403$ V, $I_o(\text{rms}) = 4.1257$ A, $P_o = 255.323$ watts, $\text{THDi} = 11.6476$ %, $\text{THDv} = 36.2551$ %, $I_s(\text{ave}) = 2.5532$ A, $I_q(\text{ave}) = 1.2766$ A, $I_o(\text{max}) = 6.3323$ A, $I_o(\text{min}) = -6.2924$ A, $V_{o1}(\text{rms}) = 72.8031$ V, and $I_{o1}(\text{rms}) = 4.098$ A. An 'Ayuda' button is also visible.

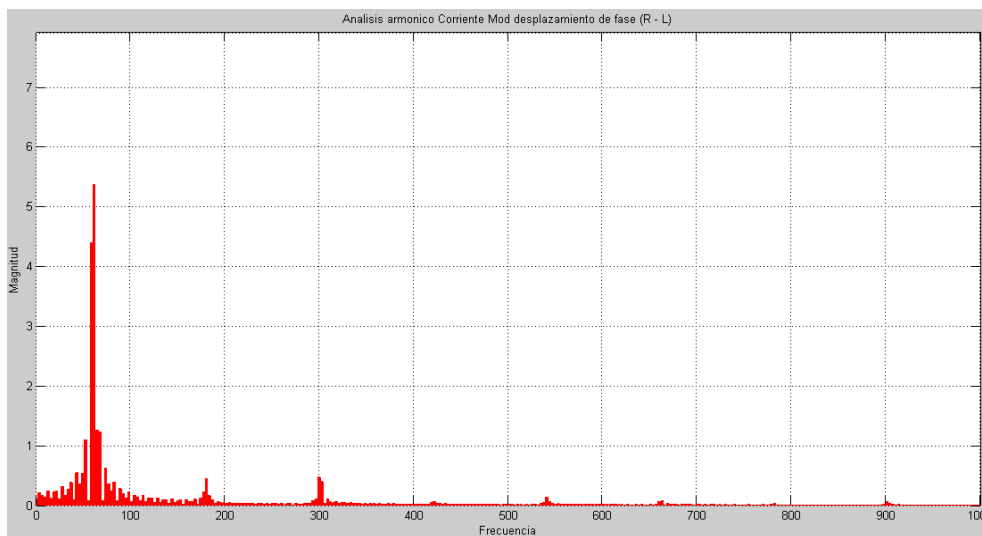
Figura 59. Esquema modulación desplazamiento de fase con carga R-L

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(a)

Figura 60. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.5.3 Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)

En la figura 61, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH, capacitancia 112 μF y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 108° .

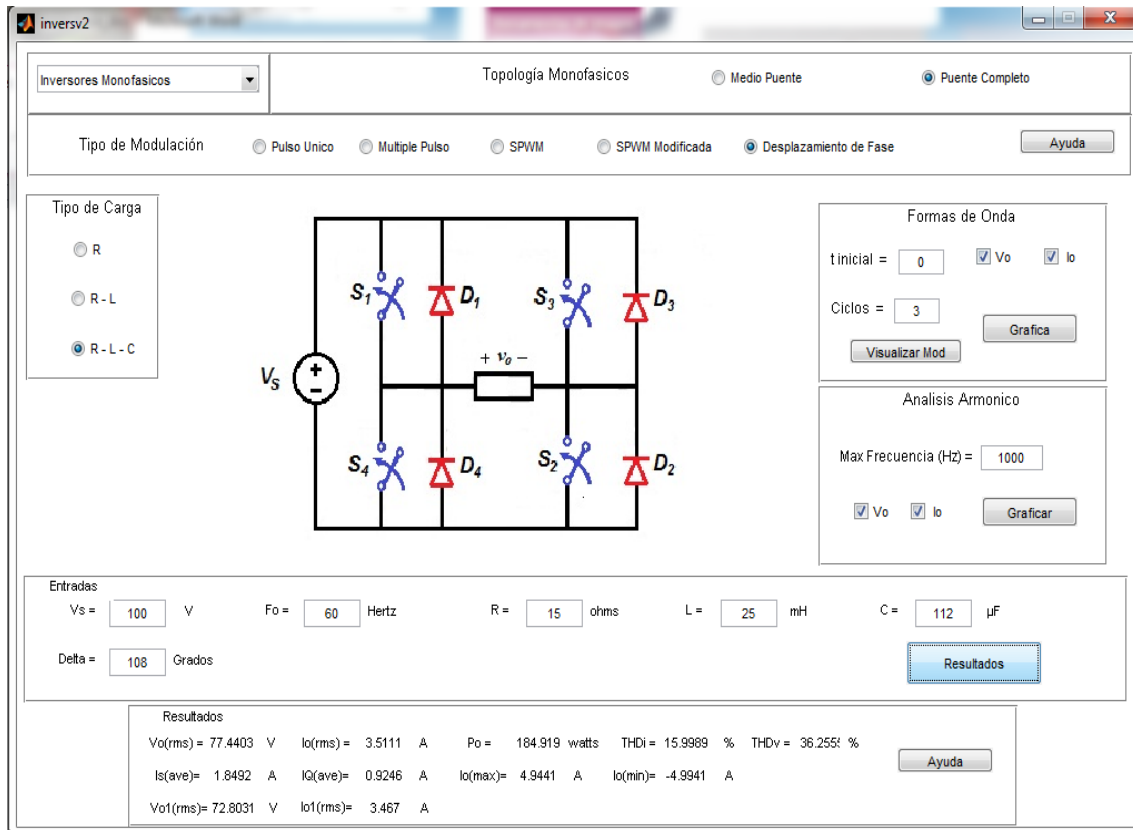
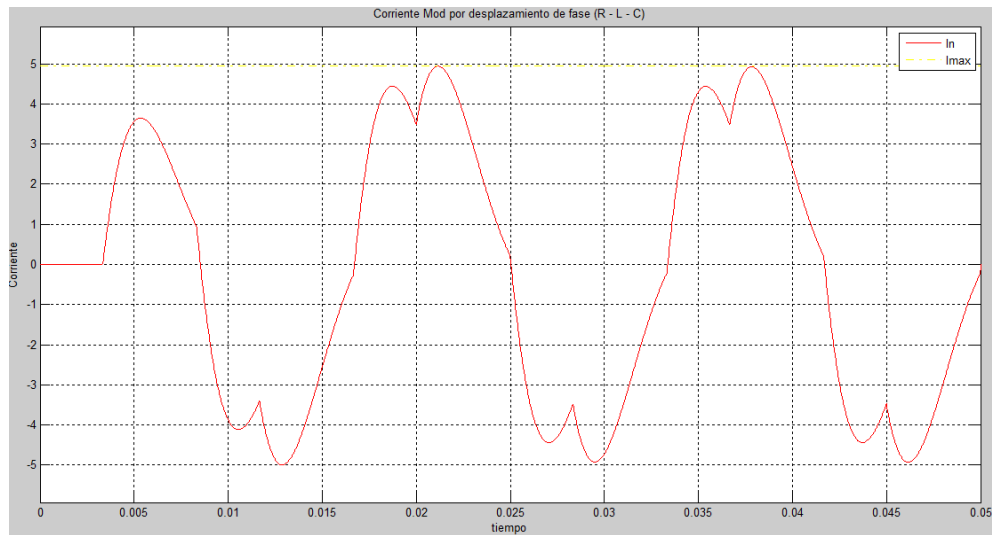


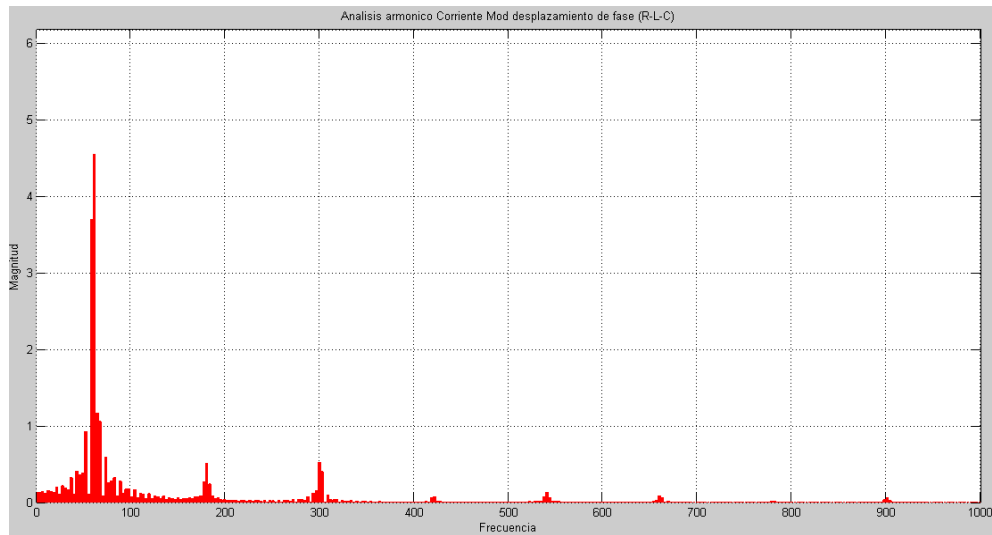
Figura 61. Esquema modulación desplazamiento de fase con carga R-L-C

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 62. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.6 Modulación de Pulso Único (puente completo)

4.6.1 Carga Resistiva

En la figura 63, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 30 ohms, y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 180° .

inversv2

Inversores Monofásicos

Topología Monofásicos Medio Puento Punto Completo

Tipo de Modulación Pulso Único Multiple Pulso SPWM SPWM Modificada Desplazamiento de Fase

Tipo de Carga

- R
- R - L
- R - L - C

Formas de Onda

t inicial = Vo Io

Ciclos =

Analisis Armonico

Max Frecuencia (Hz) =

Vo Io

Entradas

Vs = V Fo = Hertz R = ohms

Delta = Grados

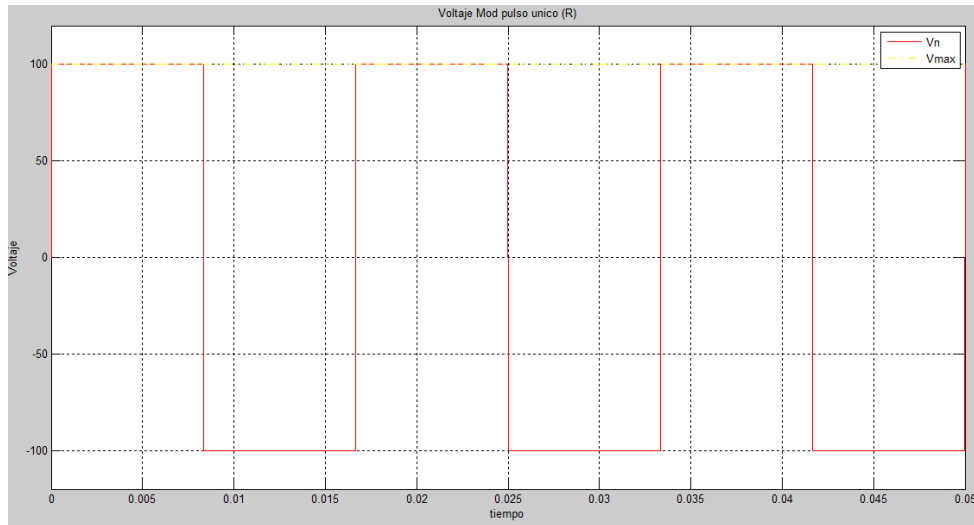
Resultados

Vo(rms) = 100.01 V	Io(rms) = 3.3337 A	Po = 333.4 watts	THDi = 48.3931 %	THDv = 48.393 %
Is(ave) = 3.334 A	IQ(ave) = 1.667 A	Io(max) = 3.3333 A	Io(min) = -3.3333 A	
Vo1(rms) = 90.0228 V	Io1(rms) = 3.0008 A			

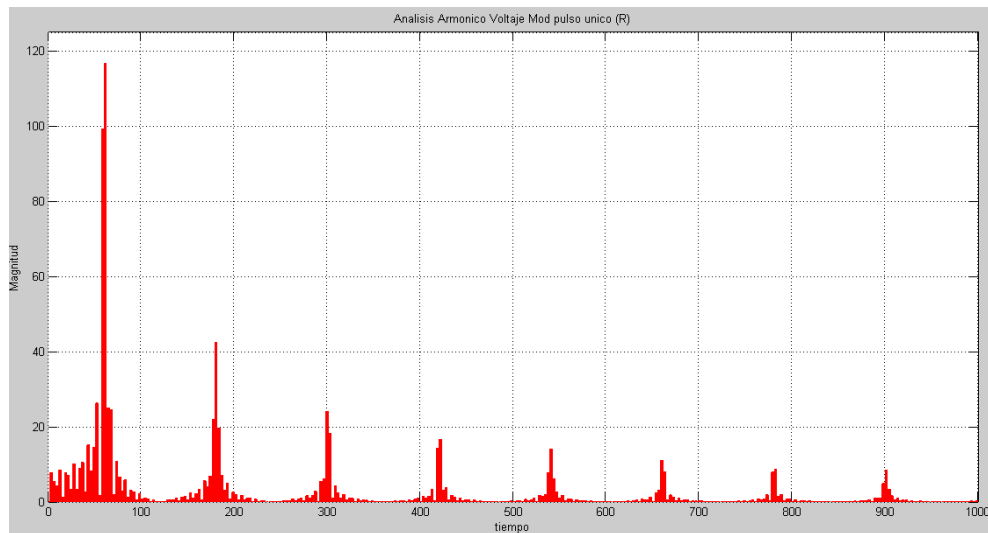
Figura 63. Esquema modulación pulso único con carga resistiva

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la Tensión (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Tensión (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)

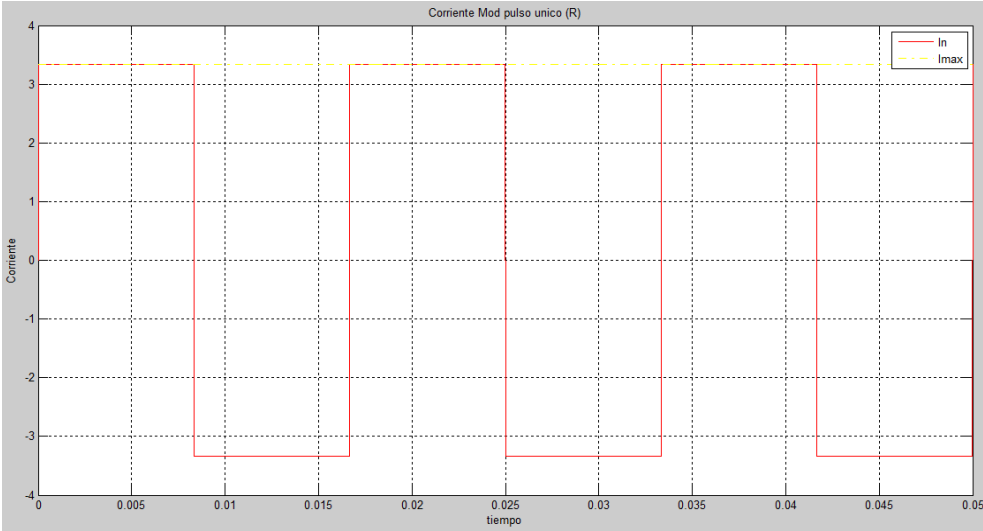


(b)

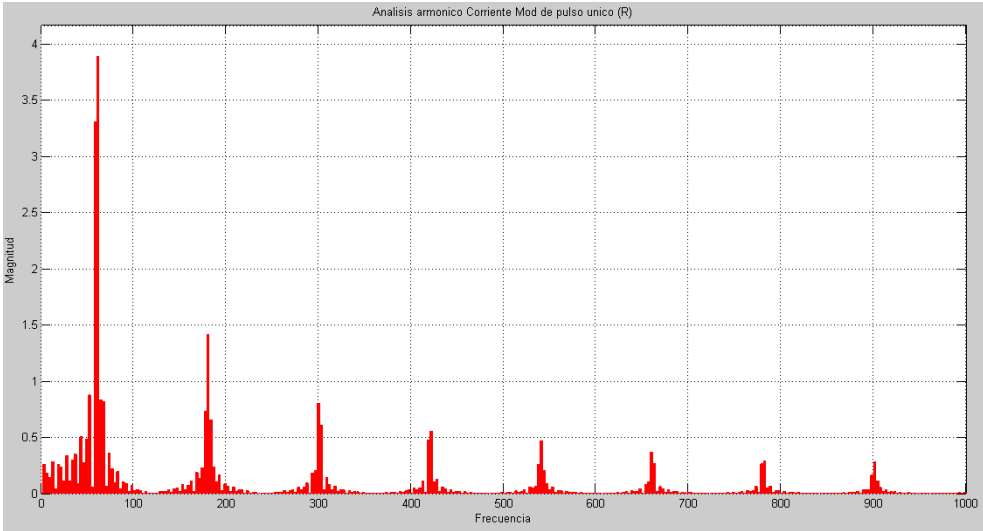
Figura 64. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

Estas formas de onda y Espectro de armónicos de la Tensión para la carga Resistiva (R) es la misma para las cargas R-L y R-L-C.

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 65. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.6.2 Carga Resistiva e Inductiva (R-L)

En la figura 66, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 180° .

The screenshot displays the 'inversv2' software interface for simulating a single-phase full-bridge inverter. The central part of the interface shows a circuit diagram with a DC voltage source V_s on the left, four switches (S_1, S_2, S_3, S_4) and four diodes (D_1, D_2, D_3, D_4) in a bridge configuration, and an R-L load connected to the output terminals. The output voltage V_o is indicated across the load. The software settings are as follows:

- Topología Monofásicos:** Puente Completo (selected)
- Tipo de Modulación:** Pulso Único (selected)
- Tipo de Carga:** R-L (selected)
- Entradas:** $V_s = 100$ V, $F_o = 60$ Hertz, $R = 15$ ohms, $L = 25$ mH, $\Delta = 180$ Grados

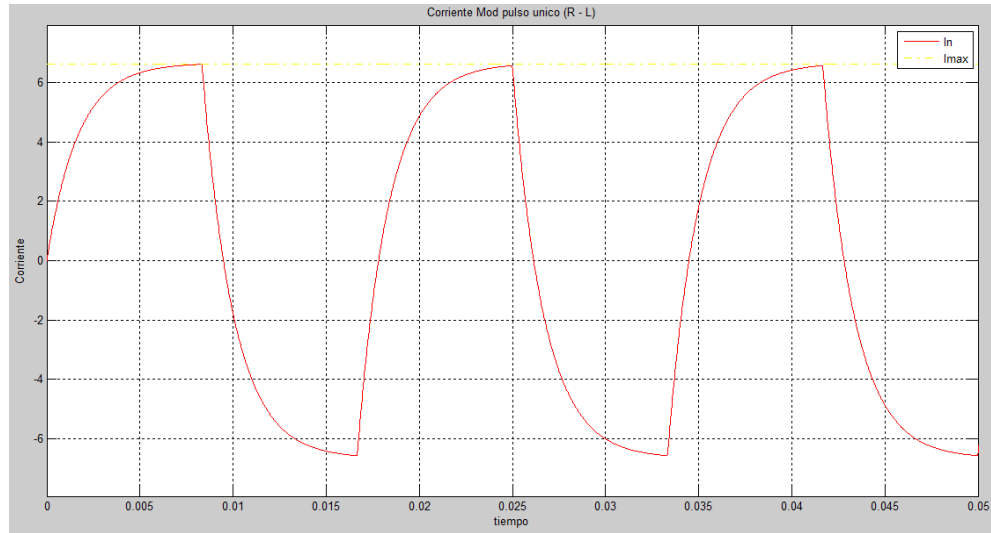
The results section shows the following values:

Resultados					
$V_o(\text{rms}) = 100.01$ V	$I_o(\text{rms}) = 5.188$ A	$P_o = 403.728$ watts	$\text{THDi} = 20.4106$ %	$\text{THDv} = 48.393$ %	
$I_s(\text{ave}) = 4.0373$ A	$I_o(\text{ave}) = 2.0186$ A	$I_o(\text{max}) = 6.6214$ A	$I_o(\text{min}) = -6.5775$ A		
$V_{o1}(\text{rms}) = 90.0228$ V	$I_{o1}(\text{rms}) = 5.0832$ A				

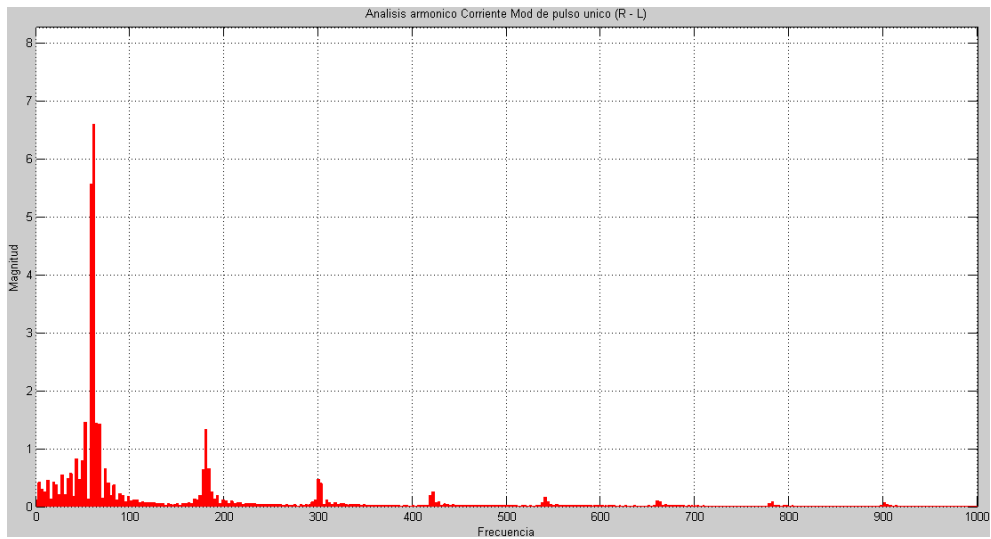
Figura 66. Esquema modulación pulso único con carga R-L

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 67. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.6.3 Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)

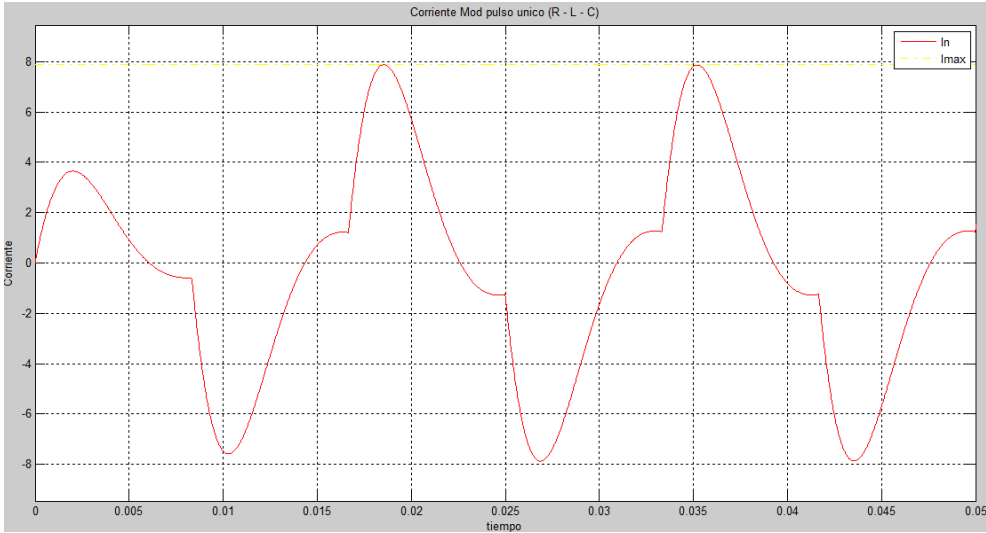
En la figura 68, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH, capacitancia 112 uF y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 180°.

The screenshot shows the 'inversv2' software interface. At the top, it is set to 'Inversores Monofasicos' and 'Topología Monofasicos' with 'Punto Completo' selected. The modulation type is 'Pulso Unico'. The load type is 'R - L - C'. The circuit diagram shows a full-bridge inverter with four switches (S_1, S_2, S_3, S_4) and four diodes (D_1, D_2, D_3, D_4). The input is V_S and the output is V_o . The simulation parameters are: $V_s = 100$ V, $F_o = 60$ Hertz, $R = 15$ ohms, $L = 25$ mH, $C = 112$ μ F, and $\Delta = 180$ Grados. The results section shows: $V_o(rms) = 100.01$ V, $I_o(rms) = 4.5344$ A, $P_o = 308.405$ watts, $THDi = 29.3954$ %, $THDv = 48.393$ %, $I_s(ave) = 3.0841$ A, $I_G(ave) = 1.542$ A, $I_o(max) = 7.8777$ A, $I_o(min) = -7.8706$ A, $V_o1(rms) = 90.0228$ V, and $I_o1(rms) = 4.3503$ A.

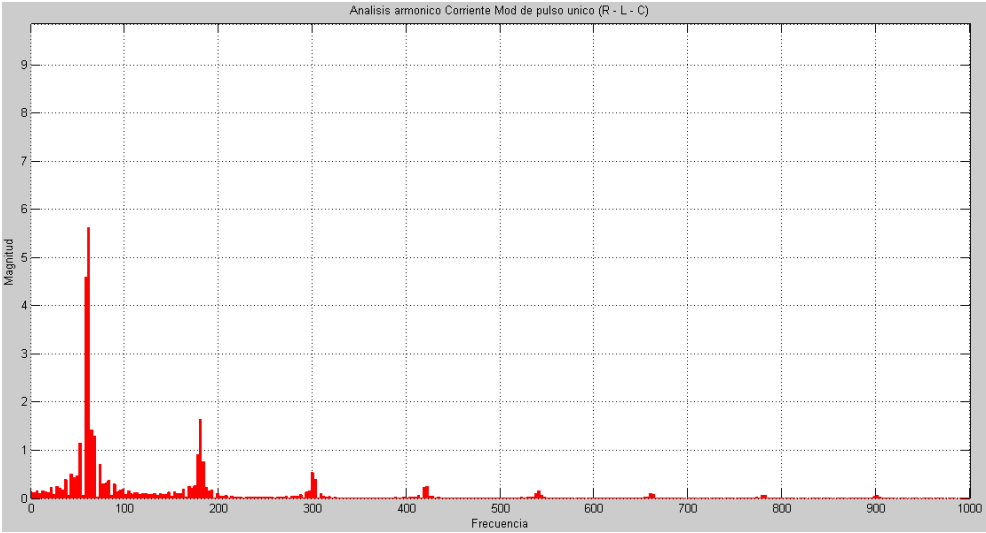
Figura 68. Esquema modulación pulso único con carga R-L-C

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 69. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.7 Modulación de Pulso Múltiple (puente completo)

4.7.1 Carga Resistiva

En la figura 70, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 30 ohms, y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 108° y una mf de 21.

