

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA DE
COMUNICACIONES

Trabajo Fin de Grado

“Herramienta de apoyo a la
enseñanza de rectificadores
monofásicos y trifásicos”

Autora: Soraya Yagüe García

Tutora: M^a Carmen Pérez Rubio

TRIBUNAL:

Presidente: Jesús Ureña Ureña

Vocal 1º: Santiago Cóbreces Álvarez

Vocal 2º: M^a Carmen Pérez Rubio

FECHA: 19 Septiembre 2018

Agradecimientos

Este proyecto supone un fin y un comienzo en una etapa relevante de mi vida y por ello creo que gran parte de él, se lo debo a las personas que han estado conmigo durante todo este viaje.

Principalmente a mi familia, a ellos, que no han dejado de apoyarme cuando lo he necesitado. Que me han insistido a seguir estudiando, incluso cuando he flaqueado y he dudado de mi misma; los que nunca me fallan y sé que siempre estarán ahí para mí y yo para ellos.

A los amigos y amigas que me han quedado después de este camino, estando a mi lado en cada momento y luchando juntos para alcanzar esta meta, que nadie dijo que fuera a ser fácil. Esta es de las mejores experiencias de mi vida, porque vosotros habéis estado ahí y hemos superado juntos todos los baches que se nos ponían por el camino. A vosotras que seréis mis amigas para siempre, porque estoy segura de que esto no acaba aquí y que nos quedará mucho por vivir juntas. Que no olvido cada una de las cosas que habéis hecho por mí, demostrándome que no estoy sola y que siempre os tendré, lo cual es reciproco porque ya no imagino un futuro sin vosotras.

Y a ti, a mi compañero de viaje que has aguantado a mi lado todos estos años, en mis momentos de flaqueza y frustración donde no sabía cómo avanzar, porque no veía la luz al final del túnel, pero persististe y me empujaste a lograrlo. Gracias a ti estoy donde estoy y soy quien soy, porque hemos madurado juntos.

Y por último a todos esos profesores que me han ayudado en momentos difíciles, ya sea con tutorías largas, con explicaciones o simplemente teniendo una grata conversación y demostrándome que son más que un profesor y se preocupan por nosotros.

Índice General

Agradecimientos	3
Índice General	5
Índice de Figuras	7
Índice de Tablas	17
Índice de Acrónimos	19
Resumen	21
Resumen	23
Summary	25
Resumen Extendido	27
Memoria	29
Capítulo 1	31
Introducción	31
Capítulo 2	33
Base Teórica	33
2.1 Introducción	33
2.2 Convertidores AC/DC no controlados	33
2.1.1 Rectificadores monofásicos	33
2.1.2 Rectificadores trifásicos	40
2.2 Convertidores AC/DC controlados	49
2.2.1 Rectificadores monofásicos	49
2.2.2 Rectificadores trifásicos	56
Capítulo 3	63
Herramienta docente para la enseñanza de convertidores DC/AC	63
3.1 Introducción	63
3.2 Interfaz gráfica de convertidores	63
3.2.1 Rectificadores monofásicos no controlados	66
3.2.2 Rectificadores trifásicos no controlados	72
3.2.3 Rectificadores monofásicos controlados	88
3.2.4 Rectificadores trifásicos controlados	98
3.3 Extensión de la herramienta	106
3.4 Potencial de la herramienta	106
Capítulo 4	107
Ensayo Laboratorio	107
Capítulo 5	113
Conclusiones y Líneas Futuras	113
5.1 Conclusiones	113
5.2 Líneas Futuras	113
Pliego de condiciones	117

Pliego de condiciones	119
Presupuesto.....	121
Presupuesto	123
Diagramas	125
Diagramas.....	127
1. Introducción.....	127
2. Archivos .m.....	129
2.1 Rectificador No Controlado Monofásico	129
2.2 Rectificador No Controlado Trifásico	132
2.3 Rectificador Controlado Monofásico.....	140
2.4 Rectificador Controlado Trifásico	144
Manual de usuario.....	151
Manual de usuario.....	153
1. Inicio.....	153
2. Rectificador No controlado Monofásico	154
3. Rectificador No controlado Trifásico	161
3.1 Rectificador No Controlado Trifásico de seis pulsos	162
3.1 Rectificador No Controlado Trifásico de doce pulsos.....	169
4. Rectificador Controlado Monofásico	175
5. Rectificador Controlado Trifásico	184
Bibliografía.....	193
Bibliografía	195

Índice de Figuras

Figura 1. Circuito rectificador en puente completo [1].....	34
Figura 2. Análisis con red ideal [1]	34
Figura 3. Armónicos de la corriente de entrada [1]	35
Figura 4. Análisis rectificador monofásico con red real [1].....	36
Figura 5. Rectificador monofásico con carga a tensión constante [1].....	37
Figura 6. Representaciones destacadas del rectificador monofásico con carga a tensión contante [1].....	37
Figura 7. Circuito rectificador monofásico con cargas a través de condensadores [1]	38
Figura 8. Representaciones destacadas del rectificador monofásico con carga a través de condensadores [1].....	39
Figura 9. Simulaciones del rectificador monofásico no controlado obtenidas de la interfaz gráfica.....	39
Figura 10. Simulación del rectificador monofásico no controlado obtenidas de la interfaz gráfica.....	39
Figura 11. Rectificador trifásico no controlado de seis pulsos con corriente constante [2].....	40
Figura 12. Representación para el cálculo del valor medio de la tensión de salida [2]	41
Figura 13. Representaciones destacadas del rectificador trifásico no controlado de seis pulsos red eléctrica ideal [2]	41
Figura 14. Armónicos de la corriente de entrada [2]	41
Figura 15. Representaciones destacadas del rectificador trifásico no controlado de seis pulsos red eléctrica real [2].....	42
Figura 16. Rectificador trifásico no controlado de seis pulsos con tensión constante [2].....	43
Figura 17. Representaciones destacadas del rectificador trifásico no controlado de seis pulsos con tensión constante [2]	43
Figura 18. Rectificador trifásico no controlado real [2]	44

Figura 19. Representaciones destacadas del rectificador trifásico no controlado real [2]	44
Figura 20. Simulaciones del rectificador trifásico de seis pulsos con inductancia de entrada nula	45
Figura 21. Simulaciones del rectificador trifásico de seis pulsos con inductancia de entrada	45
Figura 22. Composición del rectificador de doce pulsos [2].....	45
Figura 23. Representación de la tensión a la salida del rectificador trifásico de doce pulsos [2]	45
Figura 24. Rectificador trifásico no controlado de doce pulsos [2].....	46
Figura 25. Representaciones destacadas del rectificador trifásico no controlado de 12 pulsos [2]	46
Figura 26. Representaciones destacadas del rectificador trifásico no controlado de 12 pulsos [2]	46
Figura 27. Representaciones destacadas de rectificador trifásico no controlado de 12 pulsos [2]	47
Figura 28. Estructuras rectificador trifásico de 12 pulsos [2].....	47
Figura 29. Simulaciones del rectificador trifásico de 12 pulsos con red ideal obtenidas de la aplicación	47
Figura 30. Simulaciones del rectificador trifásico de 12 pulsos con red real obtenidas de la aplicación	48
Figura 31. Características del tiristor [3].....	49
Figura 32. Tiempos relevantes del tiristor [3]	49
Figura 33. Circuito rectificador controlado en puente completo [3]	50
Figura 34. Análisis con red ideal [3]	50
Figura 35. Cálculo tensión media a la salida a través del área A_{α} [3]	51
Figura 36. Armónicos de la corriente de entrada [3]	51
Figura 37. Influencia del ángulo de disparo en la potencia activa, aparente y reactiva [3].....	52
Figura 38. Análisis rectificador monofásico con red real [3].....	52
Figura 39. Funcionamiento en modo discontinuo [3]	53

Figura 40. Rectificador monofásico controlado en modo inversor [3]	53
Figura 41. Representaciones destacadas del rectificador monofásico controlado en modo inversor [3]	54
Figura 42. Representación para saber el tiempo de apagado [3]	54
Figura 43. Simulaciones del rectificador monofásico controlado con red ideal obtenida de la aplicación con ángulo de disparo de 30°	55
Figura 44. Simulación del rectificador monofásico controlado con real obtenido de la aplicación con ángulo de disparo de 30°	55
Figura 45. Rectificador trifásico controlado de seis pulsos con corriente constante [3]	56
Figura 46. Representaciones destacadas del rectificador trifásico controlado [3]	56
Figura 47. Representación para el cálculo del valor medio de la tensión de salida [3]	57
Figura 48. Armónicos de la corriente de entrada [3]	57
Figura 49. Representaciones destacadas del rectificador trifásico controlado de seis pulsos con red eléctrica real [3]	58
Figura 50. Representaciones para el cálculo del valor medio a la salida con red real [3]	59
Figura 51. Representación de la corriente. [3]	59
Figura 52. Representación relevante del rectificador trifásico controlado en modo inversor no autónomo. [3]	60
Figura 53. Topología rectificador trifásico controlado real [3]	60
Figura 54. Representaciones relevantes del rectificador trifásico controlado real [3]	60
Figura 55. Simulaciones del rectificador trifásico controlado con red ideal obtenidas de la aplicación con un ángulo de disparo de 30°	61
Figura 56. Simulaciones del rectificador trifásico controlado con red real obtenidas de la aplicación con un ángulo de disparo de 30°	61
Figura 57. Pantalla inicio de la interfaz	64
Figura 58. Interfaz gráfica rectificador monofásico no controlado	66

Figura 59: Modelo Simulink del rectificador monofásico no controlado en puente completo.....	66
Figura 60: Resultados a la entrada del sistema.....	67
Figura 61: Resultados a la salida del sistema.....	67
Figura 62: Transparencias sobre rectificadores monofásicos no controlados [1]	68
Figura 63: Valores por defecto del rectificador monofásico no controlado en puente completo.....	69
Figura 64: Resultados de la simulación	70
Figura 65: Interfaz gráfica de la representación del rectificador monofásico	71
Figura 66: Visualización de las representaciones del circuito.....	71
Figura 67: Mensaje de advertencia sobre la necesidad del cálculo previo a la representación	72
Figura 68: Botones de ayuda	72
Figura 69. Interfaz gráfica rectificador trifásico no controlado.....	72
Figura 70: Modelo Simulink del rectificador trifásico no controlado de seis pulsos.	73
Figura 71: Resultados a la entrada del sistema.....	73
Figura 72: Resultados a la entrada del sistema.....	74
Figura 73: Resultados a la salida del sistema.....	74
Figura 74: Transparencias sobre rectificadores trifásicos no controlados [2] ..	75
Figura 75: Valores por defecto del rectificador trifásico no controlado de seis pulsos.....	76
Figura 76: Resultados de la simulación	77
Figura 77: Interfaz gráfica de la representación del rectificador trifásico de seis pulsos	78
Figura 78: Visualización de las representaciones del circuito.....	78
Figura 79: Visualización de las representaciones del circuito.....	79
Figura 80: Visualización de las representaciones del circuito.....	79

Figura 81: Mensaje de advertencia sobre la necesidad del cálculo previo a la representación	79
Figura 82: Botones de ayuda	80
Figura 83: Interfaz gráfica del rectificador trifásico de doce pulsos.	80
Figura 84: Modelo Simulink del rectificador trifásico no controlado de doce pulsos.....	81
Figura 85: Resultados a la entrada del sistema.	81
Figura 86: Resultados a la entrada del sistema.	82
Figura 87: Resultados a la salida del sistema.....	82
Figura 88: Transparencias sobre rectificadores monofásicos no controlados [2]	83
Figura 89: Valores por defecto del rectificador trifásico no controlado de doce pulsos.....	84
Figura 90: Resultados de la simulación	85
Figura 91: Interfaz gráfica de la representación del rectificador trifásico de doce pulsos	86
Figura 92: Visualización de las representaciones del circuito.	86
Figura 93: Visualización de las representaciones del circuito.	87
Figura 94: Visualización de las representaciones del circuito.....	87
Figura 95: Mensaje de advertencia sobre la necesidad del cálculo previo a la representación	87
Figura 96: Botones de ayuda	88
Figura 97. Interfaz gráfica rectificador monofásico controlado.....	88
Figura 98. Disposición de los tiristores en el puente en H	89
Figura 99. Disposición de los tiristores en el puente en H	89
Figura 100. Visualización de los disparos.	89
Figura 101: Modelo Simulink del rectificador monofásico controlado en puente completo.....	89
Figura 102: Resultados a la salida del sistema.....	90
Figura 103: Resultados a la entrada del sistema.	90

Figura 104: Transparencias sobre rectificadores monofásicos controlados [3]	91
Figura 105: Valores por defecto del rectificador monofásico controlado en puente completo.....	92
Figura 106: Resultados de la simulación	93
Figura 107: Interfaz gráfica de la representación del rectificador monofásico controlado	94
Figura 108: Visualización de las representaciones del circuito con un ángulo de disparo de 30°.....	94
Figura 109: Mensaje de advertencia sobre la necesidad del cálculo previo a la representación	94
Figura 110: Botones de ayuda	95
Figura 111: Interfaz gráfica de la representación paramétrica en el rectificador monofásico controlado.....	95
Figura 112. Modelo en Simulink del rectificador monofásico controlado con corriente constante a la salida	96
Figura 113. Resultados a la entrada del sistema	96
Figura 114: Ventana informativa del avance de la simulación	97
Figura 115. Mensaje de Advertencia para que el usuario sepa el valor máximo del parámetro alpha	97
Figura 116: Representación paramétrica del rectificador monofásico controlado con corriente constante a la salida.....	97
Figura 117. Interfaz gráfica rectificador trifásico controlado.....	98
Figura 118: Modelo Simulink del rectificador trifásico controlado en puente completo.....	98
Figura 119. Gráfica de las tensiones a la entrada del puente de tiristores y los disparos de los mismos.....	99
Figura 120: Resultados a la entrada del sistema.....	99
Figura 121: Resultados a la entrada del sistema	100
Figura 122: Resultados a la salida del sistema.....	100
Figura 123: Transparencias sobre rectificadores trifásico no controlados [3].	101

Figura 124: Valores por defecto del rectificador trifásico controlado en puente completo.....	102
Figura 125: Resultados de la simulación	103
Figura 126: Interfaz gráfica de la representación del rectificador trifásico	104
Figura 127: Visualización de las representaciones del circuito.....	104
Figura 128: Visualización de las representaciones del circuito.....	105
Figura 129: Visualización de las representaciones del circuito.....	105
Figura 130: Mensaje de advertencia sobre la necesidad del cálculo previo a la representación	105
Figura 131: Botones de ayuda	106
Figura 132. Circuito utilizado en las pruebas	107
Figura 133. Componentes utilizados en las pruebas	107
Figura 134. Parte de la carga incorporada al circuito.....	107
Figura 135. Cubo de Potencia con carga resistiva.....	108
Figura 136. Configuración del rectificador trifásico según el datasheet.....	108
Figura 137. Conexiones del cubo de potencia	109
Figura 138. Señales obtenidas con el osciloscopio.	109
Figura 139. Gráficas obtenidas con la interfaz gráfica creada	110
Figura 140. Prueba realizada modificando en disparo del tiristor	111
Figura 141. Gráficas obtenidas a través de la interfaz gráfica	111
Figura 142. Máquina de potencia preparado para la docencia [16]	112
Figura 143. Máquina de potencia para la docencia [17]	112
Figura 144. Topología del rectificador de dieciocho pulsos [11]	114
Figura 145. Topología del rectificador de veinticuatro pulsos [12]	114
Figura 146. Modelo en Simulink del rectificador de veinticuatro pulsos [13]...	115
Figura 147. Topología del convertidor Back to Back [14].....	115
Figura 148: Pantalla principal del programa.....	153
Figura 149: Botón para abrir el rectificador no controlado monofásico	154

Figura 150: Acceso al rectificador no controlado monofásico	154
Figura 151: Pantalla rectificador no controlado monofásico	155
Figura 152: Acceso al modelo Simulink del rectificador	155
Figura 153: Modelo en Simulink del rectificador monofásico no controlado ...	156
Figura 154: Botón para restaurar el modelo Simulink	157
Figura 155: Archivo pdf con la teoría del rectificador monofásico no controlado	157
Figura 156: Valores por defecto para el cálculo	158
Figura 157: Resultados de la simulación	158
Figura 158: Pantalla de visualización de gráficas relevantes.....	159
Figura 159: Visualización de las gráficas y ajustes	160
Figura 160: Botón para abrir el rectificador no controlado trifásico	161
Figura 161: Acceso al rectificador no controlado trifásico	161
Figura 162: Pantalla rectificador no controlado trifásico	162
Figura 163: Acceso al modelo Simulink del rectificador	162
Figura 164: Modelo en Simulink del rectificador trifásico no controlado	163
Figura 165: Botón para restaurar el modelo Simulink	164
Figura 166: Archivo pdf con la teoría del rectificador monofásico no controlado	164
Figura 167: Valores por defecto para el cálculo	165
Figura 168: Resultados de la simulación	165
Figura 169: Pantalla de visualización	166
Figura 170: Pantalla de visualización explicada.....	167
Figura 171: Visualización de las gráficas a la entrada del sistema	168
Figura 172: Visualización de las gráficas de la salida del sistema.....	168
Figura 173: Selección del rectificador trifásico no controlado de doce pulsos	169
Figura 174: Pantalla rectificador trifásico no controlado de doce pulsos	169

Figura 175: Modelo en Simulink del rectificador trifásico no controlado de doce pulsos	170
Figura 176: Botón para restaurar el modelo Simulink	171
Figura 177: Archivo pdf con la teoría del rectificador monofásico no controlado	171
Figura 178: Valores por defecto para el cálculo	172
Figura 179: Resultados de la simulación	172
Figura 180: Pantalla de visualización	173
Figura 181: Representación de las gráficas a la entrada.....	174
Figura 182: Representación de las gráficas de la salida.....	174
Figura 183: Botón para abrir el rectificador controlado monofásico	175
Figura 184: Acceso al rectificador controlado monofásico	175
Figura 185: Pantalla rectificador no controlado monofásico	176
Figura 186: Acceso al modelo Simulink del rectificador	176
Figura 187: Modelo en Simulink del rectificador monofásico controlado	177
Figura 188: Botón para restaurar el modelo Simulink	178
Figura 189: Archivo pdf con la teoría del rectificador monofásico no controlado	178
Figura 190: Valores por defecto para el cálculo	179
Figura 191: Resultados de la simulación	179
Figura 192: Pantalla de visualización de gráficas relevantes.....	180
Figura 193: Visualización de las gráficas y ajustes	181
Figura 194: Pantalla de representación paramétrica	182
Figura 195: Representación paramétrica	183
Figura 196: Botón para abrir el rectificador controlado monofásico.....	184
Figura 197: Acceso al rectificador controlado monofásico	184
Figura 198: Pantalla rectificador no controlado monofásico	185
Figura 199: Acceso al modelo Simulink del rectificador	185

Figura 197: Modelo en Simulink del circuito.....	186
Figura 201: Botón para restaurar el modelo Simulink	187
Figura 202: Archivo pdf con la teoría del rectificador monofásico no controlado	187
Figura 203: Valores por defecto para el cálculo	188
Figura 204: Resultados de la simulación	188
Figura 202: Pantalla de visualización de gráficas relevantes.....	189
Figura 206: Pantalla de visualización explicada.....	190
Figura 204: Representación de las gráficas a la entrada del sistema.....	191
Figura 208: Representación de las gráficas a la salida del sistema	191
Figura 209: Representación de las gráficas a la entrada y salida del circuito	192

Índice de Tablas

Tabla 1: Presupuesto de ejecución por material	123
Tabla 2: Honorarios del empleado	123
Tabla 3: Presupuesto total del Trabajo Fin de Grado	124

Índice de Acrónimos

- * $v_{o,0}$ \equiv valor medio de la tensión de salida del sistema
- * v_o \equiv tensión a la salida del sistema
- * V_o \equiv valor medio de la tensión a la salida del sistema
- * v_s \equiv tensión a la entrada del sistema
- * PF \equiv factor de potencia
- * P \equiv potencia activa
- * S \equiv potencia aparente
- * I_o \equiv corriente media a la salida del sistema
- * i_o \equiv corriente a la salida del sistema
- * I_s \equiv corriente media a la entrada del sistema
- * DPF \equiv factor de potencia de desplazamiento
- * THD_i \equiv distorsión armónica total de la corriente
- * I_{s1} \equiv primer armónico de la corriente de entrada del sistema
- * v_L \equiv tensión en la inductancia de entrada del sistema
- * L_s \equiv inductancia a la entrada del sistema
- * i_s \equiv corriente de entrada del sistema
- * A_u \equiv área encierra la tensión de la inductancia durante la conmutación
- * MCC \equiv modo conducción continua
- * v_{an} \equiv tensión en el punto a
- * v_{cn} \equiv tensión en el punto c
- * v_{ac} \equiv tensión entre los puntos a y c a la entrada del sistema
- * i_a \equiv corriente en la rama a
- * i_c \equiv corriente en la rama c
- * $v_{o\alpha}$ \equiv tensión media a la salida en función del parámetro alpha
- * v_{AK} \equiv tensión máxima del tiristor cuando conduce
- * t_q \equiv tiempo de extinción

Parte I

Resumen

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se ha realizado un sistema software de simulación conversión AC/DC de rectificadores monofásicos y trifásicos, en su versión controlada y no controlada.

El proyecto ha sido desarrollado mediante Simulink y GUIDE, ambas herramientas de Matlab, creando una interfaz gráfica sencilla y didáctica.

La aplicación integra también trabajos previos, permitiendo la simulación de las diferentes topologías de convertidores DC/DC y DC/AC estudiadas en las distintas asignaturas relacionadas con electrónica de potencia. En la cual se permite la modificación de los parámetros del circuito de una manera sencilla, pudiendo así el alumno visualizar el comportamiento del mismo, lo que facilita su comprensión.

Palabras clave: electrónica de potencia, rectificadores, simulación, educación.

Summary

This Final Degree Project proposes a simulation software system for AC / DC conversion for single-phase and three-phase rectifiers in a controlled and uncontrolled version.

The project has been developed using Simulink and GUIDE, both Matlab tools, creating a simple and didactic graphical interface.

The application also allows the simulation of the different types of DC / DC converters, and DC / AC inverters studied in the different subjects related to power electronics. The modification of the circuit parameters is allowed in a simple way, so the student can visualize the behavior of the circuit, which facilitates its understanding.

Keywords: power electronics, rectifiers, simulation tools, education.

Resumen Extendido

En este Trabajo Fin de Grado se ha realizado una plataforma interactiva de simulación que facilita el estudio de los diferentes aspectos de conversión AC/DC de rectificadores monofásicos y trifásicos, en su versión controlada y no controlada. Dicha plataforma se ha desarrollado mediante Simulink y GUIDE, ambas herramientas de Matlab, siendo una interfaz gráfica sencilla e intuitiva accesible para cualquier usuario.

La aplicación permite la simulación de las diferentes tipologías de los circuitos y ver el comportamiento de los mismos, todos ellos estudiados en las distintas asignaturas relacionadas con la electrónica de potencia, tanto los casos más sencillos como los más complejos matemáticamente. Se podrán acceder tanto a los convertidores e inversores, los cuales son proyectos anteriores integrados con el actual, como los rectificadores que se han estudiado en la asignatura de Electrónica de Potencia. Todo ello para obtener una aplicación global con toda la información que pueda necesitar el alumnado.

Por último, se han realizado una serie de pruebas prácticas con el cubo de potencia *Semiteach Thyristor* de Semikron en el laboratorio, las cuales han sido con una carga resistiva. Estas son comparadas con los resultados obtenidos a través de la aplicación introduciendo los parámetros oportunos para que sea el mismo circuito.

Parte II

Memoria

Capítulo 1

Introducción

En este Trabajo Fin de Grado se ha realizado una plataforma interactiva de simulación que facilita el estudio de los diferentes aspectos de conversión AC/DC de rectificadores monofásicos y trifásicos, en su versión controlada y no controlada.

El proyecto ha sido desarrollado mediante Simulink [5] y GUIDE [4], ambas herramientas de Matlab, creando una interfaz gráfica sencilla y didáctica.

La aplicación permite la simulación de las diferentes tipologías de los circuitos y ver el comportamiento de los mismos, todos ellos estudiados en las distintas asignaturas relacionadas con la electrónica de potencia. Se han estudiado tanto los rectificadores monofásicos y trifásicos no controlados, de este último de seis y doce pulsos, como los rectificadores monofásico y trifásico controlados. Pudiendo modificarse los parámetros de los distintos circuitos de una manera sencilla por parte del alumno para visualizar el comportamiento de los circuitos y facilitar su comprensión. En ella se podrán simular tanto los casos más simples y sencillos como los más complejos matemáticamente.

Dicha aplicación ha sido unificada con interfaces de proyectos anteriores tanto de convertidores DC/DC [6] como inversores DC/AC [7] para la obtención de una herramienta docente unificada que de soporte a asignaturas con dicho temario. Para poder realizar dicha herramienta completa se han tenido que realizar los cambios oportunos en las interfaces de proyectos anteriores, al haber sido estas creadas con versiones anteriores de Matlab a la utilizada.

Además, todo ello se encuentra dentro del contexto de un proyecto de innovación docente de la Universidad de Alcalá, de título “Mejora del proceso de enseñanza-aprendizaje a través de material de apoyo y auto-estudio particularizado a las necesidades formativas del estudiante”, con referencia es UAH/EV1047.

Por último, se realizarán una serie de pruebas con el cubo de potencia *Semiteach Thyristor* de Semikron en el laboratorio, con una carga resistiva.

El documento expuesto a continuación está estructurado de tal manera que, tras esta pequeña introducción, capítulo 1, se comienza con una base teórica para poner al lector en contexto antes de abarcar la explicación del proyecto, capítulo 2.

A continuación, en el capítulo 3, se procede a la explicación del proyecto realizado, la interfaz gráfica de los rectificadores tanto monofásicos como

trifásicos no controlados y controlados, donde se realizarán además las conclusiones oportunas y comparaciones de los resultados obtenidos en los distintos casos.

En el capítulo siguiente, capítulo 4, se mostrarán las señales obtenidas tras las pruebas en laboratorio y posibles mejoras del mismo para que pueda ser utilizado en la docencia.

Para finalizar se expondrán las conclusiones finales y posibles líneas futuras del proyecto, todo ello en el capítulo 5.

Tras todo ello se indicará el pliego de condiciones necesario para la ejecución del proyecto y su utilización por parte del alumno, de igual modo se indicará el coste del proyecto, diagrama del mismo para mayor comprensión y se recoge un extracto del código Matlab generado en la sección de diagramas del proyecto.

También se incorpora un manual de usuario donde se explicará de manera más detallada la utilización de la herramienta para que cualquier usuario pueda acceder a ella.

Capítulo 2

Base Teórica

2.1 Introducción

En este capítulo se resume de manera breve y detallada la parte teórica de los distintos circuitos rectificadores utilizados en la herramienta docente creada en este proyecto. Se analizan tanto los rectificadores monofásicos como trifásicos no controlados y controlados.

Además, se muestran los cálculos oportunos a realizar para una mayor comprensión de los mismos.