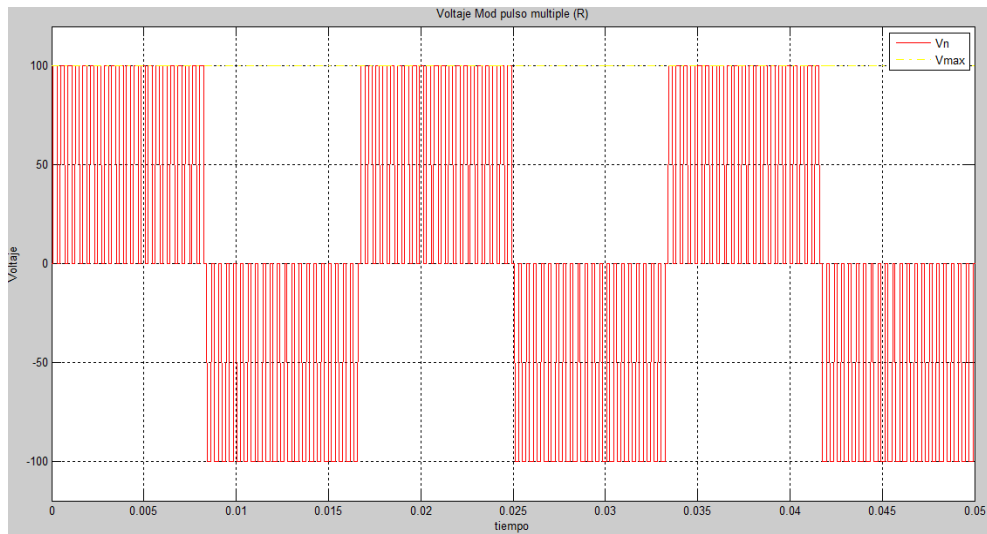
The screenshot shows the 'inversv2' software interface. At the top, it is set to 'Topología Monofásicos' with 'Punto Completo' selected. The modulation type is 'Multiple Pulso'. The load type is 'R'. The circuit diagram shows a full-bridge inverter with four switches (S_1, S_2, S_3, S_4) and four diodes (D_1, D_2, D_3, D_4). The input is a DC source V_s and the output is a resistor R connected to the bridge output terminals, with output voltage V_o and current I_o indicated. The simulation parameters are: $V_s = 100$ V, $F_o = 60$ Hertz, $R = 30$ ohms, $\Delta = 108$ Grados, and $Mf = 21$. The 'Formas de Onda' section shows $t_{inicial} = 0$, $Ciclos = 3$, and checkboxes for V_o and I_o . The 'Analisis Armonico' section shows $Max\ Frecuencia\ (Hz) = 1000$ and checkboxes for V_o and I_o . The 'Resultados' section displays the following values:

Resultados					
$V_o(rms) = 77.4597$ V	$I_o(rms) = 2.582$ A	$P_o = 200$ watts	$THDi = 102.843$ %	$THDv = 102.84$ %	
$I_s(ave) = 2$ A	$I_Q(ave) = 1$ A	$I_o(max) = 3.3333$ A	$I_o(min) = -3.3333$ A		
$V_o1(rms) = 53.999$ V	$I_o1(rms) = 1.8$ A				

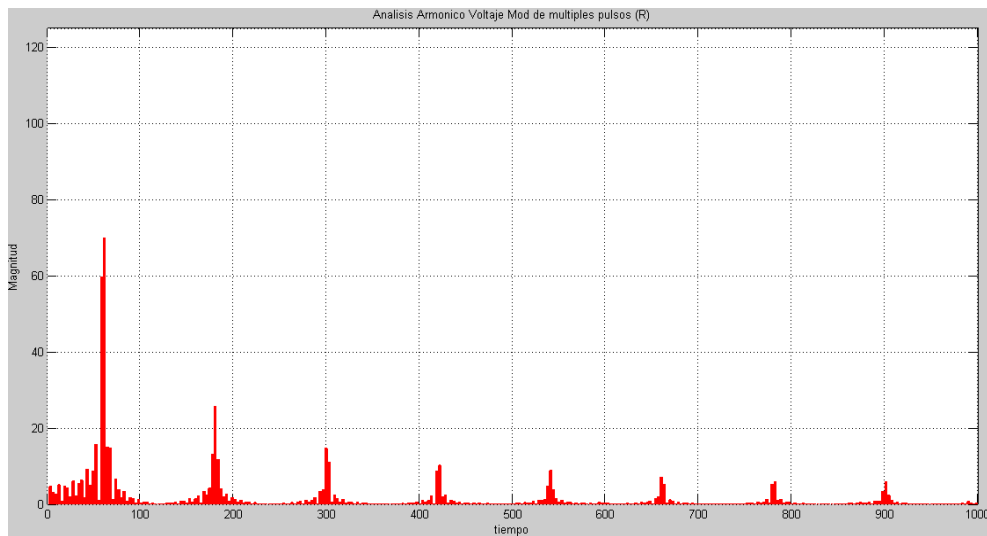
Figura 70. Esquema modulación pulso múltiple con carga resistiva

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de Tensión (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de Tensión (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)

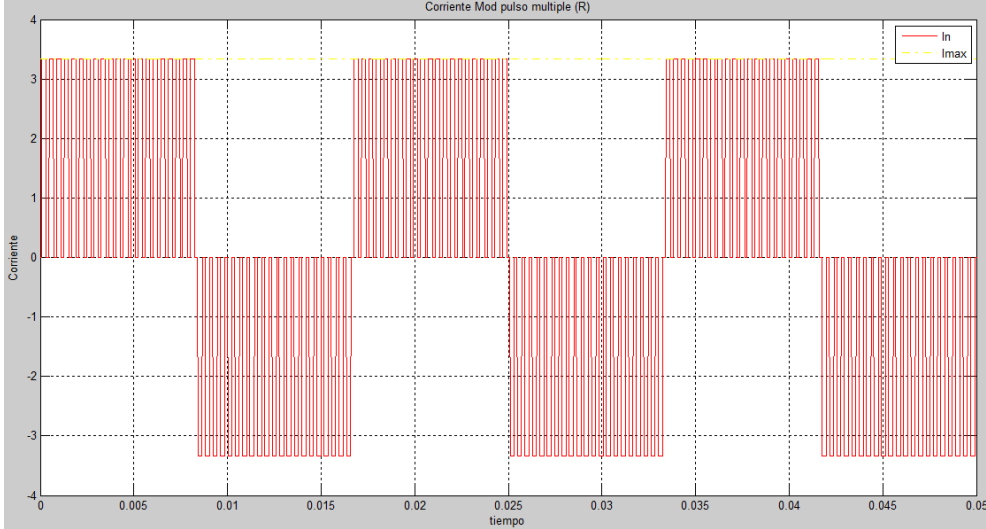


(b)

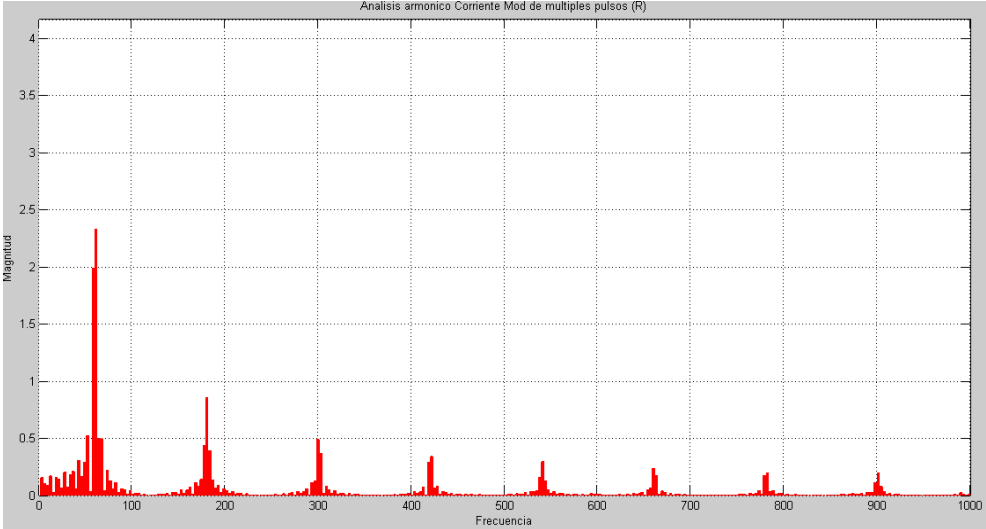
Figura 71. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

Estas formas de onda y Espectro de armónicos de la Tensión para la carga Resistiva (R) es la misma para las cargas R-L y R-L-C.

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 72. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.7.2 Carga Resistiva e Inductiva (R-L)

En la figura 73, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 108° y una mf de 21.

The screenshot shows the 'inversv2' software interface. The main window displays a full-bridge inverter circuit diagram with four thyristors (S_1, S_2, S_3, S_4) and four diodes (D_1, D_2, D_3, D_4). The DC source is V_S and the load is a resistor R and inductor L in series. The output voltage is v_o .

Simulation parameters are set as follows:

- Topología Monofásica: Medio Punteo, Punteo Completo
- Tipo de Modulación: Pulso Unico, Multiple Pulso, SPWM, SPWM Modificada, Desplazamiento de Fase
- Tipo de Carga: R, R - L, R - L - C
- Formas de Onda: t inicial = 0, Ciclos = 3, Vo, Io
- Analisis Armonico: Max Frecuencia (Hz) = 1000, Vo, Io
- Entradas: $V_s = 100$ V, $F_o = 60$ Hertz, $R = 15$ ohms, $L = 25$ mH, Delta = 108 Grados, Mf = 21

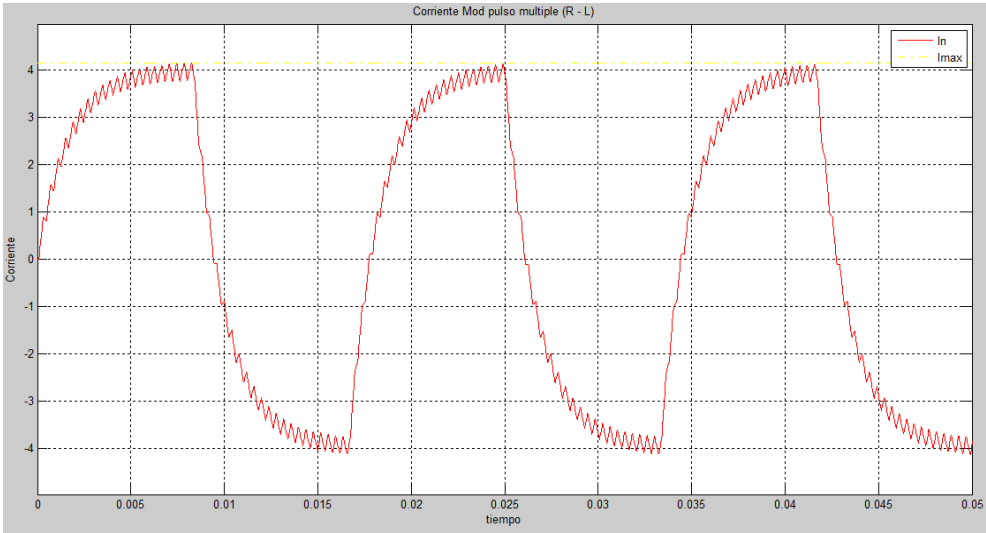
Results (Resultados):

$V_o(\text{rms}) = 77.4597$ V	$I_o(\text{rms}) = 3.1178$ A	$P_o = 145.807$ watts	THDi = 20.9185 %	THDv = 102.84% %
$I_s(\text{ave}) = 1.4581$ A	$I_Q(\text{ave}) = 0.72904$ A	$I_o(\text{max}) = 4.1439$ A	$I_o(\text{min}) = -4.1317$ A	
$V_o1(\text{rms}) = 53.999$ V	$I_o1(\text{rms}) = 3.0517$ A			

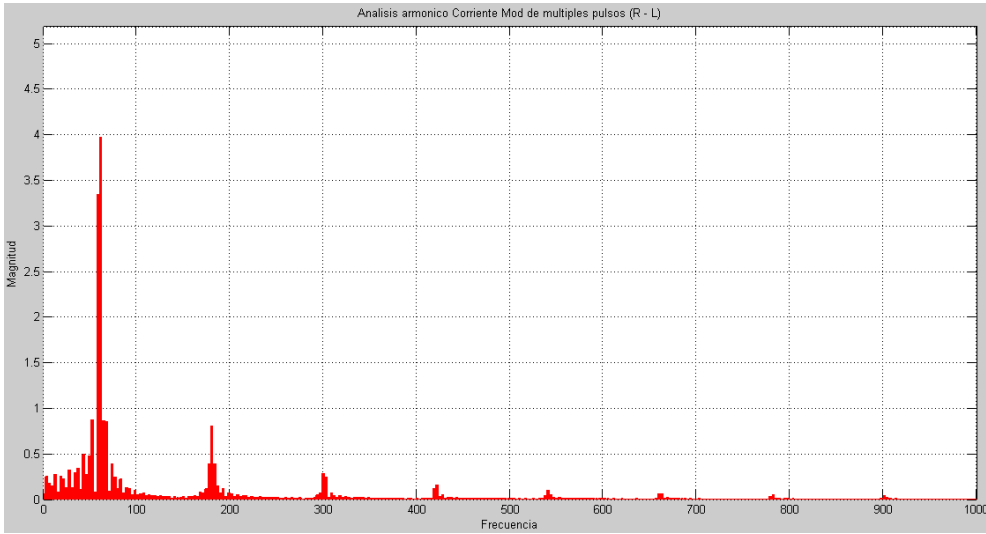
Figura 73. Esquema modulación pulso múltiple con carga R-L

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 74. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.7.3 Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)

En la figura 75, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH, capacitancia 112 μF y una frecuencia de 60 Hz con un delta de 108° y una mf de 21.

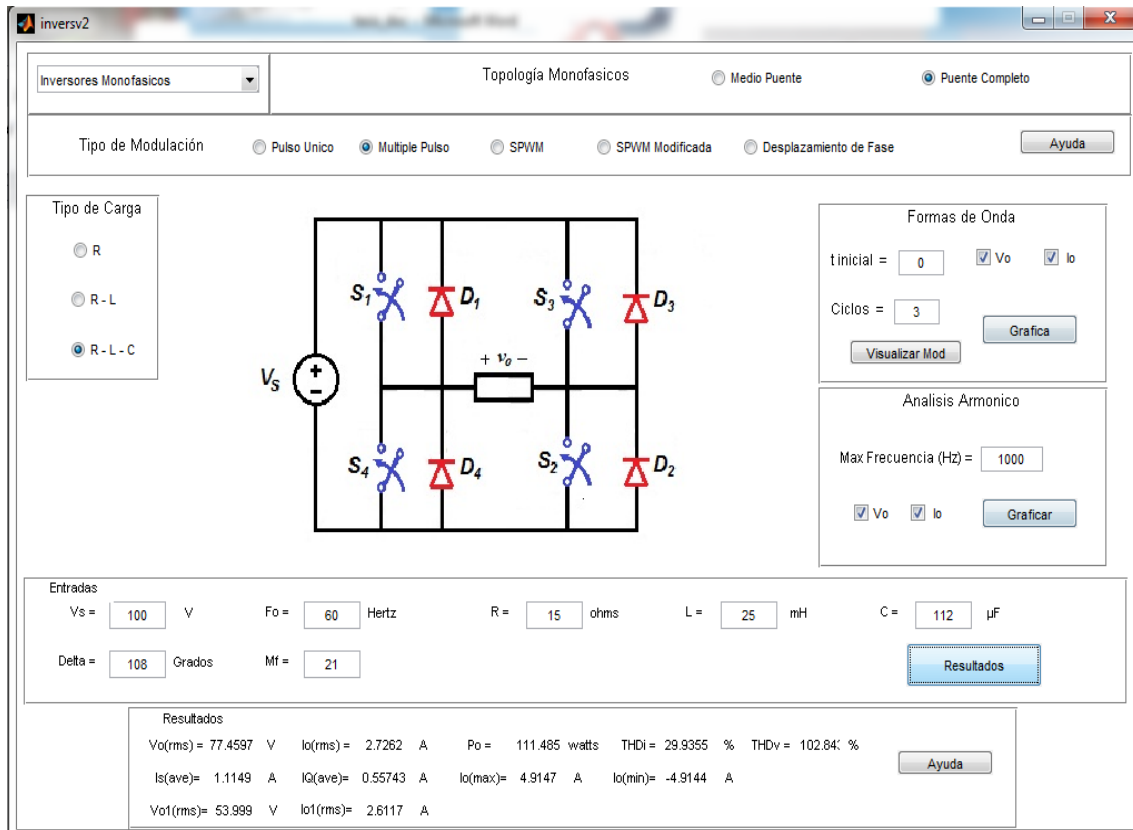
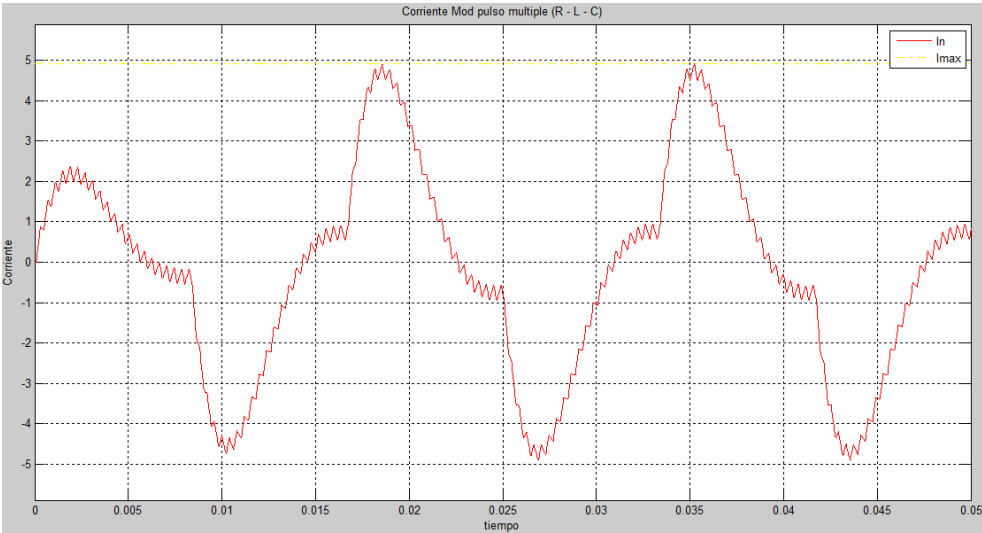


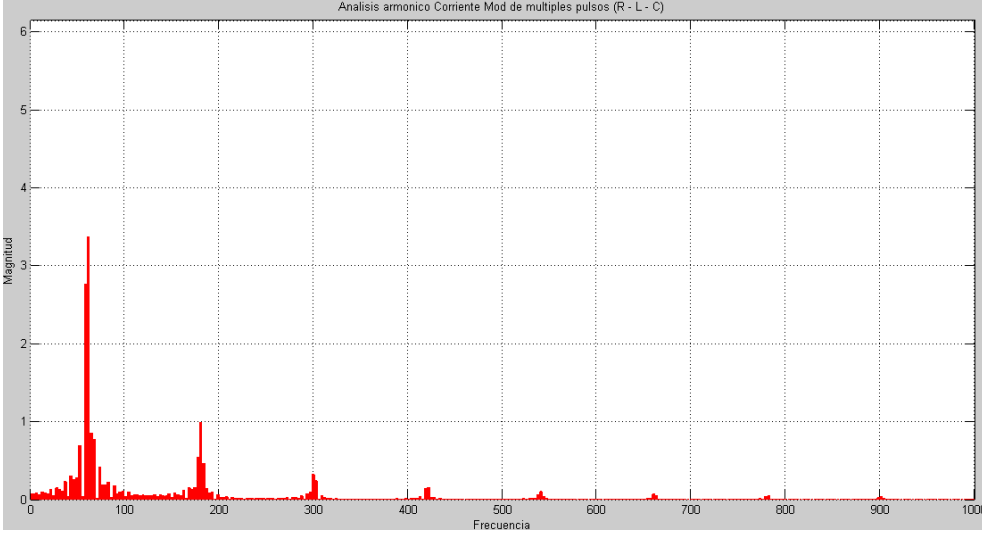
Figura 75. Esquema modulación pulso múltiple con carga R-L-C

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 76. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.8 Modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) (puente completo)

4.8.1 Carga Resistiva

En la figura 77, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 30 ohms, y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

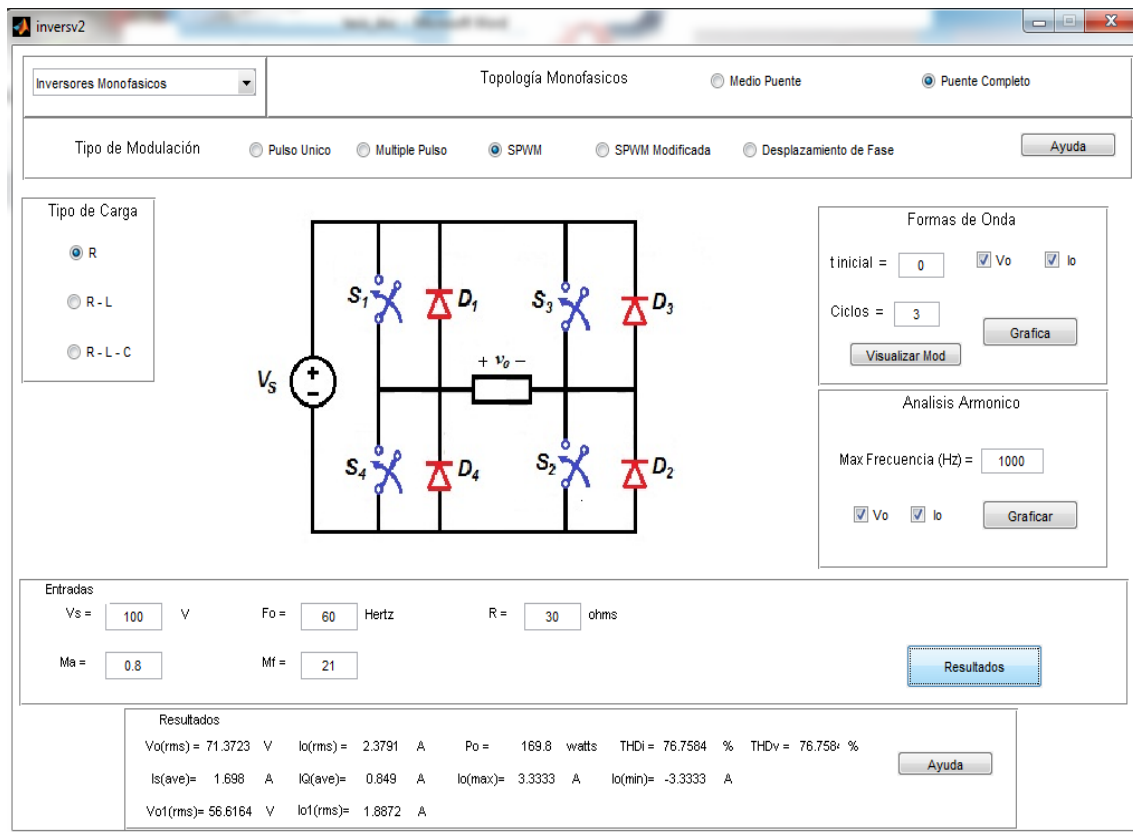
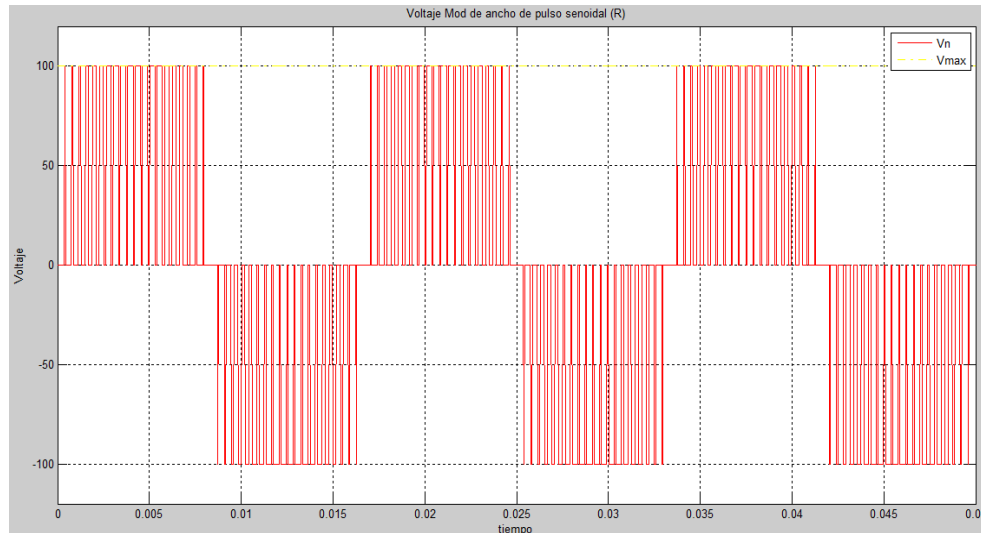


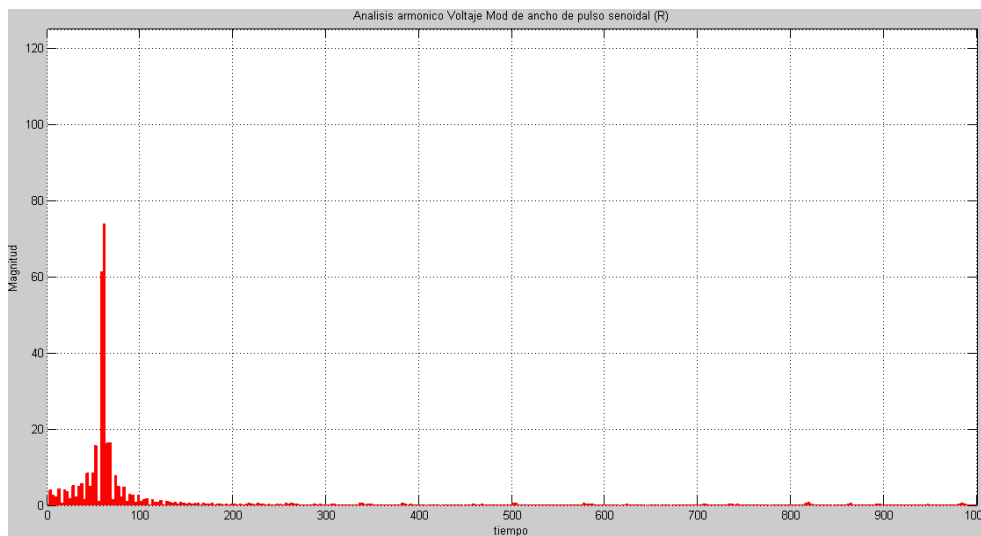
Figura 77. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal con carga resistiva

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la Tensión (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Tensión (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)

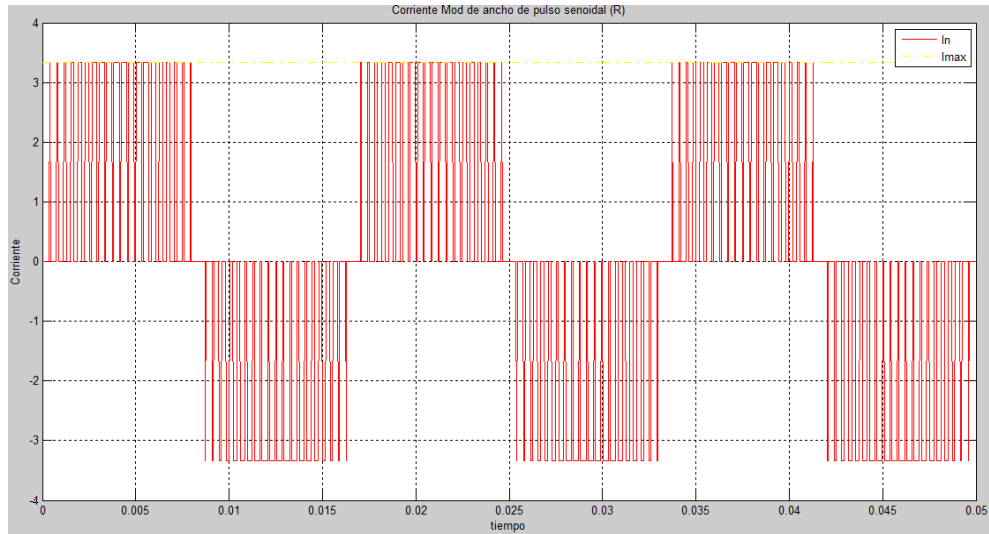


(b)

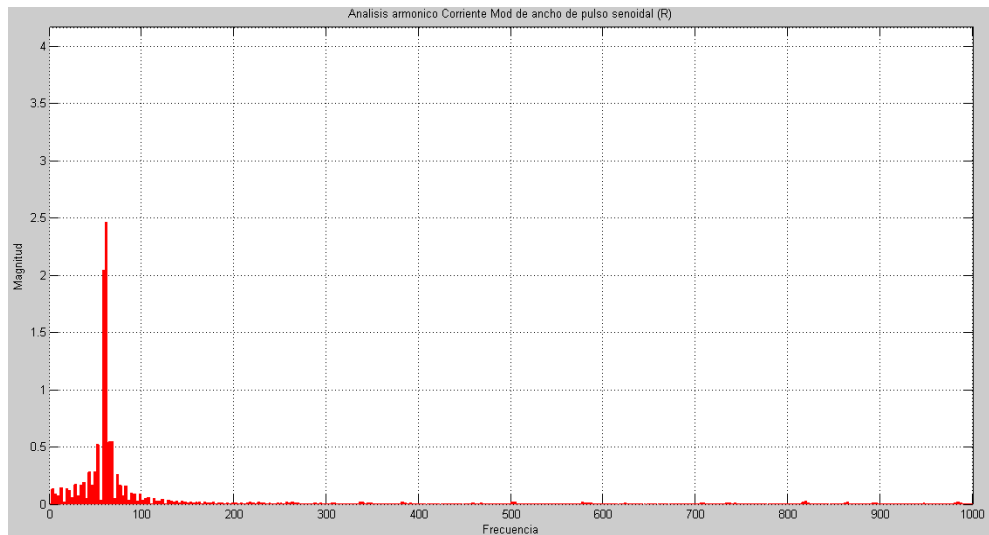
Figura 78. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

Estas formas de onda y Espectro de armónicos de la Tensión para la carga Resistiva (R) es la misma para las cargas R-L y R-L-C.

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 79. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.8.2 Carga Resistiva e Inductiva (R-L)

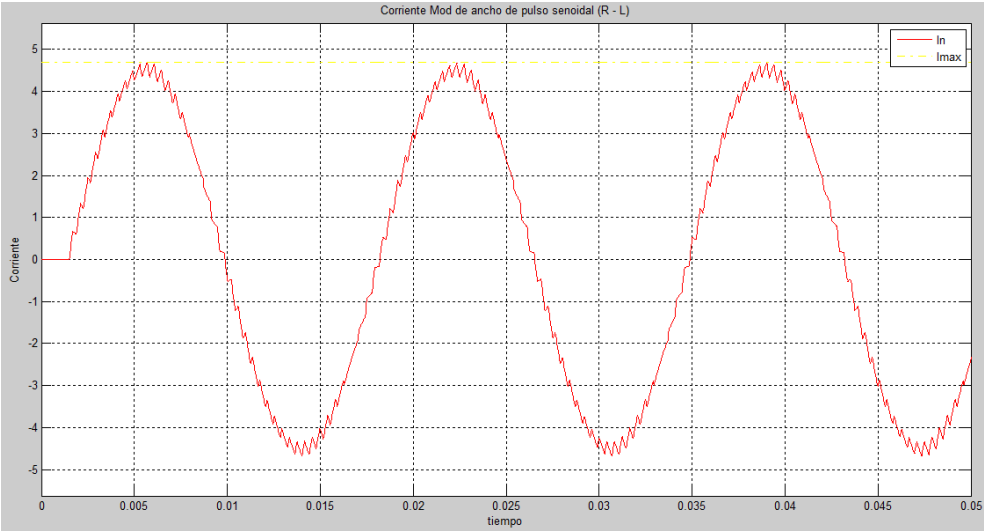
En la figura 80, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

The screenshot shows the 'inversv2' software interface. At the top, it is set to 'Inversores Monofasicos' and 'Topología Monofasicos' with 'Punto Completo' selected. The modulation type is 'SPWM'. The load type is 'R - L'. The circuit diagram shows a full-bridge inverter with thyristors S_1, S_2, S_3, S_4 and diodes D_1, D_2, D_3, D_4 . The load is a resistor R and inductor L in series. The input parameters are: $V_s = 100$ V, $F_o = 60$ Hertz, $R = 15$ ohms, $L = 25$ mH, $Ma = 0.8$, and $Mf = 21$. The results section shows: $V_o(rms) = 71.3723$ V, $I_o(rms) = 3.1946$ A, $P_o = 153.084$ watts, $THDi = 2.713$ %, $THDv = 76.758$ %, $I_s(ave) = 1.5308$ A, $I_Q(ave) = 0.76542$ A, $I_o(max) = 4.6887$ A, $I_o(min) = -4.6841$ A, $V_{o1}(rms) = 56.6164$ V, and $I_{o1}(rms) = 3.1935$ A.

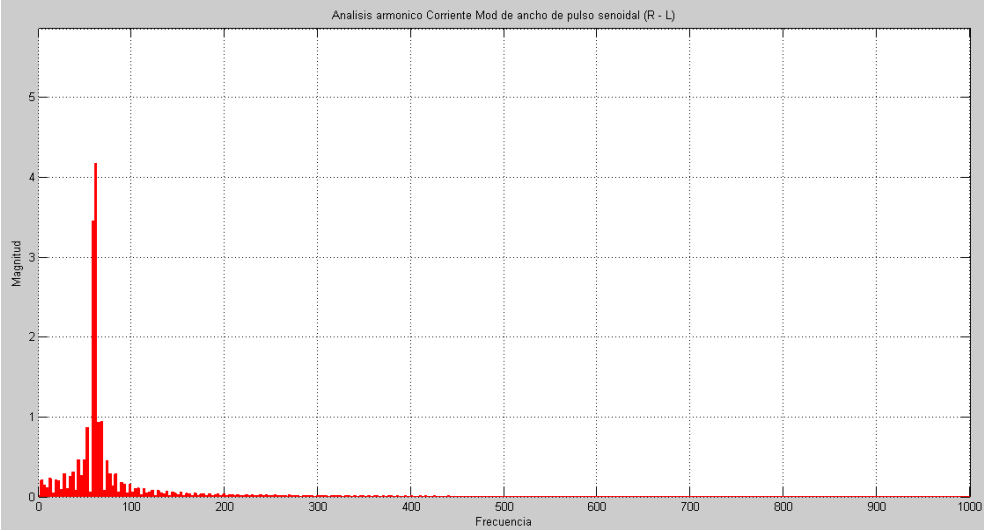
Figura 80. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal con carga R-L

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 81. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.8.3 Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)

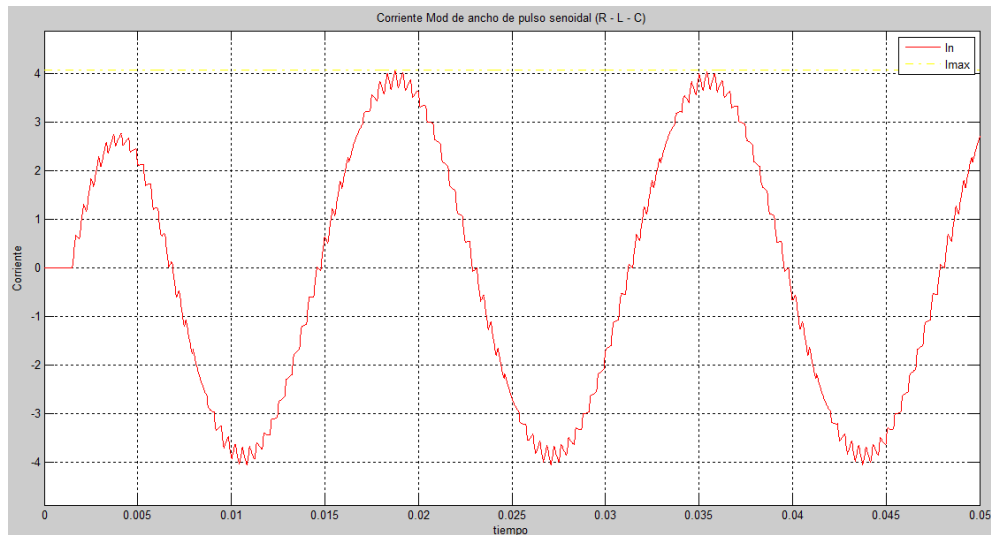
En la figura 82, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH, capacitancia 112 uF y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

The screenshot shows the 'inversv2' software interface. At the top, it is set to 'Inversores Monofasicos' and 'Topología Monofasicos' with 'Punto Completo' selected. The modulation type is 'SPWM'. The load type is 'R - L - C'. The circuit diagram shows a full-bridge inverter with four switches (S_1, S_2, S_3, S_4) and four diodes (D_1, D_2, D_3, D_4). The input is a DC source V_S and the output is V_o . The simulation parameters are: $V_s = 100$ V, $F_o = 60$ Hertz, $R = 15$ ohms, $L = 25$ mH, $C = 112$ μ F, $Ma = 0.8$, and $Mf = 21$. The results section shows: $V_o(\text{rms}) = 71.3723$ V, $I_o(\text{rms}) = 2.7352$ A, $P_o = 112.216$ watts, $\text{THDi} = 3.0252$ %, $\text{THDv} = 76.758$ %, $I_s(\text{ave}) = 1.1222$ A, $I_Q(\text{ave}) = 0.56108$ A, $I_o(\text{max}) = 4.0775$ A, $I_o(\text{min}) = -4.06$ A, $V_{o1}(\text{rms}) = 56.6164$ V, and $I_{o1}(\text{rms}) = 2.7339$ A.

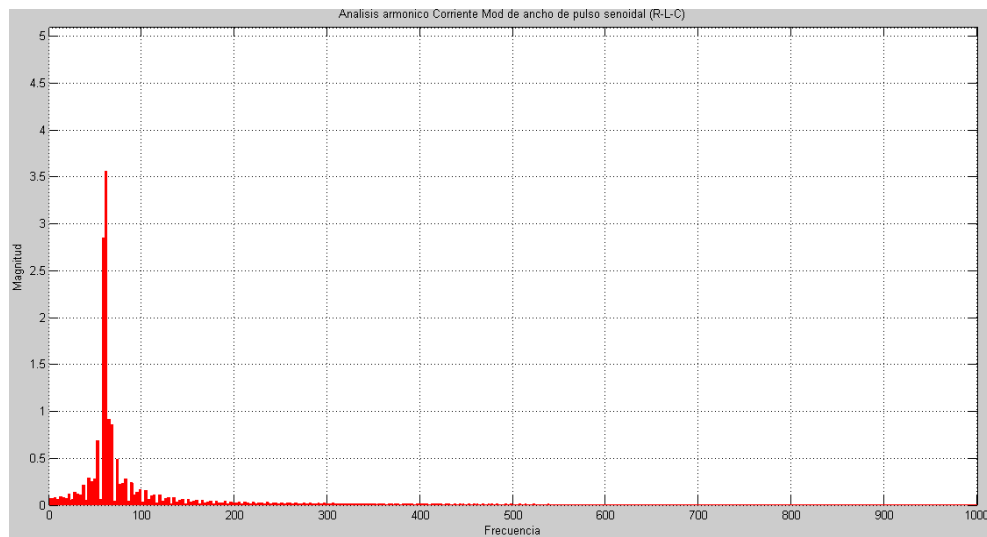
Figura 82. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal con carga R-L-C

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 83. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

4.9 Modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada (Puente completo)

4.9.1 Carga Resistiva

En la figura 84, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 30 ohms, y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

The screenshot shows the 'inversv2' software interface. The main window displays a full-bridge inverter circuit diagram with four thyristors (S_1, S_2, S_3, S_4) and four diodes (D_1, D_2, D_3, D_4). The DC source is V_s and the load is a resistor R . The output voltage is v_o .

Simulation parameters are set as follows:

- Topología Monofásicos: Puente Completo
- Tipo de Modulación: SPWM Modificada
- Tipo de Carga: R
- Formas de Onda: $t_{inicial} = 0$, Ciclos = 3, V_o , I_o
- Analisis Armonico: Max Frecuencia (Hz) = 1000, V_o , I_o
- Entradas: $V_s = 100$ V, $F_o = 60$ Hertz, $R = 30$ ohms, $Ma = 0.8$, $Mf = 21$

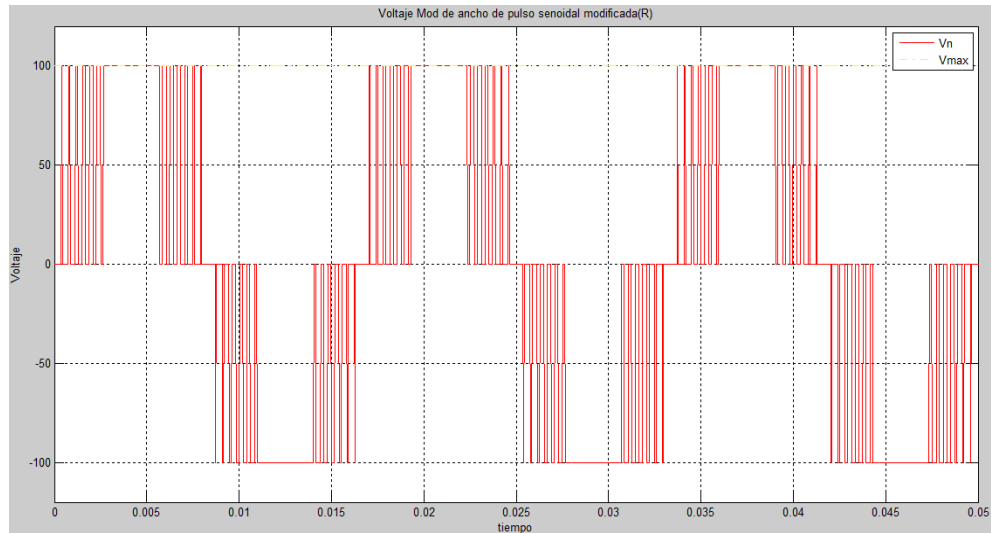
Results (Resultados):

$V_o(rms) = 76.642$ V	$I_o(rms) = 2.5547$ A	$P_o = 195.8$ watts	$THDi = 55.1767$ %	$THDv = 55.176$ %
$I_s(ave) = 1.958$ A	$I_Q(ave) = 0.979$ A	$I_o(max) = 3.3333$ A	$I_o(min) = -3.3333$ A	
$V_{o1}(rms) = 67.1048$ V	$I_{o1}(rms) = 2.2368$ A			

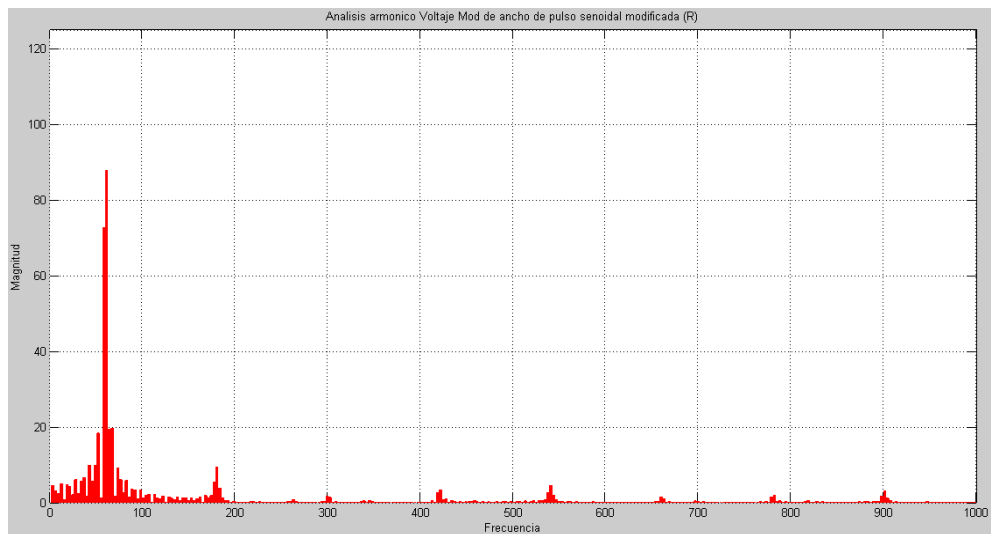
Figura 84. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada con carga resistiva

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la Tensión (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Tensión (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)

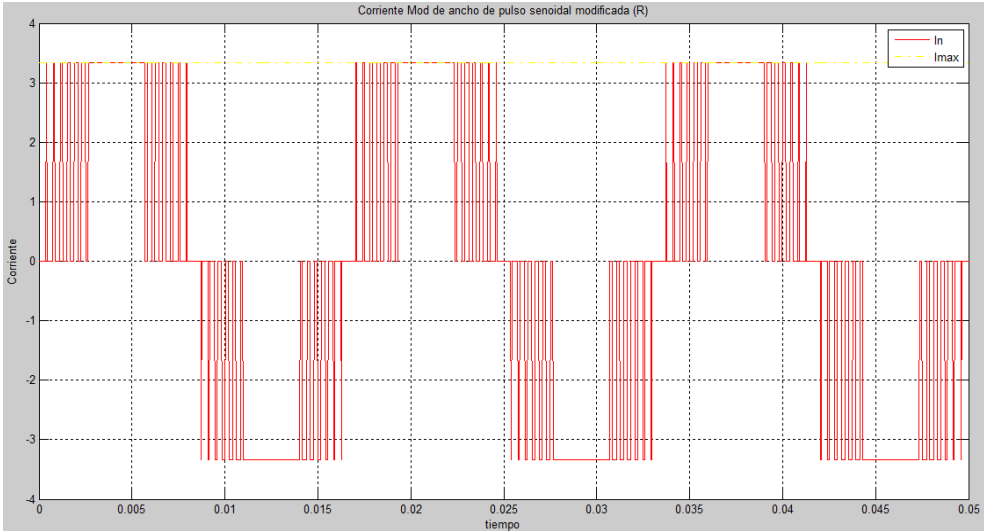


(b)

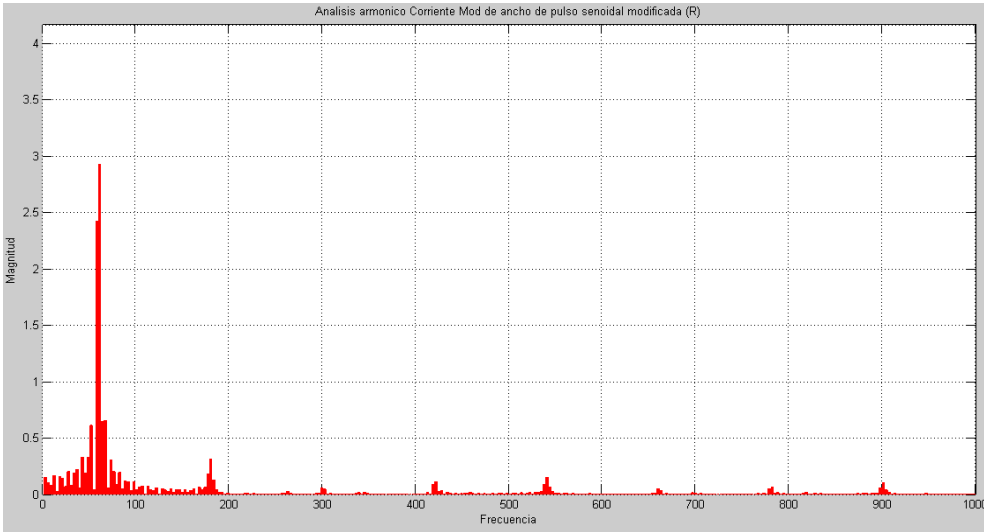
Figura 85. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

Estas formas de onda y Espectro de armónicos de la Tensión para la carga Resistiva (R) es la misma para las cargas R-L y R-L-C.

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 86. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.9.2 Carga Resistiva e Inductiva (R-L)

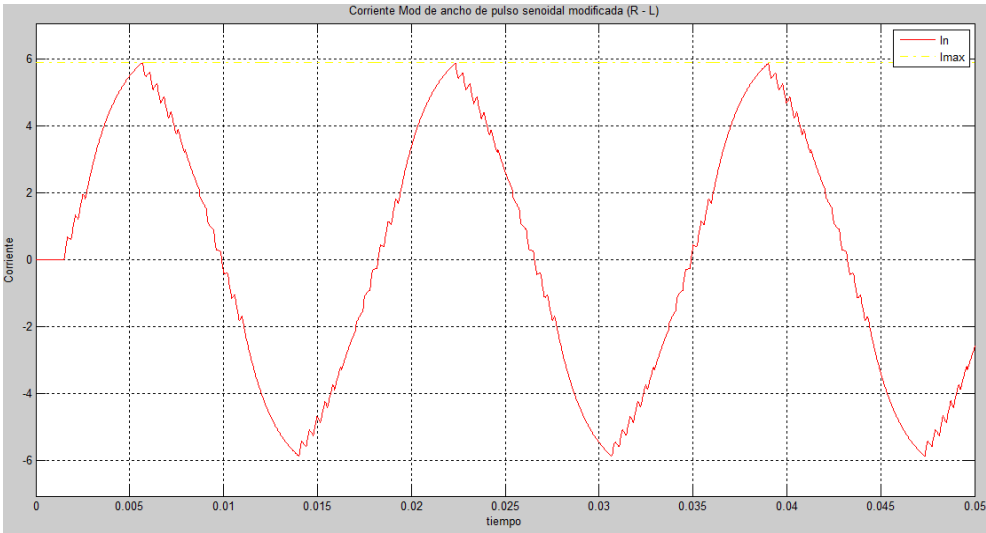
En la figura 87, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

The screenshot shows the 'inversv2' software interface. At the top, it displays 'Inversores Monofasicos' and 'Topología Monofasicos' with 'Puente Completo' selected. Below this, 'Tipo de Modulación' is set to 'SPWM Modificada'. The 'Tipo de Carga' section has 'R-L' selected. The central circuit diagram shows a full-bridge inverter with four switches (S1, S2, S3, S4) and four diodes (D1, D2, D3, D4). A DC source V_s is connected to the bridge. The load, consisting of a resistor R and an inductor L in series, is connected across the bridge output. The output voltage is labeled v_o . To the right, the 'Formas de Onda' section shows 't inicial = 0', 'Ciclos = 3', and checkboxes for V_o and I_o . The 'Analisis Armonico' section shows 'Max Frecuencia (Hz) = 1000' and checkboxes for V_o and I_o . At the bottom, the 'Entradas' section lists: $V_s = 100$ V, $F_o = 60$ Hertz, $R = 15$ ohms, $L = 25$ mH, $Ma = 0.8$, and $Mf = 21$. The 'Resultados' section displays: $V_o(rms) = 76.642$ V, $I_o(rms) = 3.7963$ A, $P_o = 216.184$ watts, $THDi = 6.0739$ %, $THDv = 55.176$ %, $I_s(ave) = 2.1618$ A, $I_q(ave) = 1.0809$ A, $I_o(max) = 5.8821$ A, $I_o(min) = -5.8642$ A, $V_{o1}(rms) = 67.1048$ V, and $I_{o1}(rms) = 3.7894$ A. A 'Resultados' button is visible next to the results.