2.2 Convertidores AC/DC no controlados

2.1.1 *Rectificadores monofásicos*

2.1.1.1 Introducción

La fuente primaria de energía eléctrica es la red eléctrica la cual se encuentra como tensión AC monofásica o trifásica. Sin embargo, muchos equipos electrónicos necesitan una tensión continua para funcionar, por ello se utilizan los convertidores AC/DC (rectificadores). Como existe un amplio abanico de aplicaciones existen distintos tipos de rectificadores según la fase, el dispositivo y la conmutación. La rectificación no controlada se lleva a cabo mediante diodos.

Los rectificadores monofásicos normalmente se utilizan en fuentes de alimentación de equipos de baja potencia y normalmente trabajan en modo discontinuo. Estos tipos de rectificadores son sistemas habituales, baratos, robustos y efectivos cuyo mayor problema es producir una mayor distorsión de línea.

2.1.1.2 Rectificador monofásico en puente completo

Se presentarán en este apartado los convertidores AC/DC monofásicos con puente de diodos completo en el cual la red eléctrica se modela como un generador independiente de tensión en serie. En la carga se puede tener una corriente constante lo cual es poco realista en el caso monofásico pero útil para entender los fundamentos básicos de los rectificadores y una tensión constante en las cuales hay un condensador de valor elevado para obtener las tensiones lo más filtradas posibles.

La plataforma creada en el proyecto permite al usuario realizar tanto los casos más simples a corriente constante como casos más complejos matemáticamente hablando en modo conducción discontinuo, casos más realistas. Para que el alumno pueda comprender todo de una manera más fácil.

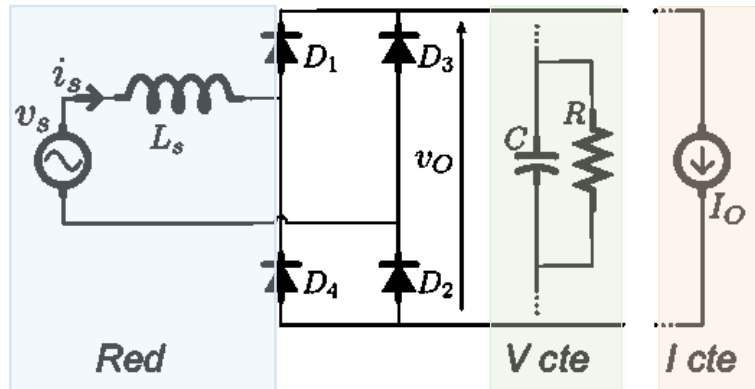


Figura 1. Circuito rectificador en puente completo [1]

2.1.1.2.1 Análisis con corriente constante e inductancia nula ($L_s=0$)

Para una mayor comprensión del circuito rectificador en puente completo se realiza un análisis del mismo suponiendo una red ideal (inductancia de entrada nula) y una red real.

Durante el análisis en una red ideal cuando la tensión de la red es positiva conducen los diodos D_1 y D_2 siendo la conmutación instantánea; mientras que cuando dicha tensión es negativa conducen los diodos D_3 y D_4 quedando a la salida una tensión siempre positiva.

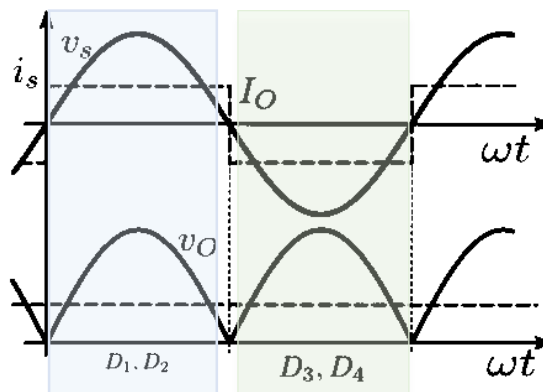


Figura 2. Análisis con red ideal [1]

Para el cálculo del valor medio de la tensión a la salida se utilizará como referencia la Figura 2 mostrada anteriormente aplicando la fórmula siguiente.

$$v_{o,0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}V_s \text{sen}(\omega t) d\omega t = \frac{2\sqrt{2}V_s}{\pi} \approx 0.9V_s \quad (1)$$

Donde $v_{o,0}$ es la tensión media a la salida, v_o es la tensión a la salida y V_s es la tensión a la entrada del circuito.

Como la corriente de entrada es una señal cuadrada bipolar de ciclo de trabajo 0.5 y media nula, el desarrollo en serie de Fourier son armónicos impares tal y como se puede observar en la figura siguiente.

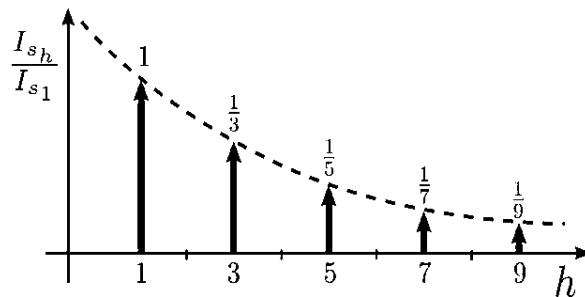


Figura 3. Armónicos de la corriente de entrada [1]

Uno de los inconvenientes más importantes de estos rectificadores es su alto contenido en armónicos, debido a ello es de esperar que el factor de potencia sea algo bajo de un 0.9.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_o I_o}{I_s V_s} = \frac{2\sqrt{2} V_s I_o}{\pi I_o V_s} \Rightarrow PF = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0.9 \quad (2)$$

Donde P es la potencia activa, S la potencia aparente y PF es el factor de potencia. Además I_o es la corriente a la salida e I_s es el valor eficaz de la corriente a la entrada del circuito.

Además, alguno de los valores relevantes del circuito son el factor de potencia de desplazamiento (DPF) que tiene un valor de 1 debido a que el primer armónico de la corriente va en fase con la tensión de red y el valor de la distorsión armónica total de la corriente (THD_i) es de un 48.43%.

$$THD = \frac{I_{sr}}{I_{s1}} = \frac{\sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2}}{I_{s1}} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} - 1} \approx 0.4843 = 48.43\% \quad (3)$$

Donde I_{s1} es el primer armónico de la corriente de entrada del sistema.

2.1.1.2.2 Análisis con corriente constante y efecto de la inductancia de entrada

Considerando el efecto de L_s , la corriente no puede variar de manera instantánea lo cual se puede ver de una manera clara cuando la tensión de la red se hace positiva, D_1 y D_2 se polarizan en directo mientras D_3 y D_4 evolucionan en sentido contrario y la corriente varia de una manera suave de $-I_o$ a I_o .

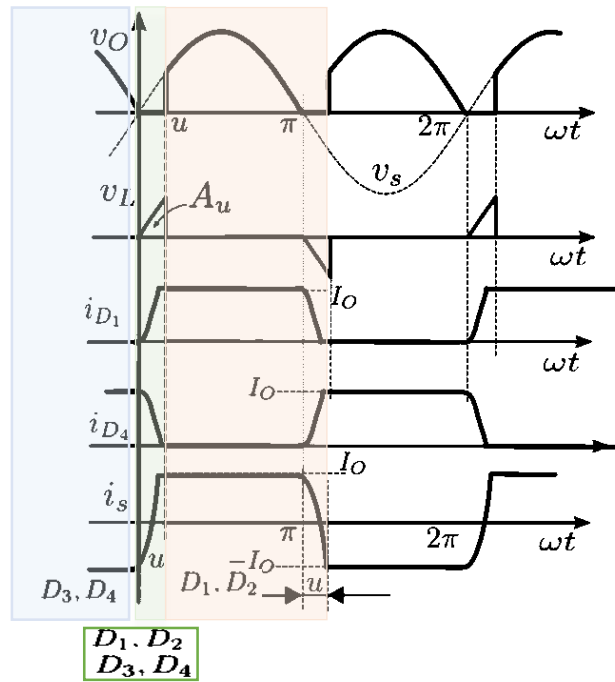


Figura 4. Análisis rectificador monofásico con red real [1]

En este caso, el cálculo del periodo de evolución u (rad) es relevante para lo cual recurrimos al modelo dinámico de la inductancia:

$$v_L(t) = \sqrt{2} V_s \text{sen}(\omega t) d\omega t = \omega L_s di_s \quad (4)$$

Donde v_L es la tensión en la inductancia de entrada siendo L_s dicha inductancia e i_s la corriente a la entrada.

Integrando la ecuación durante la conmutación, resolviendo la integral y despejando la ecuación se obtiene el valor de u :

$$\int_0^u \sqrt{2} V_s \text{sen}(\omega t) d\omega t = \omega L_s \int_{-I_o}^{I_o} di_s \Rightarrow \cos(u) = 1 - \frac{2\omega L_s I_o}{\sqrt{2} V_s} \quad (5)$$

Partiendo del modelo dinámico de la inductancia también se puede calcular el valor de A_u que es el área que se elimina a la tensión de salida una vez cada π radianes, tal y como se muestra en la Figura 4.

$$A_u = \int_0^u v_L(\omega t) d\omega t = \int_0^u \sqrt{2} V_s \text{sen}(\omega t) d\omega t = \omega L_s \int_{-I_o}^{I_o} di_s = 2\omega L_s I_o \quad (6)$$

El análisis realizado anteriormente tanto con red eléctrica ideal como real ha sido considerando que a la salida se obtenida una corriente constante lo cual en la práctica es imposible de conseguir.

2.1.1.2.3 Análisis con tensión constante

Si se realizará un análisis del circuito con una fuente de tensión constante a la salida, se trataría de una aproximación del caso de una carga fuertemente capacitiva.

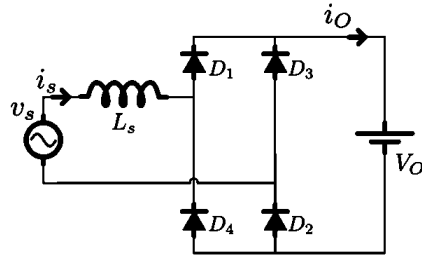


Figura 5. Rectificador monofásico con carga a tensión constante [1]

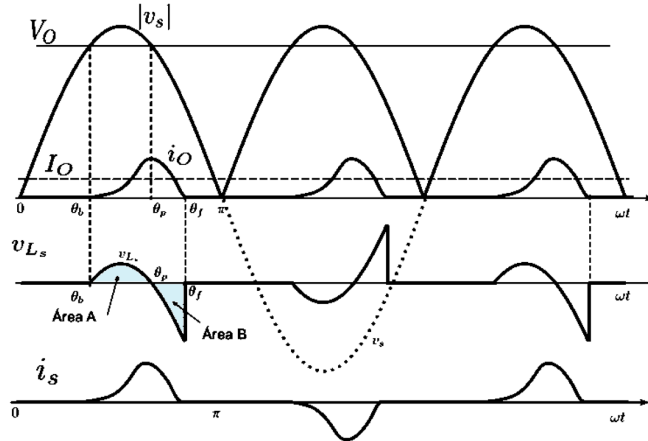


Figura 6. Representaciones destacadas del rectificador monofásico con carga a tensión constante [1]

Observando la Figura 6 se puede decir que el ángulo θ_b viene dado por la fórmula siguiente y que además debido a la simetría $\theta_p = \pi - \theta_b$.

$$\theta_b = \arcsen \frac{V_o}{\sqrt{2}V_s} \quad (7)$$

Donde V_o es la tensión media a la salida del circuito.

Cuando la corriente a la salida no es nula la tensión en la bobina de la entrada del sistema quedaría de la siguiente manera.

$$v_{L_s} = L_s \frac{di_o}{dt} = \sqrt{V_s \text{sen}(\omega t) - V_o} \quad (8)$$

Integrando la ecuación anterior y resolviendo la ecuación se obtendrá la corriente a la salida del sistema.

$$i_o(\theta) = \frac{1}{\omega L_s} \int_{\theta_b}^{\theta} (\sqrt{2}V_s \text{sen}(\omega t) - V_o) d\omega t \quad (9)$$

$$i_o(0) = 0 = \int_{\theta_b}^{\theta_f} \sqrt{2}(V_s \text{sen}(\omega t) - V_o) d\omega t \quad (10)$$

$$I_o = \frac{1}{\pi} \int_{\theta_b}^{\theta_f} i_o(\theta) d\theta \quad (11)$$

2.1.1.2.4 Casos prácticos

En la práctica, los rectificadores monofásicos suelen conectarse a cargas a través de condensadores, obteniendo de este modo filtrar la forma de onda de la tensión de salida y proporcionar una reserva de energía (aislamiento) entre la fuente y la carga.

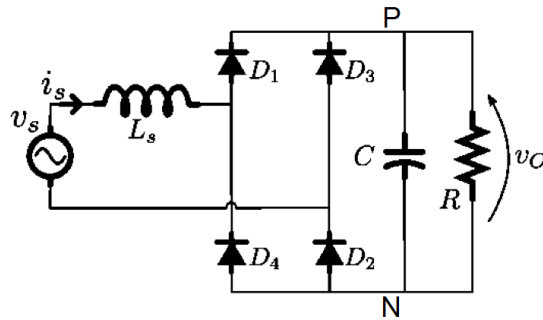


Figura 7. Circuito rectificador monofásico con cargas a través de condensadores [1]

En este tipo de circuitos la tensión a la salida representa un rizado que dependerá de la resistencia en la carga y cuyo valor medio no es controlable.

Por otro lado, la corriente es muy discontinua y picuda y el factor de potencia es muy bajo (≈ 0.5).

Además, uno de los parámetros fundamentales de diseño es el tamaño del condensador para lo cual se tendrá en cuenta el tiempo de carga del condensador, que debe ser mucho menor al de descarga y la descarga que se debe producir con corriente constante. Otro criterio para el diseño del condensador es el de conseguir un determinado tiempo de hold-up, tiempo durante el cual el convertidor DC/DC sigue regulando la salida en ausencia de señal de red.

La ecuación del condensador:

$$\Delta v_c = \frac{1}{C} \Delta Q = \frac{1}{C} I_o t_{des} \quad (12)$$

Donde Δv_c es el incremento de la tensión en el condensador a la salida, C es el valor de dicho condensador y ΔQ el incremento de carga. Además, t_{des} es el tiempo de desplazamiento.

Si se realiza una aproximación de $t_{des} = \frac{T}{2}$ se comete un error del 3%.

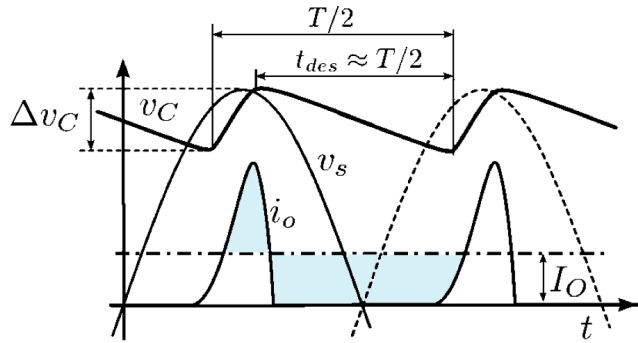


Figura 8. Representaciones destacadas del rectificador monofásico con carga a través de condensadores [1]

Para este caso práctico se muestran a continuación alguna de las simulaciones obtenidas con la interfaz siendo la inductancia de entrada aproximadamente nula.

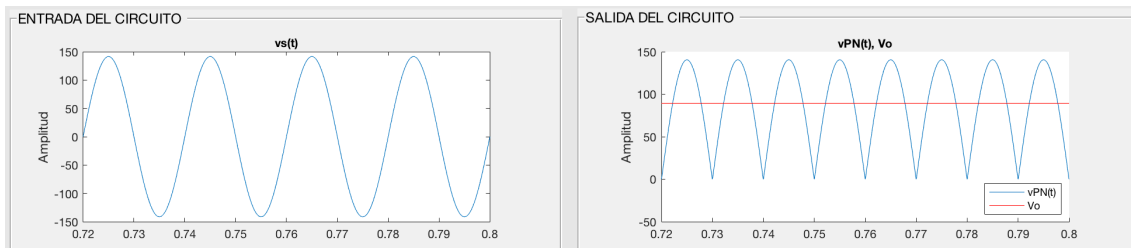


Figura 9. Simulaciones del rectificador monofásico no controlado obtenidas de la interfaz gráfica

Las próximas simulaciones obtenidas muestran la tensión a la entrada y la tensión a la salida cuando la inductancia a la entrada no es nula, si no que tiene un valor de 0.001H.

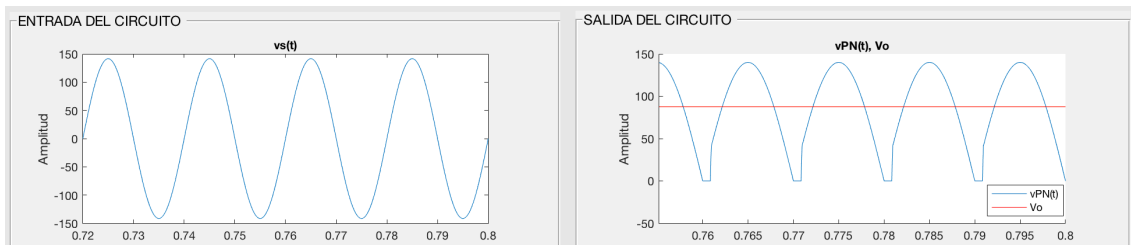


Figura 10. Simulación del rectificador monofásico no controlado obtenidas de la interfaz gráfica

2.1.2 Rectificadores trifásicos

2.1.2.1 Introducción

Este tipo de rectificadores son interesantes usarlos en aplicaciones industriales debido a que consumen potencia instantánea constante, presentan un rizado mucho menor a los monofásicos y capaces de manejar más potencia. Además, se emplean en aplicaciones de más potencia donde el modo de conducción continua, MCC, es mucho más habitual. Aunque su mayor problema es la producción de mucha distorsión en línea.

Se hará una exposición de los rectificadores trifásicos de seis y doce pulsos, cuya estructura de rectificadores multipulso es habitual en aplicaciones de alta potencia o donde se requieran altas calidades en la corriente de red. Esencialmente se realizan asociaciones en serie de rectificadores trifásicos no controlados para que el rizado de los convertidores quede intercalado. Su construcción es sencilla, aunque incrementa el coste.

2.1.2.2 Rectificador trifásico de seis pulsos

En este apartado se mostrará el comportamiento del circuito con una carga de corriente constante. Posteriormente se analizará en el caso en que la corriente no sea constante. Su topología es la siguiente.

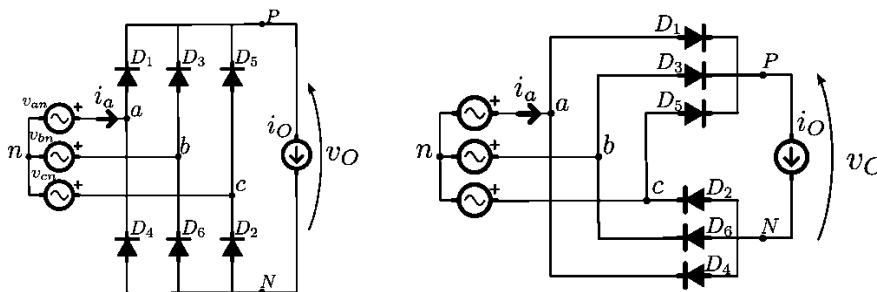


Figura 11. Rectificador trifásico no controlado de seis pulsos con corriente constante [2]

Al igual que en el rectificador monofásico no controlado se realiza un análisis del circuito cuando la red eléctrica es ideal y cuando es real para una mayor comprensión del mismo.

2.1.2.2.1 Análisis con corriente constante e inductancia nula ($L_s=0$)

A continuación, se expone el caso en que la red eléctrica es ideal en el cual dado la simetría se puede calcular el valor medio de la tensión de salida fijándose en la Figura 12 usando la ecuación siguiente:

$$V_{o,0} = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{2} V_{LL} \cos(\omega t) d\omega t = \frac{3\sqrt{2} V_{LL}}{\pi} \approx 1.35 V_{LL} \quad (13)$$

Donde V_{LL} es la tensión de línea.

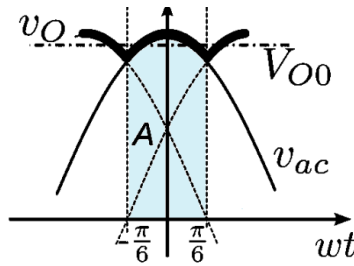


Figura 12. Representación para el cálculo del valor medio de la tensión de salida [2]

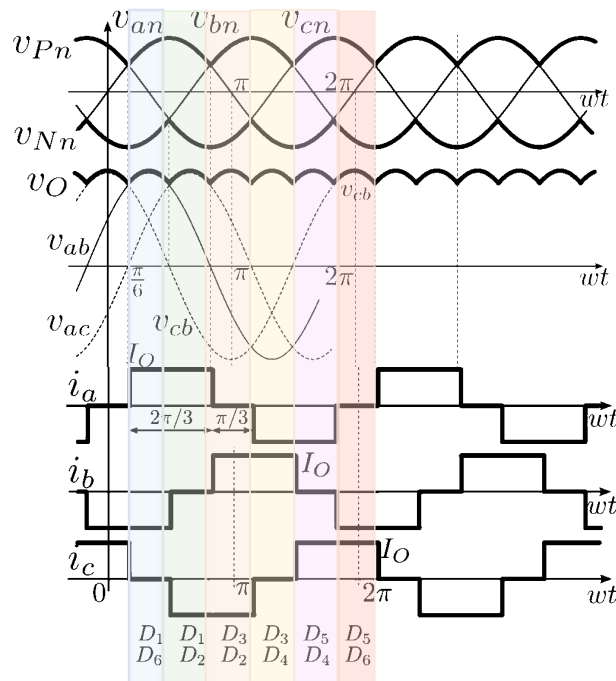


Figura 13. Representaciones destacadas del rectificador trifásico no controlado de seis pulsos red eléctrica ideal [2]

Observando la corriente obtenida en la red, una señal cuadrada se sabe que el valor eficaz de la misma viene dado por la siguiente ecuación y cuyos armónicos si se realiza la serie de Fourier son impares no múltiplos de 3.

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_a^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} I_o^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_o \quad (14)$$

Donde I_a es la corriente media a la entrada en la rama a del circuito e i_a es la dicha corriente a la entrada.

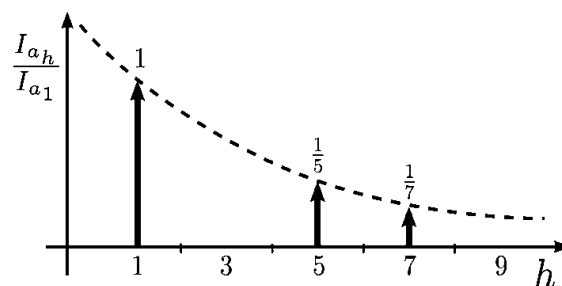


Figura 14. Armónicos de la corriente de entrada [2]

Dado el alto contenido en armónicos de la señal es de esperar que el factor de potencia sea algo bajo, de un 0.95 pero si es comparado con el rectificador monofásico ha habido una mejora de 0.05.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_o I_o}{\sqrt{3} I_a V_{LL}} = \frac{\frac{3\sqrt{2} V_{LL} I_o}{\pi}}{\sqrt{2} V_{LL} \sqrt{\frac{2}{3}} I_o} \Rightarrow PF = \frac{3}{\pi} = 0.95 \quad (15)$$

Además, alguno de los valores relevantes del circuito son el DPF que tiene un valor de 1 debido a que el primer armónico de la corriente va en fase con la tensión de red y el valor de la distorsión armónica de un 31%. Si comparamos el valor obtenido con el caso del rectificador monofásico vemos que hay una mejora ya que el valor de la distorsión armónica pasa de 48.43% al 31%, es decir, hay menor distorsión debido a que el primer armónico es mayor en el trifásico.

$$THD = \frac{I_{ar}}{I_{a1}} = \frac{\sqrt{I_a^2 - I_{a1}^2}}{I_{a1}} = \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - 1} \approx 0.31 = 31\% \quad (16)$$

Si la carga utilizada exige potencias muy altas es mejor utilizar rectificadores trifásicos a los monofásicos.

2.1.2.2.2 Análisis con corriente constante y efectos de la inductancia de entrada

Ahora se pasará a la exposición del circuito cuando la red es real (considerando el efecto de L_s) para una mayor comprensión del mismo.

Cuando $t = 0^-$ la corriente de la salida circula por los diodos D_5 y D_6 , durante la conmutación, mientras que $t < u$, D_1 se polariza en directo por lo que la corriente i_a evoluciona a I_o e i_c evoluciona a cero. Finalmente, cuando la conmutación ha terminado $t = u$, $v_o = v_{ab}$.

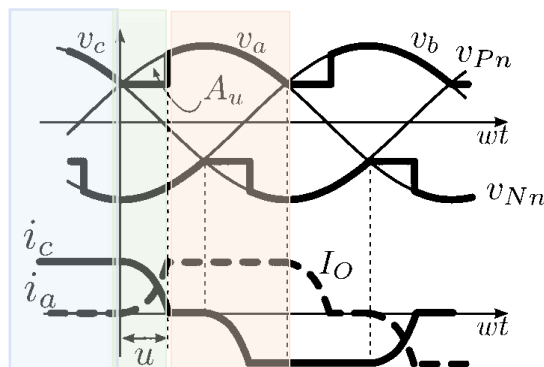


Figura 15. Representaciones destacadas del rectificador trifásico no controlado de seis pulsos red eléctrica real [2]

Para el cálculo del tiempo de conmutación u se plantea la ecuación de malla formada por los diodos D_1 y D_5 que se encuentran en conducción durante la misma colocando el origen del tiempo como el mostrado en la Figura 15.

$$v_{an} - v_{cn} = L_s \frac{di_a}{dt} - L_s \frac{di_c}{dt} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} i_c = I_o - i_a \\ v_{an} - v_{cn} = v_{ac} = \sqrt{2} V_{LL} \text{sen}(\omega t) \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\sqrt{2} V_{LL} \text{sen}(\omega t) = 2\omega L_s \frac{di_a}{d\omega t} \quad (17)$$

Integrando la ecuación y despejando el parámetro u, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\int_0^u \sqrt{2} V_{LL} \text{sen}(\omega t) d\omega t = 2\omega L_s \int_0^{I_o} di_a \Rightarrow \cos(u) = 1 - \frac{2\omega L_s I_o}{\sqrt{2} V_{LL}} \quad (18)$$

Por último, para el cálculo de A_u observando la Figura 15, es el área encerrada entre v_{an} y v_p el cual se elimina de la tensión de salida seis veces cada periodo.

$$A_u = \int_0^u (v_{an} - v_{pn}) d\omega t = \int_0^u V_{La} d\omega t = \omega L_s \int_0^{I_o} di_a \Rightarrow A_u = \omega L_s I_o \quad (19)$$

El estudio del circuito con corriente constante realizado es muy conveniente a nivel didáctico por su simplicidad.

2.1.2.2.3 Análisis con tensión constante

Cuando se encuentra ante un circuito con tensión DC constante a la salida tanto por una fuente de alimentación o por que el condensador de filtrado sea grande se asumirá que la corriente es discontinua.