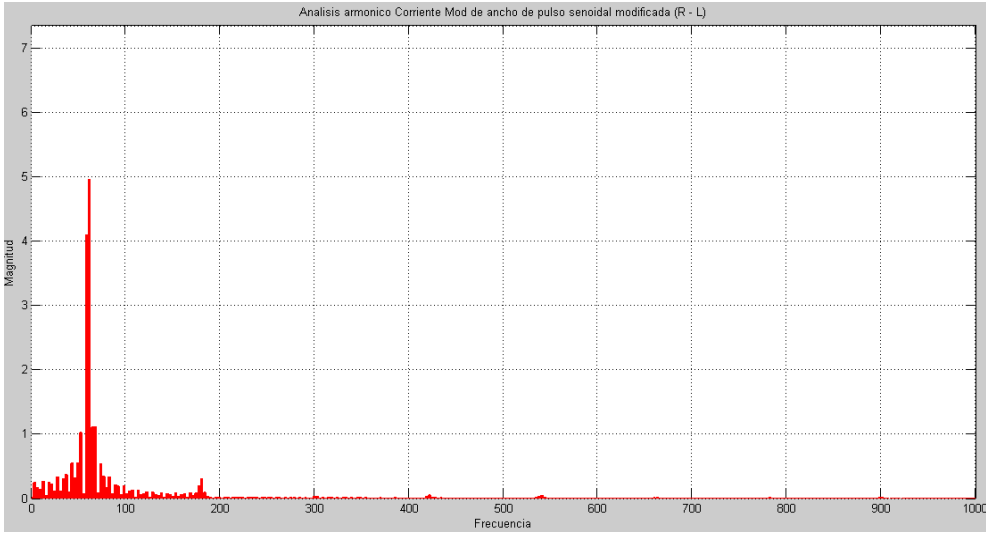
Figura 87. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada con carga R-L

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 88. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.9.3 Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)

En la figura 89, se muestra el esquema para un inversor monofásico, con topología de puente completo, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH, capacitancia 112 μF y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

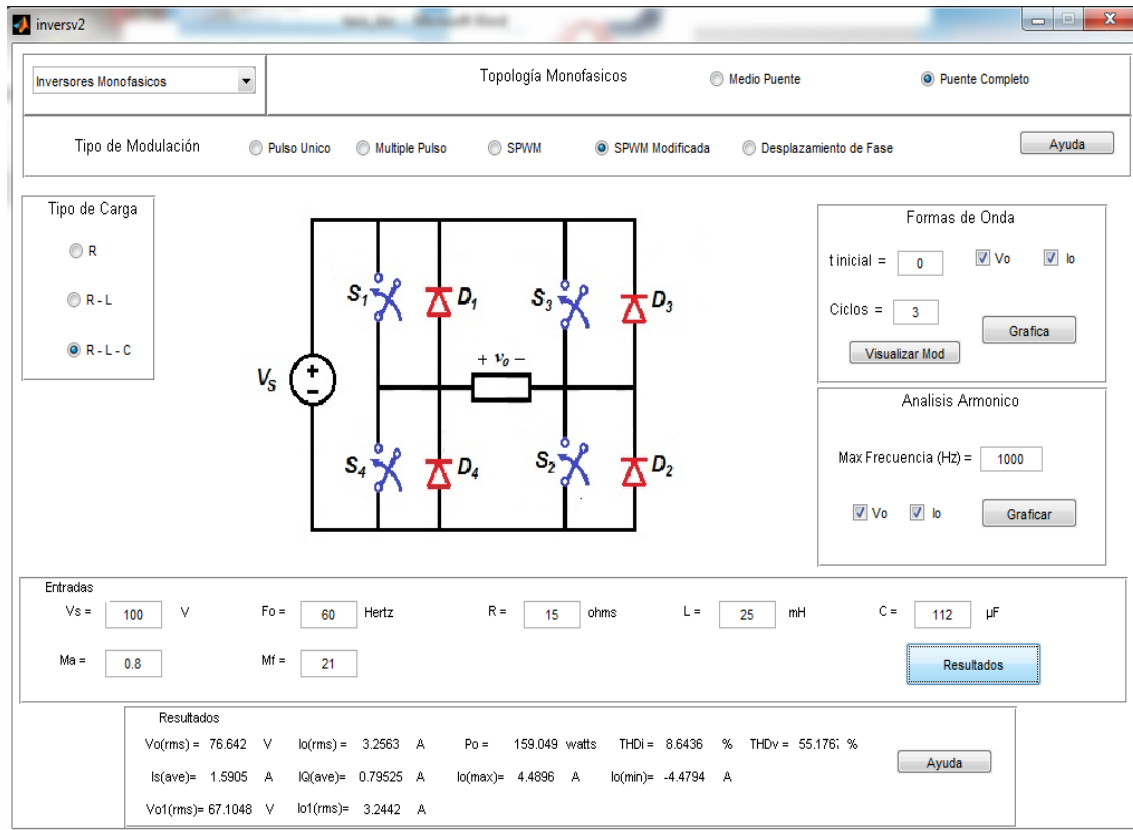
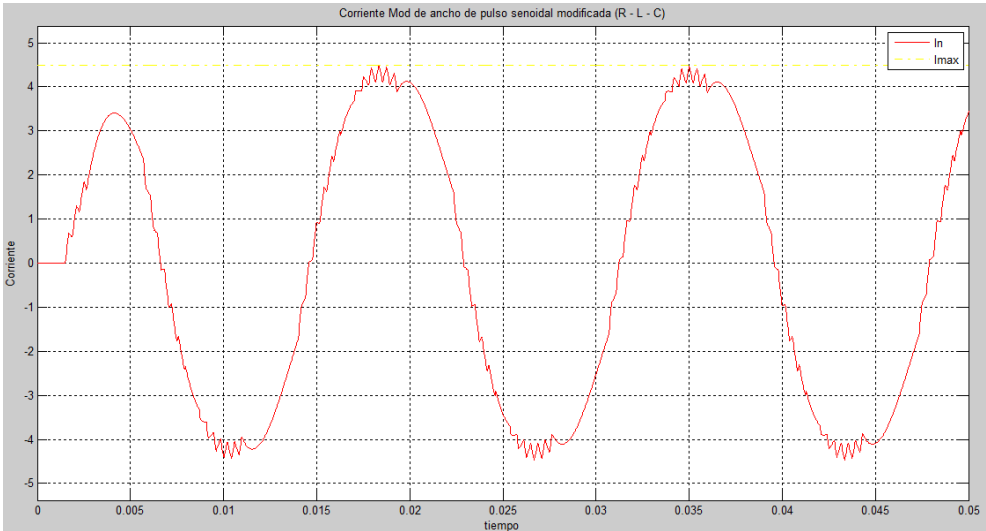


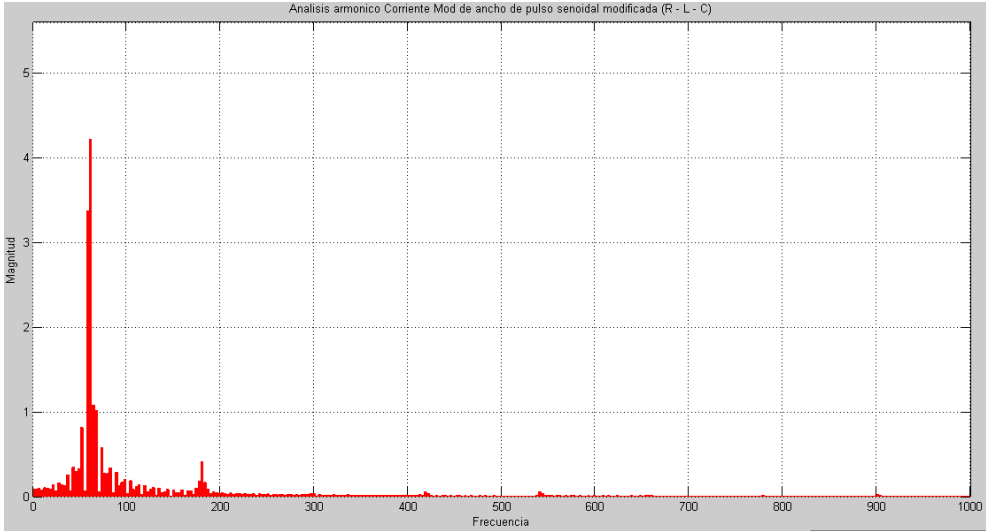
Figura 89. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada con carga R-L-C

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 90. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.10 Modulación por ancho de pulso sinusoidal (Puente trifásico)

4.10.1 Carga Resistiva

En la figura 91, se muestra el esquema para un inversor trifásico, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 30 ohms, y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

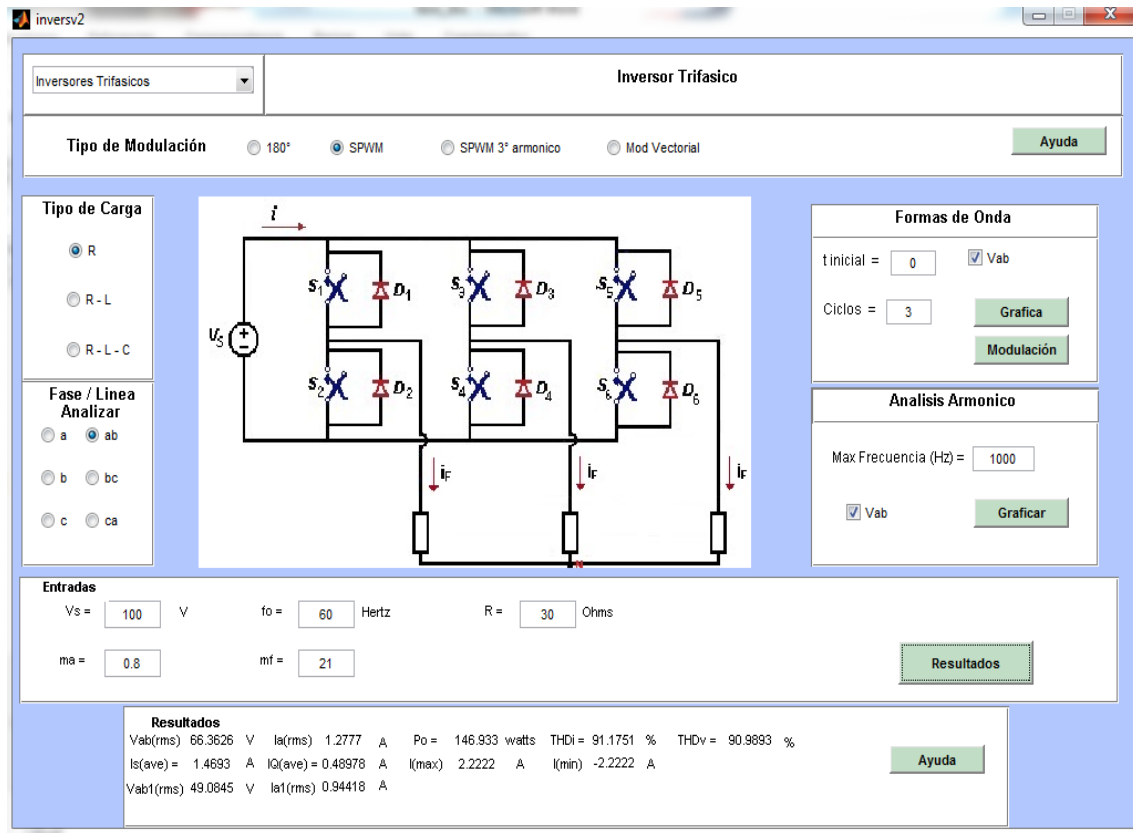
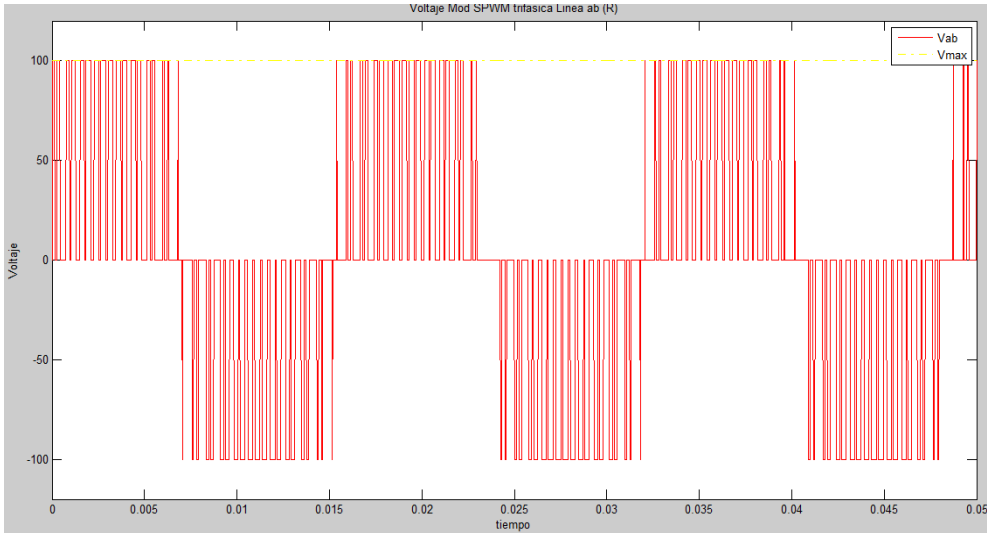


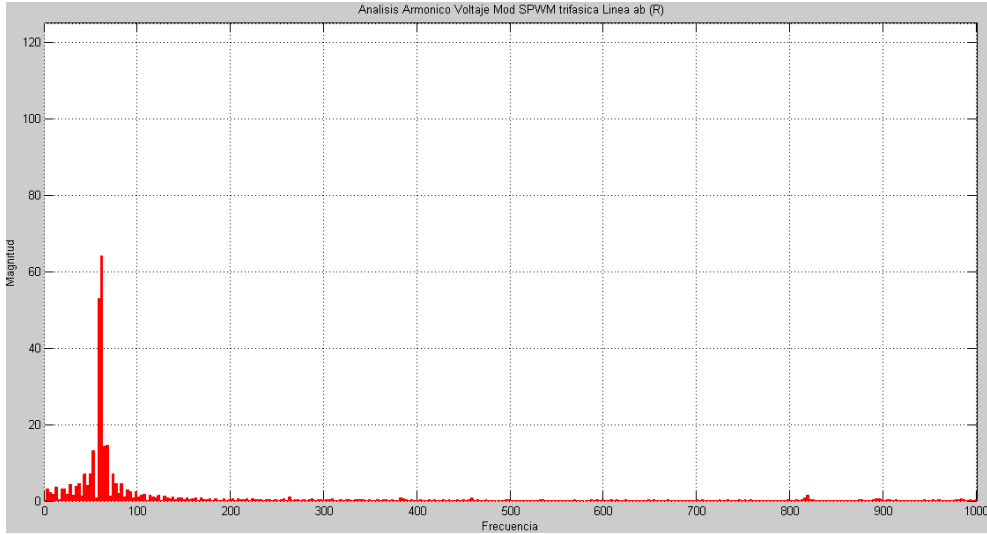
Figura 91. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal con carga resistiva

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados para la tensión de línea ab y corriente de fase a son:

Análisis de la forma de onda de la Tensión (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Tensión (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)

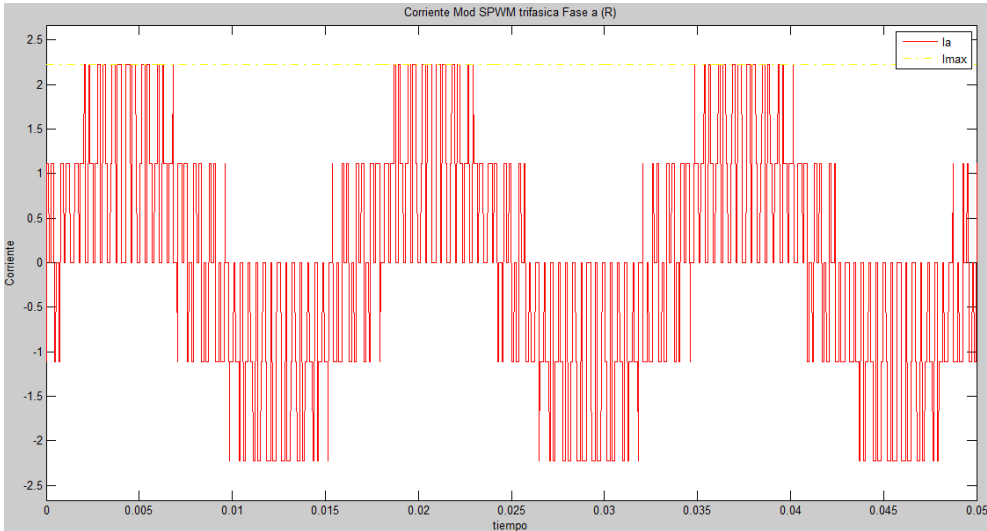


(b)

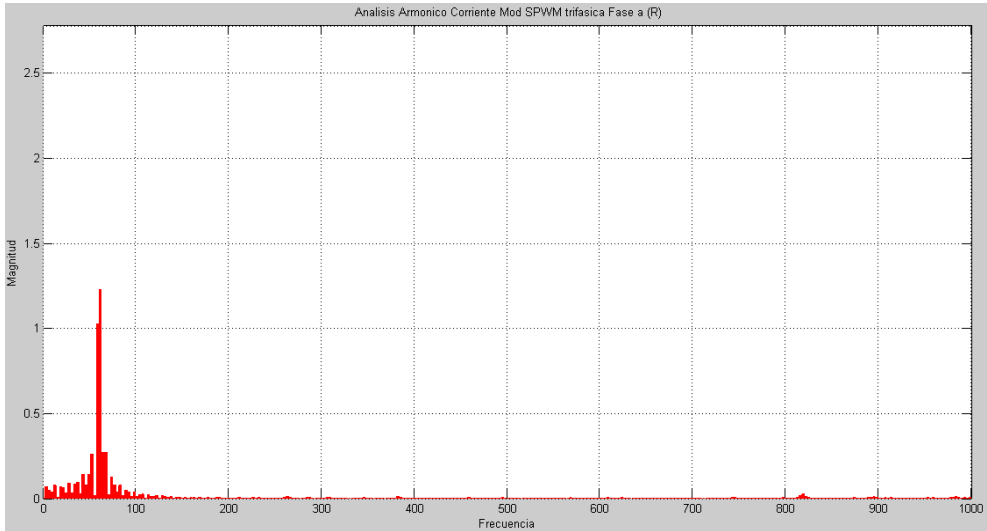
Figura 92. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

Estas formas de onda y Espectro de armónicos de la Tensión para la carga Resistiva (R) es la misma para las cargas R-L y R-L-C.

Análisis de la forma de onda de la Corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 93. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.10.2 Carga Resistiva e Inductiva (R-L)

En la figura 94, se muestra el esquema para un inversor trifásico, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

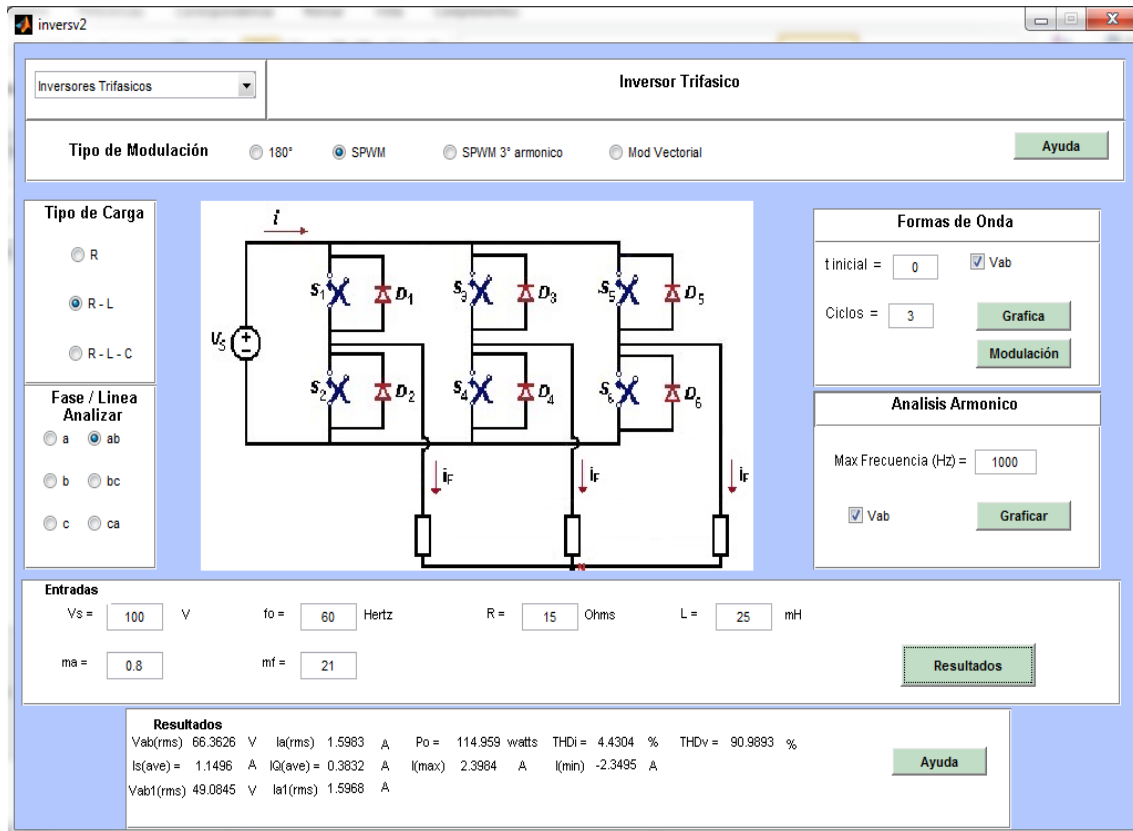
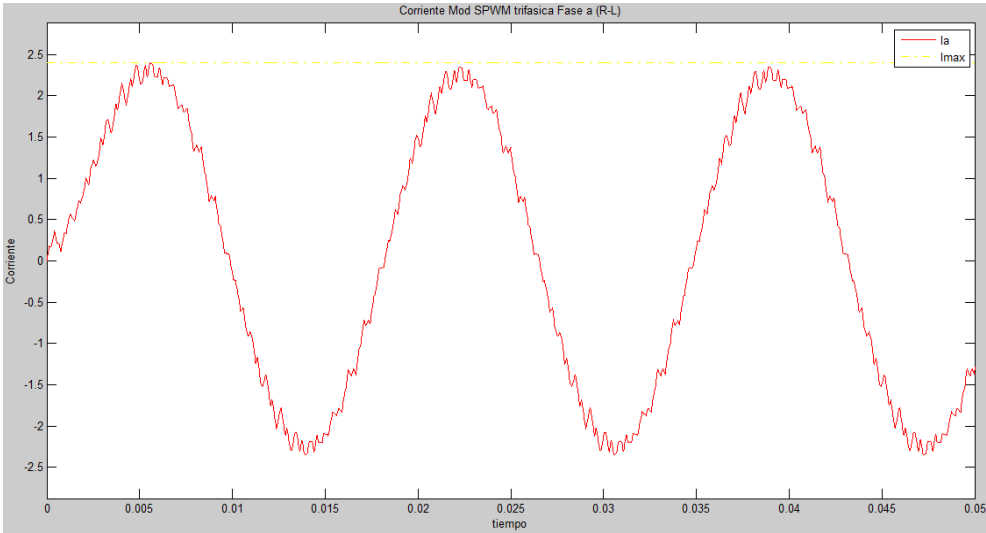


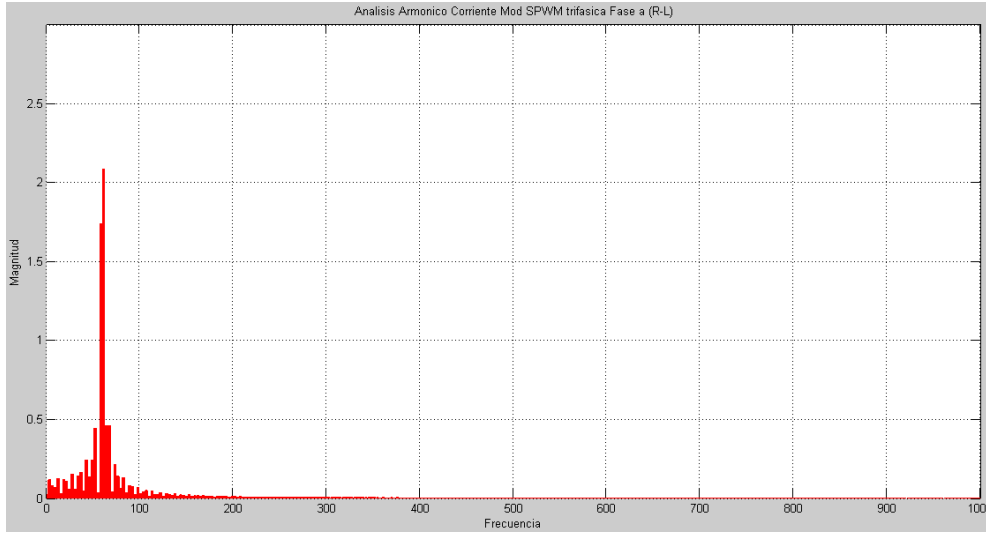
Figura 94. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal con carga R-L

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados para la corriente de fase a son:

Análisis de la forma de onda de la Corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 95. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.10.3 Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)

En la figura 96, se muestra el esquema para un inversor trifásico, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH, capacitancia 112 μF y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

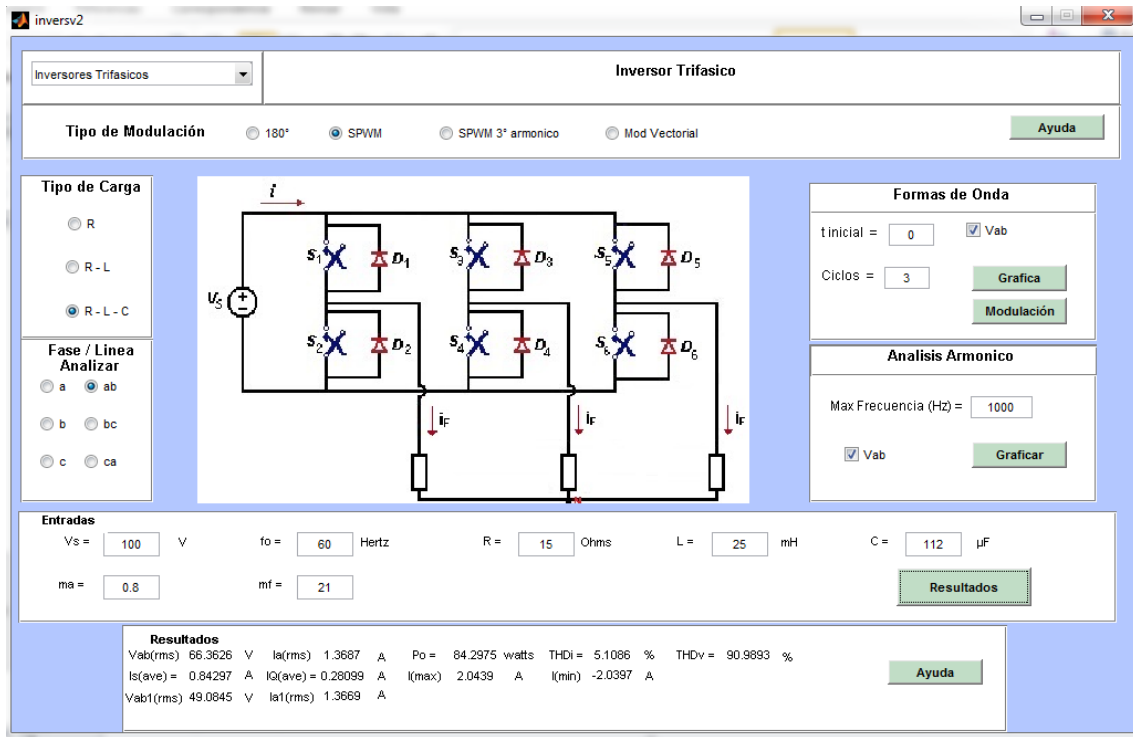
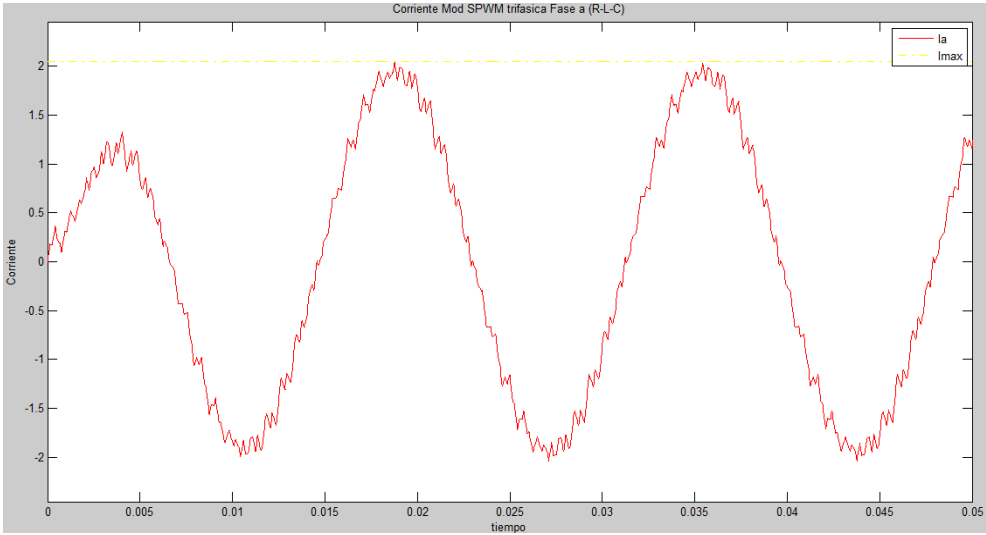


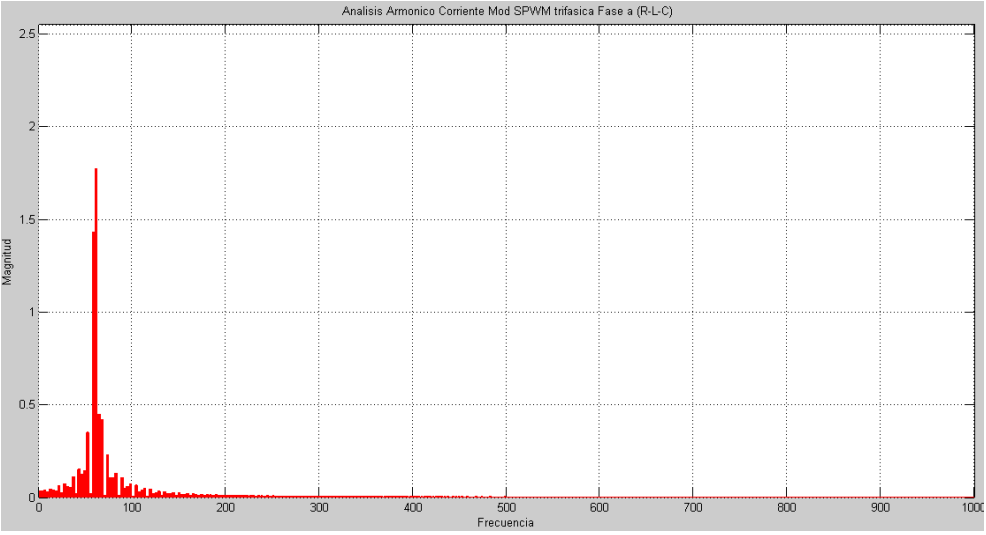
Figura 96. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal con carga R-L-C

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados para la corriente de fase a son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 97. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.11 Modulación por ancho de pulso sinusoidal con tercer armónico (Puente trifásico)

4.11.1 Carga Resistiva

En la figura 98, se muestra el esquema para un inversor trifásico, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 30 ohms, y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

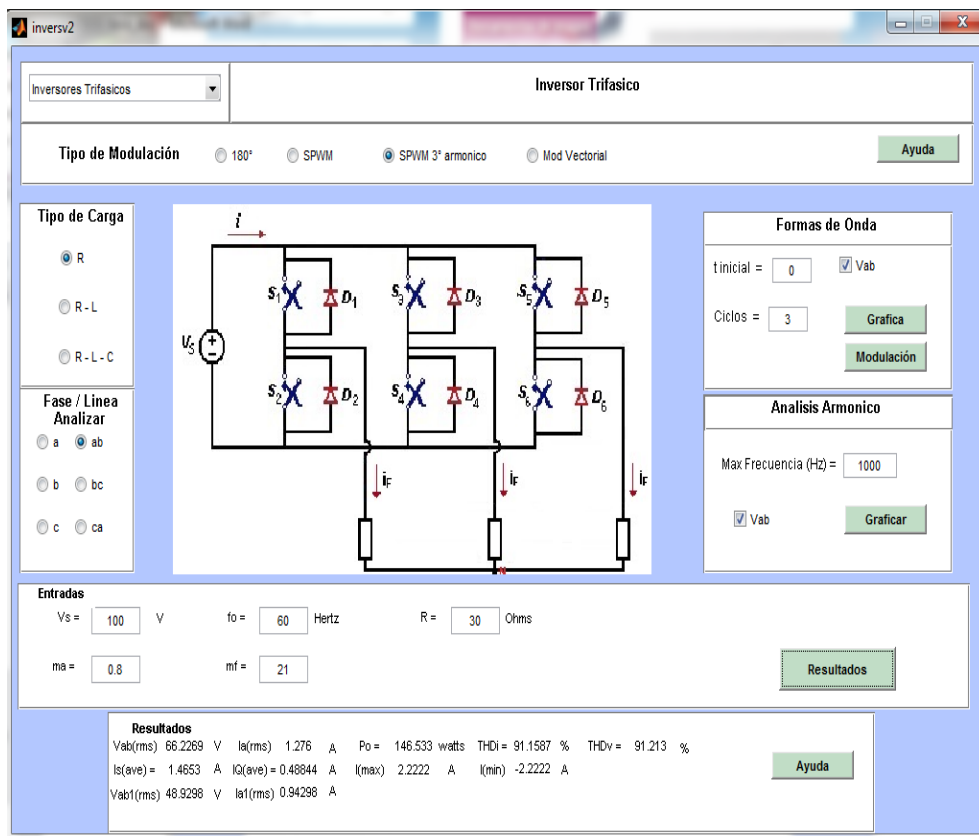
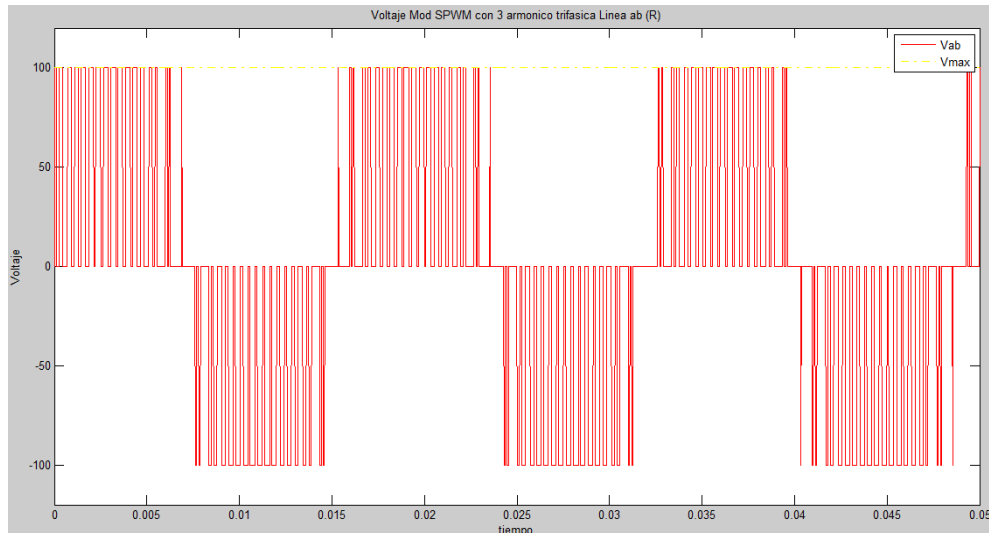


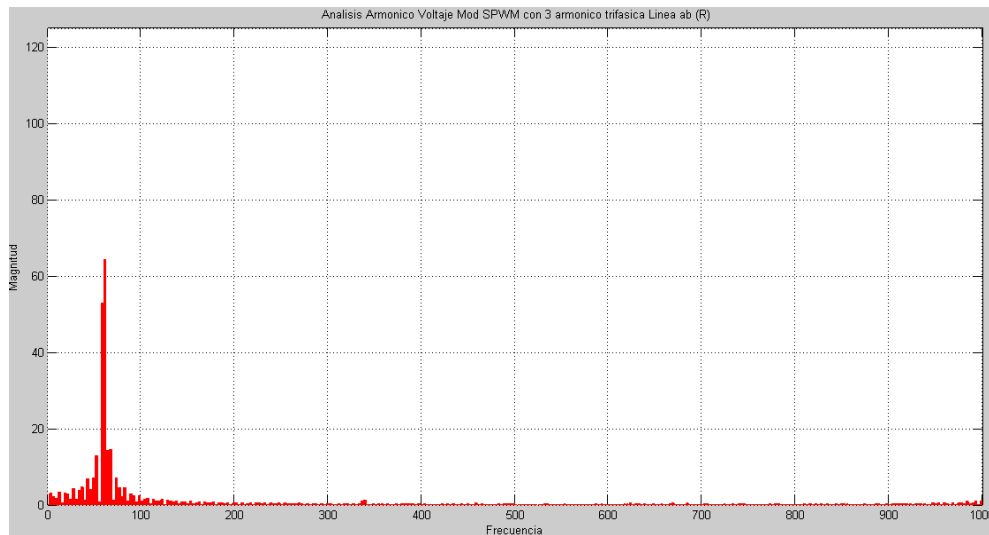
Figura 98. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal 3er armónico carga resistiva

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados para la tensión de línea ab y corriente de fase a son:

Análisis de la forma de onda de la Tensión (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Tensión (con frecuencia máxima de 1000 Hz).



(a)

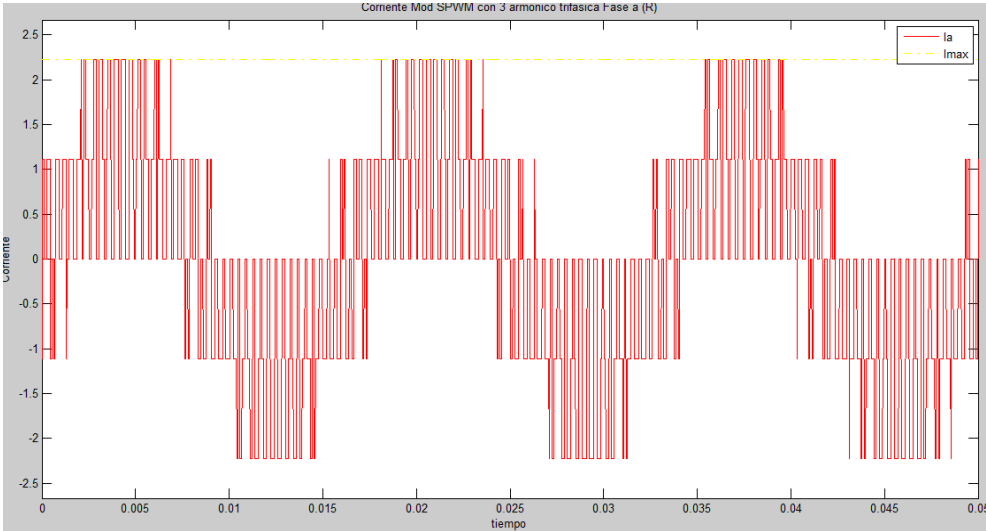


(b)

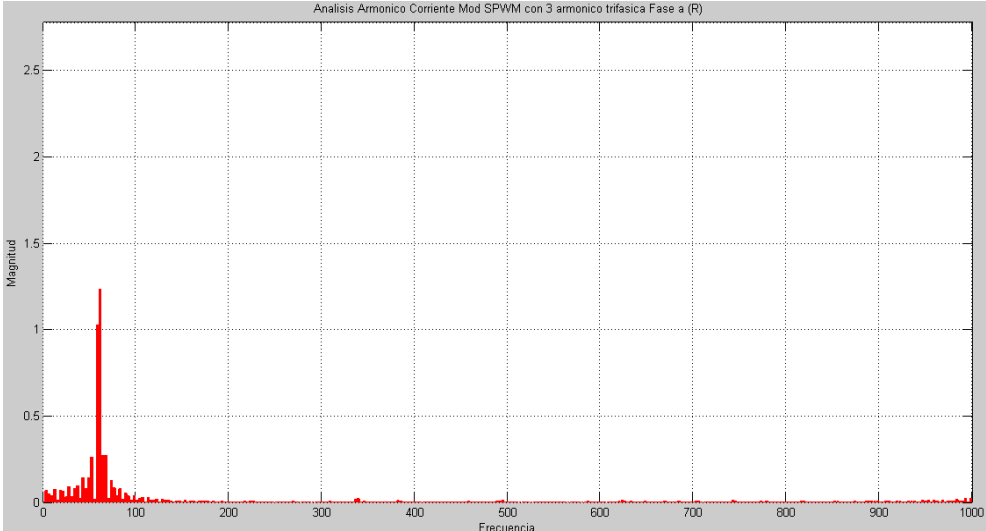
Figura 99. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

Estas formas de onda y Espectro de armónicos de la Tensión para la carga Resistiva (R) es la misma para las cargas R-L y R-L-C.

Análisis de la forma de onda de la Corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 100 (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.11.2 Carga Resistiva e Inductiva (R-L)

En la figura 101, se muestra el esquema para un inversor trifásico, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

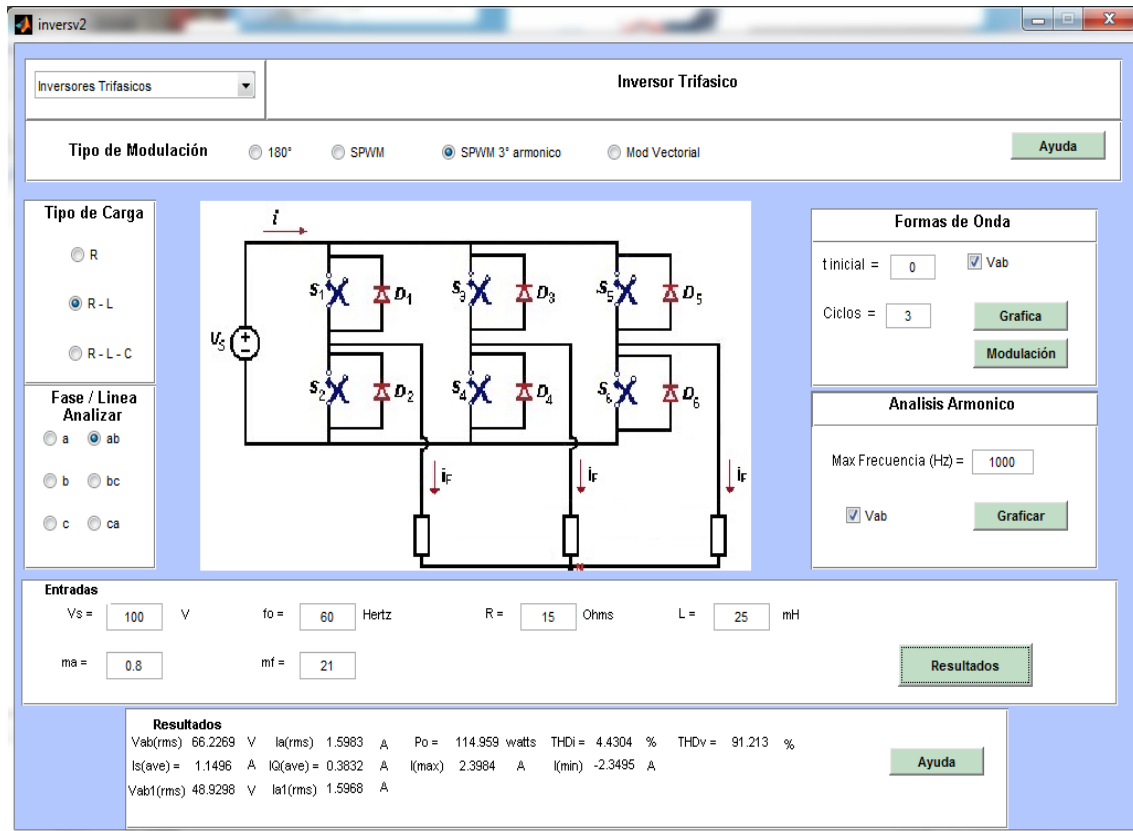
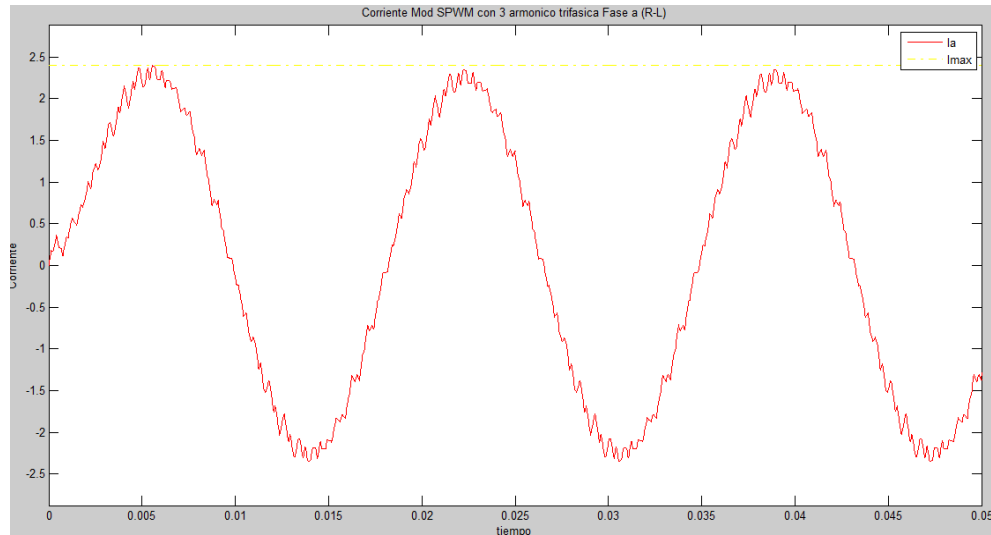


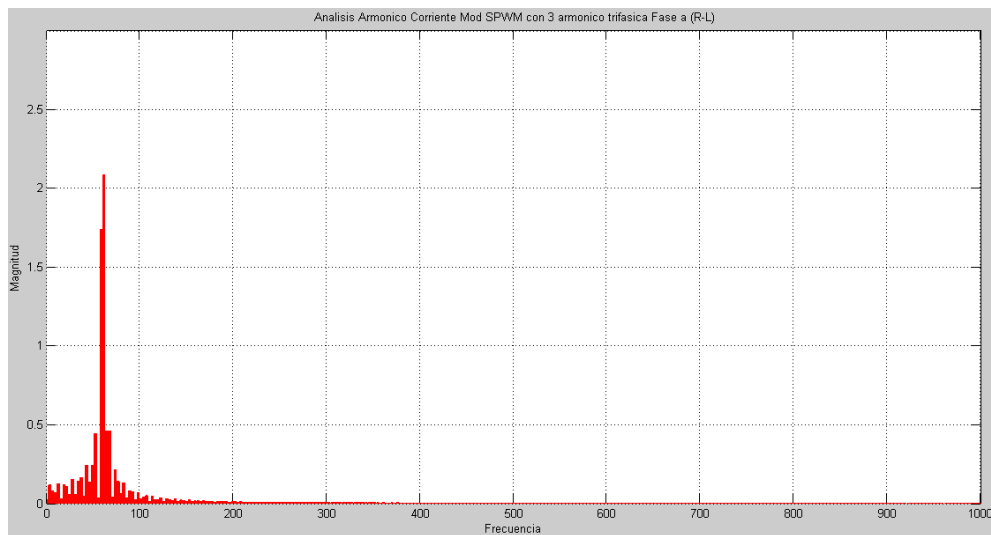
Figura 101. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal 3er armónico con carga resistiva

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados para la corriente de fase a son:

Análisis de la forma de onda de la Corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 102. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.11.3 Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)

En la figura 103, se muestra el esquema para un inversor trifásico, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH, capacitancia 112 μF y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

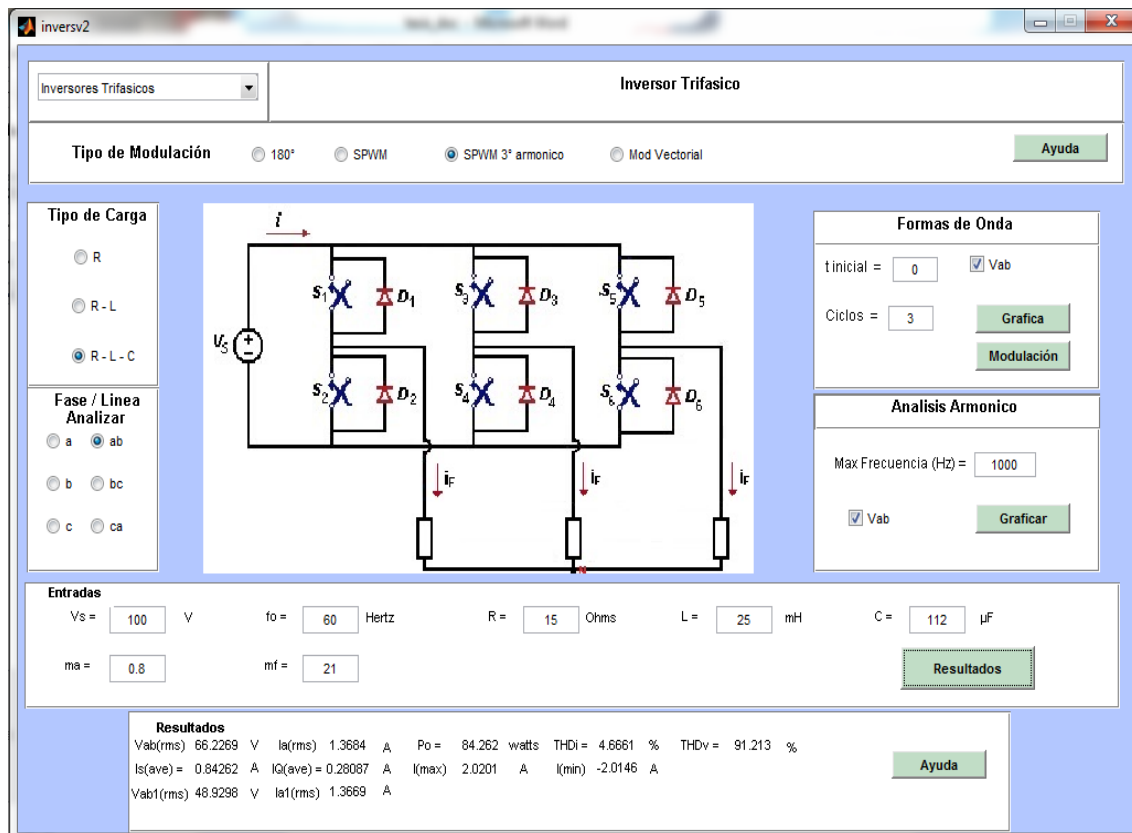
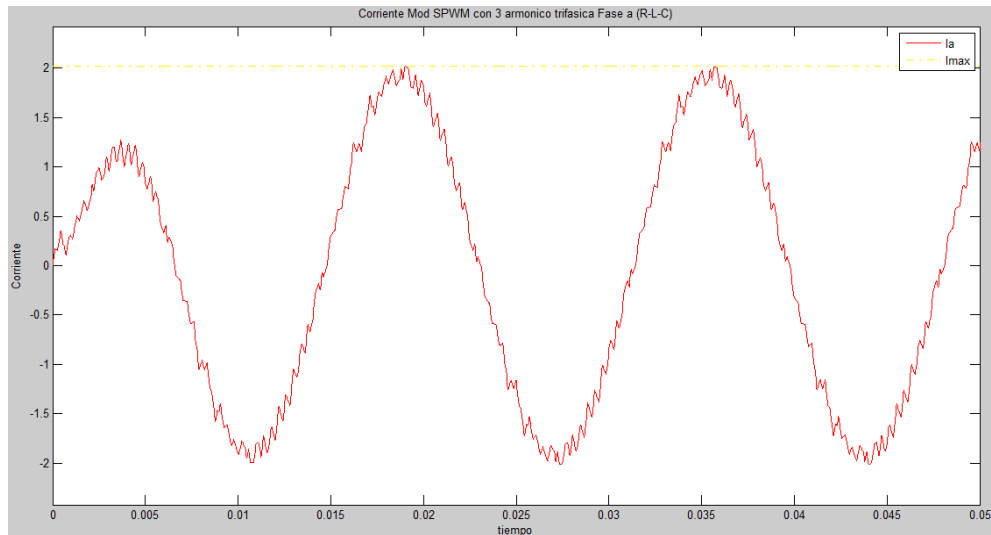


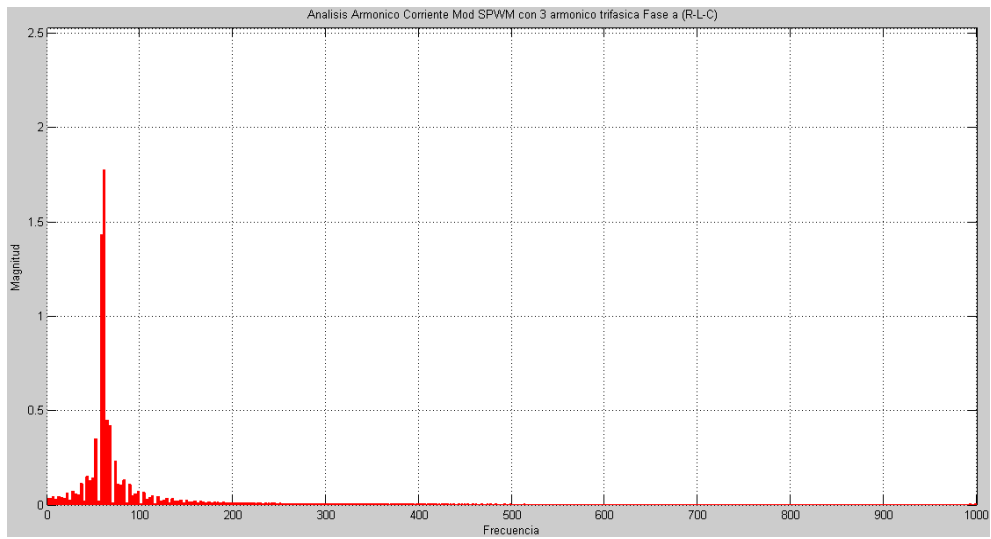
Figura 103. Esquema modulación por ancho de pulso sinusoidal 3er armónico con carga R-L-C

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados para la corriente de fase a son:

Análisis de la forma de onda de la corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 104. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.12 Modulación Vectorial (Puente trifásico)

4.12.1 Carga Resistiva

En la figura 105, se muestra el esquema para un inversor trifásico, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 30 ohms, y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