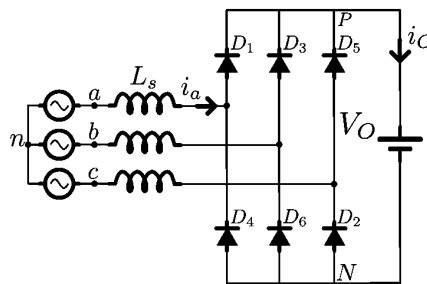


Figura 16. Rectificador trifásico no controlado de seis pulsos con tensión constante [2]

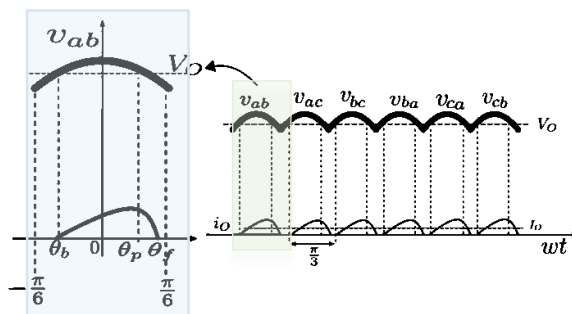


Figura 17. Representaciones destacadas del rectificador trifásico no controlado de seis pulsos con tensión constante [2]

Observando la Figura 17 se puede decir que el ángulo θ_p viene dado por la fórmula siguiente y que además debido a la simetría $\theta_p = -\theta_b$.

$$\theta_p = \arccos \frac{V_o}{\sqrt{2} V_{LL}} \quad (20)$$

Donde θ_p es el ángulo donde coinciden nuevamente la tensión v_{ab} y la tensión media a la salida del sistema.

Cuando la corriente a la salida no es nula la tensión en la bobina de la entrada del sistema quedaría de la siguiente manera.

$$v_{L_s} = L_s \frac{di_o}{dt} = \sqrt{2}V_{LL} \cos(\omega t) - V_o \quad (21)$$

Integrando la ecuación anterior y resolviendo la ecuación se obtendrá la corriente a la salida del sistema.

$$i_o(\theta) = \frac{1}{\omega L_s} \int_{\theta_b}^{\theta} (\sqrt{2}V_{LL} \text{sen}(\omega t) - V_o) d\omega t \quad (22)$$

$$i_o(0) = 0 = \int_{\theta_b}^{\theta_f} \sqrt{2}(V_{LL} \text{sen}(\omega t) - V_o) d\omega t \quad (23)$$

$$I_o = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} i_o(\theta) d\theta \quad (24)$$

2.1.2.2.3 Casos prácticos

El comportamiento de los convertidores reales no se tiene tensión o corriente constante y su topología es la mostrada a continuación.

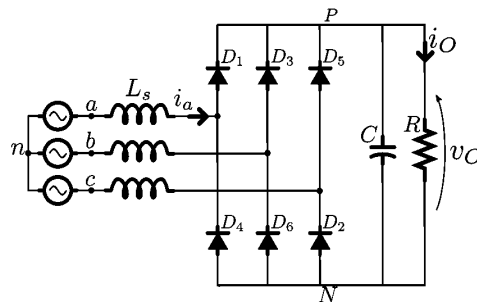


Figura 18. Rectificador trifásico no controlado real [2]

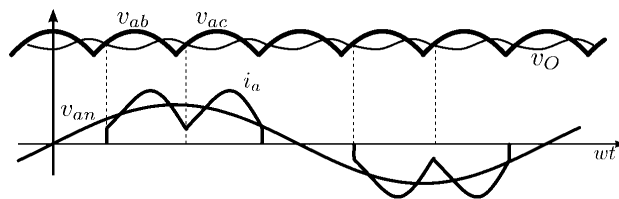


Figura 19. Representaciones destacadas del rectificador trifásico no controlado real [2]

Al igual que en el caso del rectificador monofásico el análisis del circuito es más complejo por lo cual se utilizan herramientas de simulación para ello como la creada en este proyecto. Algunas de las simulaciones obtenidas con dicha herramienta tanto en caso de que la inductancia de entrada sea nula como si no, en cuyo caso el valor de ella es de 0.001, son las mostradas en las figuras siguientes.

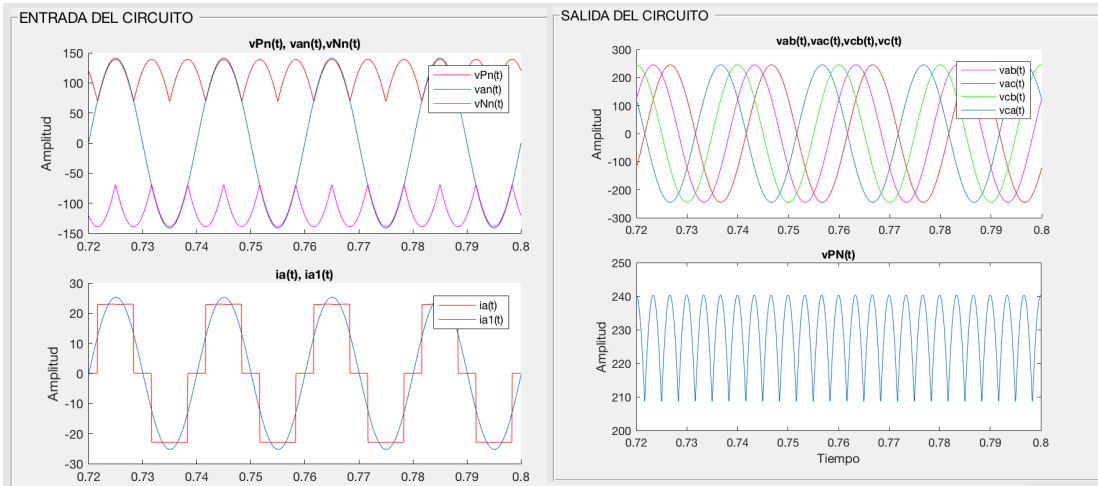


Figura 20. Simulaciones del rectificador trifásico de seis pulsos con inductancia de entrada nula

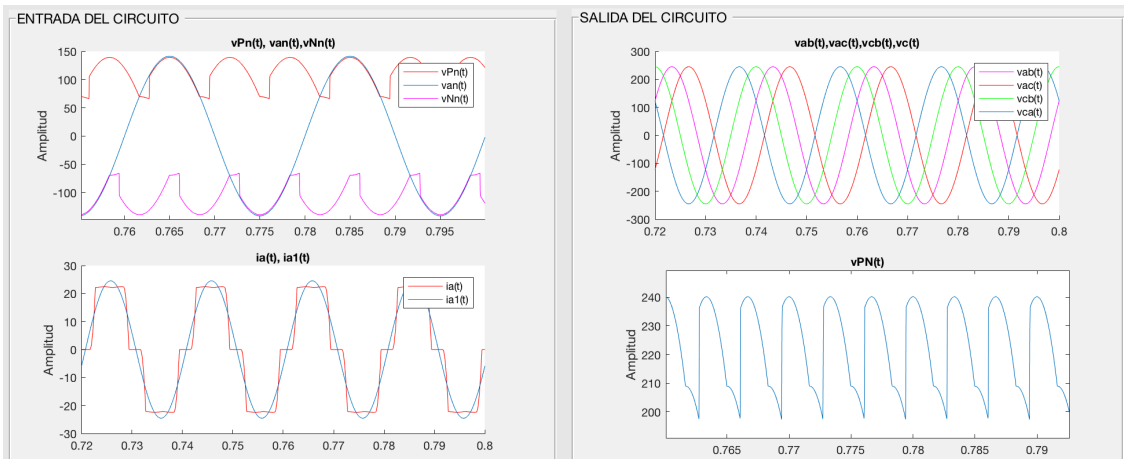


Figura 21. Simulaciones del rectificador trifásico de seis pulsos con inductancia de entrada

2.1.2.3 Rectificador trifásico de doce pulsos

El rectificador trifásico de doce pulsos está compuesto de dos rectificadores intercalados lo cual tiene una repercusión en la calidad de la señal DC y también en la calidad de las corrientes AC.

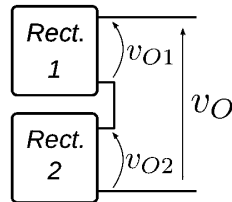


Figura 22. Composición del rectificador de doce pulsos [2]

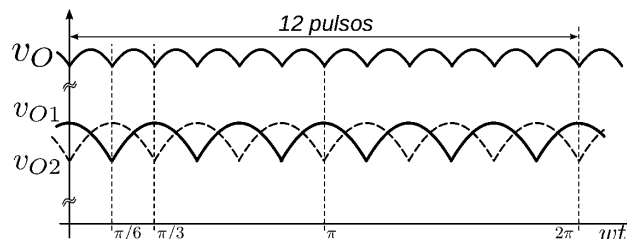


Figura 23. Representación de la tensión a la salida del rectificador trifásico de doce pulsos [2]

Para realizar la construcción de un rectificador de $6 \cdot n$ pulsos es necesario desfasar los rectificadores $\frac{\pi}{3n}$, por lo tanto, para el caso a exponer que es el rectificador de doce pulsos se debe desfasar las tensiones de línea 30° ($\frac{\pi}{6}$ rad) además de ser idénticas $V_{oi} = V_o/n$.

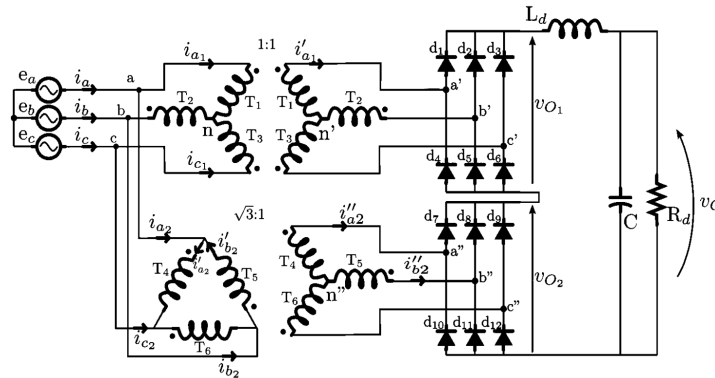


Figura 24. Rectificador trifásico no controlado de doce pulsos [2]

Observando la figura anterior y fijándose concretamente en la relación Y | Y, se puede ver que es 1:1 por lo que la corriente $i_{a1} = i'_{a1}$ y la tensión $v_{an} = v_{a'n'}$

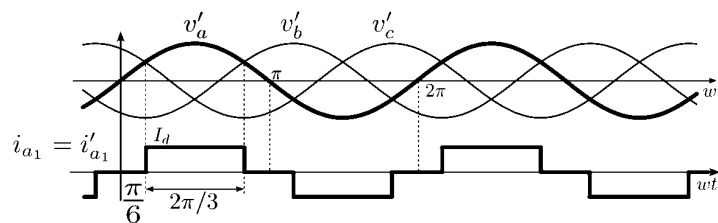


Figura 25. Representaciones destacadas del rectificador trifásico no controlado de 12 pulsos [2]

La relación $\Delta | Y$ es $\sqrt{3} : 1$ y la corriente $i_{a2} = i'_{a2} - i'_{b2}$, además las corrientes y tensiones son las mostradas en la Figura 26.

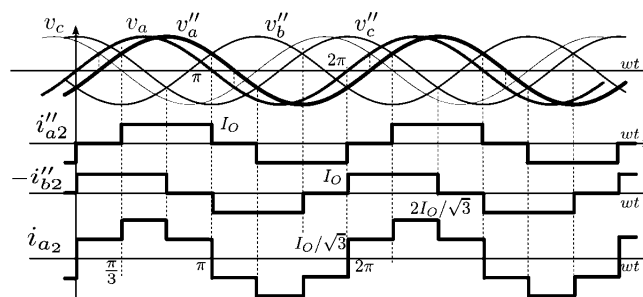


Figura 26. Representaciones destacadas del rectificador trifásico no controlado de 12 pulsos [2]

Sumando ambas corrientes se obtiene la corriente que consume el rectificador de la red eléctrica $i_a = i_{a1} + i_{a2}$.

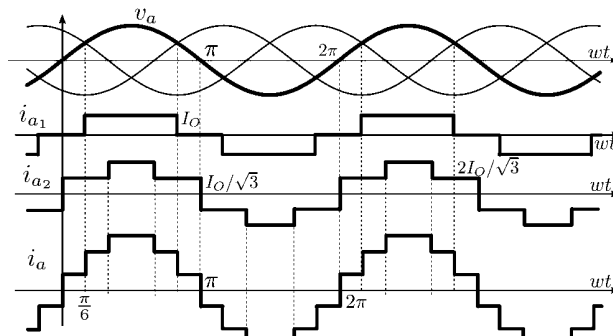


Figura 27. Representaciones destacadas de rectificador trifásico no controlado de 12 pulsos [2]

Como se puede ver en la Figura 27 la corriente i_a va en fase con v_a por lo que el DPF=1. Y su contenido armónico es mucho menor que el de un rectificador estándar.

Otras estructuras posibles para conseguir el mismo resultado serían las mostradas en la figura siguiente. Todas ellas se podrían utilizar para construir estructuras de 18,24,32,48... pulsos.

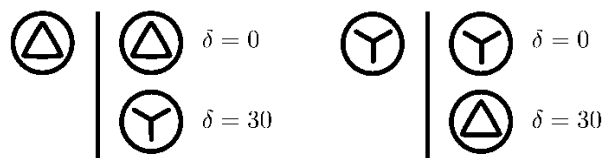


Figura 28. Estructuras rectificador trifásico de 12 pulsos [2]

Las figuras mostradas anteriormente son en el caso en que la red sea ideal, es decir, la inductancia de entrada nula. Para el caso en que la inductancia no sea nula se muestran las simulaciones obtenidas a través de la herramienta realizada en este proyecto son las mostradas en la Figura 30.

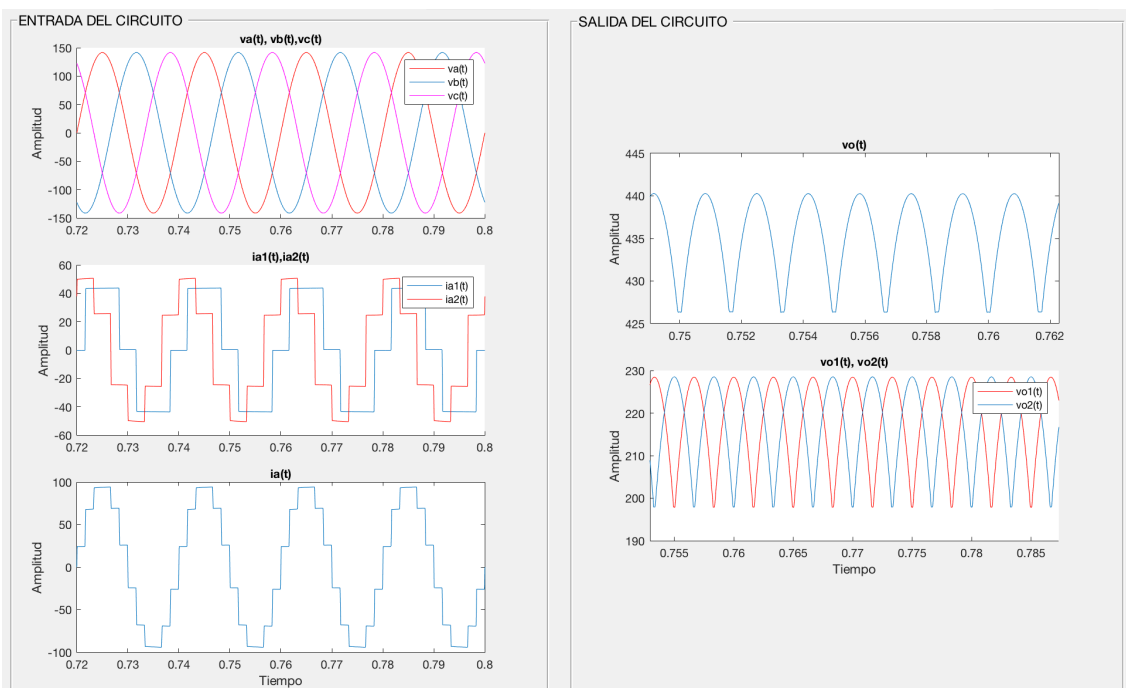


Figura 29. Simulaciones del rectificador trifásico de 12 pulsos con red ideal obtenidas de la aplicación

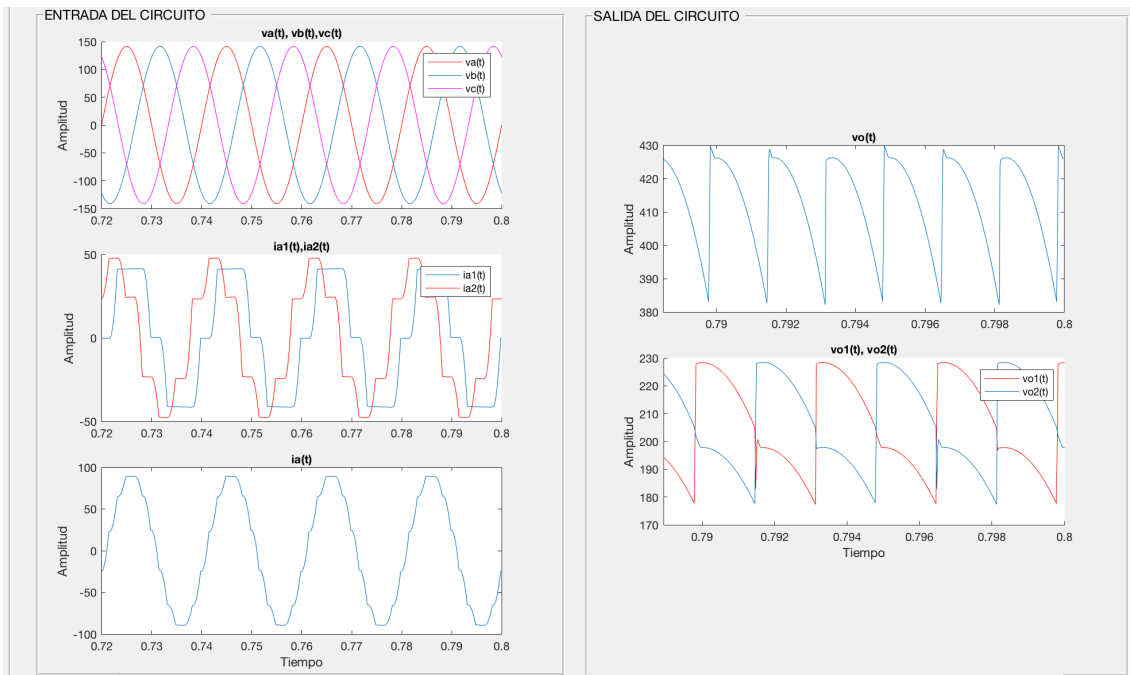


Figura 30. Simulaciones del rectificador trifásico de 12 pulsos con red real obtenidas de la aplicación

Si se comparan los resultados obtenidos entre el rectificador trifásico de seis y doce pulsos se ve que hay una mejora en la distorsión armónica total de uno a otro, tanto en una red ideal como una real. Sin embargo, el factor de potencia si la red es ideal mejora de uno a otro, siendo de 0.96 en el rectificador trifásico de seis pulsos y de 0.99 en el de doce pulsos, en cambio si la red es real empeora de 0.8 a 0.43.

2.2 Convertidores AC/DC controlados

2.2.1 Rectificadores monofásicos

2.2.1.1 Introducción

Los rectificadores expuestos anteriormente proporcionan tensiones medias que hasta cierto punto son sólo función de V_S , pero en algunas circunstancias es deseable que la tensión media de la salida sea controlable.

La utilización de tiristores en lugar de diodos permite la controlabilidad de la tensión rectificada a niveles de potencia no alcanzables por otros dispositivos y del funcionamiento en dos cuadrantes.

Los tiristores son dispositivos semi-controlados, normalmente usados en conmutación natural; se accionan al inyectar una corriente de puerta y se mantienen activados hasta que la tensión ánodo-cátodo tiene un valor negativo o hasta que la corriente impuesta por el circuito externo tiene un valor suficientemente bajo.

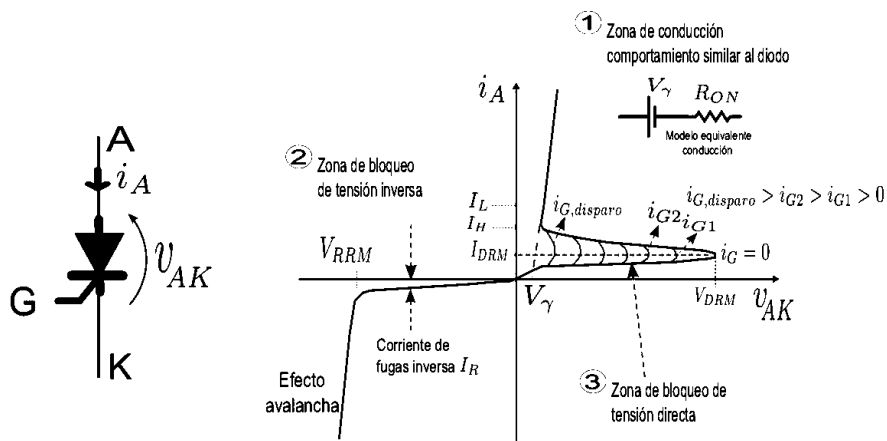


Figura 31. Características del tiristor [3]

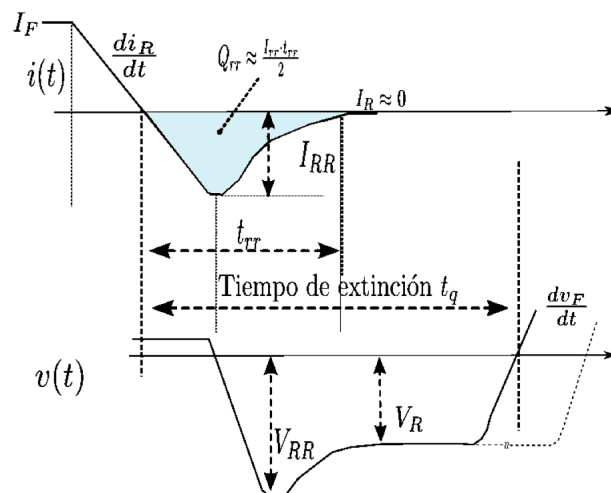


Figura 32. Tiempos relevantes del tiristor [3]

Observando la figura anterior, uno de los tiempos relevantes es el tiempo de

extinción t_q , el cual, es el tiempo mínimo que debe transcurrir entre que se invierte la intensidad en el ánodo y el instante en que se aplica una tensión ánodo-cátodo positiva sin que el tiristor entre en conducción (bloqueo directo).

2.2.1.2 Rectificador monofásico controlado en puente completo

La estructura de los rectificadores monofásicos controlados en puente completo es idéntica que la de los no controlados, pero utilizando tiristores disparados a un ángulo α . El tiristor conduce con una tensión máxima (V_{AK}) si se activa la puerta hasta que comience otro a conducir y se extinga la corriente.

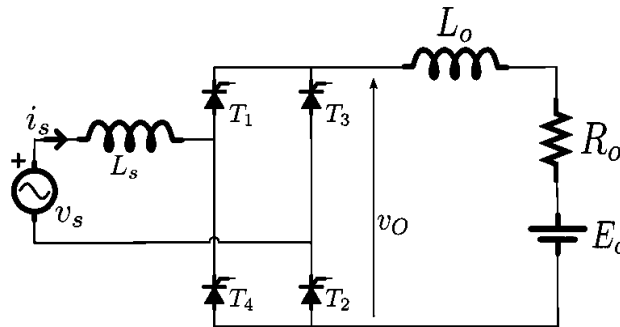


Figura 33. Circuito rectificador controlado en puente completo [3]

Para una mayor comprensión del circuito rectificador en puente completo se realiza un análisis del mismo suponiendo una red ideal (inductancia de entrada nula) y una red real.

2.2.1.2.1 Análisis con red ideal ($L_s=0$) y corriente constante

Observando la figura siguiente se puede decir que el funcionamiento del circuito es similar al rectificador monofásico controlado salvo por el retraso que se produce en la conducción de los dispositivos, el cual afecta tanto a la tensión rectificada como a las corrientes de línea. Además, durante el tiempo de 0 a α el rectificador está entregando energía a la fuente que se podría usar para invertir.

Cuando se encuentran activos los tiristores T_1 y T_2 la tensión de salida es igual a la de la entrada mientras que estando activos T_3 y T_4 la tensión de salida es la tensión a la entrada invertida.

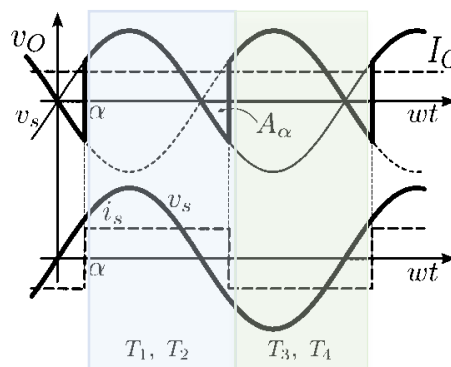


Figura 34. Análisis con red ideal [3]

Para el cálculo del valor medio de la tensión a la salida se recurre a la definición particularizando en el problema en concreto.

$$v_{O\alpha} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_O(\omega t) d\omega t \Rightarrow v_{O\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) d\omega t = 0.9V_s \cos(\alpha) \quad (25)$$

Donde $v_{O\alpha}$ es la tensión a la salida en función del valor de alpha, es decir, el ángulo de disparo del tiristor.

Aunque también se puede expresar en función del área A_α mostrada en la figura siguiente.

$$V_{O\alpha} = V_{O0} - \Delta V_{O\alpha} = V_{O0} - \frac{A_\alpha}{\pi} \quad (26)$$

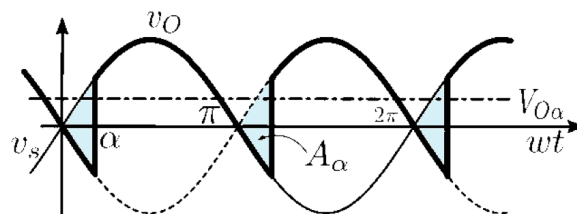


Figura 35. Cálculo tensión media a la salida a través del área A_α [3]

La corriente de entrada es una señal cuadrada bipolar de ciclo de trabajo 0.5 y media nula al igual que en rectificador controlado, pero se encuentra desfasada lo cual afectará al PF. El desarrollo en serie de Fourier son armónicos impares tal y como se puede observar en la figura siguiente

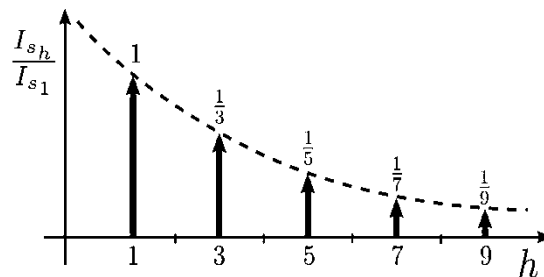


Figura 36. Armónicos de la corriente de entrada [3]

Este rectificador no alcanza el factor de potencia unitario debido a la alimentación por un tono puro de tensión lo que produce infinitos armónicos y al ángulo de disparo que reduce la potencia entregada al primer armónico.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_o I_o}{I_s V_s} = \frac{2\sqrt{2}V_s I_o \cos(\alpha)}{\pi I_o V_s} \Rightarrow PF = \frac{2\sqrt{2} \cos(\alpha)}{\pi} \approx 0.9 \cos(\alpha) \quad (27)$$

Además, alguno de los valores relevantes del circuito son el DPF que tiene un valor de $\cos(\alpha)$ y el valor de la distorsión armónica de un 48.43%.

$$DPF = \cos(\alpha) \quad (28)$$

$$THD = \frac{I_{Sr}}{I_{S1}} = \frac{\sqrt{I_S^2 - I_{S1}^2}}{I_{S1}} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} - 1} \approx 0.4843 = 48.43\% \quad (29)$$

El ángulo de disparo influye de manera directa en la potencia activa consumida por el sistema, por el contrario, la potencia aparente se mantiene constante y el primer armónico de ella es menor debido a los armónicos tal y como se puede ver en la figura siguiente. Cuando dicho ángulo de disparo supera los $\frac{\pi}{2}$ el tiristor pasa a modo inesor hasta alcanzar un valor aproximado de π , debido al tiempo de extinción el valor no puede ser menor el de π .