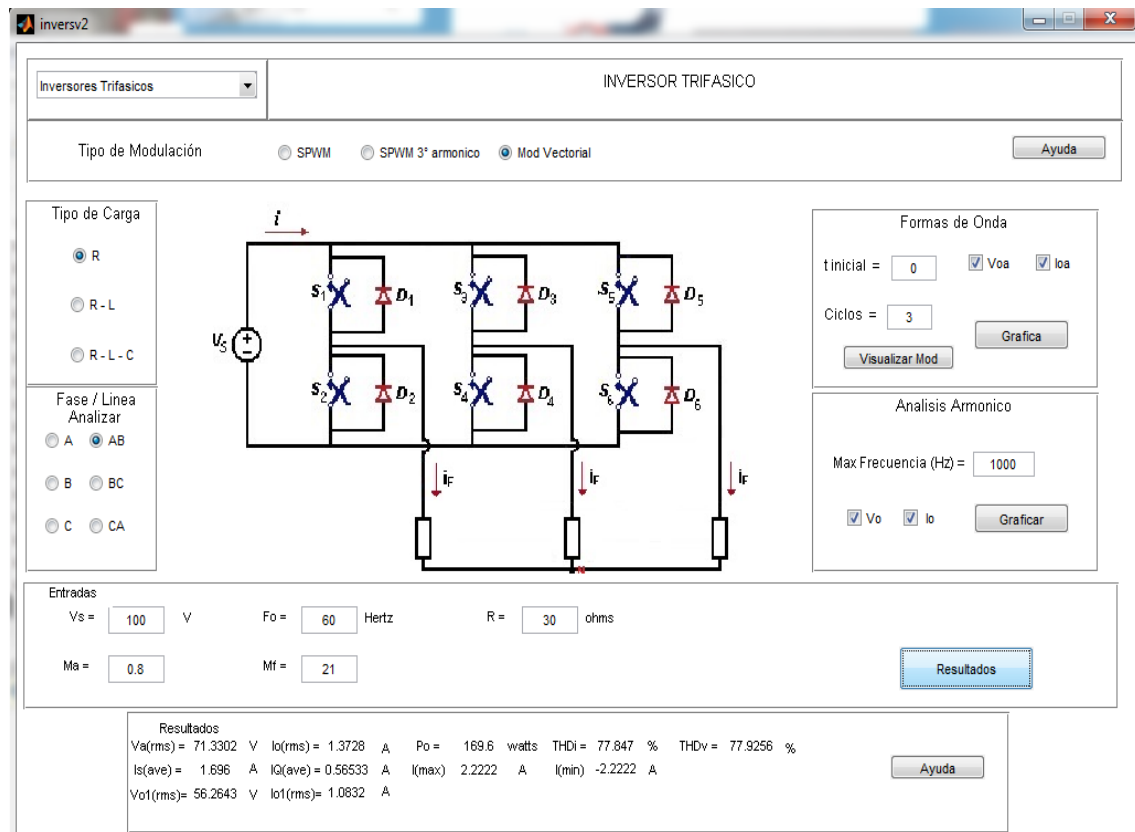
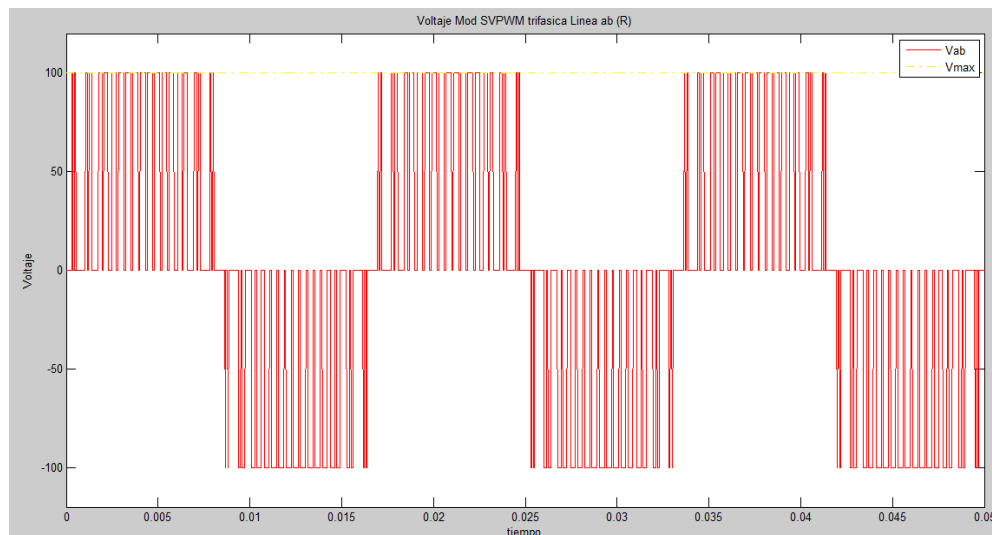


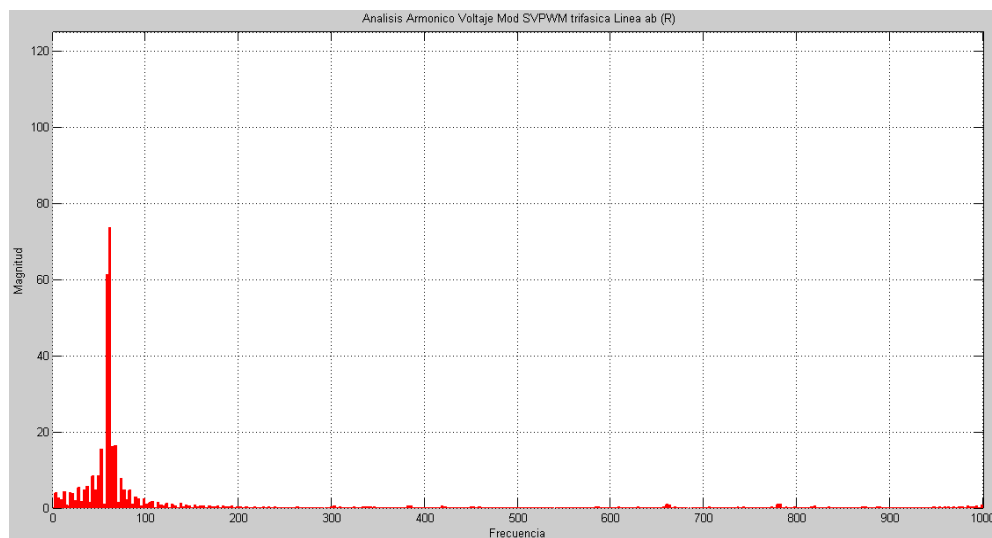
Figura 105. Esquema modulación Vectorial con carga resistiva

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados para la línea ab son:

Análisis de la forma de onda de la Tensión (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Tensión (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)

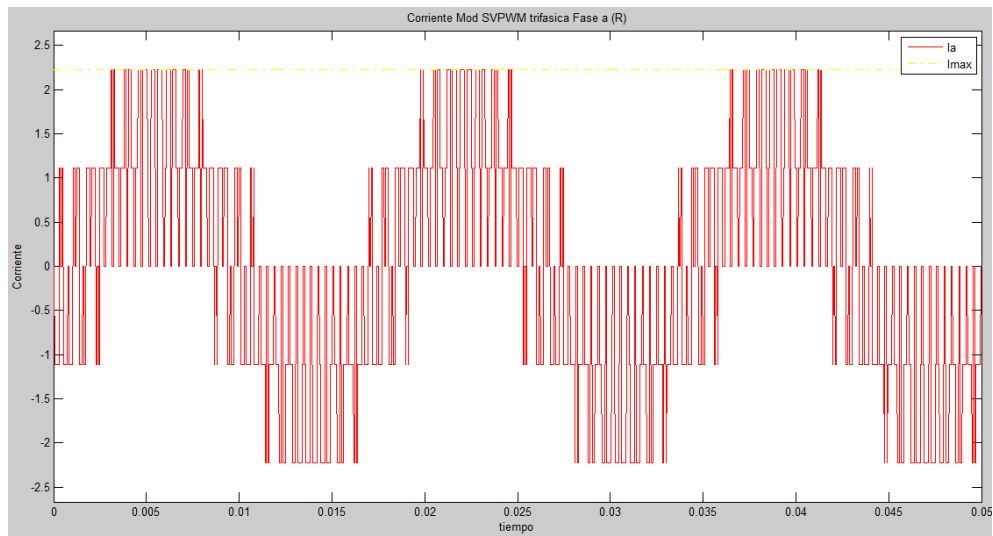


(b)

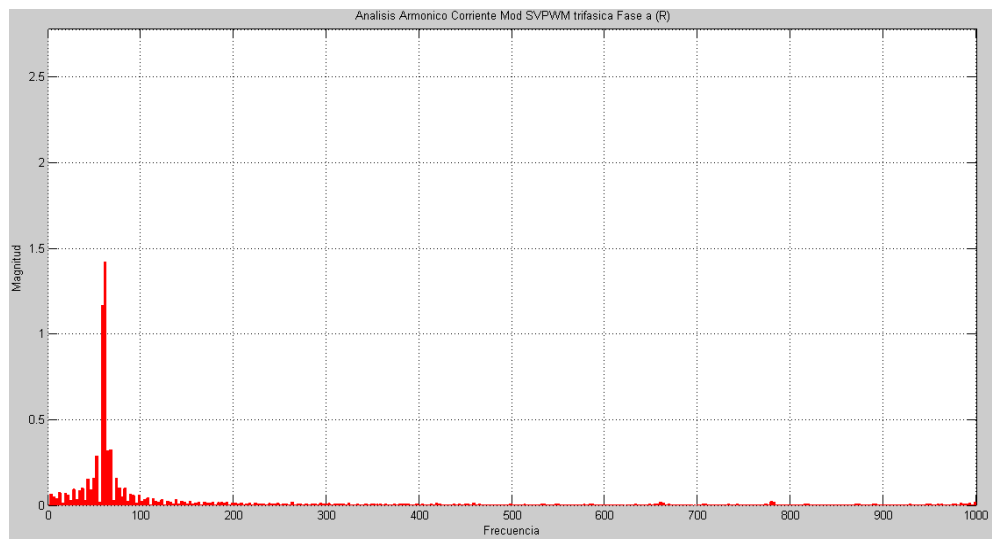
Figura 106. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

Estas formas de onda y Espectro de armónicos de la Tensión para la carga Resistiva (R) es la misma para las cargas R-L y R-L-C.

Análisis de la forma de onda de la Corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 107. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.12.2 Carga Resistiva e Inductiva (R-L)

En la figura 108, se muestra el esquema para un inversor trifásico, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

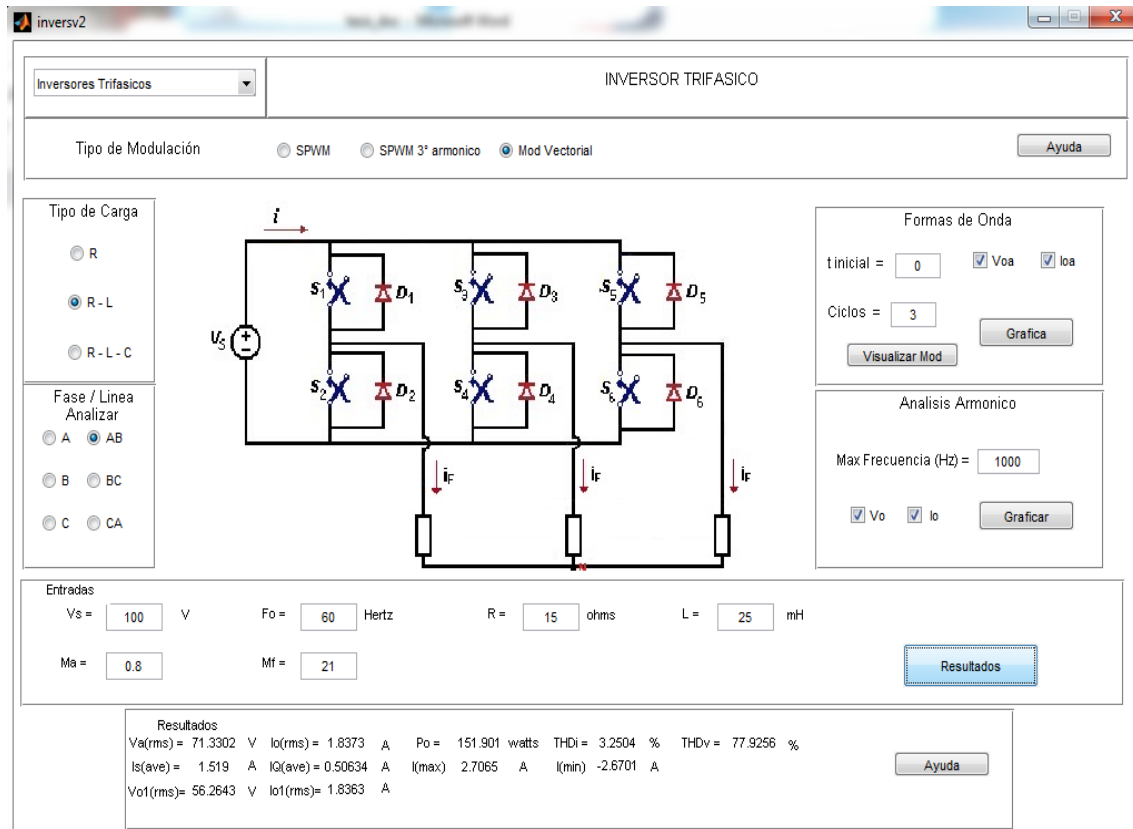


Figura 108. Esquema modulación Vectorial con carga R-L

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados para la Línea AB son:

Análisis de la forma de onda de la Corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)

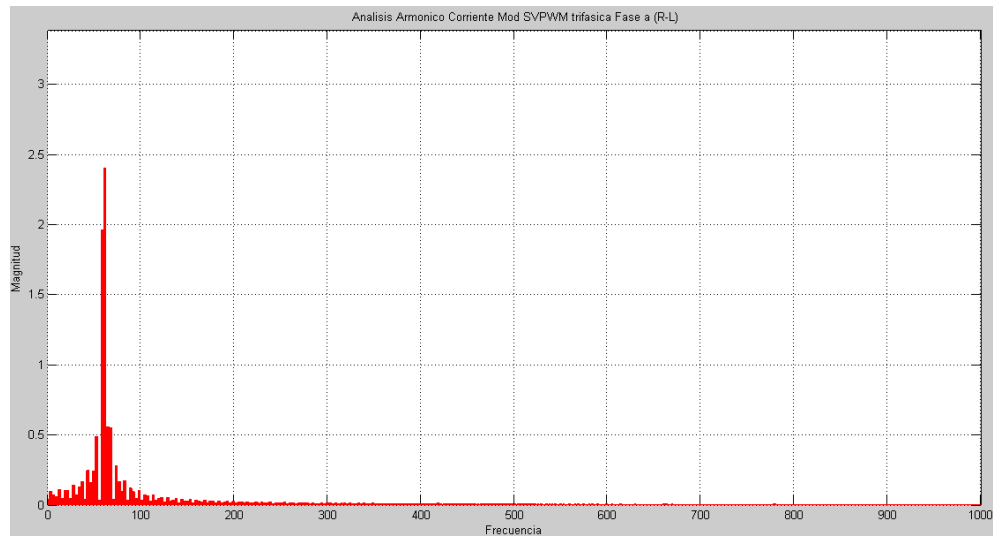
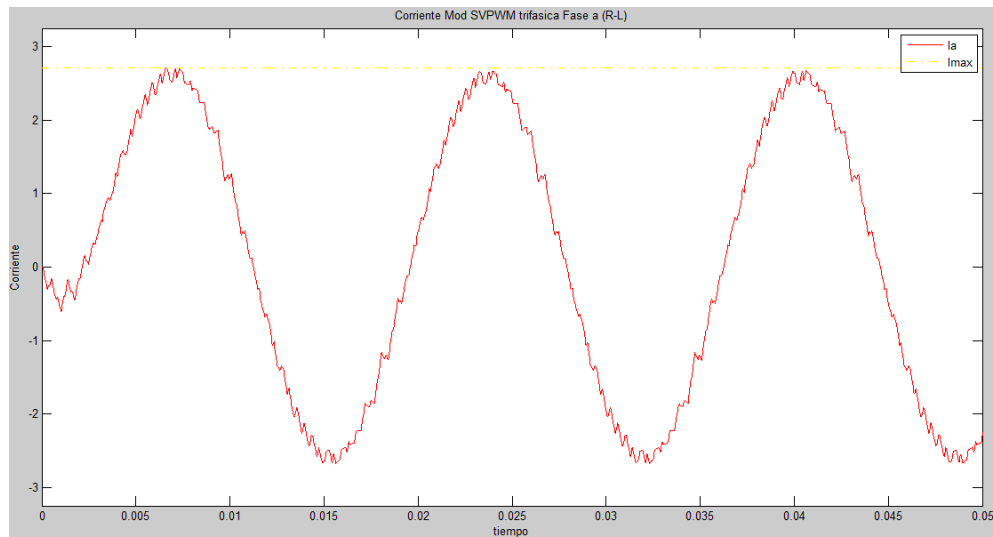


Figura 109. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.12.3 Carga Resistiva, Capacitiva e Inductiva (R-L-C)

En la figura 110, se muestra el esquema para un inversor trifásico, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH, capacitancia 112 μF y una frecuencia de 60 Hz con un ma de 0.8 y una mf de 21.

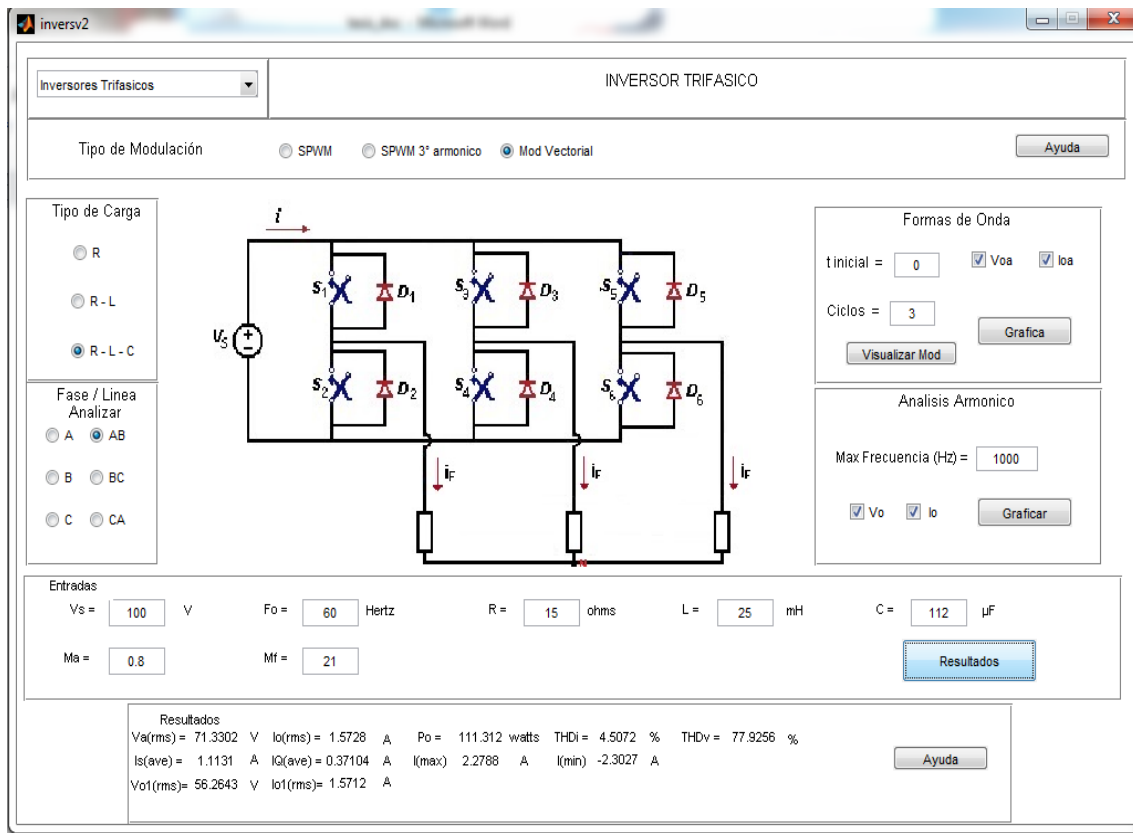
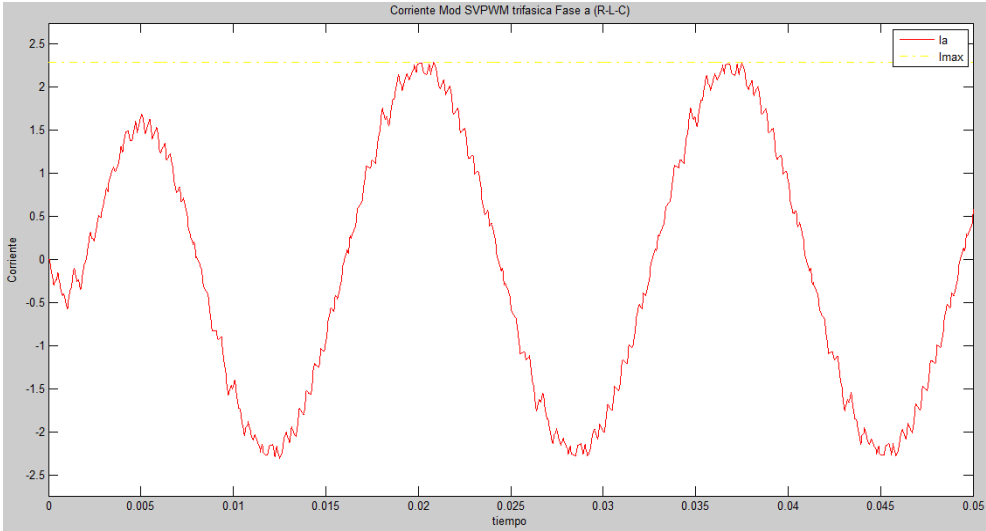


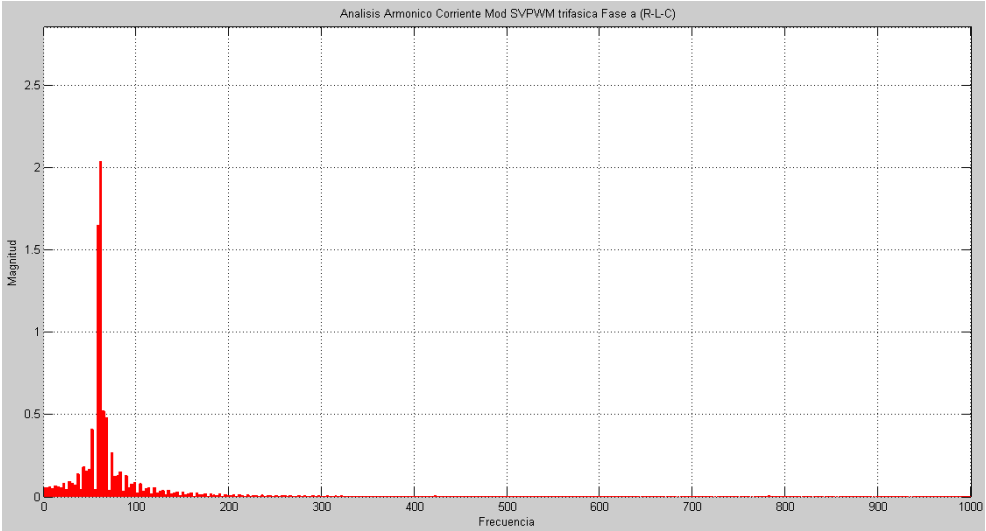
Figura 110. Esquema modulación Vectorial con carga R-L-C

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados para la Línea AB son:

Análisis de la forma de onda de la Corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz).



(a)



(b)

Figura 111. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

4.13 Modulación 180° (Puentes trifásico)

4.13.1 Carga Resistiva e Inductiva

En la figura 112, se muestra el esquema para un inversor trifásico, considerando un $V_{dc}=100V$, una resistencia de 15 ohms, inductancia de 25mH, y una frecuencia de 60 Hz.

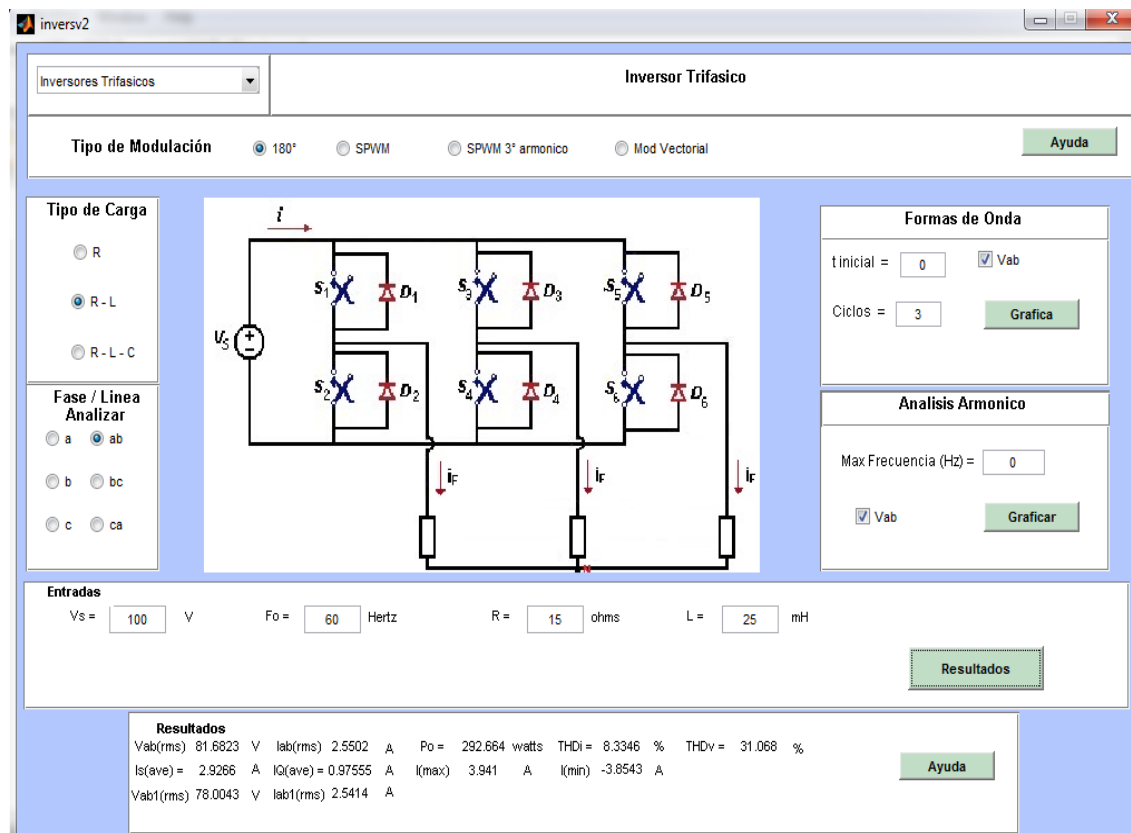
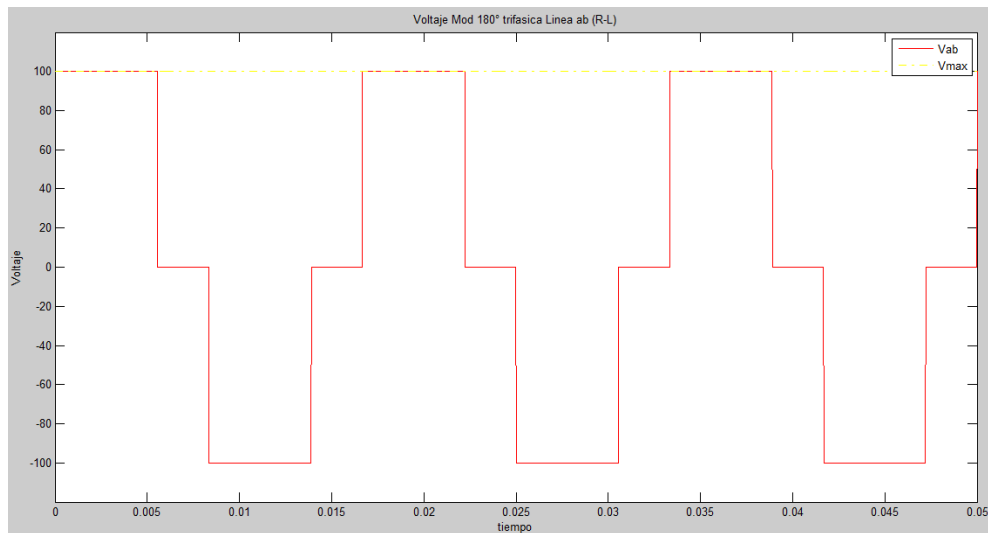


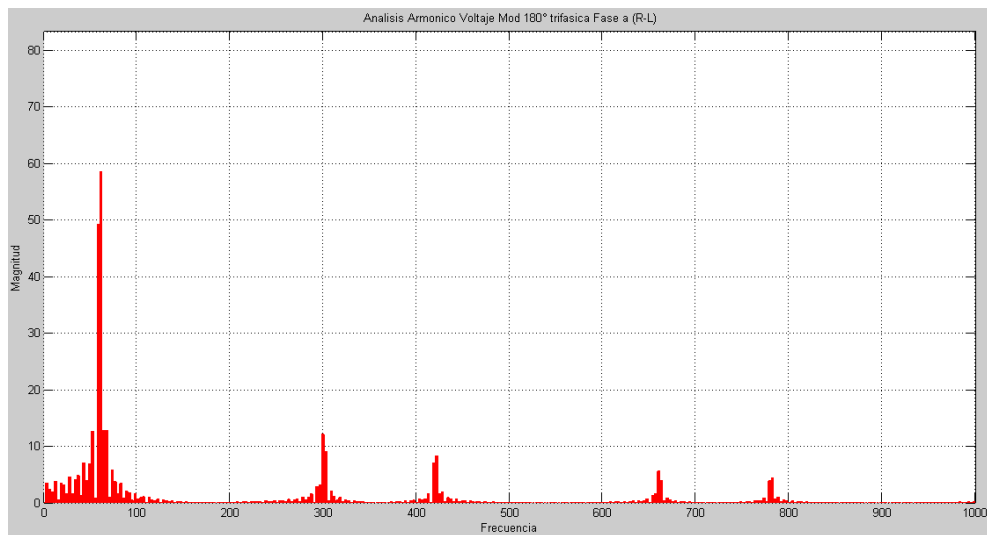
Figura 112. Esquema modulación 180°

En el esquema anterior se ve calculado el valor rms, el cual se obtuvo al usar el botón Resultados. Los demás resultados para la línea ab son:

Análisis de la forma de onda de la Tensión (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Tensión (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)

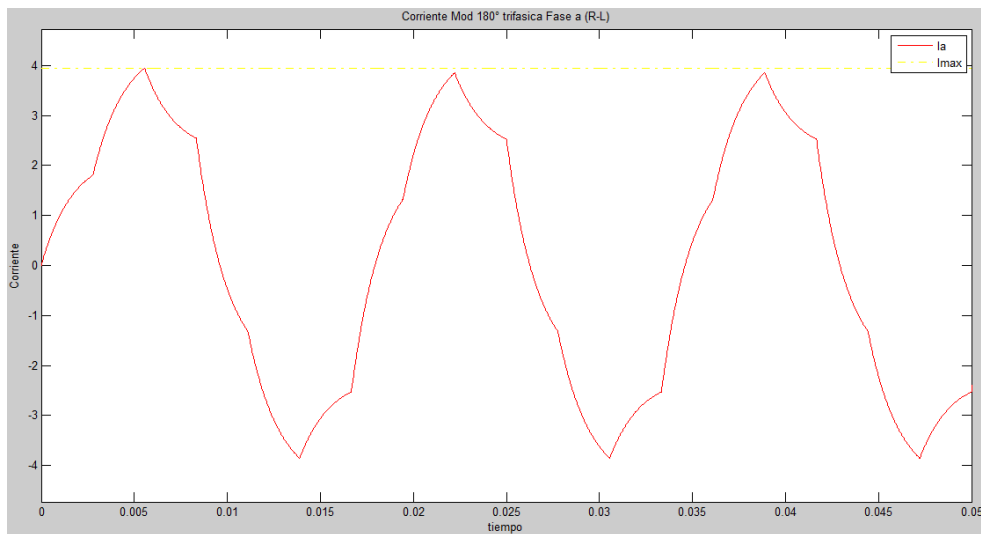


(b)

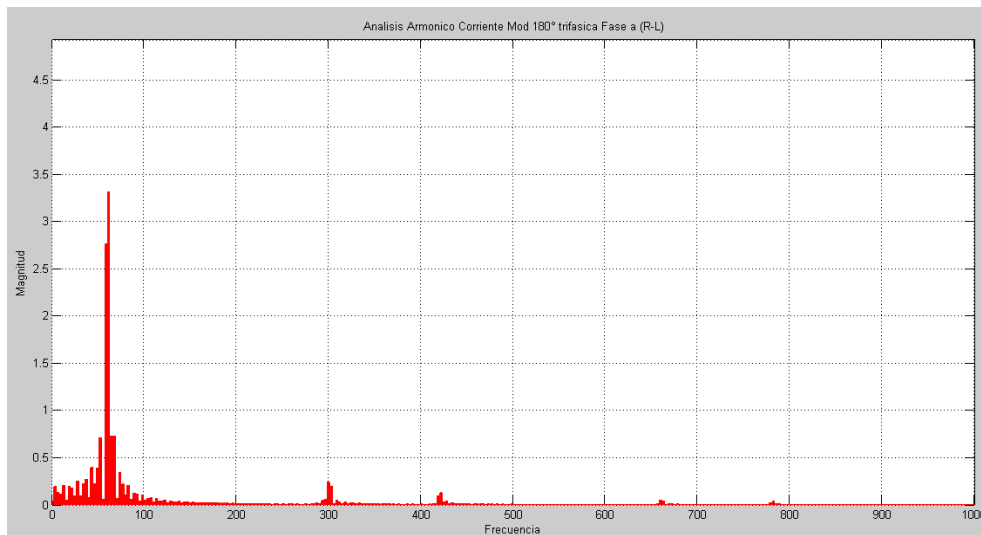
Figura 113. (a) Forma de Onda Tensión, (b) Espectro Armónicos Onda Tensión

Estas formas de onda y Espectro de armónicos de la Tensión para la carga Resistiva (R) es la misma para las cargas R-L y R-L-C.

Análisis de la forma de onda de la Corriente (considerando 3 ciclos y tiempo inicial cero) y el Espectro de los armónicos de la Corriente (con frecuencia máxima de 1000 Hz.)



(a)



(b)

Figura 114. (a) Forma de Onda Corriente, (b) Espectro Armónicos Onda Corriente

5 Comparación de Resultados.

Para demostrar la confiabilidad del software educativo es necesario contrastar los resultados obtenidos en la simulación con los mismos parámetros en fuentes confiables como libros de electrónica de potencia y programas ya establecidos de electrónica de potencia que simulan el comportamiento de los circuitos de una forma acertada en este caso la toolbox de potencia de Matlab en simulink.

5.1 Comparación con Fuentes Bibliográficas.

5.1.1 Inversor Medio puente monofásico con modulación de pulso único con delta de 180°

Tomando como referencia el libro de Rashid [8] en la página 359, El ejemplo 10.1 tiene los siguientes parámetros de entrada:

Vs (v)	48
R (ohm)	2.4
Fo (Hz)	60
Delta	180°

Tabla 3. Datos de entrada.

Los datos de salida que entrega la interfaz gráfica de usuario del programa y los resultados de la bibliografía se muestran en la tabla 4.

Datos Obtenidos			
Libro		GUI	
Vo(rms)	24 V	Vo(rms)	24.0024 V
Vo1 (rms)	21.6 V	Vo1 (rms)	21.6055 V
Po	240 W	Po	240.048 W
Is (promedio)	10 A	Is (promedio)	10.001 A
I _Q (c/transistor)	5 A	I _Q (c/transistor)	5.001 A
THD _v	48.34 %	THD _v	48.3931 %

Tabla 4. Comparación y resultados

Como se aprecia el error promedio de la comparación entre la fuente bibliográfica y la GUI es de un 0.05%, confirmando que el inversor de medio puente con la modulación de pulso único funciona satisfactoriamente.

5.1.2 Inversor puente monofásico con modulación de pulso único con delta de 180°

Tomando como referencia el libro de Rashid [8] en la página 361, El ejemplo 10.2 tiene los siguientes parámetros de entrada:

Vs (v)	48
R (omh)	2.4
Fo (Hz)	60
Delta	180°

Tabla 5. Datos de entrada.

Los datos de salida que entrega la interfaz gráfica de usuario del programa y los resultados de la bibliografía se muestran en la tabla 6.

Datos Obtenidos			
Libro		GUI	
Vo(rms)	48 V	Vo(rms)	48.0048 V
Vo1 (rms)	43.2 V	Vo1 (rms)	43.2109 V
Po	960 W	Po	960.192 W
Is (promedio)	20 A	Is (promedio)	20.004 A
I _Q (c/transistor)	10 A	I _Q (c/transistor)	10.002 A
THDv	48.34 %	THDv	48.3931 %

Tabla 6. Comparación y resultados

Como se aprecia el error promedio de la comparación entre la fuente bibliográfica y la GUI es de un 0.04%, confirmando que el inversor de puente completo con la modulación de pulso único funciona satisfactoriamente.

5.1.3 Inversor puente monofásico con modulación de pulso único con delta de 180°

Tomando como referencia el libro de Rashid [8] en la página 362; El ejemplo 10.3 y referencia el libro [7] página 363; tiene los siguientes parámetros de entrada:

Vs (v)	220
R (ohm)	10
L (mH)	31.5
C (μF)	112
Fo (Hz)	60
Delta	180°

Tabla 7. Datos de entrada.

Los datos de salida que entrega la interfaz gráfica de usuario del programa y los resultados de la bibliografía se muestran en la tabla 8.

Datos Obtenidos

Libro		GUI	
Vo(rms)	220 V	Vo(rms)	220.022 V
Io(rms)	13.02 A	Io(rms)	13.0235
Io1 (rms)	12.8 A	Io1 (rms)	12.8025 A
Po	1695 W	Po	1691.12 W
Is (promedio)	7.7 A	Is (promedio)	7.7097 A
Iq(c/transistor)	3.845 A	Iq(c/transistor)	3.8548 A
THDi	18.59 %	THDi	18.6617 %
Ip (max)	21.14 A	Ip (max)	21.5486 A

Tabla 8. Comparación y resultados

Como se aprecia el error promedio de la comparación entre la fuente bibliográfica y la GUI es de un 0.4%, confirmando que el inversor de puente completo con la modulación de pulso único y carga R-L-C funciona satisfactoriamente.

5.1.4 Inversor puente monofásico con modulación de pulso único con delta de 108°

En el libro [7] página 391; tiene los siguientes parámetros de entrada:

Vs (v)	100
R (ohm)	2.5
Fo (Hz)	60
Delta	108°

Tabla 9. Datos de entrada.

Los datos de salida que entrega la interfaz gráfica de usuario del programa y los resultados de la bibliografía se muestran en la tabla 10.

Datos Obtenidos

Libro		GUI	
Vo(rms)	77.45 V	Vo(rms)	77.4984 V
Po	2402.5 W	Po	2402.4 W

Tabla 10. Comparación y resultados

Como se aprecia el error promedio de la comparación entre la fuente bibliográfica y la GUI es de un 0.04%, confirmando que el inversor de puente completo con la modulación de pulso único y carga R funciona satisfactoriamente.

5.1.5 Inversor trifásico con conducción a 180°

En el libro [8] página 369, Ejemplo 10-4; tiene los siguientes parámetros de entrada: Carga R-L.

Vs (v)	220
R (omh)	5
Fo (Hz)	60
L (mH)	23

Tabla 11. Datos de entrada.

Los datos de salida que entrega la interfaz gráfica de usuario del programa y los resultados de la bibliografía se muestran en la tabla 12.

Datos Obtenidos

Libro		GUI	
Vab(rms)	179.63 V	Vab(rms)	179.7011 V
THDvab	31.08 %	THDvab	31.068 %
Va(rms)	103.7 V	Va(rms)	103.6883 V
THDva	-	THDva	31.1444 %
Vab1(rms)	171.53 V	Vab1(rms)	171.6096 V
Va1(rms)	99.03 V	Va1(rms)	98.9979 V
Ia(rms)	9.91 A	Ia(rms)	9.9108 A
Ia1(rms))	-	Ia1(rms))	9.8985 A
P (rms)	1473 W	P (rms)	1473.37 W
Is (promedio)	6.7 A	Is (promedio)	6.6971 A
I _Q (c/transistor)	2.23 A	I _Q (c/transistor)	2.2324 A
THDi	-	THDi	4.9897 %

Tabla 12. Comparación y resultados

Como se aprecia el error promedio de la comparación entre la fuente bibliográfica y la GUI es de un 0.037%, confirmando que el inversor trifásico con conducción a 180° y carga R-L funciona satisfactoriamente.

5.2 Comparación con software de simulación.

Debido a la complejidad del cálculo de forma práctica sobre ejercicios de inversores modulados, se usan programas que hacen los cálculos computarizados de una forma sencilla y arroja los resultados que se esperan; Por eso en algunas fuentes bibliográficas no se encuentran ejercicios prácticos resueltos sobre varios de estos tipos de inversores modulados; Tanto En el libro de Electrónica de Potencia de Hart [24] usan para sus cálculos el programa PSpice como el libro de Rashid [8] para otros tipos de inversores modulados (PWM); Pero También existe una toolbox en simulink de Matlab el cual tiene paquetes de modulaciones desarrolladas.

5.2.1 Inversor puente monofásico con modulación SPWM.

Para esta comparación entre la GUI, El libro [24] pagina 349 y el toolbox de simulink, se tienen los siguientes parámetros de entrada: Carga R-L.

Vs (v)	100
R (ohm)	1
L (mH)	2.65
Fo (Hz)	60
ma	0.9
mf	10

Tabla 13. Datos de entrada.

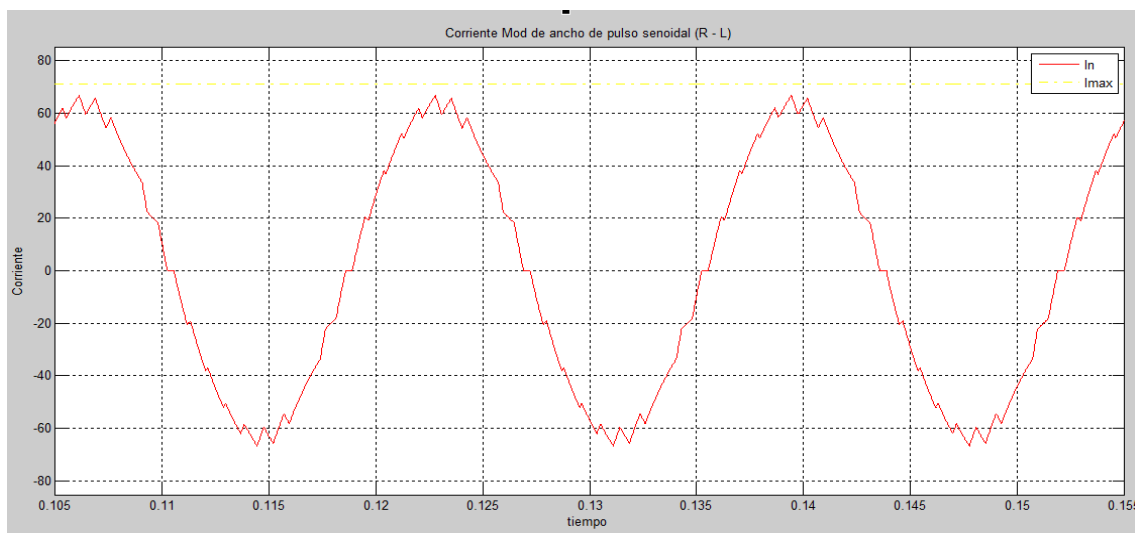
Los datos de salida que entrega la interfaz gráfica de usuario del programa y los resultados de la bibliografía se muestran en la tabla 14.

Datos Obtenidos					
Toolbox simulink		GUI		Libro de Hart [24]	
Vo(rms)	75.09 V	Vo(rms)	75.4188 V	Vo(rms)	-
Io(rms)	44.8 A	Io(rms)	45.0565 A	Io(rms)	-
Po(rms)	-	Po(rms)	2030.08 W	Po(rms)	-
Vo1(rms)	64.45 V	Vo1(rms)	63.66 V	Vo1(rms)	62.9 V
Io1(rms)	45.55 A	Io1(rms)	45.0308 A	Io1(rms)	44.5 A
Is (promedio)	-	Is (promedio)	20.3009 A	Is (promedio)	-
I _Q (c/transistor)	-	I _Q (c/transistor)	10.1507 A	I _Q (c/transistor)	-
THDv	4.029%	THDv	3.3797%	THDv	3.6%
THDi	64.02%	THDi	63.5221%	THDi	-

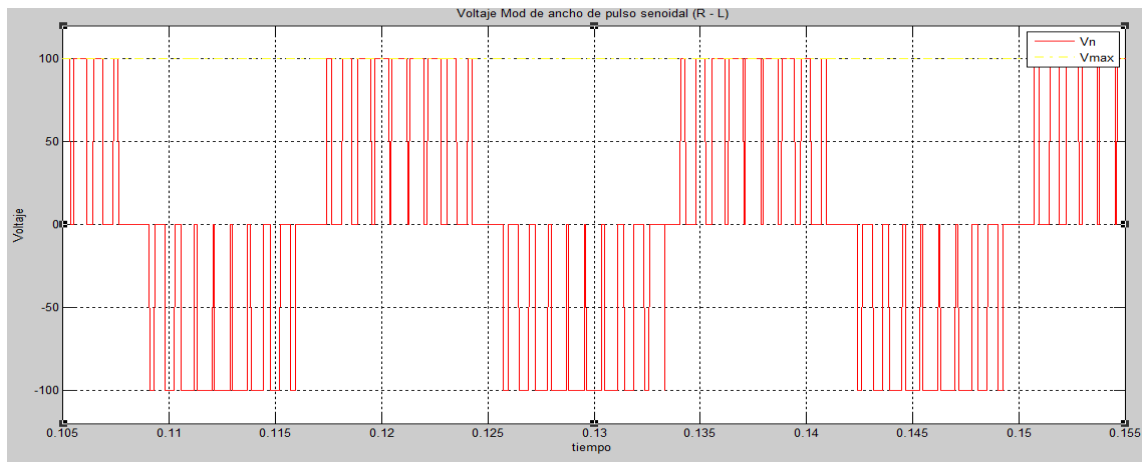
Tabla 14. Comparación y resultados

Cuando se comparan los resultados de la toolbox de simulink con el libro de Hart [24], con el valor de Vo1 y Io1 da un error promedio de 2.4% y con el dato del THDi da un error del 10.65%. Ahora cuando se comparan los resultados de la GUI con el libro de Hart [24], en el valor de Vo1 e Io1 da un error promedio de 1.19% con el dato del THDi da un error de 6.2% el cual está entre los parámetros asequibles.

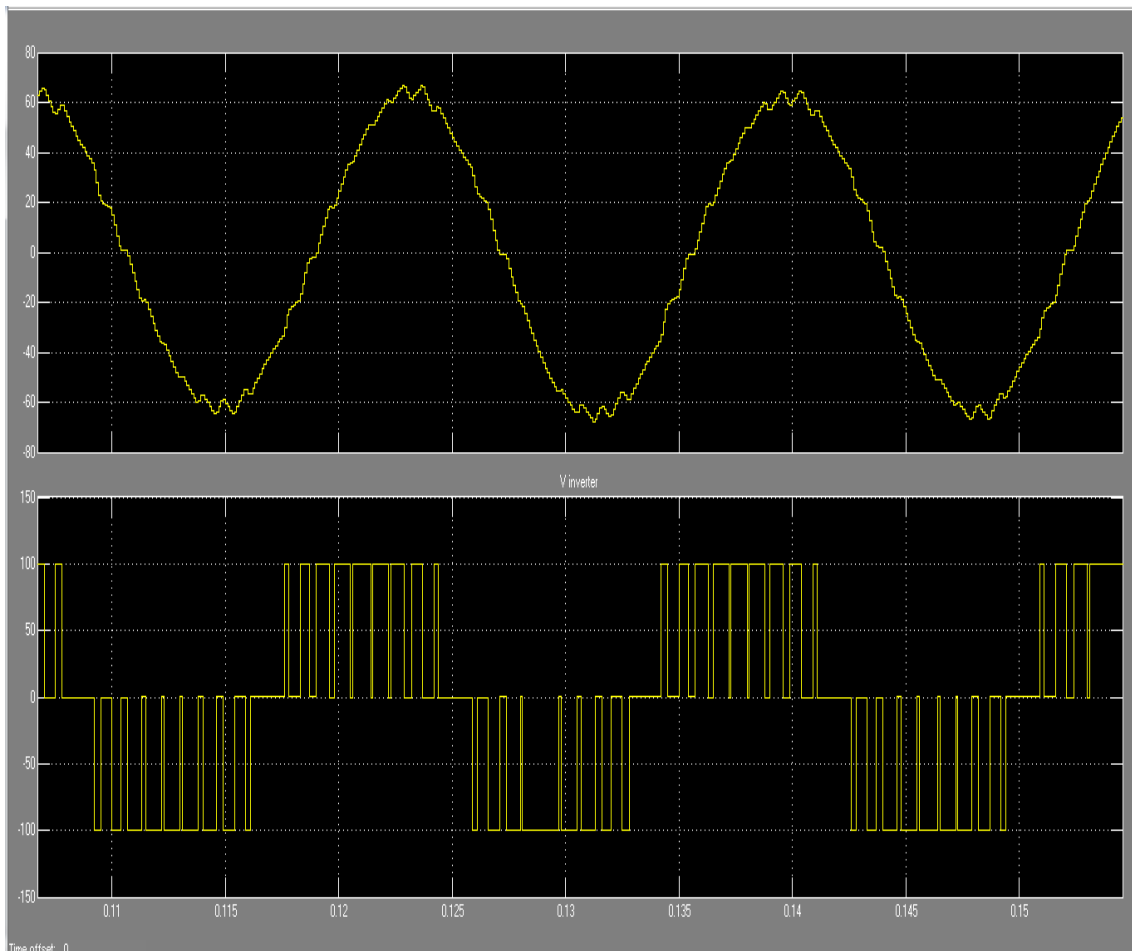
Los Resultados de la GUI son mucho más aproximados a los del libro de Hart [24] que los de la toolbox de simulink.



A)



B)



C)

Figura 115. A) Forma de onda corriente GUI. B) Forma de onda Voltaje GUI. C) Forma de onda corriente y voltaje Toolbox Simulink.

Como se aprecia las formas de onda obtenidas por la GUI son mucho más simétricas y más limpias que las obtenidas por la toolbox de simulink.

5.2.2 Inversor con modulación de ancho de pulso sinusoidal (trifásico)

Para esta comparación entre la GUI, el toolbox de simulink, se tienen los siguientes parámetros de entrada: Carga R-L.

Vs (v)	100
R (omh)	15
L(mH)	25
Fo (Hz)	60
ma	0.8
mf	21

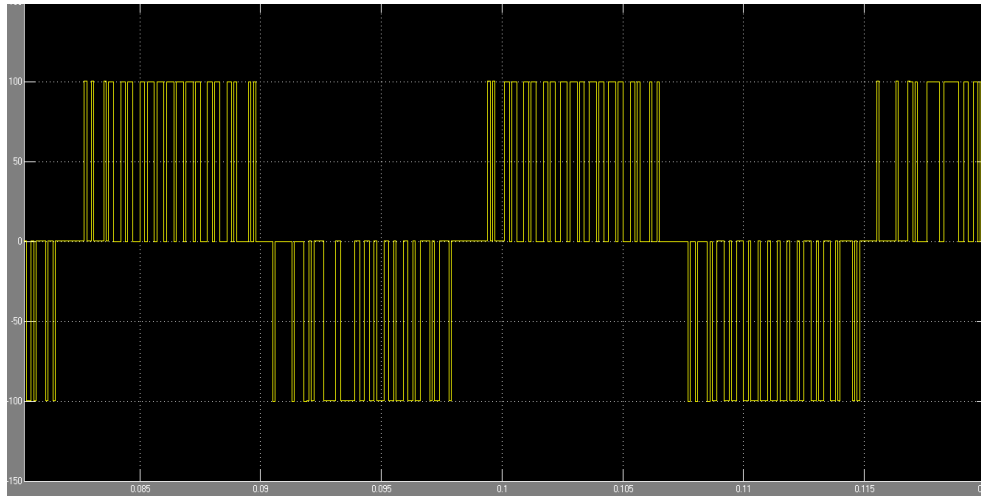
Tabla 15. Datos de entrada.

Los datos de salida que entrega la interfaz gráfica de usuario del programa y los resultados de la bibliografía se muestran en la tabla 16.

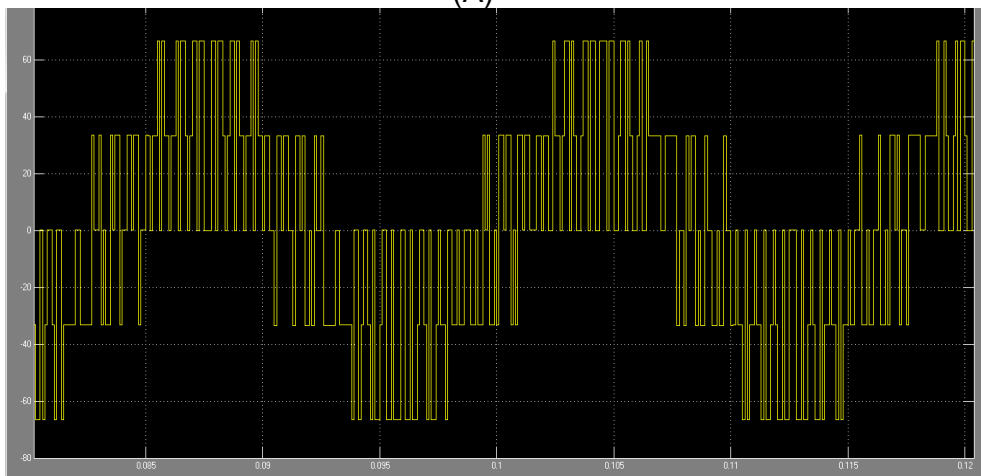
Datos Obtenidos			
Toolbox simulink		GUI	
Vab(rms)	66.18 V	Vab(rms)	66.3626 V
Vab1(rms)	48.73 V	Vab1(rms)	49.0845 V
THDvab	91.89 %	THDvab	90.9893 %
Ia(rms)	1.576 A	Ia(rms)	1.5983 A
Ia1(rms)	1.572 A	Ia1(rms)	1.5968 A
THDia	6.597 %	THDia	4.4304 %
Va(rms)	38.18 V	Va(rms)	38.3319 V
Va1(rms)	27.84 V	Va1(rms)	28.3255 V
THDva	93.82 %	THDva	91.1751 %

Tabla 16. Datos de entrada.