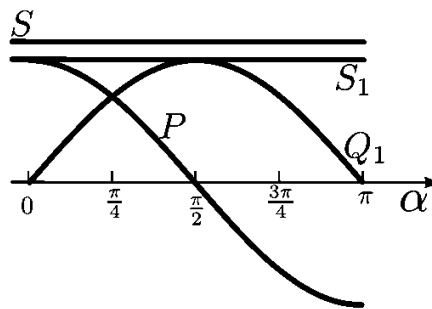


Figura 37. Influencia del ángulo de disparo en la potencia activa, aparente y reactiva [3]

2.2.1.2.1 Análisis con red real ($L_s \neq 0$) y corriente de salida constante

Considerando el efecto de L_s , la corriente no puede variar de manera instantánea lo cual se puede ver de una manera clara en el momento de activarse la señal de puerta de un tiristor que dura u radianes.

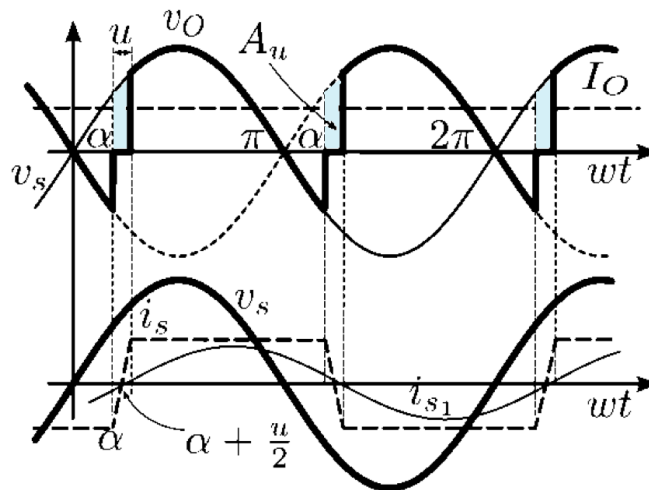


Figura 38. Análisis rectificador monofásico con red real [3]

En este caso el cálculo del periodo de evolución u (rad) es relevante para lo cual se plantean las ecuaciones de la inductancia de línea:

$$\int_{\alpha}^{\alpha+u} \sqrt{2} V_s \sin(\omega t) d\omega t = \omega L_s \int_{-I_o}^{I_o} di_s \Rightarrow \cos(\alpha + u) = \cos(\alpha) - \frac{2\omega L_s I_o}{\sqrt{2} V_s} \quad (30)$$

Debido a este tiempo de conmutación se pierde cierta área de tensión en la salida A_u .

$$A_u = \int_{\alpha}^{u+\alpha} v_L(\omega t) d\omega t = \int_{\alpha}^{u+\alpha} \sqrt{2} V_s \text{sen}(\omega t) d\omega t = 2\omega L_s I_o \quad (31)$$

La pérdida de dicha tensión implica la modificación de la tensión media a la salida.

$$V_{O\alpha, L_s} = V_{O\alpha} - \frac{A_u}{\pi} = V_{O0} - \Delta V_{O\alpha} - \frac{A_u}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cos(\alpha) - \frac{2\omega L_s I_o}{\pi} \quad (32)$$

Cuando baja la corriente del sistema se vuelve discontinua y los valores elevados de E_o producen una disminución en la carga del sistema.

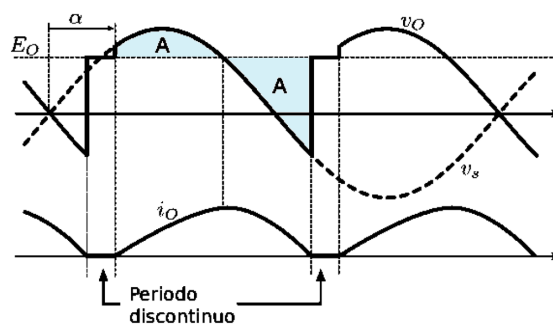


Figura 39. Funcionamiento en modo discontinuo [3]

El rectificador monofásico controlado puede actuar en modo inversión si la tensión a la salida pasa a ser negativa lo cual es posible gracias a que en la carga existe una fuente de energía E_o y ocurre para un ángulo de disparo $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$. La carga entrega potencia a la fuente de tensión de entrada.

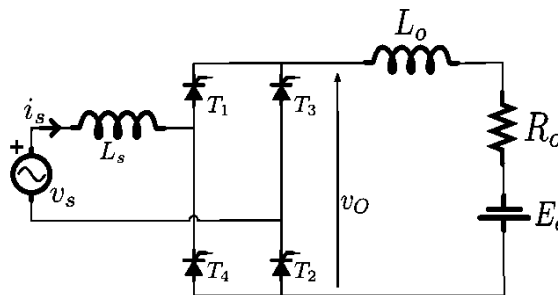


Figura 40. Rectificador monofásico controlado en modo inversor [3]

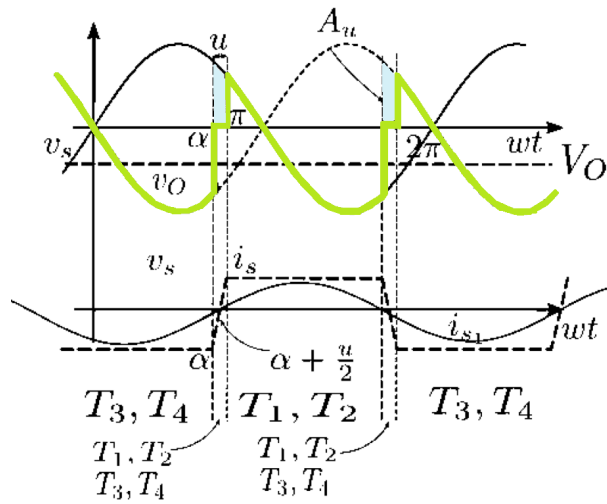


Figura 41. Representaciones destacadas del rectificador monofásico controlado en modo inversor [3]

Se debe garantizar un tiempo de apagado o extinción (t_q) antes de aplicar sobre el tiristor una tensión positiva (peligro de disparo involuntario) lo que implica que $\gamma = \pi - (\alpha + u) \geq \omega t_q$.

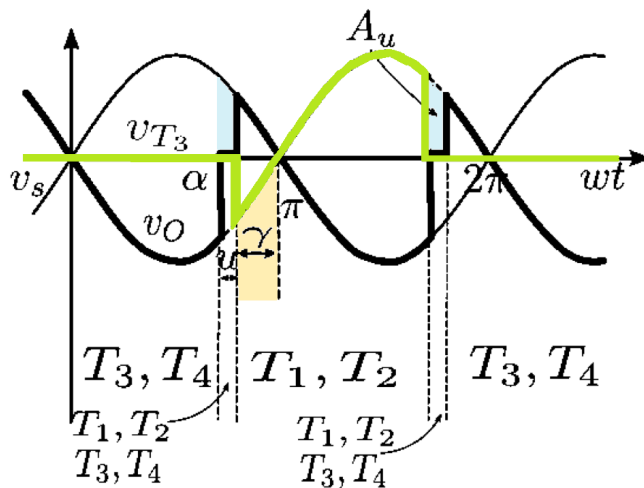


Figura 42. Representación para saber el tiempo de apagado [3]

Para una mayor comprensión se muestran algunas de las simulaciones obtenidas tanto con red ideal como real a partir de la herramienta realizada, en cuyo caso el ángulo de disparo es de 30° .

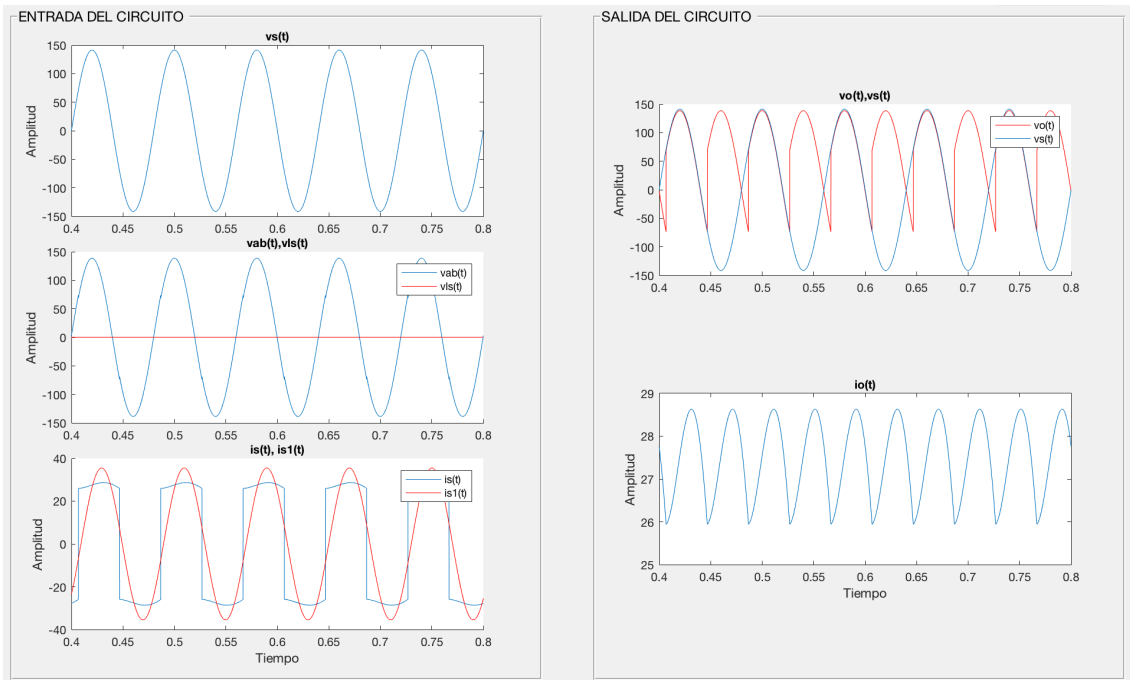


Figura 43. Simulaciones del rectificador monofásico controlado con red ideal obtenida de la aplicación con ángulo de disparo de 30°

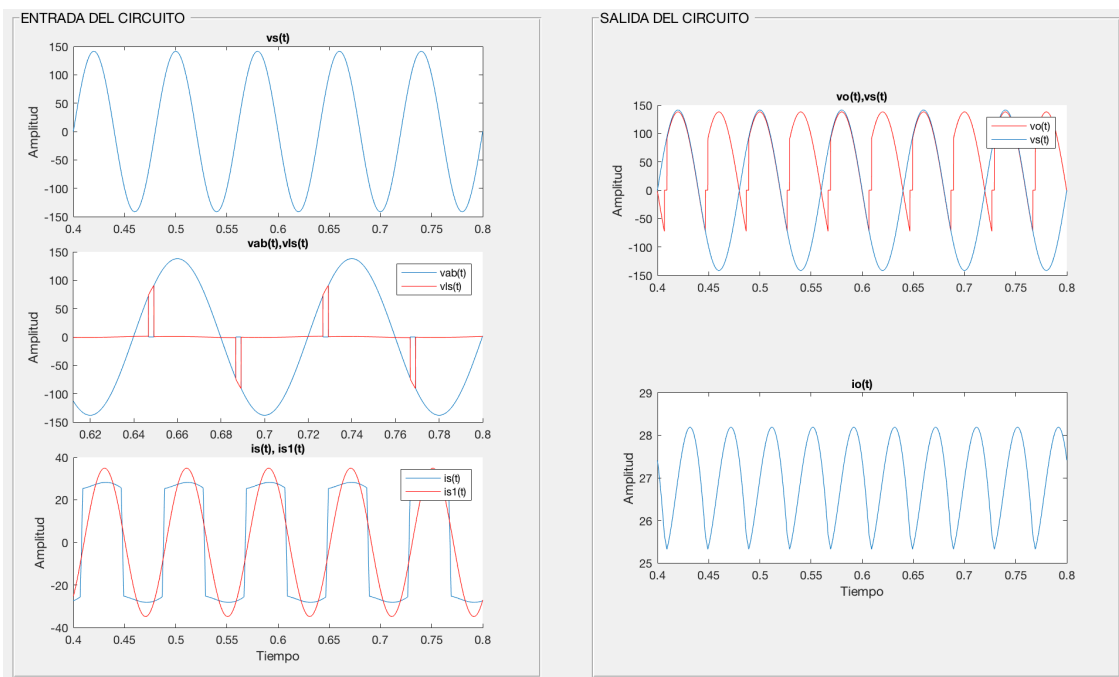


Figura 44. Simulación del rectificador monofásico controlado con real obtenida de la aplicación con ángulo de disparo de 30°

2.2.2 Rectificadores trifásicos

2.2.2.1 Introducción

Este tipo de rectificadores son interesantes usarlos en aplicaciones industriales debido a que consumen potencia instantánea constante, presentan un rizado mucho menor a los monofásicos y capaces de manejar más potencia.

Se hará una exposición de los rectificadores trifásicos de seis pulsos y por simplicidad se expondrá el caso con corriente constante en la carga.

2.2.2.2 Rectificador trifásico de seis pulsos

En este apartado se mostrará el comportamiento del circuito con una carga de corriente constante cuya topología es la siguiente.

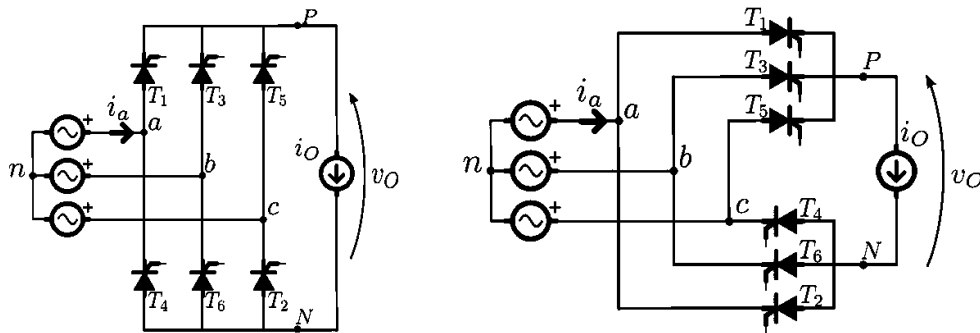


Figura 45. Rectificador trifásico controlado de seis pulsos con corriente constante [3]

Al igual que en el rectificador monofásico controlado se realiza un análisis del circuito cuando la red eléctrica es ideal y cuando es real para una mayor comprensión del mismo.

2.2.2.2.1 Análisis con red ideal ($L_s=0$) y corriente constante

A continuación, se expone el caso en que la red eléctrica es ideal donde los tiristores son disparados a un ángulo de α y la conmutación de dispositivos se retrasa en dicho ángulo respecto al momento natural lo cual afecta al desfase de las corrientes i_a y a la forma de onda v_o .

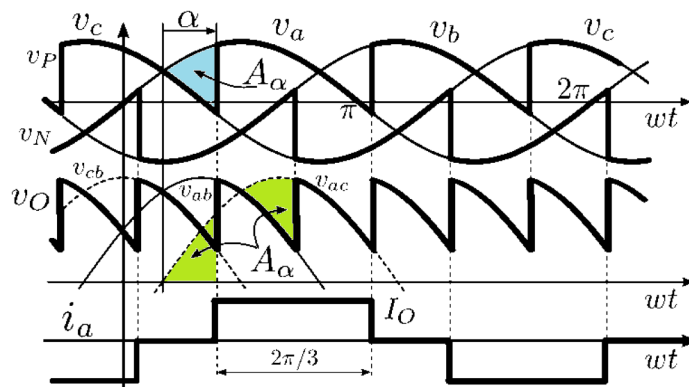


Figura 46. Representaciones destacadas del rectificador trifásico controlado [3]

Para calcular el valor medio de la tensión de salida se utilizará el área A_α que se puede observar en diferentes lugares de la forma de onda, es conveniente que el área sea la encerrada por una tensión de línea expresada en seno entre 0 y α .

$$V_{O\alpha} = V_{O0} - \frac{A_\alpha}{\pi/3} \quad (33)$$

$$A_\alpha = \int_0^\alpha \sqrt{2} V_{LL} \sin(\omega t) d\omega t = \sqrt{2} V_{LL}(1 - \cos(\alpha)) \quad (34)$$

Combinando ambas ecuaciones se obtiene el valor de la tensión media.

$$V_{O\alpha} = V_{O0} - \frac{A_\alpha}{\pi/3} = \frac{3\sqrt{2} V_{LL}}{\pi} \cos(\alpha) \approx 1.35V_{LL} \cos(\alpha) \quad (35)$$

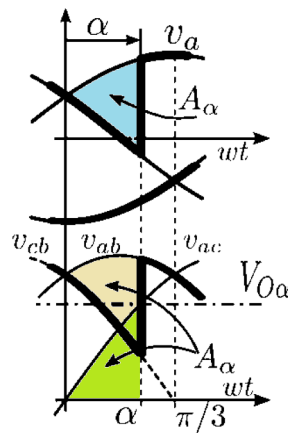


Figura 47. Representación para el cálculo del valor medio de la tensión de salida [3]

Observando la corriente obtenida en la red, una señal cuadrada se sabe que el valor eficaz de la misma viene dado por la siguiente ecuación y del cual no depende de la fase de i_s .

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} I_o \quad (36)$$

La distribución armónica de una señal periódica no se ve afectada por los desfases por tanto la corriente i_s presenta armónicos impares no múltiplos de 3.

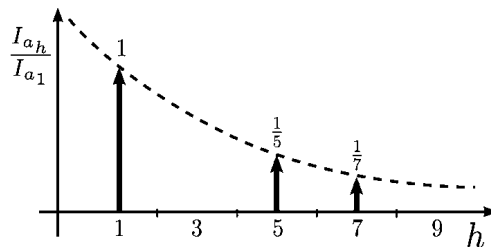


Figura 48. Armónicos de la corriente de entrada [3]

Con los valores anteriores se puede calcular el valor de la distorsión armónica THD. El cual si es comparado con el obtenido en el rectificador monofásico controlado vemos que mejora ya que disminuye de 44.93% al 31%.

$$THD = \frac{I_{ar}}{I_{a1}} = \frac{\sqrt{I_a^2 - I_{a1}^2}}{I_{a1}} = \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - 1} \approx 0.31 = 31\% \quad (37)$$

El factor de potencia se ve afectado por el ángulo de disparo tal y como se muestra a continuación al igual que el DPF.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_o I_o}{\sqrt{3} I_a V_{LL}} = \frac{\frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} I_o \cos(\alpha)}{\sqrt{2} V_{LL} \sqrt{\frac{2}{3}} I_o} \Rightarrow PF = \frac{3}{\pi} \cos(\alpha) \quad (38)$$

$$DPF = \cos(\alpha) \quad (39)$$

Si comparamos el factor de potencia del rectificador monofásico a este teniendo en cuenta que en ambos casos el ángulo de disparo de los tiristores es de 30° , se obtiene que varía de 0.78 a 0.82, por lo que se puede decir que mejora de uno a otro.

2.2.2.2 Análisis con red real ($L_s \neq 0$)

Ahora se pasará a la exposición del circuito cuando la red es real para una mayor comprensión del mismo ya que no poder obviada en los rectificadores con tiristores. En muchos casos la normativa obliga la introducción de ella para reducir las perturbaciones en el punto de conexión de otros usuarios, la cual provoca una conmutación no instantánea de la corriente entre el ángulo de disparo α y $\alpha + u$.

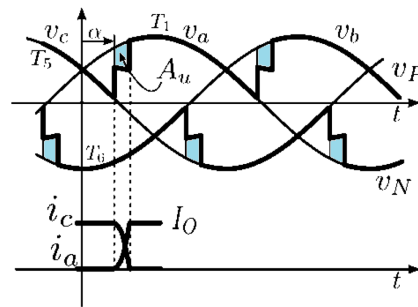


Figura 49. Representaciones destacadas del rectificador trifásico controlado de seis pulsos con red eléctrica real [3]

Para el cálculo del tiempo de conmutación u se plantea la ecuación de malla formada por los tiristores T_1 y T_5 que se encuentran en conducción durante la conmutación.

$$v_{an} - v_{cn} = L_s \frac{di_a}{dt} - L_s \frac{di_c}{dt} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} i_c = I_o - i_a \\ v_{an} - v_{cn} = v_{ac} = \sqrt{2} V_{LL} \sin(\omega t) \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\sqrt{2} V_{LL} \sin(\omega t) = 2\omega L_s \frac{di_a}{d\omega t} \quad (40)$$

Donde v_{an} es la tensión en el punto a, de igual modo v_{cn} es la tensión en el punto c y v_{ac} es la tensión entre ambos puntos. Además de sus correspondientes corrientes son i_a e i_c .

Integrando la ecuación y despejando el parámetro u , se obtiene la siguiente ecuación:

$$\int_0^{\alpha+u} \sqrt{2} V_{LL} \text{sen}(\omega t) d\omega t = 2\omega L_s \int_0^{I_o} di_a \Rightarrow \cos(\alpha + u) = \cos(\alpha) - \frac{2\omega L_s I_o}{\sqrt{2} V_{LL}} \quad (41)$$

Por último, para el cálculo de A_u observando la Figura 50, es el área encerrada entre v_{an} y v_{pn} el cual se elimina de la tensión de salida seis veces cada periodo.

$$A_u = \int_0^{\alpha+u} (v_{an} - v_{pn}) d\omega t = \int_0^{\alpha+u} V_{La} d\omega t = \omega L_s \int_0^{I_o} di_a \Rightarrow A_u = \omega L_s I_o \quad (42)$$

Por tanto, con todo ello se sabe que la tensión media a la salida es la siguiente.

$$V_o = V_{O\alpha} - \frac{6}{2\pi} A_u = \frac{3\sqrt{2} V_{LL}}{\pi} \cos(\alpha) - \frac{3\omega L_s I_o}{\pi} \quad (43)$$

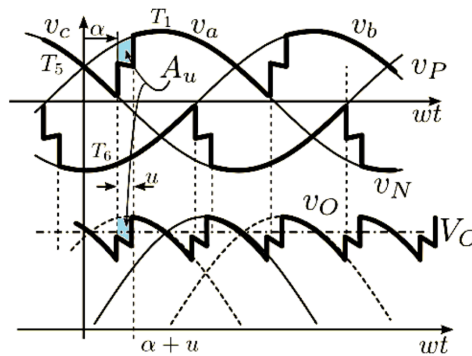


Figura 50. Representaciones para el cálculo del valor medio a la salida con red real [3]

Al igual que en el caso del rectificador monofásico se puede aproximar la forma de onda de las corrientes de red por señales trapezoidales. El factor de potencia de desplazamiento se puede aproximar a un valor: $DPF \approx \cos\left(\alpha + \frac{u}{2}\right)$.

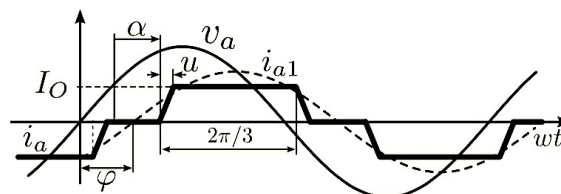


Figura 51. Representación de la corriente. [3]

2.2.2.2.3 Funcionamiento como inversor no autónomo

Este tipo de rectificadores controlados tienen un modo de funcionamiento como inversor no autónomo. Para un ángulo de disparo superior a $\pi/2$ pero inferior a π , la potencia entregada a la carga es negativa, es decir, la carga está devolviendo energía a la red. El circuito debe garantizar un tiempo de apagado

o extinción antes de aplicar sobre el tiristor una tensión positiva. Para garantizar un buen funcionamiento $\gamma \geq \omega t_q$ siendo $\gamma = \pi - \alpha - u$.

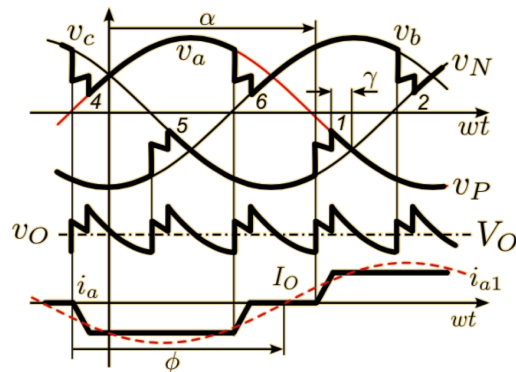


Figura 52. Representación relevante del rectificador trifásico controlado en modo inversor no autónomo. [3]

Los convertidores reales tienen una topología diferente a la mostrada anteriormente y su comportamiento ante el modo de conducción discontinuo.

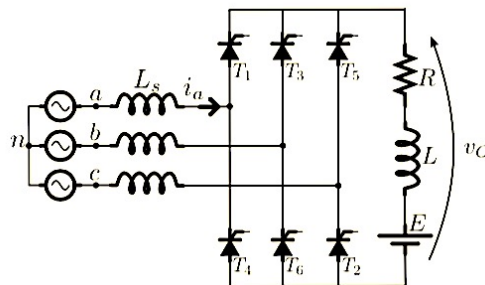


Figura 53. Topología rectificador trifásico controlado real [3]

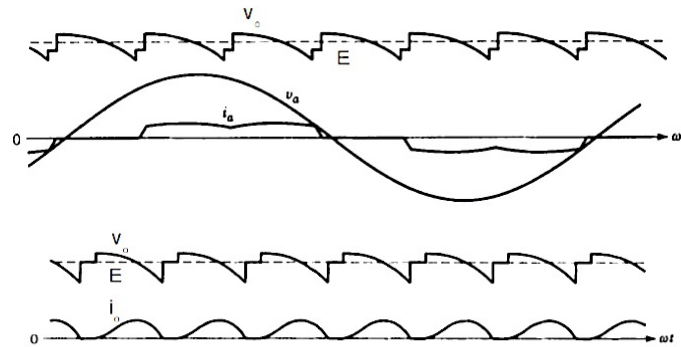


Figura 54. Representaciones relevantes del rectificador trifásico controlado real [3]

Como en los casos anteriores se muestra a continuación las simulaciones relativas a los rectificadores trifásicos controlados obtenidas de la herramienta de simulación realizada en este proyecto tanto en el caso de que la red sea ideal como siendo real, siendo el ángulo de disparo de 30° .