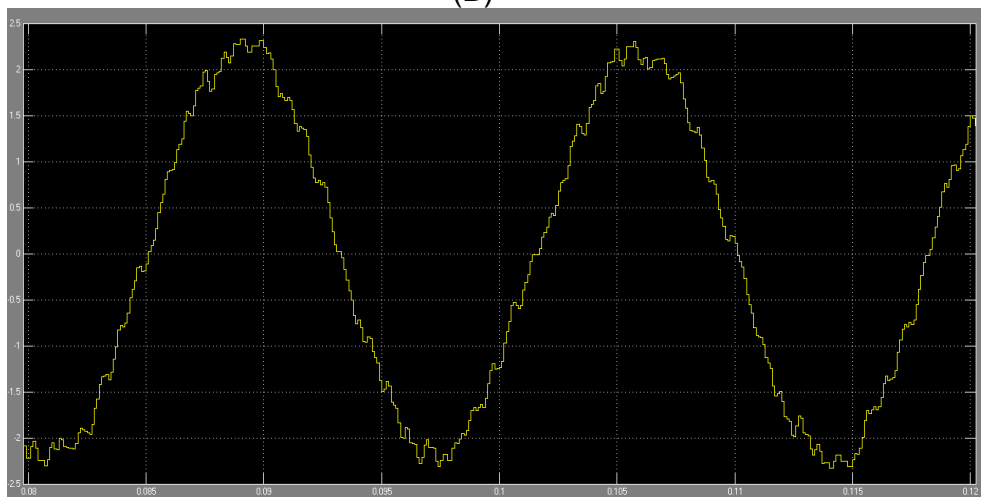
En la comparación el error promedio es del 4.7 % el cual esta dentro de los parámetros permisibles, confirmado la confiabilidad del programa para la carga R-L, este mismo proceso es para las demás tipos de carga R y R-L-C. el cual arroja resultados similares.



(A)

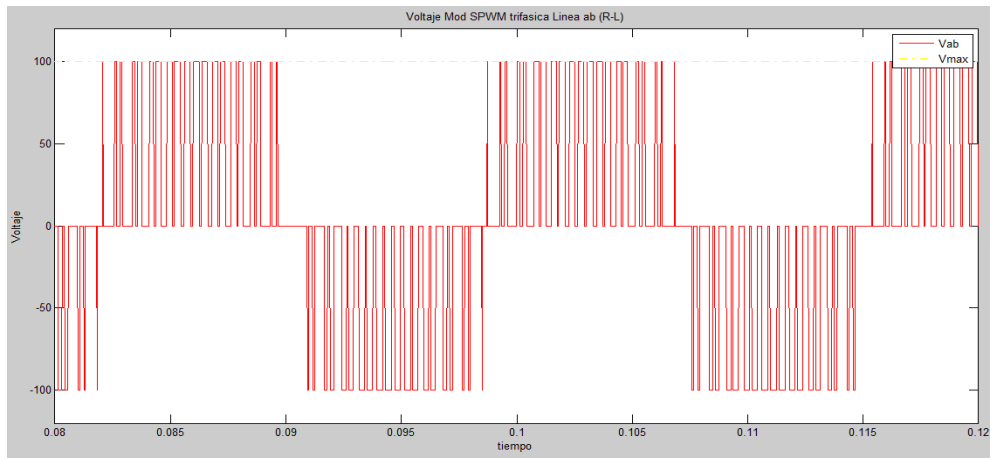


(B)

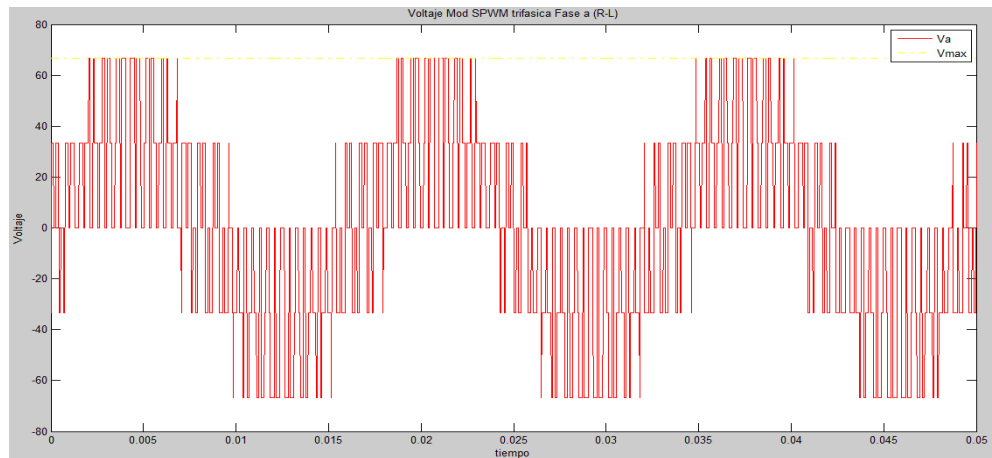


(C)

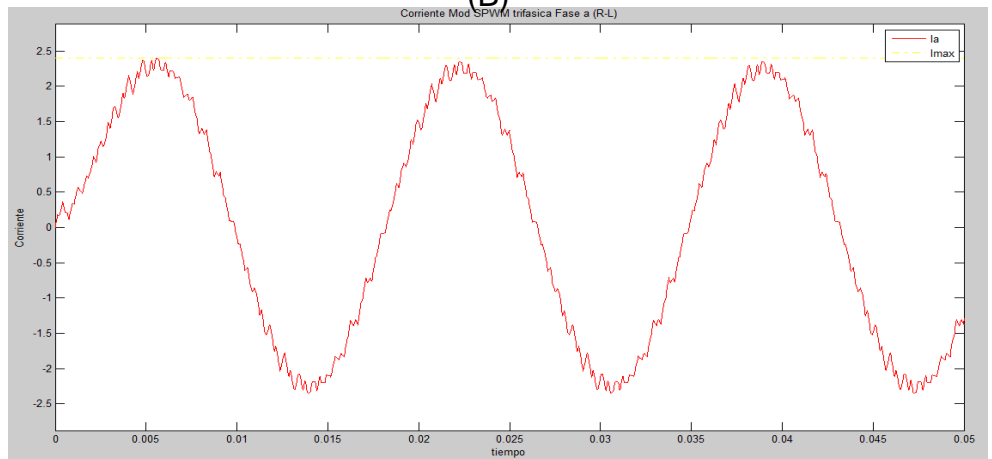
Figura 116. A) Forma de onda Voltaje de Línea B) Forma de onda Voltaje de Fase C) Forma de onda corriente por toolbox de simulink



(A)



(B)



(C)

Figura 117. A) Forma de onda Voltaje de Línea B) Forma de onda Voltaje de Fase C) Forma de onda corriente de la GUI.

Las formas de ondas son muy parecidas pero la de la GUI es mucho más estable y uniforme y simétrica.

5.2.3 Inversor puente monofásico con modulación de múltiple pulsos.

Para esta comparación entre la GUI, El libro [8], pagina 406, ejemplo 10-11, se tienen los siguientes parámetros de entrada: Carga R.

Vs (v)	100
R (omh)	2.5
Fo (Hz)	60
ma	0.6
mf	5

Tabla 17. Datos de entrada.

Los datos de salida que entrega la interfaz gráfica de usuario del programa y los resultados de la bibliografía se muestran en la tabla 18.

Datos Obtenidos					
Libro (Programa pc)		Libro (PSpice)		GUI	
Vo(rms)	-	Vo(rms)	-	Vo(rms)	77.4984 V
Vo1(rms)	54.59 V	Vo1(rms)	53.41 V	Vo1(rms)	54.5918 V
THDv	100.65%	THDv	80.65%	THDv	100.76%

Tabla 18. Comparación y resultados

Al comparar los resultados en la GUI con los del libro se puede notar dos diferencias: Cuando los de la GUI se comparan con los resultados del programa por computadora (del libro) se tiene un error promedio del 0.056% y cuando se compara con el PSpice del libro da un error promedio del 11%. Lo que se especifica en [8] es que el valor del THD cuando se hace por PSpice da un valor mas bajo. Ya que el el PSpice solo considera hasta el 9no armonico y cuando los valores de los armónicos después del noveno tienen un valor considerable, no se perciben produciendo el error.

Ya aclarando los resultados se puede decir primero que los datos de la GUI son confiables y mejores que los cálculos por PSpice.

5.2.4 Inversor trifásico con modulación Vectorial.

Para la comparación entre la GUI, y la toolbox de simulink, se tienen los siguientes parámetros de entrada: Carga R-L.

Vs (v)	100
R (omh)	15
L (mH)	10
Fo (Hz)	60
ma	0.8
mf	21

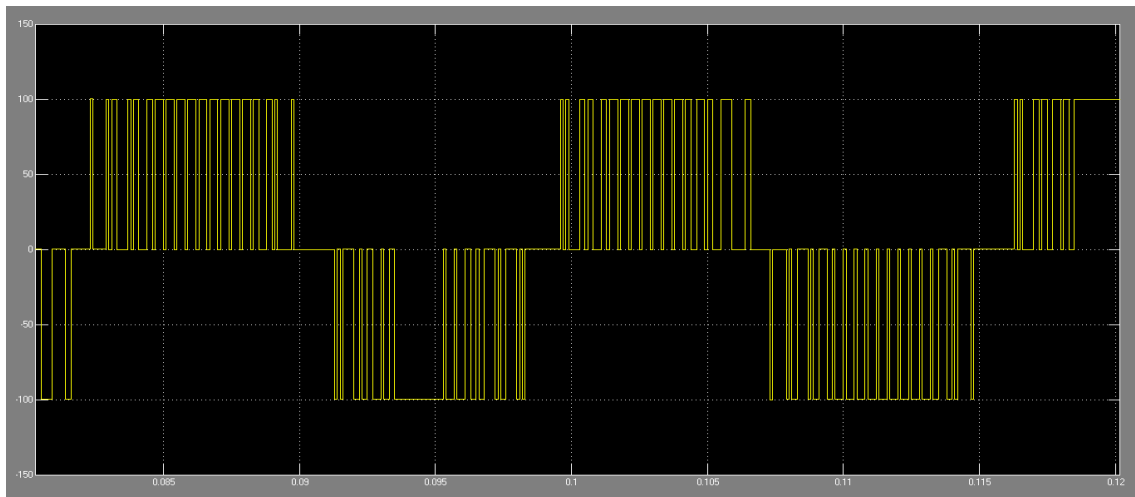
Tabla 19. Datos de entrada.

Los datos de salida que entrega la interfaz gráfica de usuario del programa y los resultados de la toolbox de simulink se muestran en la tabla 20

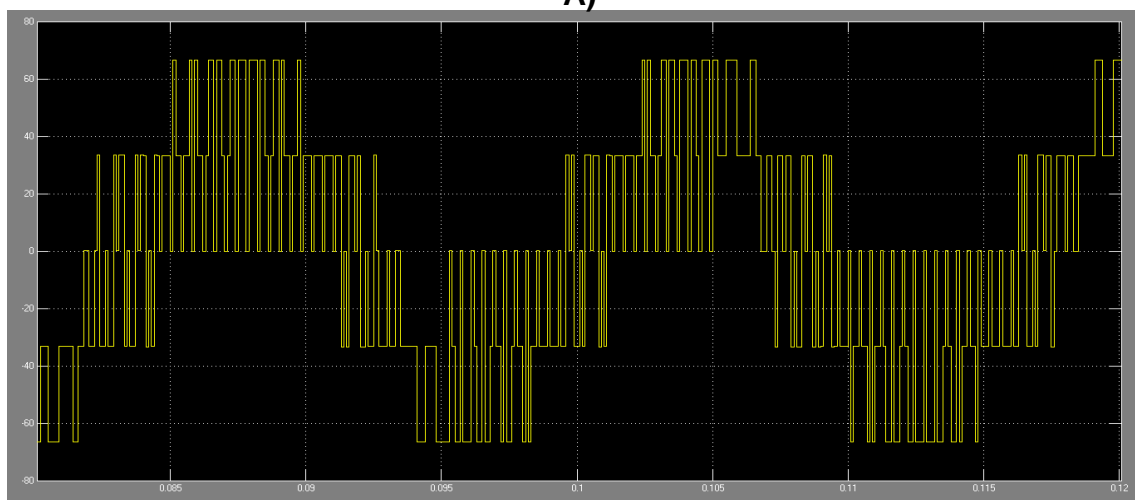
Toolbox simulink		GUI	
Vab(rms)	70.57 V	Vab(rms)	71.3302 V
Vab1(rms)	56.54 V	Vab1(rms)	56.2631 V
THDvab	74.62 %	THDvab	77.9256%
Va(rms)	41.04 V	Va(rms)	41.1825 V
Va1(rms)	32.84 V	Va1(rms)	32.496 V
THDva	74.9 %	THDva	77.847%
lab(rms)	2.131 A	lab(rms)	2.1097 A
lab1(rms)	2.121 A	lab1(rms)	2.1029 A
THDi	9.943 %	THDi	8.0224%
Po	204.4 W	Po	200.278 W

Tabla 20. Comparación y resultados

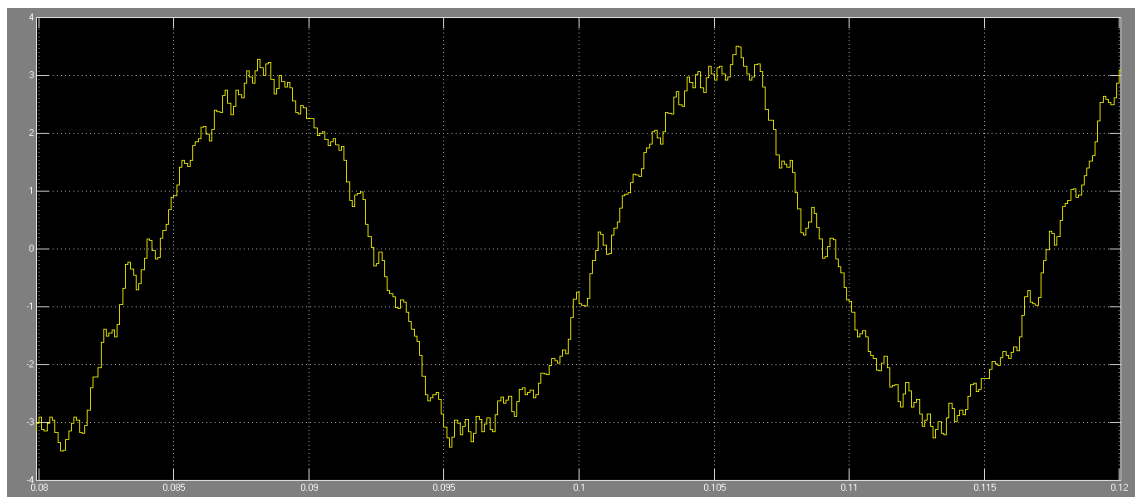
Al ver el análisis de la comparación entre la toolbox y la GUI se aprecia un error promedio de 3.42% el cual está dentro de los parámetros y confirmando que los resultados de la GUI de modulación Vectorial para carga R-L se cumple satisfactoriamente. (Es igual para los circuitos R y R-L-C)



A)

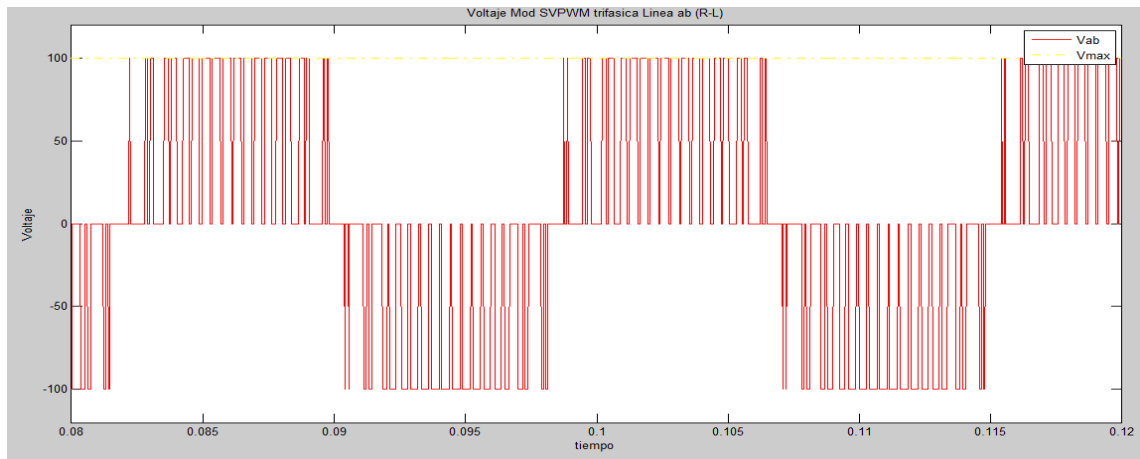


B)

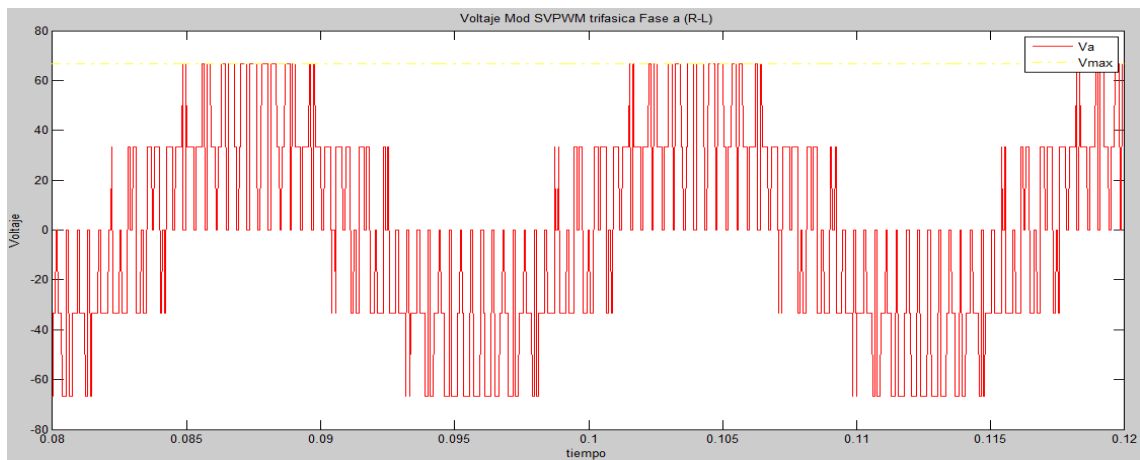


C)

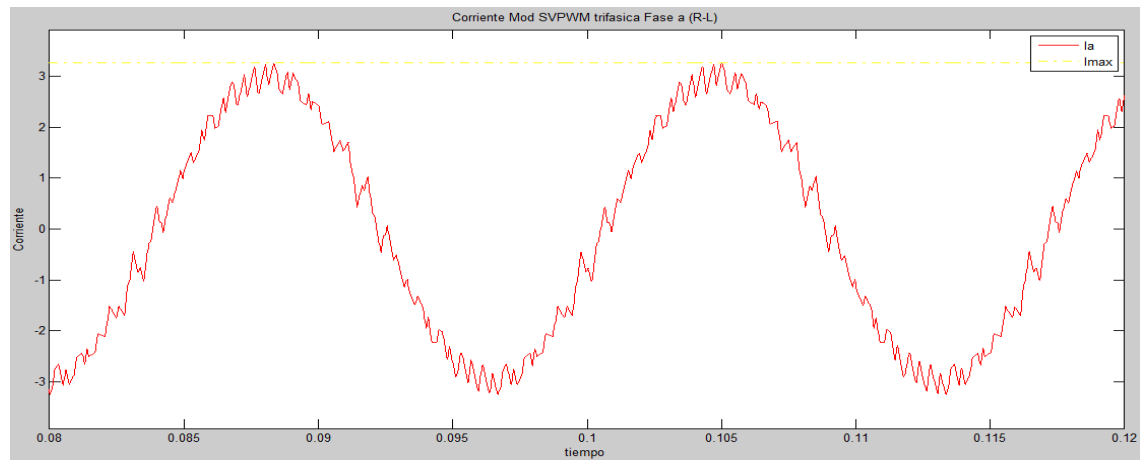
Figura 118. A) Forma de onda Voltaje de Línea B) Forma de onda Voltaje de Fase C) Forma de onda corriente por toolbox de simulink



A)



B)



C)

Figura 119. A) Forma de onda Voltaje de Línea B) Forma de onda Voltaje de Fase C) Forma de onda corriente por la GUI

Las mismas graficas muestran que la forma de ondas de la GUI son más simétricas y sin tantas perturbaciones que las del toolbox de simulink, dando como resultado que la GUI implementada es más efectiva.

6 CONCLUSIONES

La GUI realizada tiene un diseño práctico y muy fácil de asimilar para cualquier usuario, cuenta con botones de ayuda que orientan en la labor de su uso.

La GUI sirve y cumple los requisitos para cada tipo de carga R, R-L y R-L-C con varios tipos de modulación, PWM de pulso único, PWM de pulso múltiple y PWM sinusoidal (SPWM), modulación PWM sinusoidal con inyección de tercer armónico, Modulación por desplazamiento de fase, modulación 180° y modulación Vectorial.

Al ver los resultados y las comparaciones se puede ver que el error promedio está dentro de los parámetros permitidos y se demuestra que la confiabilidad de la GUI implementada es buena y puede ser utilizada como apoyo para la materia de electrónica de potencia.

La GUI que se desarrolló, fue implementada en código Matlab, esto hace que los cálculos como el THD, Armónicos, corriente y tensión tengan una mejor simetría y un margen de error más pequeño, comparado con el de simulink.

El programa proporcionado es un buen soporte para la solución de circuitos inversores, y permite ver el comportamiento de la forma de onda del voltaje y la corriente, algo que no se puede apreciar de forma teórica, en la práctica ahorra el trabajo de ir a montar los circuitos en el laboratorio y analizar su comportamiento en las horas de clase. Por eso las nuevas formas metodológicas didácticas con software son de gran ayuda y por eso se debe hacer el esfuerzo para realizarlos, así impulsar el desarrollo y el crecimiento en todas las carreras profesionales; Eso genera el progreso del país. De la suma de pequeños esfuerzos se forma una excelente herramienta.

En los inversores monofásicos la modulación SPWM es la mejor de las modulaciones, tiene bajo nivel de armónicos en la corriente de salida. En el inversor trifásico la mejor modulación es la vectorial y tiene un bajo índice de armónicos.

7 BIBLIOGRAFÍA

[1] SUDRIÁ, Antoni. GALCERAN, Samuel. MONTESINOS, Daniel. La Electrónica de Potencia, Una Tecnología Estratégica. Ponencia, Catedra Endesa Red Por la Universidad Politécnica de Catalunya [en línea].

<http://www.cerien.upc.edu/jornades/jjie2005/ponencias/Electronica%20de%20potencia.pdf>

[2] CASTRO RAMÍREZ, Felipe. PÉREZ AGUILAR, Andrés. Implementación de una interfaz grafica de usuario en matlab® - Para circuitos rectificadores. Pereira 2011. Trabajo de Grado (Ingeniero Electricista). Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de Ingenierías. Programa Ingeniería Eléctrica.

[3] BARRAGÁN, Diego O. Manual de interfaz gráfica de Usuario en Matlab parte 1. Matworks. 31 agosto de 2006 (Updated 03 jul 2009) [en línea].

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=12122&objectType=FILE>

[4] GONZÁLEZ, Juan. Inversores PWM. Universidad de Oviedo. España. Lección. Mayo de 1999 [En línea]

<http://pels.edv.uniovi.es/pels/pels/Pdf/Leccion%20Inversores%20Juan%20Diaz.pdf>

[5] MI, Chunting. SHEN, John and CECCARELLI, Theresa. 0. Continuing Education in Power Electronics. IEEE Transactions on Education, Vol 48, No. 1, February 2005.

[6] FERNÁNDEZ, Cristina. ZUMEL, Pablo. SANZ, Marina. LÁZARO, Antonio and BARRADO, Andrés. Description and Assessment of Activities Oriented to Enhance a First Course on Power Electronics. IEEE Transactions on Education, Vol 54, No. 4, November 2011.

[7] ÁLZATE, Alfonso. Electrónica de Potencia. Pereira, 1991. Universidad Tecnológica de Pereira. Cap. 7.

[8] RASHID, Muhammad. Electrónica de Potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Pearson Educación de México 2004. Cap. 6. ISBN 9702605326

[9] OWEN, E. L. History [Origin of the inverter]. Industry Applications Magazine, IEEE. Volume 2. No 1. Pag 64-66. Jan/Feb 1996 ISSN: 107-7-2618.

[10] AL AMERI, Ahmed. YOUSEF, Refaat. Introduction to Graphical User Interface

(GUI) Matlab 6.5. UAE University, College of Engineering. Electrical Engineering Department. IEEE UAEU Student Branch.

[11] DOOLLA, Suryanarayana. BHAT, Sunil. BHATTI, T and Veerachary, M. A GUI Based Simulation of Power Electronic Converters and Reactive Power Compensators Using MATLAB/SIMULINK. 2004 International Conference on Power System Technology – POWERCON 2004 . Singapore, 21-24 November 2004.

[12] Visnie, R. Sunde, V. and Mrcela I. Matlab /GUI interface for simulation of power electronic converters. Distribution System Operator, Ltd, Elektra Karlovac, Vladka Maceka 44, Karlovac, Croatia. Faculty of Electrical Engineering and Computing. Department of Electric Machines, Drives and Automation, Zagreb, Croatia. May 2011.

[13] YANG, Rui. WANG, Zhu and WANG, Lingfeng. A GUI-based Simulation Platform for Energy and Comfort Management in Zero-Energy Buildings. Dept. Of Electrical Engineering and computer science University of Toledo. North American Power Symposium (NAPS), Aug. 2011.

[14] Durespo. Colombia. Productos. Inversores de Potencia.
www.durespo.com/productos/inversores-de-potencia

[15] QMax. Argentina. Productos, Inversores de Potencia.
www.qmax.com.ar/inversores_cargadores_senoidal_pura.php

[16] Gomez, A. Riera, M. Casaravilla, G. Control de flujo vectorial mediante un inversor de corriente. Departamento de Potencia. Instituto de Ingeniería Eléctrica. Facultad de Ingeniería, UDEELAR, Montevideo, Uruguay, 1999.

[17] San Martin, Jose. Convertidor DC/DC o DC/AC Resonante. Área de Tecnologías Electrónicas, Departamento de ciencias del espacio y Tecnologías Electrónicas. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

[18] Brown, M. Godman, H. Martínéz, J. Paiz, M. DC-AC/DC Power Inverter. Department of Electrical Engineering. New Mexico Tech. May 12, 2010.

[19] Zheng Peng, Fany. Z-Soucer Inverter. IEEE Transactions on Industry aplicaciones, Vol. 39, No. 2, March, April 2003.

[20] Wilber Calderón. Inversor de cuatro etapas. Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Salvador. El Salvador. Noviembre de 2011.

[21] Vinoth, K. Joseph, J. Suresh, S. Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverter. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol 5, No 7, July 2010.

[22] Inibe, Q. Pérez, V. Javier, B. José, A. Aganza, T. Implementación de la Técnica de Modulación de Vectores Espaciales utilizando un controlador Digital de Señal dsPIC30F3010, RIEE&C. Revista de ingeniería Eléctrica, Electrónica y computación. Vol 6 No. 1, Junio 2009. Pg 16.

[23] Vernavá, A. Gibbons, R. Nachez, A. Arias, M. Novello, A. Electrónica de potencia. Electiva III, Control Vectorial. Facultad de Ciencias Exactas Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. 2008.

[24] HART, Daniel. 1997. Electrónica de Potencia. Trad. Vuelapluma. Madrid, 2001. Pearson Educación S.A. Ed. 1. ISBN: 84-205-3179-0.