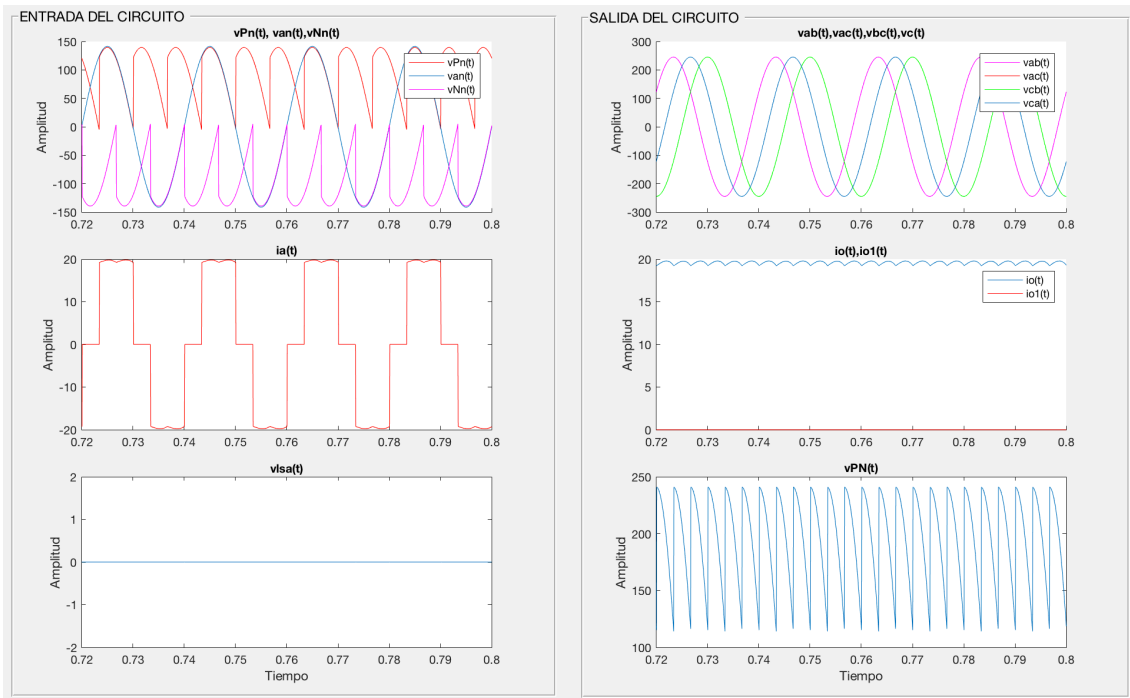


Figura 55. Simulaciones del rectificador trifásico controlado con red ideal obtenidas de la aplicación con un ángulo de disparo de 30°

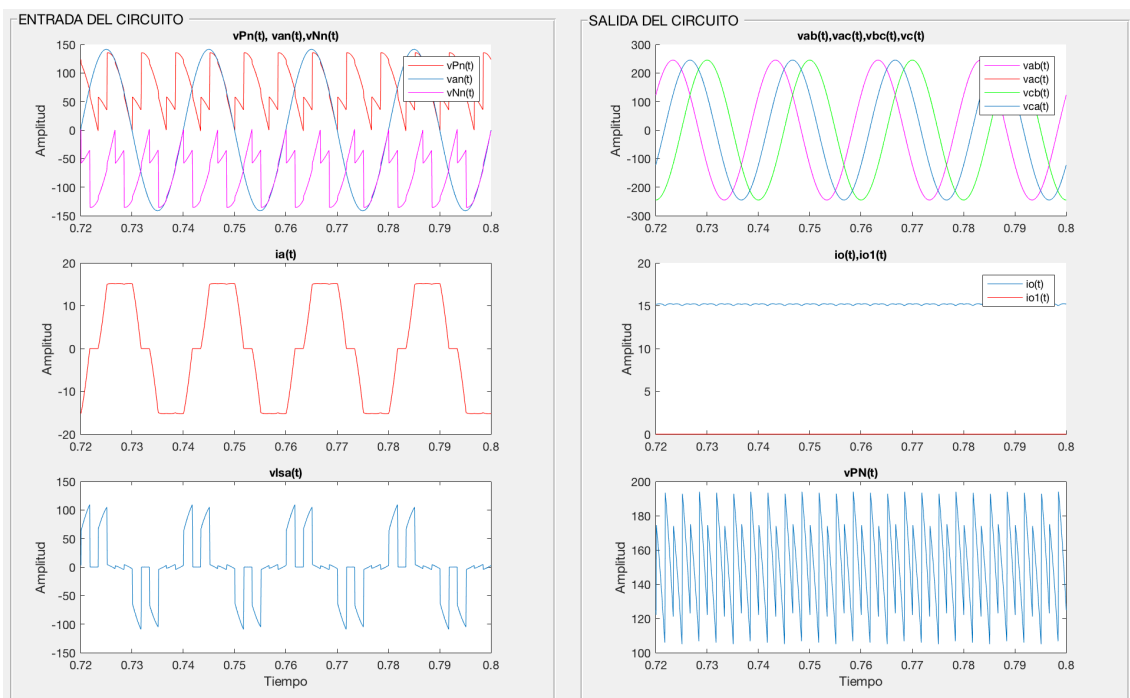


Figura 56. Simulaciones del rectificador trifásico controlado con red real obtenidas de la aplicación con un ángulo de disparo de 30°

Tras la exposición de toda la parte teórica y comparando todos los circuitos en conjunto se puede concluir que la distorsión armónica es la misma tanto en los no controlados como controlados ya que la forma de onda no varía.

Por otro lado, el factor de potencia si varía ya que en el caso de que sea un rectificador controlado se ve influenciada por el valor de α . En el mejor de

los casos en el que α sea de 0° tendremos el mismo valor del PF, en cambio si no es así el factor de potencia disminuye y por tanto empeora.

Si por el contrario se desea un mayor factor de potencia se debería de utilizar el rectificador trifásico de doce pulsos con red ideal seguido del rectificador trifásico de seis pulsos con red ideal, ambos no controlados.

Observando las conclusiones obtenidas se puede decir que el rectificador trifásico es una buena elección siempre y cuando se desee una tensión continua de valor constante. Por otro lado, los rectificadores controlados se utilizarán cuando se desee una tensión de valor variable realizando las modificaciones oportunas en el disparo de los tiristores.

Además, si se desea obtener más potencia se utilizarán los rectificadores trifásicos siempre y cuando la alimentación sea trifásica, es decir, en lugares donde se necesitan grandes potencias. Por otro lado, en lugares como casas la alimentación no es trifásica por lo que no se podrán utilizar dichos rectificadores.

Capítulo 3

Herramienta docente para la enseñanza de convertidores DC/AC

3.1 Introducción

La herramienta desarrollada en este Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo ayudar al alumno en el estudio de los rectificadores de potencia estudiados en clase de Electrónica de Potencia.

Esta herramienta está compuesta por una interfaz gráfica desarrollada mediante la aplicación GUIDE[2] que será la encargada de poder de configurar los distintos parámetros a analizar, así como de seleccionar las diferentes opciones permitidas por la herramienta.

La interfaz gráfica enlaza con otra aplicación llamada Simulink [3], que permite modelar y simular los modelos de los rectificadores controlados y no controlados.

Ambas herramientas pertenecen al software Matlab.

3.2 Interfaz gráfica de convertidores

Como se ha explicado con anterioridad, la interfaz gráfica es la encargada de realizar las diferentes acciones del proyecto, tales como modificar los valores, simular circuitos o visualizar diferentes señales.

Tras ejecutar el *script* principal se abre la pantalla principal de inicio mostrada en la siguiente figura.



Figura 57. Pantalla inicio de la interfaz

Como se puede ver, esta pantalla contiene seis botones diferentes para cada una de las opciones:

* Convertidor DC/DC:

Este botón abrirá la interfaz donde se podrá ejecutar los modelos de convertidores DC/DC: reductor, elevador, y reductor-elevador. Todos ellos realizados en otro proyecto anterior a éste. [6]

* Convertidor DC/DC Puente en H:

Este botón abrirá la interfaz asociada al convertidor DC/DC en puente completo realizado en otro proyecto anterior a éste [6], y que aquí se ha integrado para ofrecer una herramienta completa al alumno.

* Inversor DC/AC Monofásico:

Este botón abrirá la interfaz gráfica asociada a los inversores de potencia monofásicos con sus diferentes variantes, es decir, el convertidor en puente completo con modulación PWM bipolar, con modulación PWM unipolar y con modulación mediante cancelación de tensión, además del

convertidor Push Pull. Todo ello es abarcado en una interfaz gráfica realizada por un trabajo de fin de grado anterior [7] a éste e integrado a este proyecto para la obtención de una herramienta más completa para el usuario, actualizándolo a la versión 2017b de Matlab.

* Inversor DC/AC Trifásico:

Este botón permite abrir la interfaz gráfica asociada a los inversores de potencia trifásicos y sus diferentes variantes, es decir, al convertidor de tres ramas con modulación PWM, con modulación PWM con inyección de tercer armónico, con modulación PWM con inyección de secuencia cero, con modulación PWM discontinua y con modulación vectorial, tanto en su forma normal como con eliminación de armónicos pares. Este trabajo se realizó en un TFG previo [7] y se ha adaptado y actualizado a la versión de Matlab 2017b.

* Rectificador No Controlado Monofásico:

Este botón permite abrir la interfaz gráfica asociada a los rectificadores de potencia monofásicos no controlados. Este botón se expondrá de manera más detallada en el apartado 3.2.1.

* Rectificador No Controlado Trifásico:

Este botón permite abrir la interfaz gráfica asociada a los rectificadores de potencia trifásicos no controlados de seis y de doce pulsos. Este botón se expondrá de manera más detallada en el apartado 3.2.2.

* Rectificador Controlado Monofásico:

Este botón permite abrir la interfaz gráfica asociada a los rectificadores de potencia monofásicos controlados. Este botón se expondrá de manera más detallada en el apartado 3.2.3.

* Rectificador Controlado Trifásico:

Este botón permite abrir la interfaz gráfica asociada a los rectificadores de potencia trifásicos controlados de seis pulsos. Este botón se expondrá de manera más detallada en el apartado 3.2.4.

3.2.1 Rectificadores monofásicos no controlados

Al pulsar en el botón “**Rectificador No Controlado Monofásico**” se abre la ventana mostrada en la Figura 58 con la interfaz gráfica asociada a estos rectificadores.

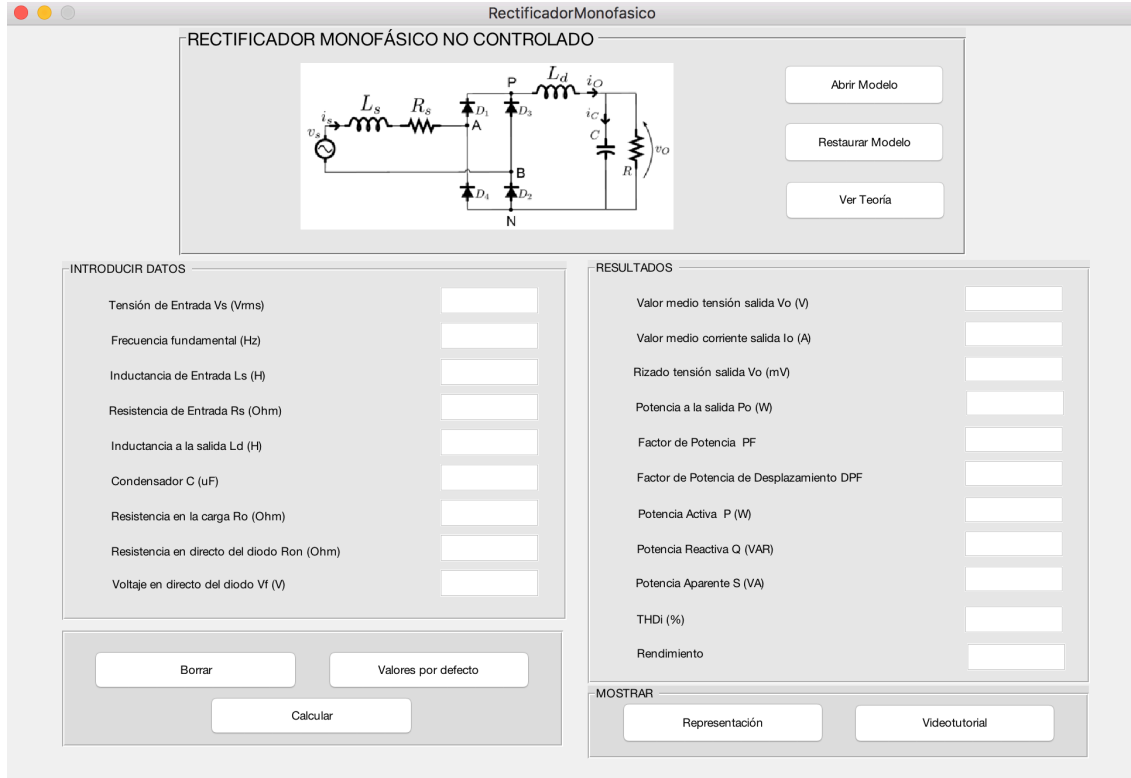


Figura 58. Interfaz gráfica rectificador monofásico no controlado

En la interfaz se puede observar el circuito del rectificador en puente completo el cual corresponde al visto en la teoría, en la Figura 1, habiendo añadido la resistencia de red R_s .

Para visualizar dicho circuito en Simulink se debe pulsar el botón “**Abrir Modelo**”, lo que abrirá el archivo .slx, que es el mostrado en la Figura 59.

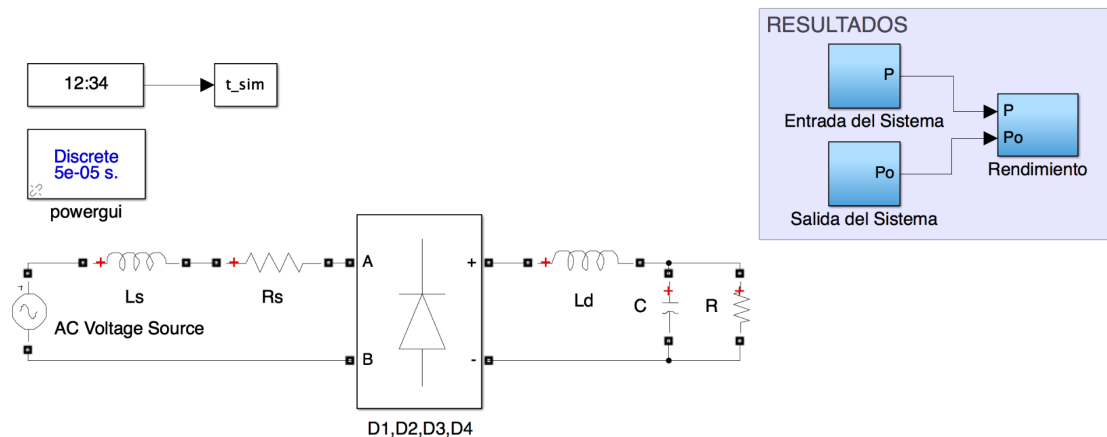


Figura 59: Modelo Simulink del rectificador monofásico no controlado en puente completo.

Dentro del modelo de Simulink se puede acceder a los valores y resultados relevantes de la entrada del sistema o de la salida seleccionando el subsistema que se desee. Los resultados de la entrada del sistema se muestran en la Figura 60, mientras que los de la salida son los mostrados en la Figura 61.

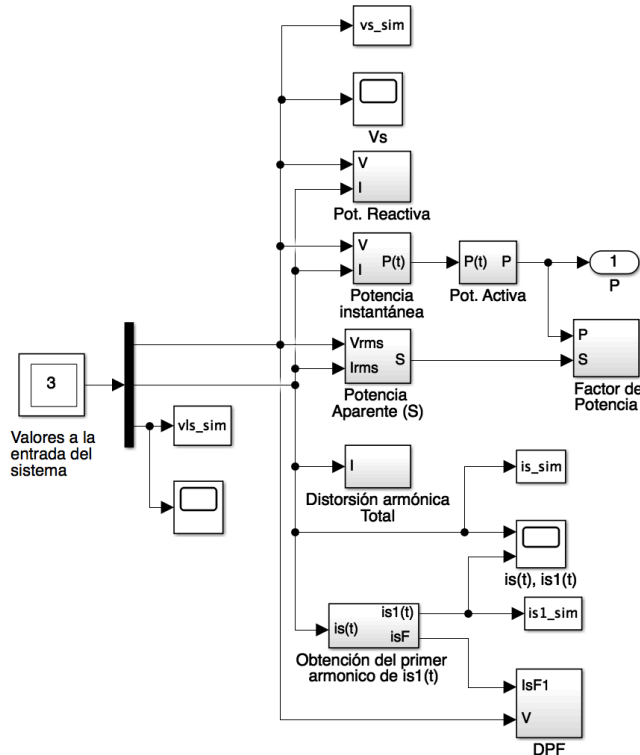


Figura 60: Resultados a la entrada del sistema.

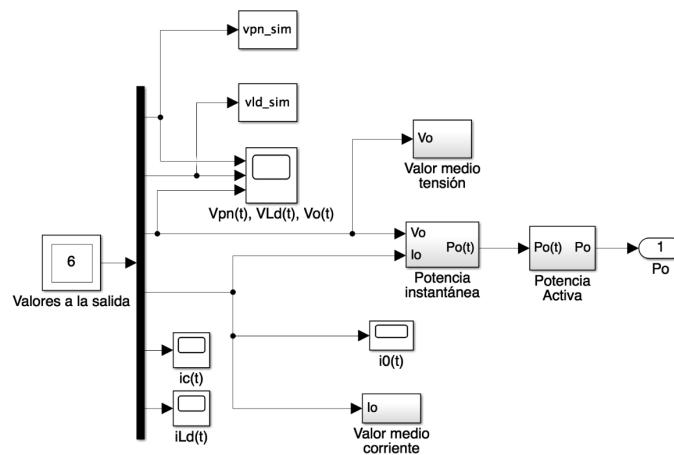


Figura 61: Resultados a la salida del sistema.

Los bloques más importantes empleados en el modelo Simulink:

Universal Bridge: Con este bloque se ha implementado el puente completo del rectificador monofásico no controlado, el cual está formado por diodos.

THD: Con este bloque se ha calculado el THD (del inglés Total Harmonic Distortion) de la corriente de entrada.

RMS: Este bloque se utiliza para calcular el valor eficaz de diferentes magnitudes como la tensión y corriente de entrada.

Fourier: Este bloque se ha utilizado para el cálculo del primer armónico de la corriente de entrada.

Sobre este archivo se pueden realizar y guardar modificaciones que desee el usuario para estudiar otros comportamientos que se consideren oportunos o interesantes.

Pulsando el botón “**Restaurar Modelo**” se restaura el modelo a ejecutar por una copia de seguridad guardada y se sobrescribe.

Pulsando el botón “**Ver Teoría**” se abrirán los apuntes correspondientes a los rectificadores monofásicos no controlados dados por la asignatura de Electrónica de Potencia, lo cual sirve para completar la herramienta y ayudar al alumno a buscar respuestas a diferentes problemas que puedan surgir. La portada de estos apuntes puede verse en la Figura 62.

Lección: Rectificadores no controlados monofásicos

Lección: Rectificadores no controlados monofásicos

Tema: Convertidores AC/DC

Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá,



Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá

1 of 80

Figura 62: Transparencias sobre rectificadores monofásicos no controlados [1]

En la pestaña “**Introducir Datos**” se muestran los distintos parámetros que puede introducir el usuario para la simulación del circuito los cuales son los siguientes:

- * Tensión de Entrada $V_s(V_{rms})$

- * Frecuencia fundamental (Hz)
- * Inductancia de Entrada $L_s(H)$
- * Resistencia de Entrada $R_s(Ohm)$
- * Inductancia a la salida $L_d(H)$
- * Condensador $C(\mu F)$
- * Resistencia en la carga $R_o(Ohm)$
- * Resistencia en directo del diodo $R_{on}(Ohm)$
- * Voltaje en directo del diodo $V_f(V)$

Si se desea introducir los valores por defecto se debe pulsar el botón “**Valores por defecto**” tras lo cual se cargarán dichos valores a los parámetros y se mostrarán dichos valores por pantalla que se puede ver en la Figura 63. Estos valores hacen que la red se comporte de manera ideal, es decir, la inductancia a la entrada L_s es prácticamente nula al igual que la resistencia R_s .

The screenshot shows a software application window titled "RectificadorMonofasico". The main area displays a circuit diagram of a full-bridge rectifier with an AC source v_s , input inductor L_s , input resistor R_s , four diodes (D_1, D_2, D_3, D_4), an output inductor L_d , an output capacitor C , and a load resistor R . The output voltage is v_o .

Below the diagram are two main sections: "INTRODUCIR DATOS" (Input Data) and "RESULTADOS" (Results).

INTRODUCIR DATOS		RESULTADOS	
Tensión de Entrada V_s (Vrms)	100	Valor medio tensión salida V_o (V)	
Frecuencia fundamental (Hz)	50	Valor medio corriente salida I_o (A)	
Inductancia de Entrada L_s (H)	1e-9	Rizado tensión salida V_o (mV)	
Resistencia de Entrada R_s (Ohm)	0.1	Potencia a la salida P_o (W)	
Inductancia a la salida L_d (H)	0.1	Factor de Potencia PF	
Condensador C (μF)	0.001	Factor de Potencia de Desplazamiento DPF	
Resistencia en la carga R_o (Ohm)	10	Potencia Activa P (W)	
Resistencia en directo del diodo R_{on} (Ohm)	1e-3	Potencia Reactiva Q (VAR)	
Voltaje en directo del diodo V_f (V)	0	Potencia Aparente S (VA)	
		THDi (%)	
		Rendimiento	

At the bottom of the interface, there are buttons for "Borrar", "Valores por defecto", "Calcular", "Abrir Modelo", "Restaurar Modelo", "Ver Teoría", "Representación", and "Videotutorial".

Figura 63: Valores por defecto del rectificador monofásico no controlado en puente completo

Si se desea modificar algún valor, sólo se debe seleccionar la casilla y escribir el valor deseado en ella.

Para ejecutar el modelo Simulink y obtener los resultados se selecciona el botón “**Calcular**”, tras lo cual, una vez haya finalizado la simulación se mostrarán en la pestaña “**Resultados**” mostrados en la Figura 64 donde se encuentran:

- * Valor medio tensión salida $V_o(V)$
- * Valor medio corriente salida $I_o(A)$
- * Rizado tensión salida $V_o(mV)$
- * Potencia a la salida $P_o(W)$
- * Factor de Potencia PF
- * Factor de Potencia de Desplazamiento DPF
- * Potencia Activa $P(W)$
- * Potencia Reactiva $Q(VAR)$
- * Potencia Aparente $S(VA)$
- * THDi (%)
- * Rendimiento

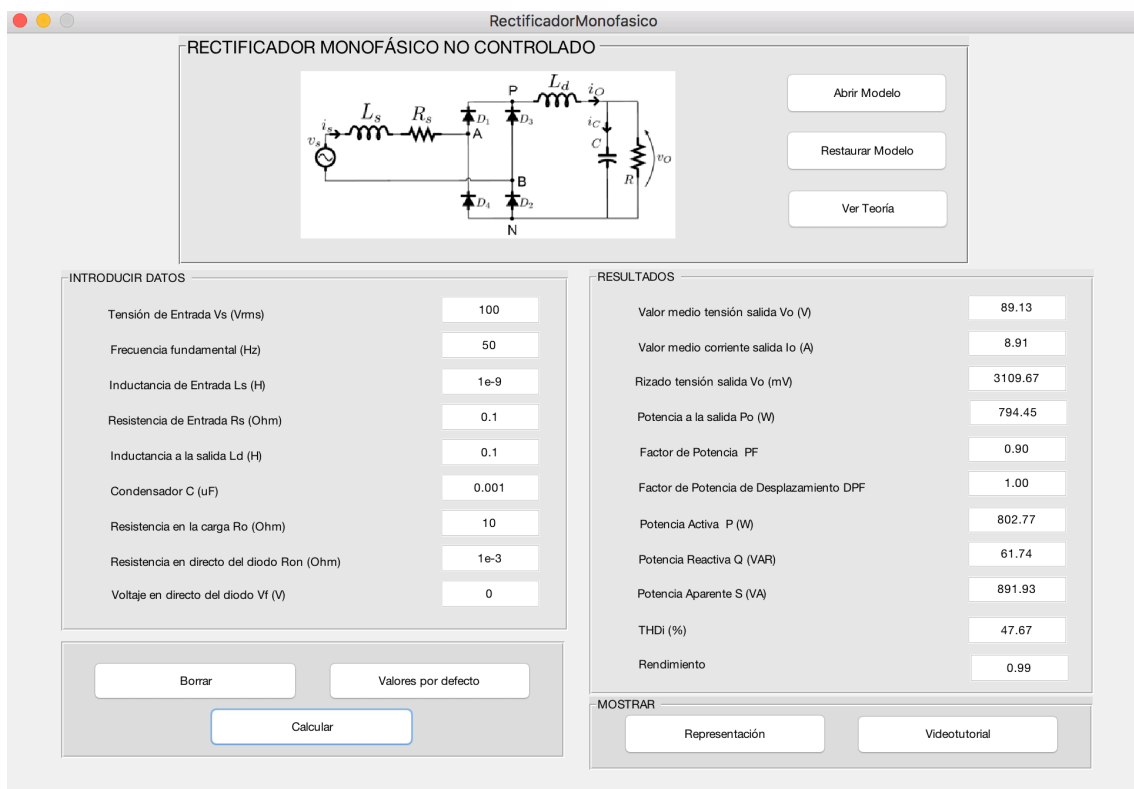


Figura 64: Resultados de la simulación

Para eliminar todos los valores de la interfaz, tanto de la pestaña “**Introducir Datos**” como de la pestaña “**Resultados**”, se pulsa el botón “**Borrar**”.

Además, la herramienta consta de videos explicativos de cada interfaz, el cual sirve como manual de usuario, para acceder al video correspondiente a esta interfaz el usuario debe pulsar el botón “**Videotutorial**”, el cual es de desarrollo propio.

Por último, se puede acceder al botón “**Representación**” el cual abrirá otra interfaz gráfica con las representaciones más relevantes del circuito mostrada en la Figura 65.

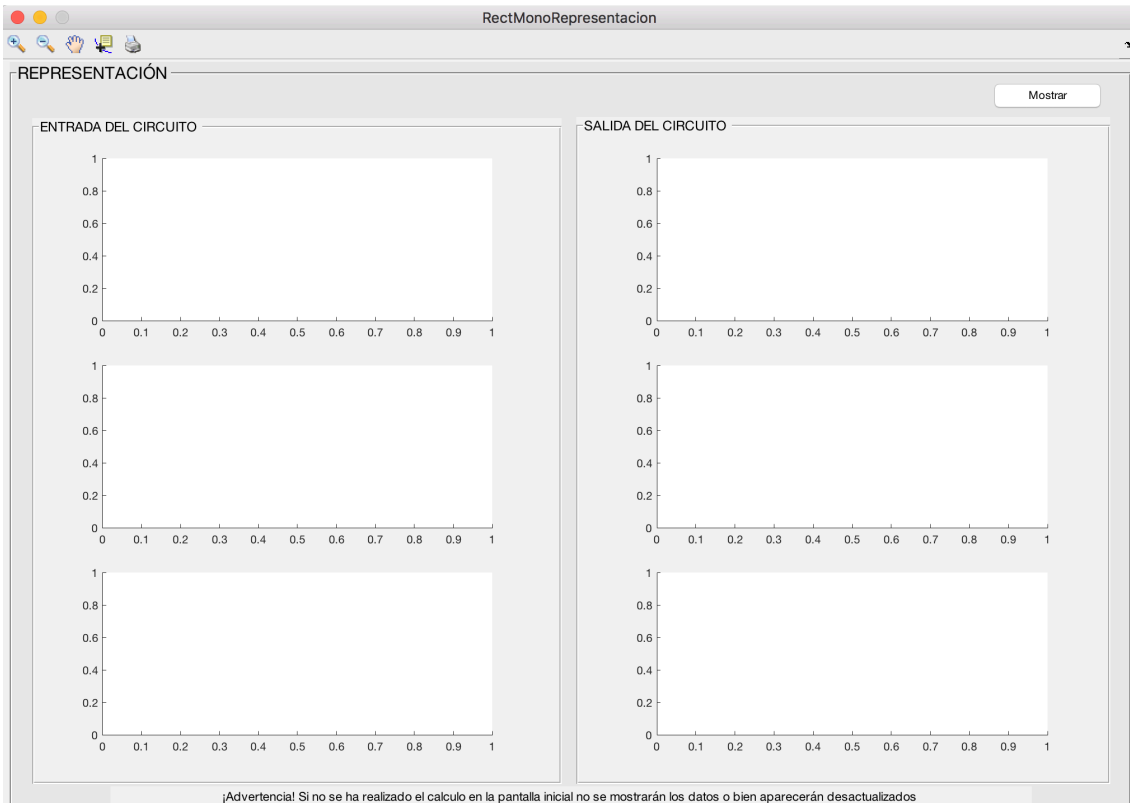


Figura 65: Interfaz gráfica de la representación del rectificador monofásico

Para poder visualizar las representaciones se pulsa el botón **“Mostrar”** siempre y cuando se haya realizado el cálculo en la pantalla inicial para poder mostrar los datos actualizados.

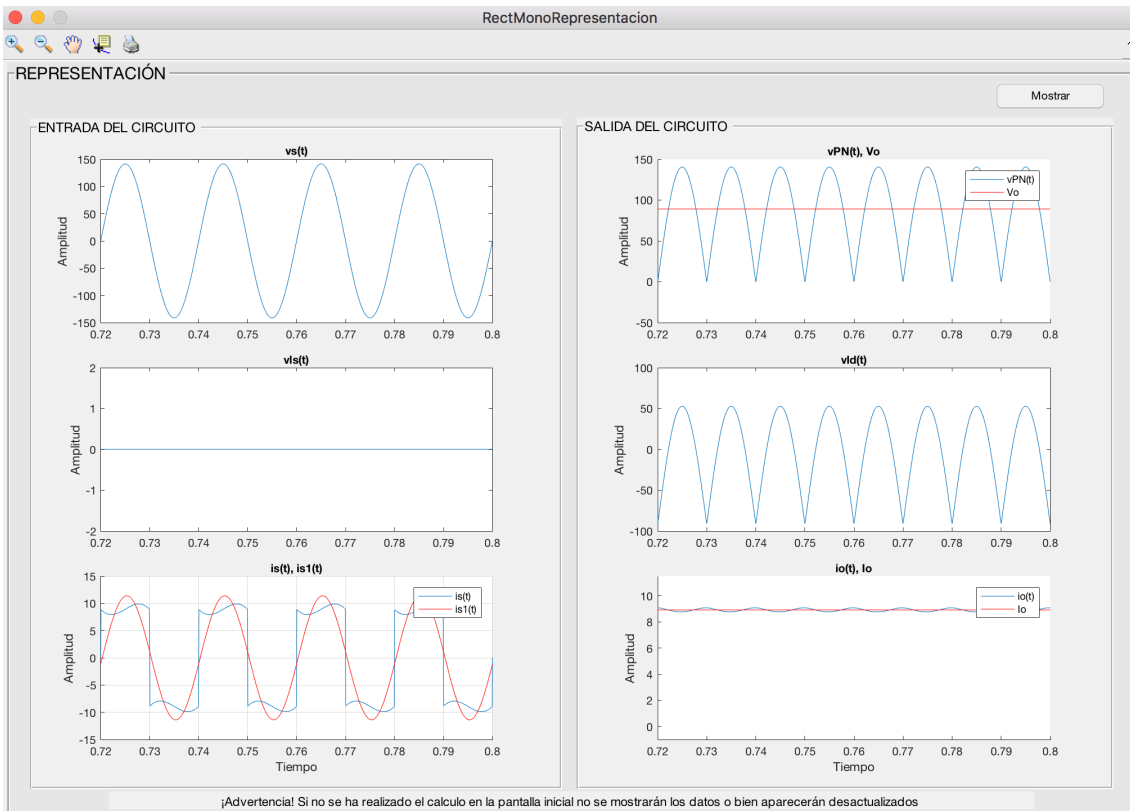


Figura 66: Visualización de las representaciones del circuito.

¡Advertencia! Si no se ha realizado el cálculo en la pantalla inicial no se mostrarán los datos o bien aparecerán desactualizados

Figura 67: Mensaje de advertencia sobre la necesidad del cálculo previo a la representación

Si se desea aumentar, disminuir o moverse por las representaciones se seleccionarán los botones situados en la parte superior izquierda de la interfaz.

Al igual que si se desea ver el valor en algún punto o incluso imprimir las representaciones.



Figura 68: Botones de ayuda

3.2.2 Rectificadores trifásicos no controlados

Al pulsar en el botón “**Rectificador No Controlado Trifásico**” se abre la ventana mostrada en la Figura 69 con la interfaz gráfica asociada a estos rectificadores.

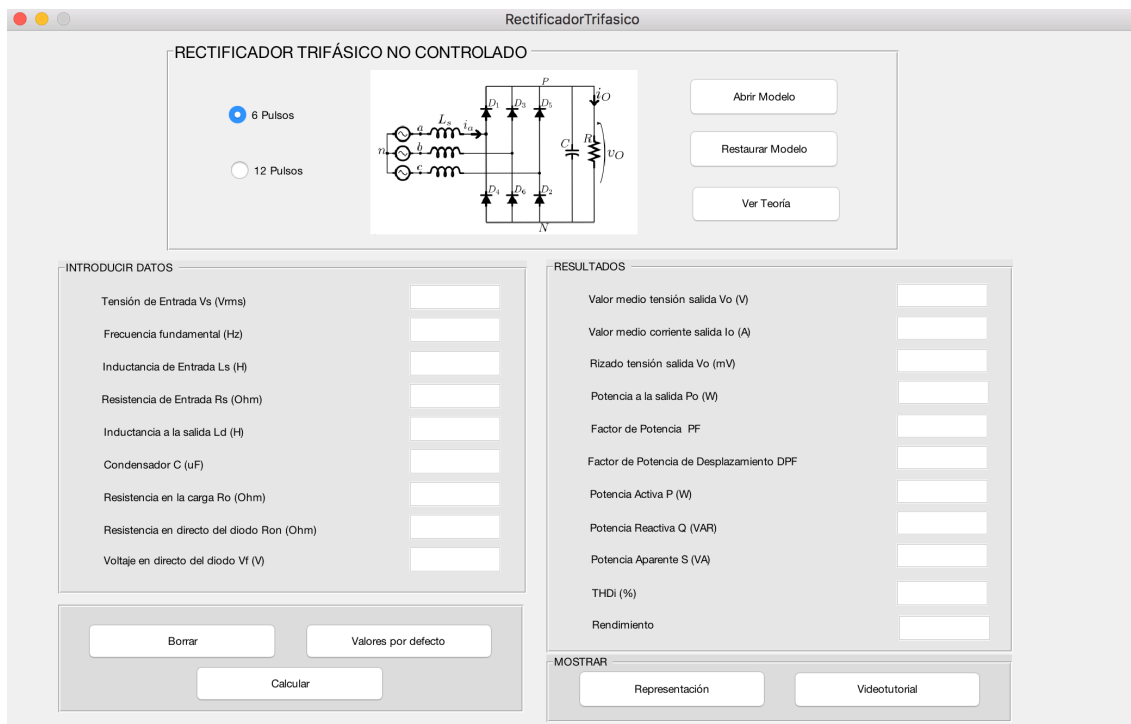


Figura 69. Interfaz gráfica rectificador trifásico no controlado

En la pestaña “**Rectificador Trifásico No Controlado**” se encuentra seleccionado por defecto el circuito de seis pulsos mostrando su correspondiente circuito visto en la teoría, Figura 11 habiendo añadido la inductancia L_s a la entrada. Pero también se da la opción de ver el comportamiento del rectificador trifásico no controlado de doce pulsos.

3.2.2.1 Rectificador trifásico no controlado de seis pulsos

Este circuito es el mostrado de manera predeterminada en la interfaz cuando es abierta, Figura 69.

Para visualizar el modelo en Simulink se debe pulsar el botón “**Abrir Modelo**”, lo que abrirá el archivo .slx, que es el mostrado en la Figura 70.

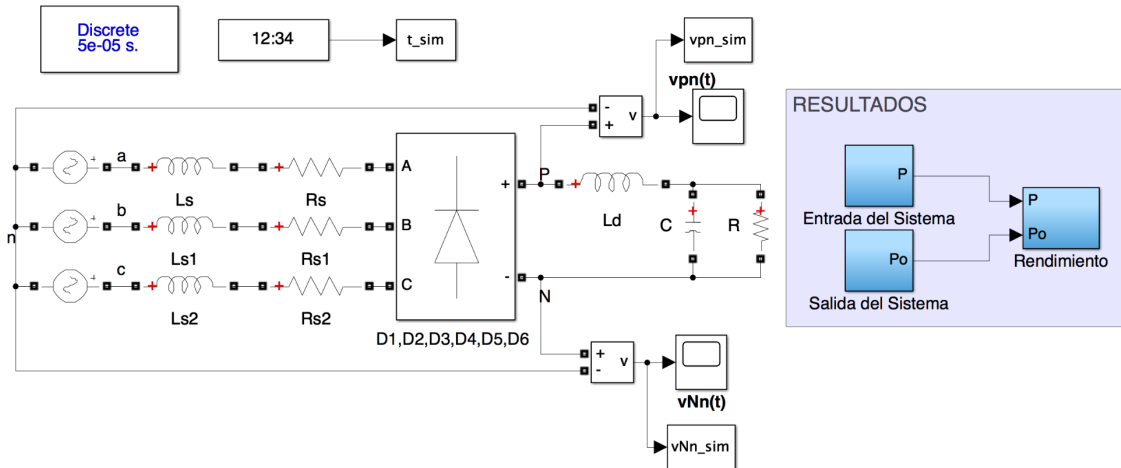


Figura 70: Modelo Simulink del rectificador trifásico no controlado de seis pulsos.

Dentro del modelo de Simulink se puede acceder a los valores y resultados relevantes de la entrada del sistema o de la salida seleccionando el subsistema que se desee.

Los resultados de la entrada del sistema se muestran en la Figura 71 y la Figura 72, mientras que los de la salida son los mostrados en la Figura 73.

Valores a la entrada del sistema

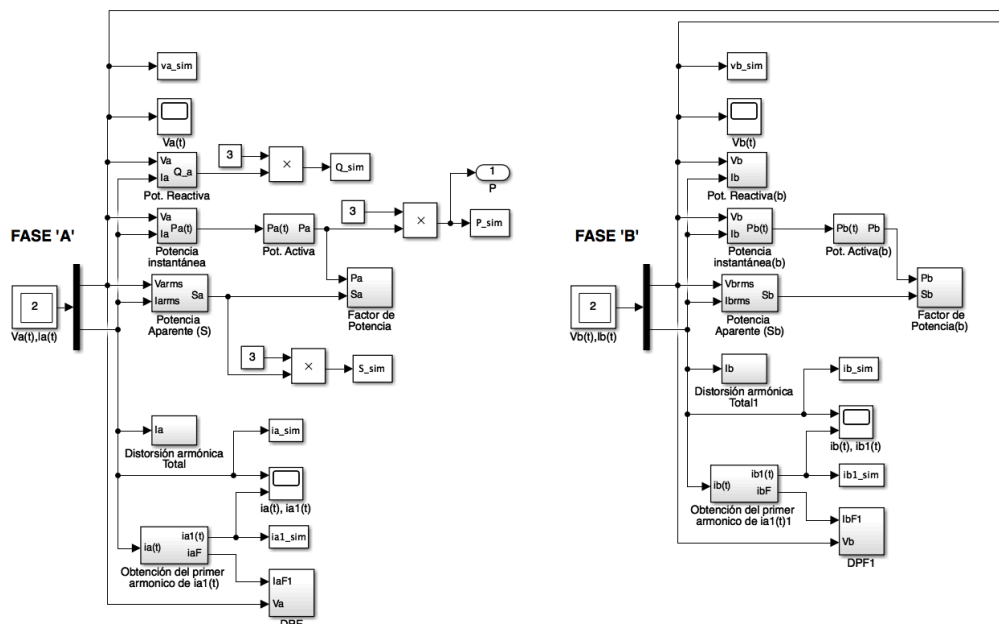


Figura 71: Resultados a la entrada del sistema.

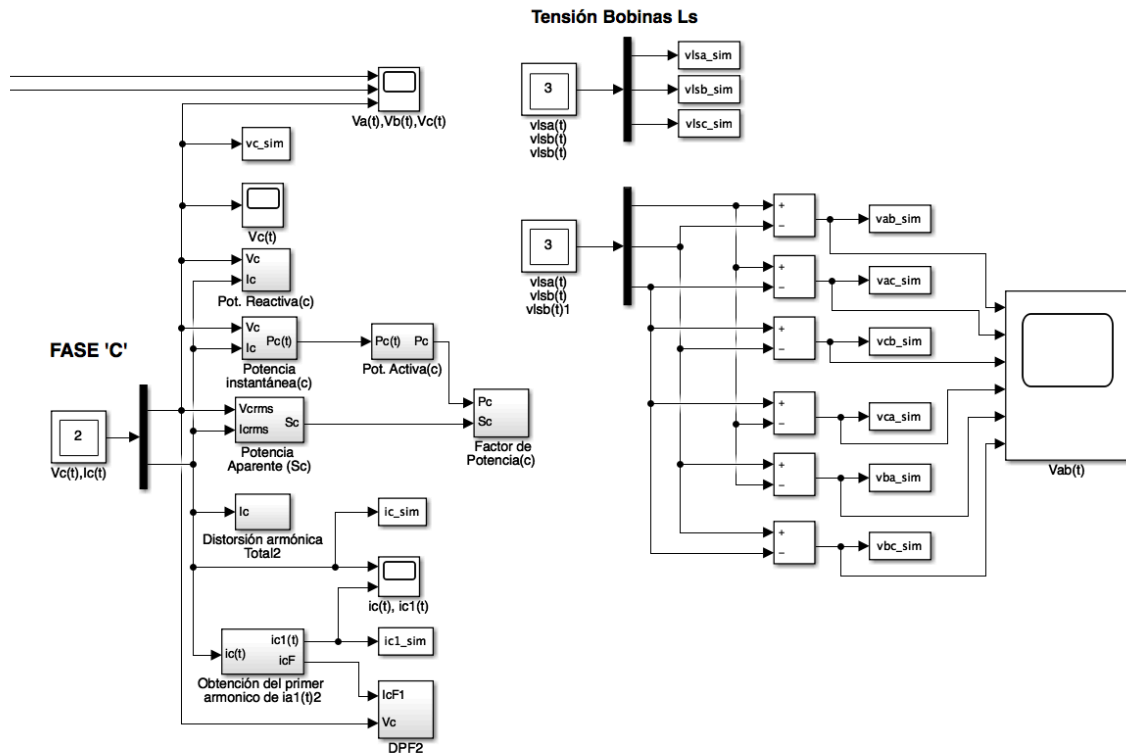


Figura 72: Resultados a la entrada del sistema.

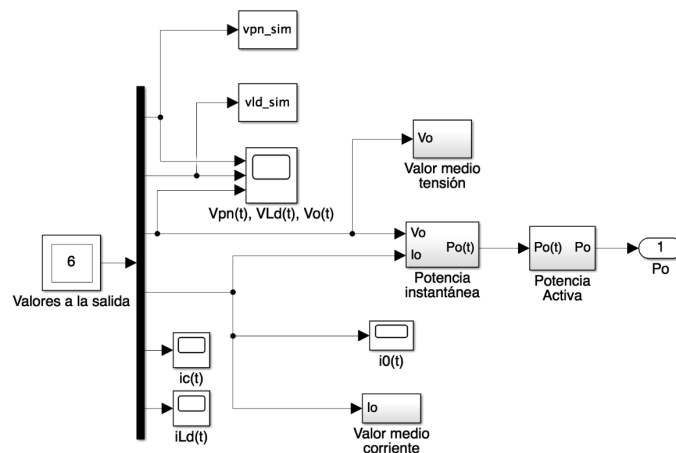


Figura 73: Resultados a la salida del sistema.

Los bloques más importantes empleados en el modelo Simulink:

Universal Bridge: Con este bloque se ha implementado rectificador trifásico no controlado de seis pulsos, el cual está formado por diodos.

THD: Con este bloque se ha calculado el THD (del inglés Total Harmonic Distortion) de la corriente de entrada.

RMS: Este bloque se utiliza para calcular el valor eficaz de diferentes magnitudes como la tensión y corriente de entrada.

Fourier: Este bloque se ha utilizado para el cálculo del primer armónico de la corriente de entrada.

Sobre este archivo se pueden realizar y guardar modificaciones que desee el usuario para estudiar otros comportamientos que se consideren oportunos o interesantes.

Pulsando el botón “**Restaurar Modelo**” se restaura el modelo a ejecutar por una copia de seguridad guardada y se sobrescribe.

Pulsando el botón “**Ver Teoría**” se abrirán los apuntes correspondientes a los rectificadores trifásicos no controlados dados por la asignatura de Electrónica de Potencia, lo cual sirve para completar la herramienta y ayudar al alumno a buscar respuestas a diferentes problemas que puedan surgir. La portada de estos apuntes puede verse en la Figura 74.

Lección: Rectificadores no controlados trifásicos

Lección: Rectificadores no controlados trifásicos

Tema: Convertidores AC/DC

Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá,



Figura 74: Transparencias sobre rectificadores trifásicos no controlados [2]

En la pestaña “**Introducir Datos**” se muestran los distintos parámetros que puede introducir el usuario para la simulación del circuito los cuales son los siguientes:

- * Tensión de Entrada $V_s(V_{rms})$
- * Frecuencia fundamental (Hz)
- * Inductancia de Entrada $L_s(H)$
- * Resistencia de Entrada $R_s(Ohm)$
- * Inductancia a la salida $L_d(H)$
- * Condensador $C(\mu F)$

- * Resistencia en la carga $R_o(Ohm)$
- * Resistencia en directo del diodo $R_{on}(Ohm)$
- * Voltaje en directo del diodo $V_f(V)$

Si se desea introducir los valores por defecto se debe pulsar el botón “**Valores por defecto**” tras lo cual se cargarán dichos valores a los parámetros y se mostrarán dichos valores por pantalla que se puede ver en la Figura 75. Estos valores hacen que la red se comporte de manera ideal, es decir, la inductancia a la entrada es prácticamente nula al igual que la resistencia R_s .

Figura 75: Valores por defecto del rectificador trifásico no controlado de seis pulsos.

Si se desea modificar algún valor, sólo se debe seleccionar la casilla y escribir el valor deseado en ella.

Para ejecutar el modelo Simulink y obtener los resultados se selecciona el botón “**Calcular**”, tras lo cual, una vez haya finalizado la simulación se mostrarán en la pestaña “**Resultados**” mostrados en la donde se encuentran:

- * Valor medio tensión salida $V_o(V)$
- * Valor medio corriente salida $I_o(A)$
- * Rizado tensión salido $V_o(mV)$
- * Potencia a la salida $P_o(W)$
- * Factor de Potencia PF
- * Factor de Potencia de Desplazamiento DPF
- * Potencia Activa $P(W)$
- * Potencia Reactiva $Q(VAR)$

- * Potencia Aparente $S(VA)$
- * THDi (%)
- * Rendimiento

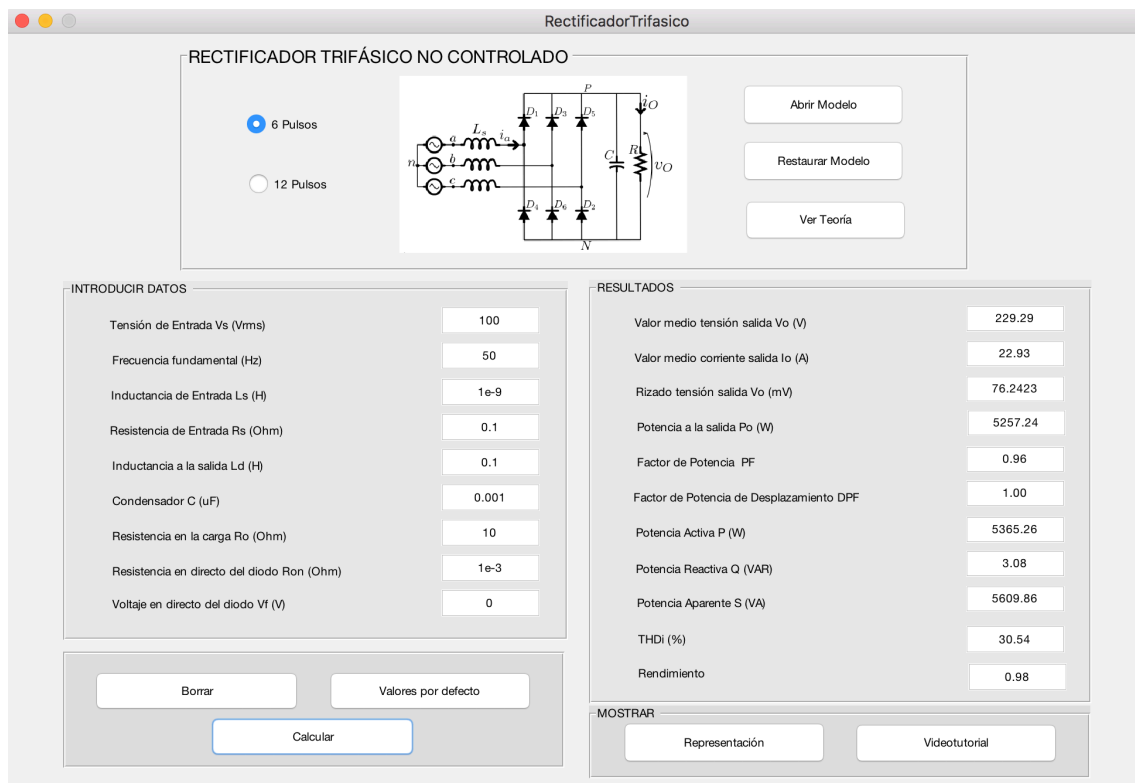


Figura 76: Resultados de la simulación

Para eliminar todos los valores de la interfaz, tanto de la pestaña “**Introducir Datos**” como de la pestaña “**Resultados**”, se pulsa el botón “**Borrar**”.

Además, la herramienta consta de videos explicativos de cada interfaz, el cual sirve como manual de usuario, para acceder al video correspondiente a esta interfaz el usuario debe pulsar el botón “**Videotutorial**”, el cual ha sido desarrollado durante este proyecto.

Por último, se puede acceder al botón “**Representación**” el cual abrirá otra interfaz gráfica con las representaciones más relevantes del circuito mostrada en la Figura 77.

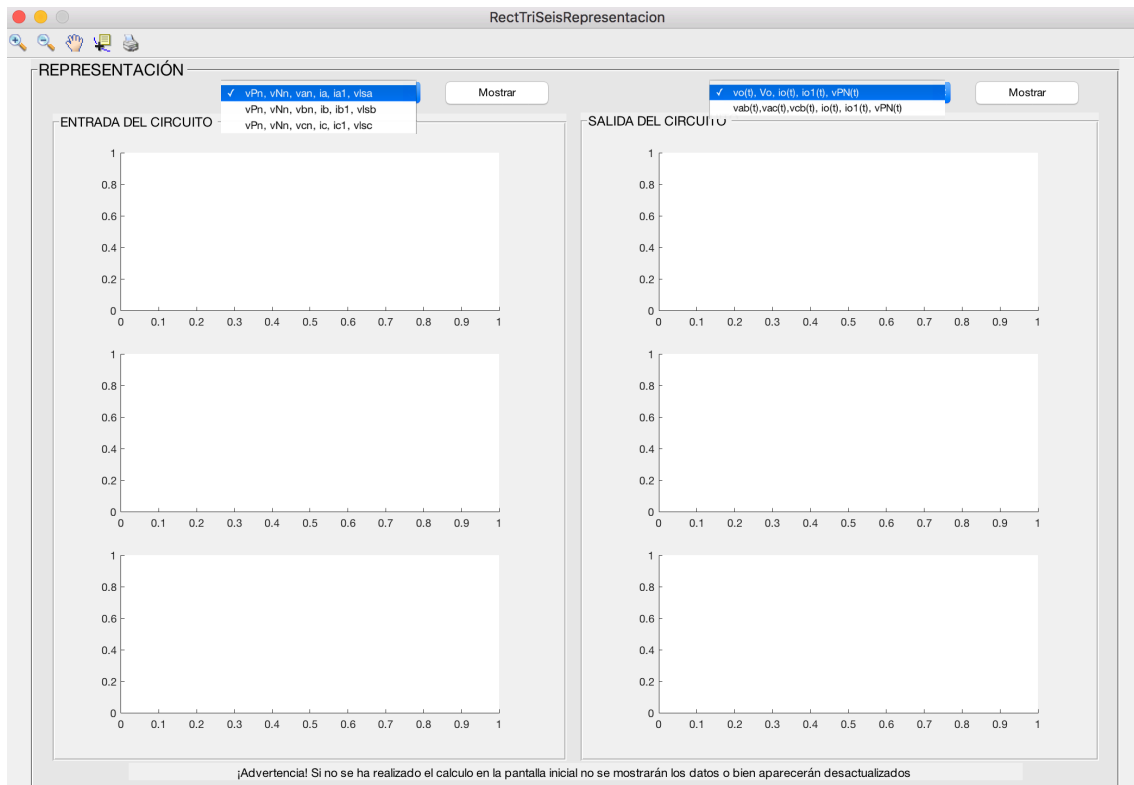


Figura 77: Interfaz gráfica de la representación del rectificador trifásico de seis pulsos

En esta ventana hay dos desplegables que permiten seleccionar diferentes opciones de visualización de distintas variables relevantes del circuito, las cuales aparecerán tras pulsar el botón “Mostrar”. Dependiendo de que botón “Mostrar” se pulse, se mostrará los resultados a la entrada o a la salida del circuito.

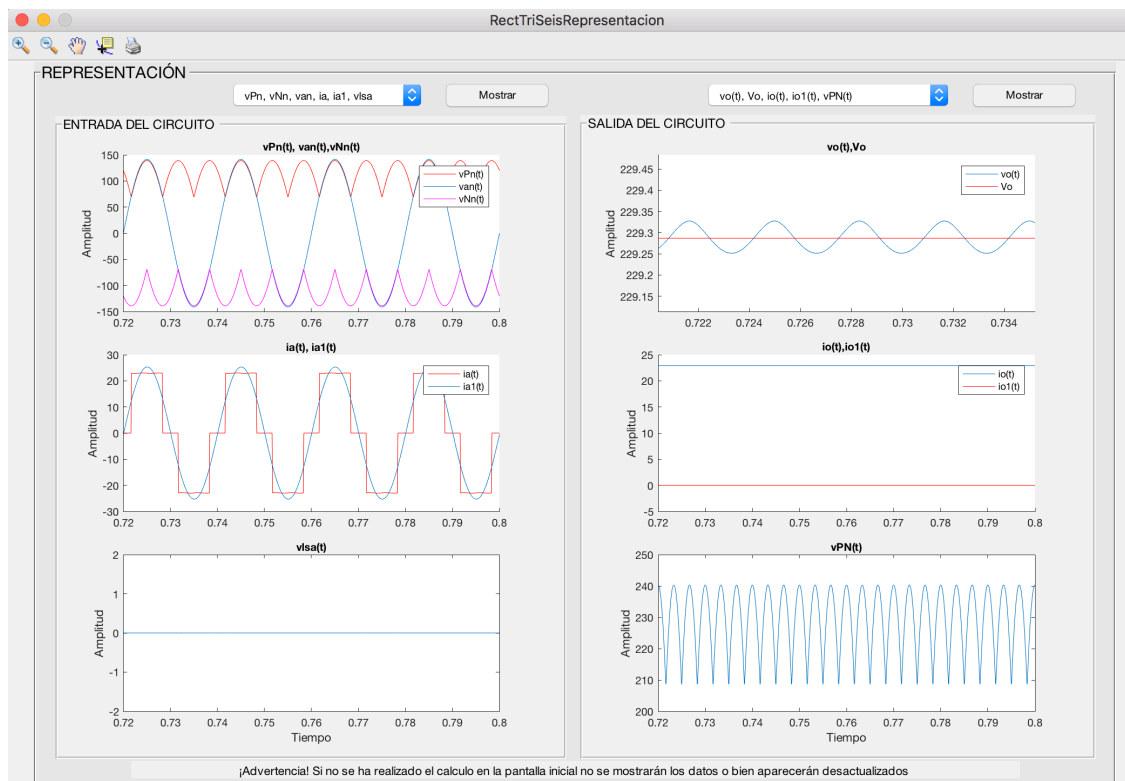


Figura 78: Visualización de las representaciones del circuito.

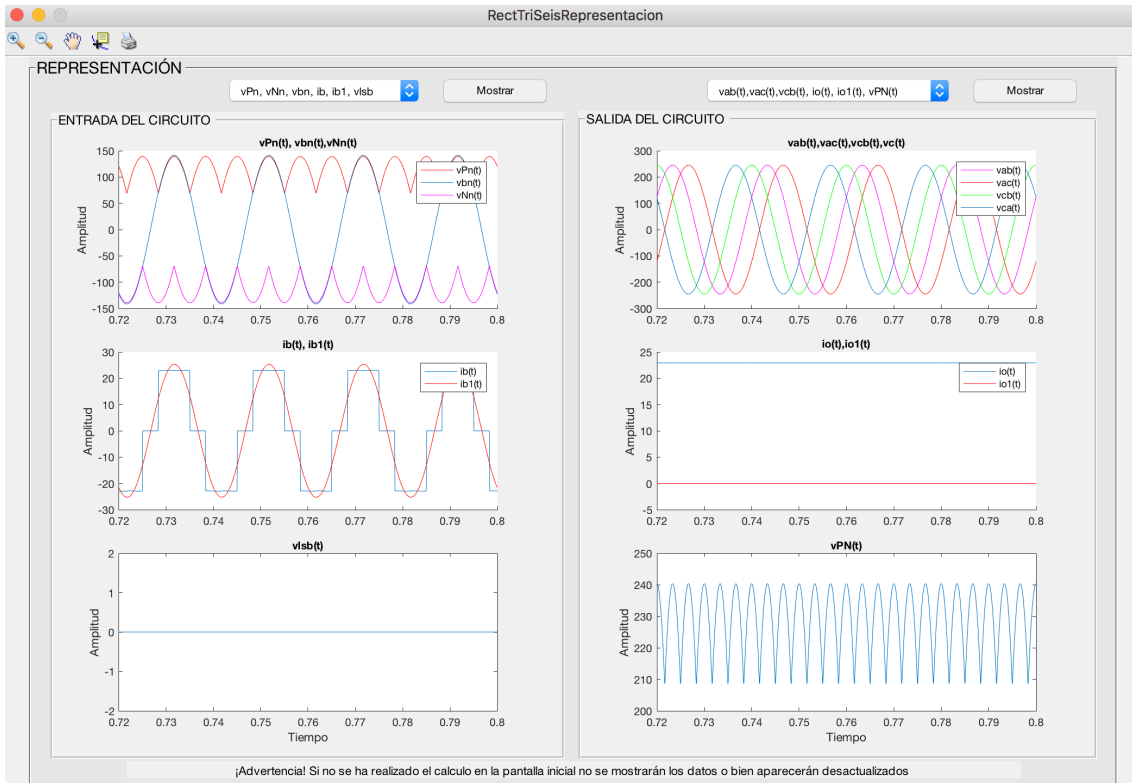


Figura 79: Visualización de las representaciones del circuito.

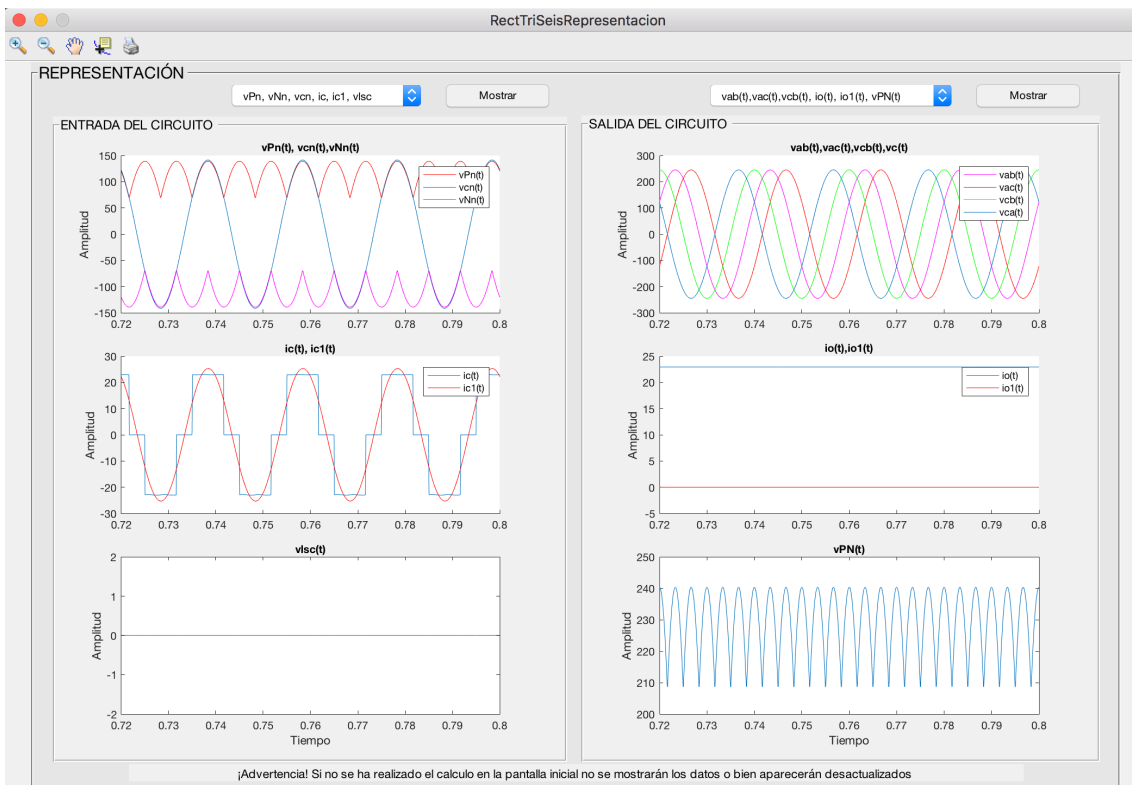


Figura 80: Visualización de las representaciones del circuito.

Es necesario realizar el cálculo en la pantalla principal para que los datos sean actualizados tal y como se indica en la interfaz.

¡Advertencia! Si no se ha realizado el calculo en la pantalla inicial no se mostrarán los datos o bien aparecerán desactualizados

Figura 81: Mensaje de advertencia sobre la necesidad del cálculo previo a la representación

Si se desea aumentar, disminuir o moverse por las representaciones se seleccionarán los botones situados en la parte superior izquierda de la interfaz.

Al igual que si se desea ver el valor en algún punto o incluso imprimir las representaciones.

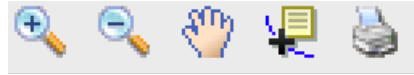


Figura 82: Botones de ayuda

3.2.2.2 Rectificador trifásico no controlado de doce pulsos

Para acceder al circuito se debe seleccionar la opción de “12 Pulsos” en la pestaña de Rectificador Trifásico No Controlado, tras lo cual se mostrará la topología del circuito en la interfaz.

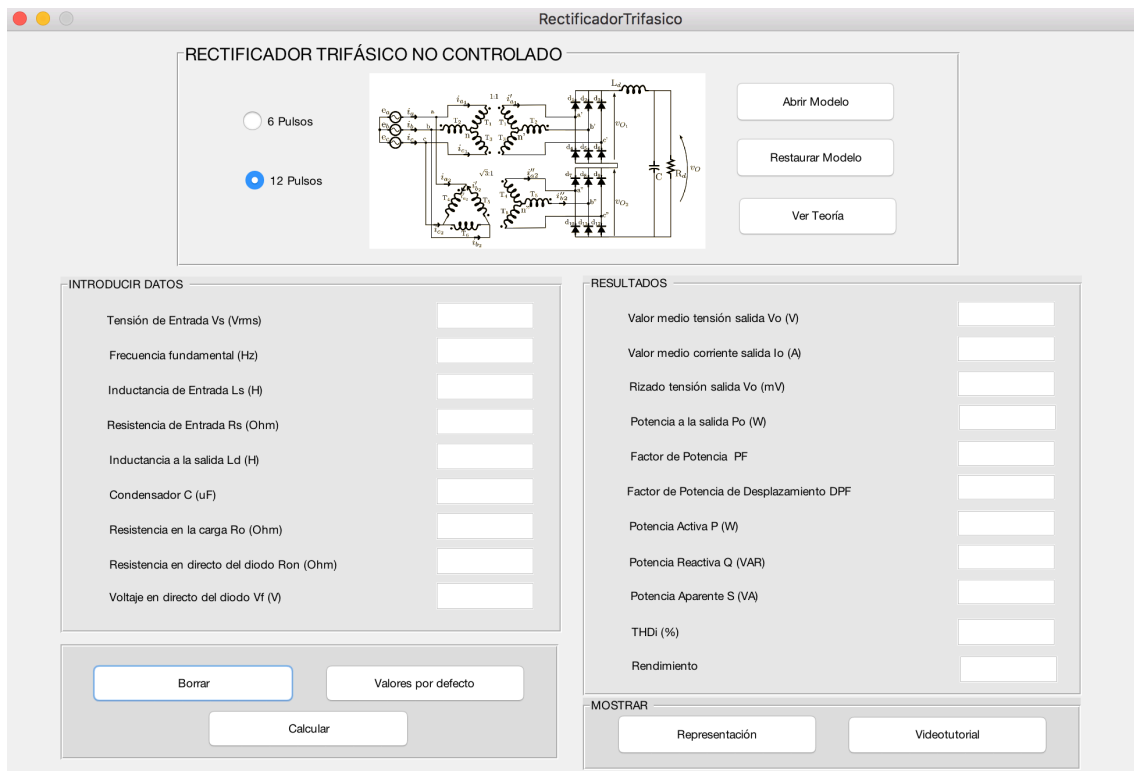


Figura 83: Interfaz gráfica del rectificador trifásico de doce pulsos.

Para visualizar el modelo en Simulink se debe pulsar el botón “**Abrir Modelo**”, lo que abrirá el archivo .slx, que es el mostrado en la Figura 84.

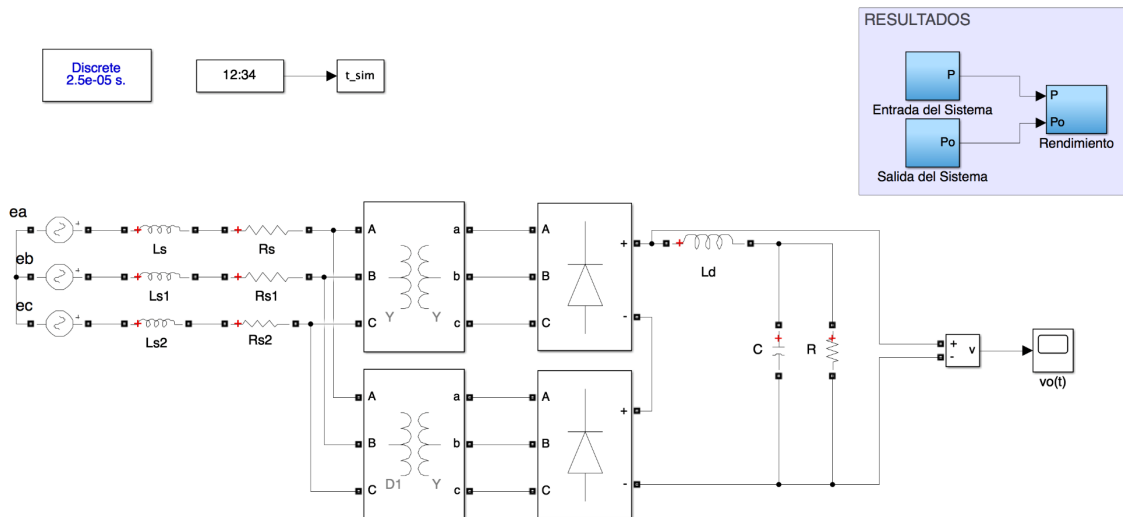


Figura 84: Modelo Simulink del rectificador trifásico no controlado de doce pulsos.

Dentro del modelo de Simulink se puede acceder a los valores y resultados relevantes de la entrada del sistema o de la salida seleccionando el subsistema que se desee.

Los resultados de la entrada del sistema se muestran en la Figura 85 y la Figura 86, mientras que los de la salida son los mostrados en la Figura 87.

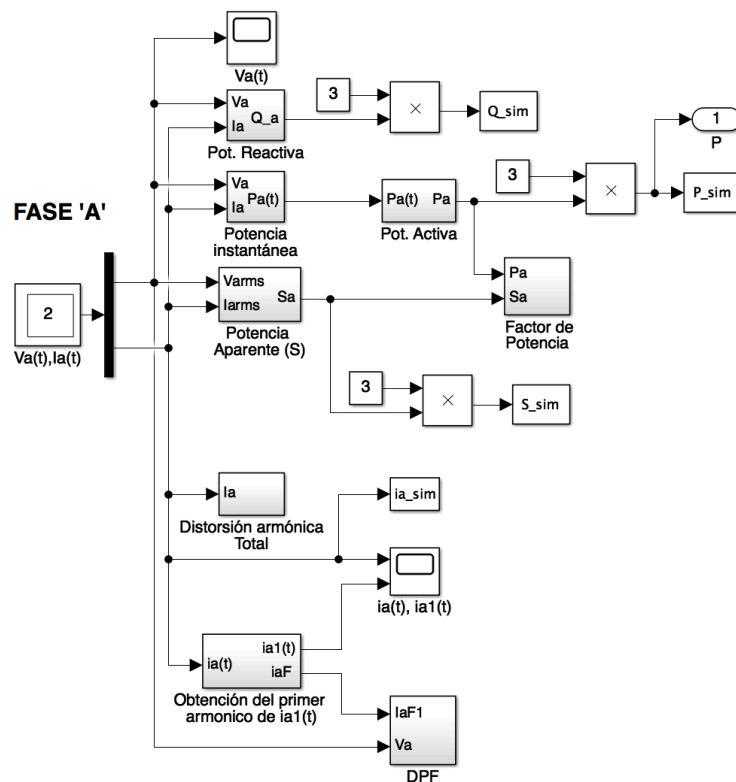


Figura 85: Resultados a la entrada del sistema.

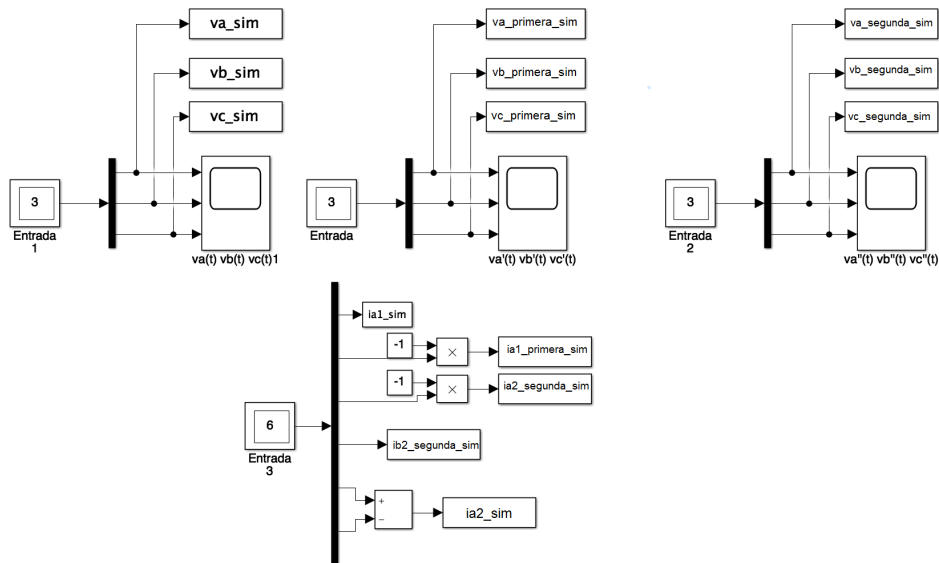


Figura 86: Resultados a la entrada del sistema.

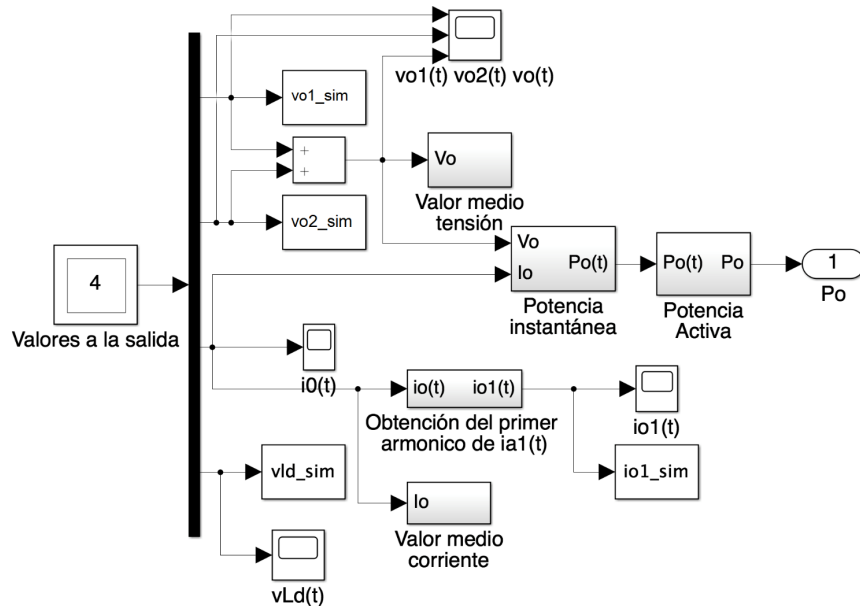


Figura 87: Resultados a la salida del sistema.

Los bloques más importantes empleados en el modelo Simulink:

Three-Phase Transformer: con este bloque se ha implementado las estructuras de unión de la red eléctrica y el rectificador.

Universal Bridge: Con este bloque se ha implementado rectificador trifásico no controlado de seis pulsos, el cual está formado por diodos.

THD: Con este bloque se ha calculado el THD (del inglés Total Harmonic Distortion) de la corriente de entrada.

RMS: Este bloque se utiliza para calcular el valor eficaz de diferentes magnitudes como la tensión y corriente de entrada.

Fourier: Este bloque se ha utilizado para el cálculo del primer armónico de la corriente de entrada.

Sobre este archivo se pueden realizar y guardar modificaciones que desee el usuario para estudiar otros comportamientos que se consideren oportunos o interesantes.

Pulsando el botón “**Restaurar Modelo**” se restaura el modelo a ejecutar por una copia de seguridad guardada y se sobrescribe.

Pulsando el botón “**Ver Teoría**” se abrirán los apuntes correspondientes a los rectificadores trifásicos no controlados dados por la asignatura de Electrónica de Potencia, lo cual sirve para completar la herramienta y ayudar al alumno a buscar respuestas a diferentes problemas que puedan surgir. La portada de estos apuntes puede verse en la Figura 88.

Lección: Rectificadores no controlados trifásicos

Lección: Rectificadores no controlados trifásicos

Tema: Convertidores AC/DC

Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá,



Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá

1 of 50

Figura 88: Transparencias sobre rectificadores monofásicos no controlados [2]

En la pestaña “**Introducir Datos**” se muestran los distintos parámetros que puede introducir el usuario para la simulación del circuito los cuales son los siguientes:

- * Tensión de Entrada $V_s(V_{rms})$
- * Frecuencia fundamental (Hz)
- * Inductancia de Entrada $L_s(H)$
- * Resistencia de Entrada $R_s(Ohm)$

- * Inductancia a la salida $L_d(H)$
- * Condensador $C(\mu F)$
- * Resistencia en la carga $R_o(Ohm)$
- * Resistencia en directo del diodo $R_{on}(Ohm)$
- * Voltaje en directo del diodo $V_f(V)$

Si se desea introducir los valores por defecto se debe pulsar el botón “**Valores por defecto**” tras lo cual se cargarán dichos valores a los parámetros y se mostrarán dichos valores por pantalla que se puede ver en la Figura 89. Estos valores hacen que la red se comporte de manera ideal, es decir, la inductancia a la entrada es prácticamente nula al igual que la resistencia R_s .

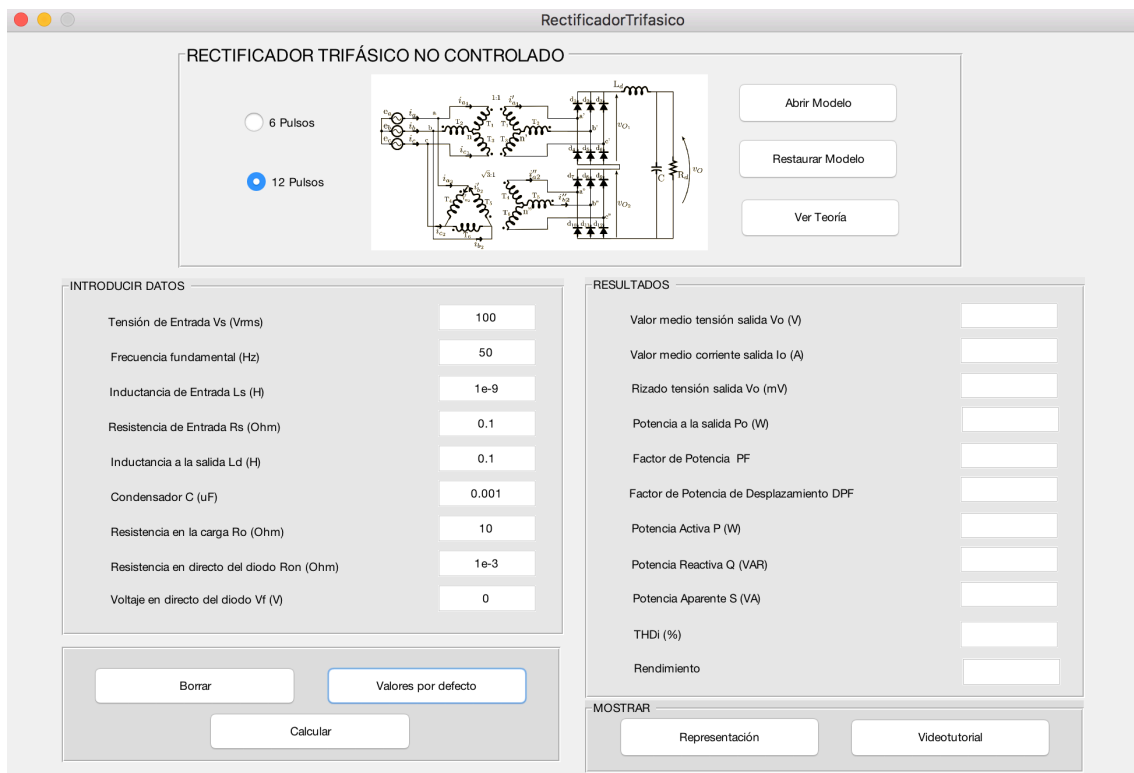


Figura 89: Valores por defecto del rectificador trifásico no controlado de doce pulsos.

Si se desea modificar algún valor, sólo se debe seleccionar la casilla y escribir el valor deseado en ella.

Para ejecutar el modelo Simulink y obtener los resultados se selecciona el botón “**Calcular**”, tras lo cual, una vez haya finalizado la simulación se mostrarán en la pestaña “**Resultados**” mostrados en la donde se encuentran:

- * Valor medio tensión salida $V_o(V)$
- * Valor medio corriente salida $I_o(A)$
- * Rizado tensión salida $V_o(mV)$
- * Potencia a la salida $P_o(W)$
- * Factor de Potencia PF
- * Factor de Potencia de Desplazamiento DPF

- * Potencia Activa PP (W)
- * Potencia Reactiva Q (VAR)
- * Potencia Aparente S (VA)
- * THDi (%)
- * Rendimiento

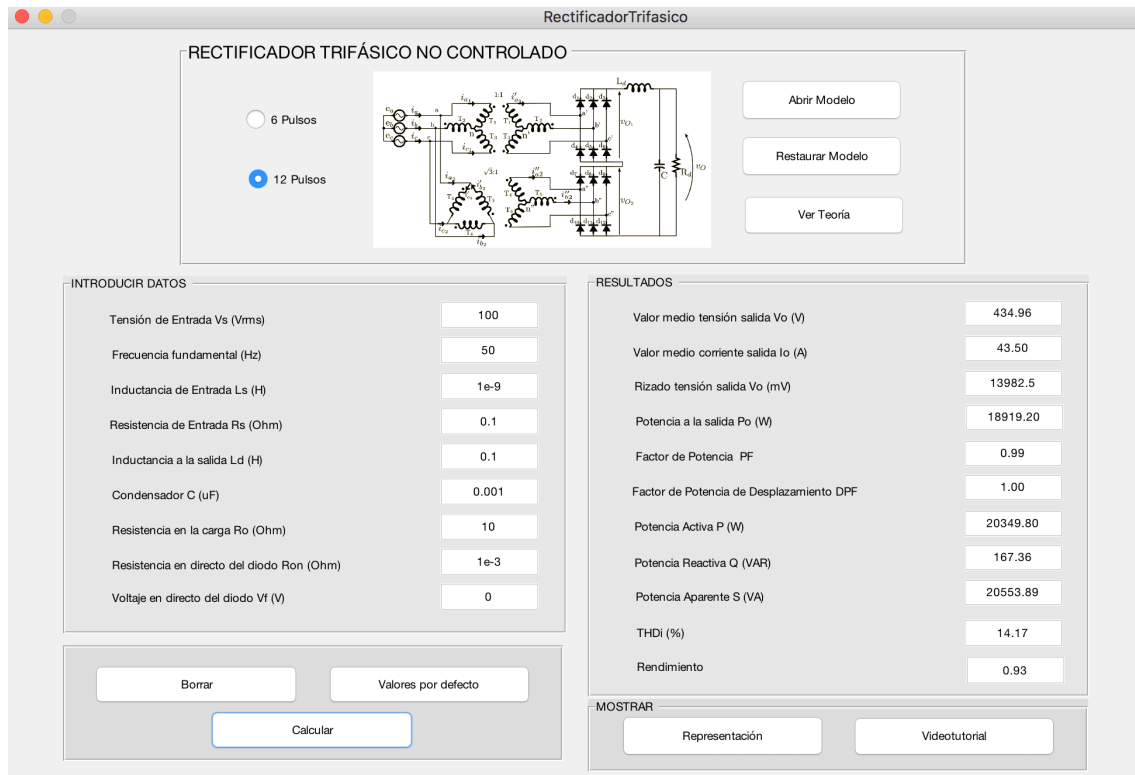


Figura 90: Resultados de la simulación

Para eliminar todos los valores de la interfaz, tanto de la pestaña “**Introducir Datos**” como de la pestaña “**Resultados**”, se pulsa el botón “**Borrar**”.

Además, la herramienta consta de videos explicativos de cada interfaz, el cual sirve como manual de usuario, para acceder al video correspondiente a esta interfaz el usuario debe pulsar el botón “**Videotutorial**”, el cual ha sido un desarrollo propio.

Por último, se puede acceder al botón “**Representación**” el cual abrirá otra interfaz gráfica con las representaciones más relevantes del circuito mostrada en la Figura 91.

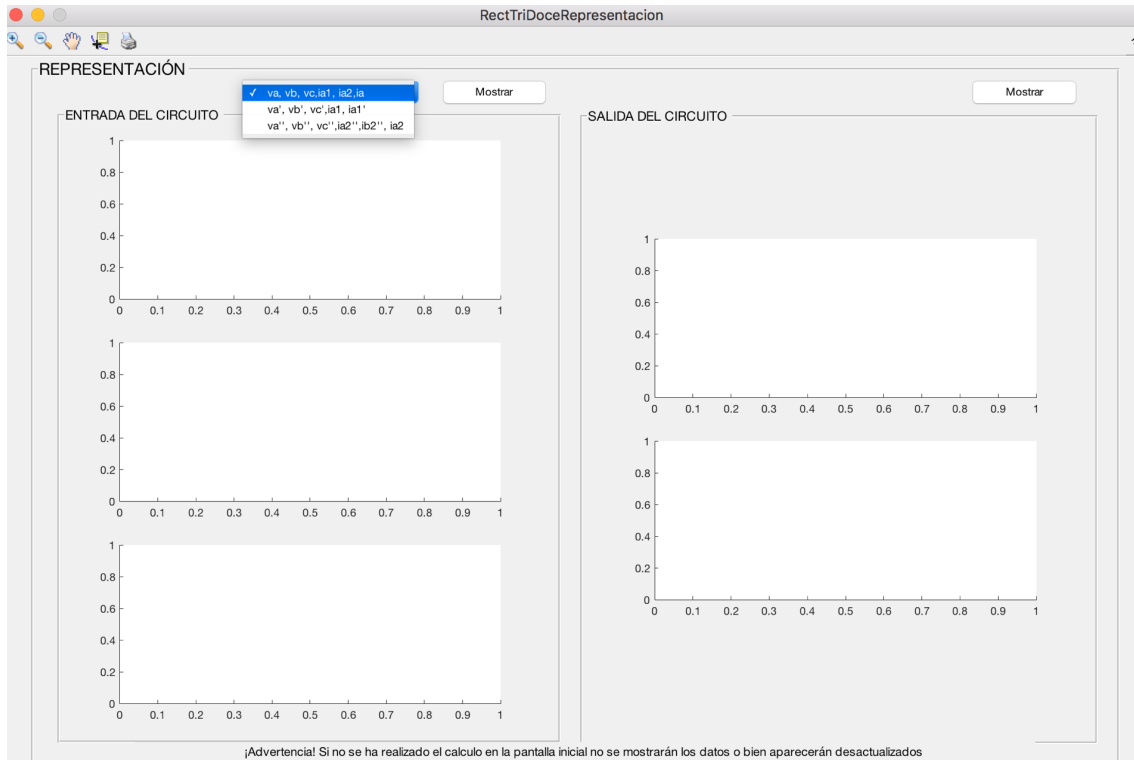


Figura 91: Interfaz gráfica de la representación del rectificador trifásico de doce pulsos

En esta ventana hay un desplegable que permiten seleccionar diferentes opciones de visualización de la entrada del sistema, las cuales aparecerán tras pulsar el botón “Mostrar”. Dependiendo de que botón “Mostrar” se pulse, se mostrará los resultados a la entrada o a la salida del circuito.

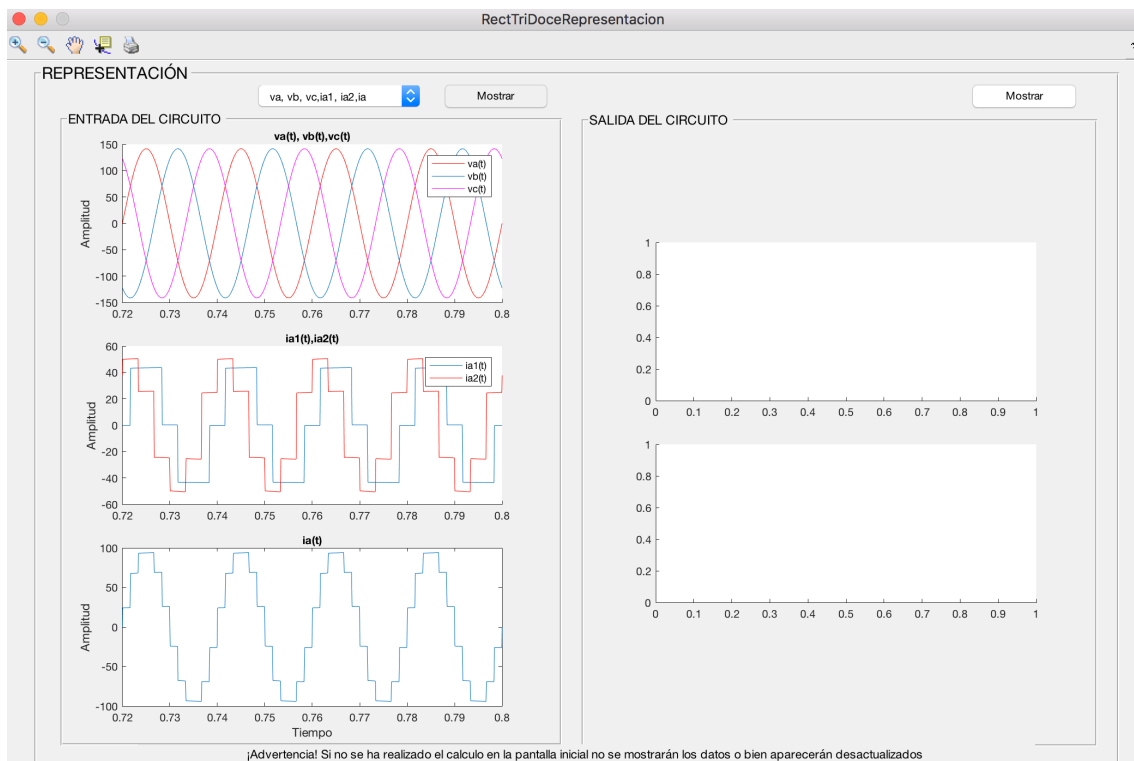


Figura 92: Visualización de las representaciones del circuito.

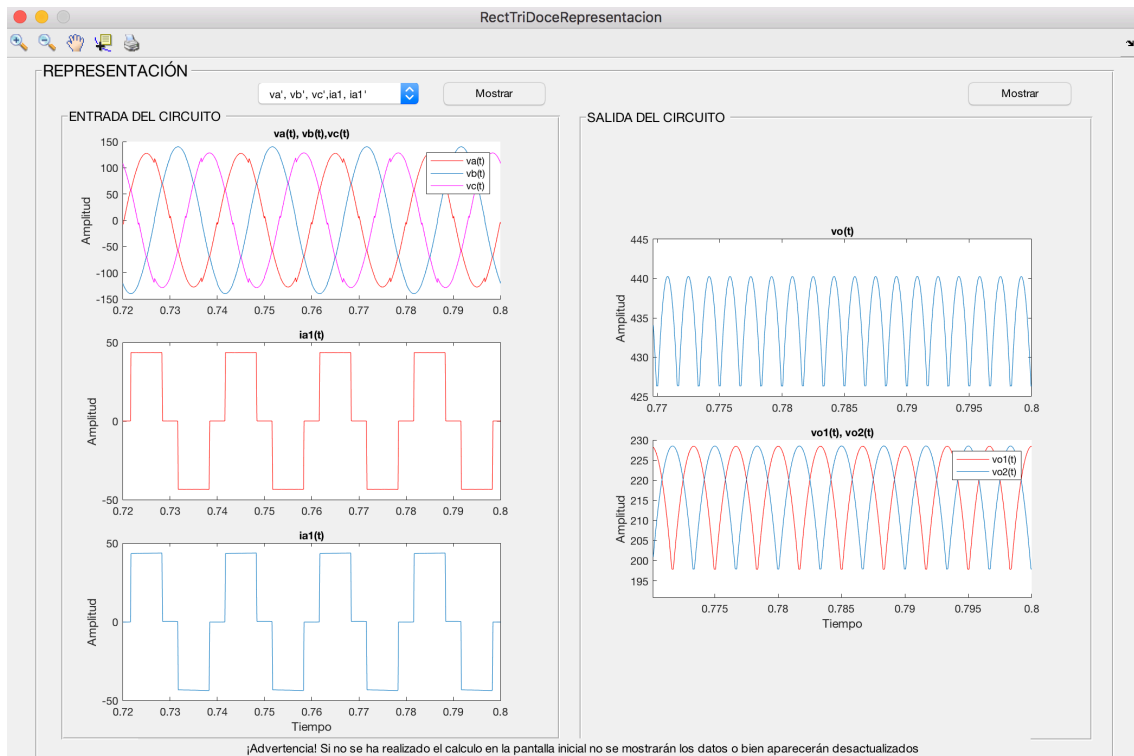


Figura 93: Visualización de las representaciones del circuito.

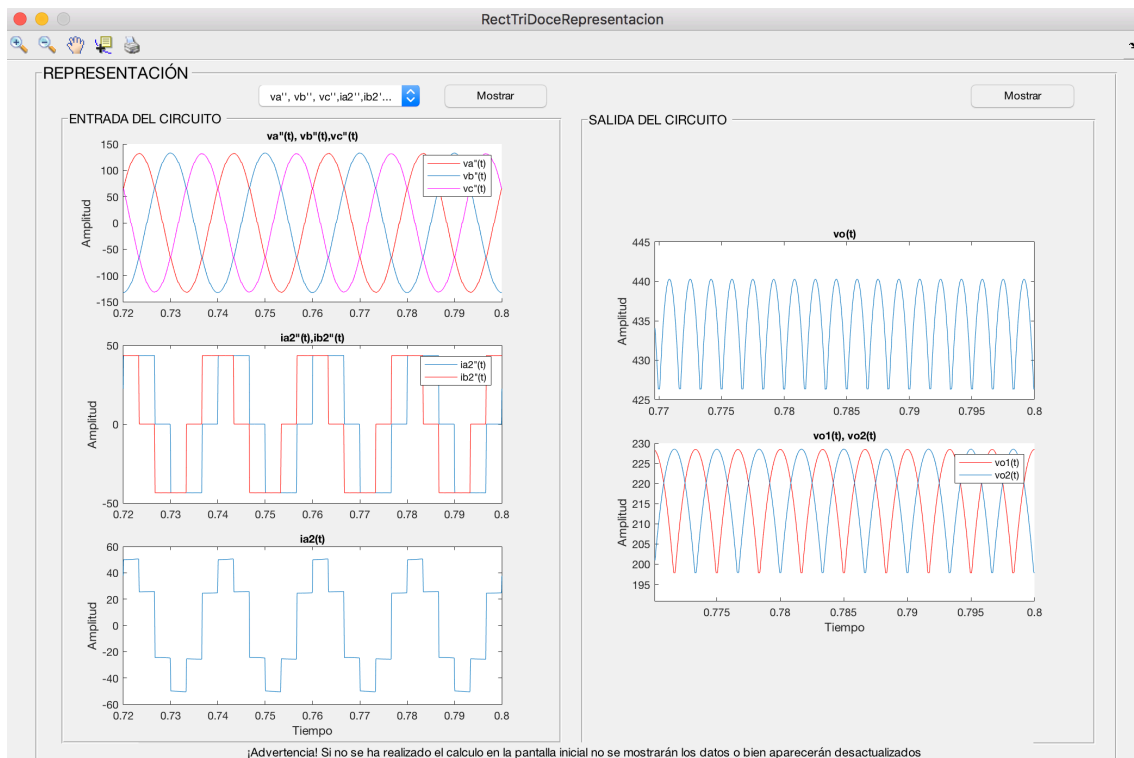


Figura 94: Visualización de las representaciones del circuito.

Es necesario realizar el cálculo en la pantalla principal para que los datos sean actualizados tal y como se indica en la interfaz.

¡Advertencia! Si no se ha realizado el cálculo en la pantalla inicial no se mostrarán los datos o bien aparecerán desactualizados

Figura 95: Mensaje de advertencia sobre la necesidad del cálculo previo a la representación

Si se desea aumentar, disminuir o moverse por las representaciones se seleccionarán los botones situados en la parte superior izquierda de la interfaz.

Al igual que si se desea ver el valor en algún punto o incluso imprimir las representaciones.

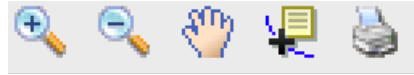


Figura 96: Botones de ayuda

3.2.3 Rectificadores monofásicos controlados

Al pulsar en el botón “**Rectificador Controlado Monofásico**” se abre la ventana mostrada en la Figura 97 con la interfaz gráfica asociada a estos rectificadores.

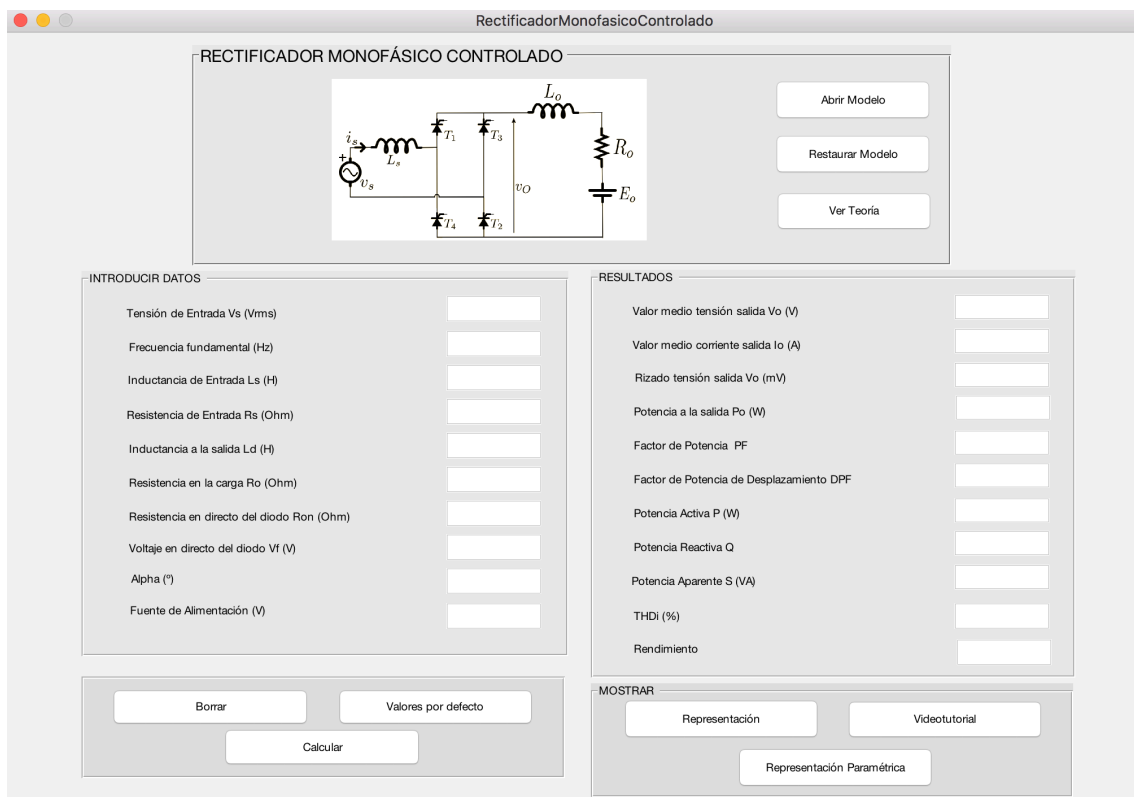


Figura 97. Interfaz gráfica rectificador monofásico controlado

En la interfaz se puede observar el circuito del rectificador en puente completo el cual corresponde al visto en la teoría, en la Figura 33.

Para visualizar dicho circuito en Simulink se debe pulsar el botón “**Abrir Modelo**”, lo que abrirá el archivo .slx, que es el mostrado en la Figura 101, en el cual se ha añadido la resistencia de red R_s .

En este tipo de rectificador se ha tenido que configurar el disparo del tiristor para lo cual se han usado el bloque de Pulse Generator y además sabiendo que ambos debían depender del parámetro alpha y estar desfasados 180° ($T_s/2$) el uno del otro. Para finalizar los tiristores T_1 y T_2 deben de tener el mismo disparo al igual que T_3 y T_4 . Por ello observando la ayuda de Matlab y comparándola con

la disposición teórica estudiada sabemos que la conexión de los Pulse Generator es la siguiente.

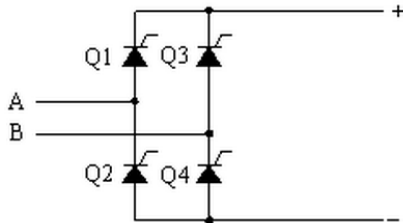


Figura 98. Disposición de los tiristores en el puente en H

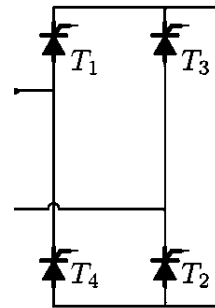


Figura 99. Disposición de los tiristores en el puente en H

A continuación, se muestra una las visualizaciones de la tensión v_{ab} y los pulsos generados para los tiristores siendo el ángulo de disparo de 30° .

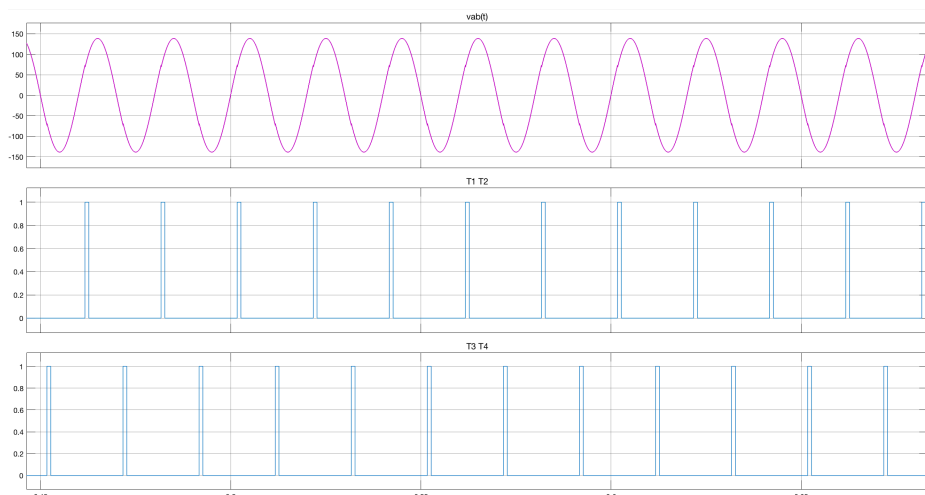


Figura 100. Visualización de los disparos.

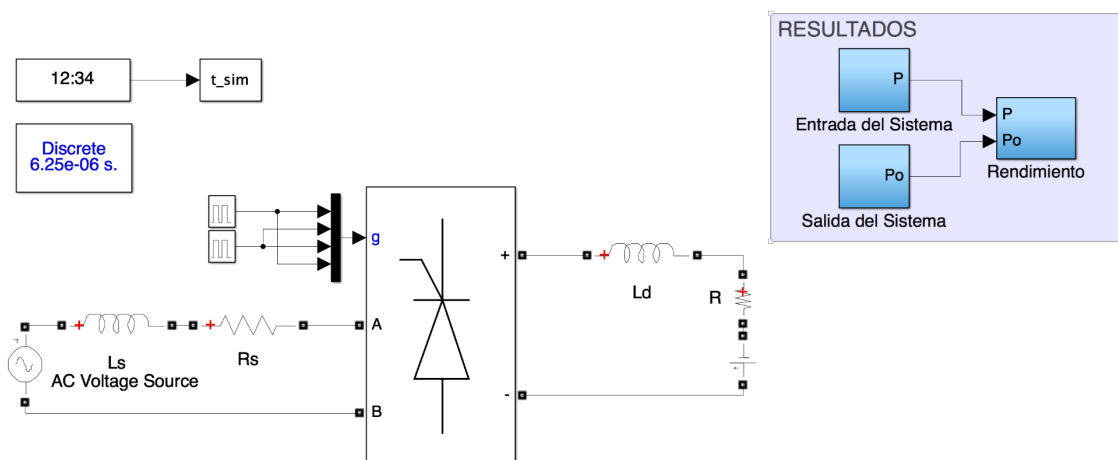


Figura 101: Modelo Simulink del rectificador monofásico controlado en puente completo.

Dentro del modelo de Simulink se puede acceder a los valores y resultados relevantes de la entrada del sistema o de la salida seleccionando el subsistema que se desee. Los resultados de la entrada del sistema se muestran en la Figura 103, mientras que los de la salida son los mostrados en la Figura 102.

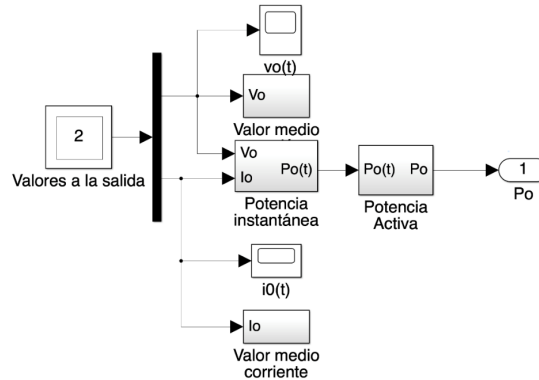


Figura 102: Resultados a la salida del sistema.

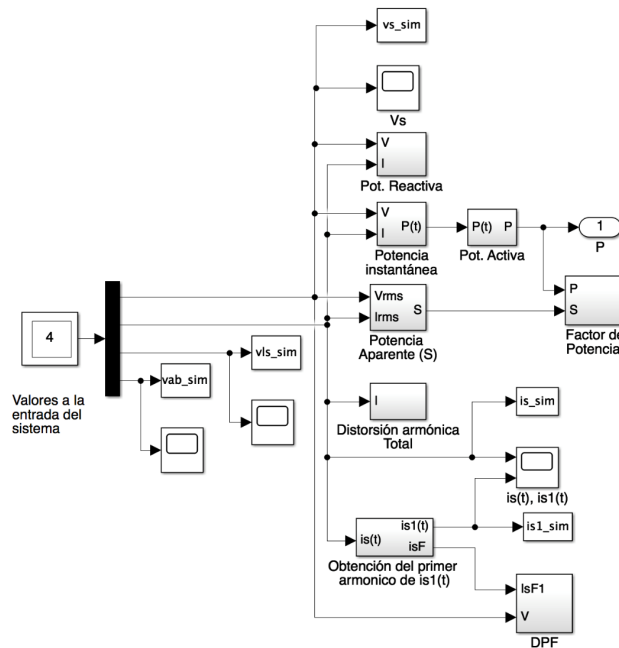


Figura 103: Resultados a la entrada del sistema.

Los bloques más importantes empleados en el modelo Simulink:

Universal Bridge: Con este bloque se ha implementado el puente completo del rectificador monofásico no controlado, el cual está formado por tiristores.

Pulse Generator: con dos bloques se implementa el disparo de los tiristores para el correcto funcionamiento del sistema, teniendo como parámetro la variable α .

THD: Con este bloque se ha calculado el THD (del inglés Total Harmonic Distortion) de la corriente de entrada.

RMS: Este bloque se utiliza para calcular el valor eficaz de diferentes magnitudes

como la tensión y corriente de entrada.

Fourier: Este bloque se ha utilizado para el cálculo del primer armónico de la corriente de entrada.

Sobre este archivo se pueden realizar y guardar modificaciones que desee el usuario para estudiar otros comportamientos que se consideren oportunos o interesantes.

Pulsando el botón “**Restaurar Modelo**” se restaura el modelo a ejecutar por una copia de seguridad guardada y se sobrescribe.

Pulsando el botón “**Ver Teoría**” se abrirán los apuntes correspondientes a los rectificadores monofásicos controlados dados por la asignatura de Electrónica de Potencia, lo cual sirve para completar la herramienta y ayudar al alumno a buscar respuestas a diferentes problemas que puedan surgir. La portada de estos apuntes puede verse en la Figura 104.

Lección: Rectificadores controlados

Lección: Rectificadores controlados

Tema: Convertidores AC/DC

Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá,



Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá

1 of 66

Figura 104: Transparencias sobre rectificadores monofásicos controlados [3]

En la pestaña “**Introducir Datos**” se muestran los distintos parámetros que puede introducir el usuario para la simulación del circuito los cuales son los siguientes:

- * Tensión de Entrada $V_s(V_{rms})$
- * Frecuencia fundamental (Hz)

- * Inductancia de Entrada $L_s(H)$
- * Resistencia de Entrada $R_s(Ohm)$
- * Inductancia a la salida $L_d(H)$
- * Resistencia en la carga $R_o(Ohm)$
- * Resistencia en directo del diodo $R_{on}(Ohm)$
- * Voltaje en directo del diodo $V_f(V)$
- * Alpha ($^{\circ}$)
- * Fuente de Alimentación (V)

Si se desea introducir los valores por defecto se debe pulsar el botón “**Valores por defecto**” tras lo cual se cargarán dichos valores a los parámetros y se mostrarán dichos valores por pantalla que se puede ver en la Figura 105. Estos valores hacen que la red se comporte de manera ideal, es decir, la inductancia a la entrada (L_s) es prácticamente nula al igual que la resistencia (R_s).

Figura 105: Valores por defecto del rectificador monofásico controlado en puente completo

Si se desea modificar algún valor, sólo se debe seleccionar la casilla y escribir el valor deseado en ella.

Para ejecutar el modelo Simulink y obtener los resultados se selecciona el botón “**Calcular**”, tras lo cual, una vez haya finalizado la simulación se mostrarán en la pestaña “**Resultados**” mostrados en la Figura 106 donde se encuentran:

- * Valor medio tensión salida $V_o(V)$
- * Valor medio corriente salida $I_o(A)$

- * Rizado tensión salida $V_o(mV)$
- * Potencia a la salida $P_o(W)$
- * Factor de Potencia PF
- * Factor de Potencia de Desplazamiento DPF
- * Potencia Activa $P(W)$
- * Potencia Reactiva $Q(VAR)$
- * Potencia Aparente $S(VA)$
- * THDi (%)
- * Rendimiento

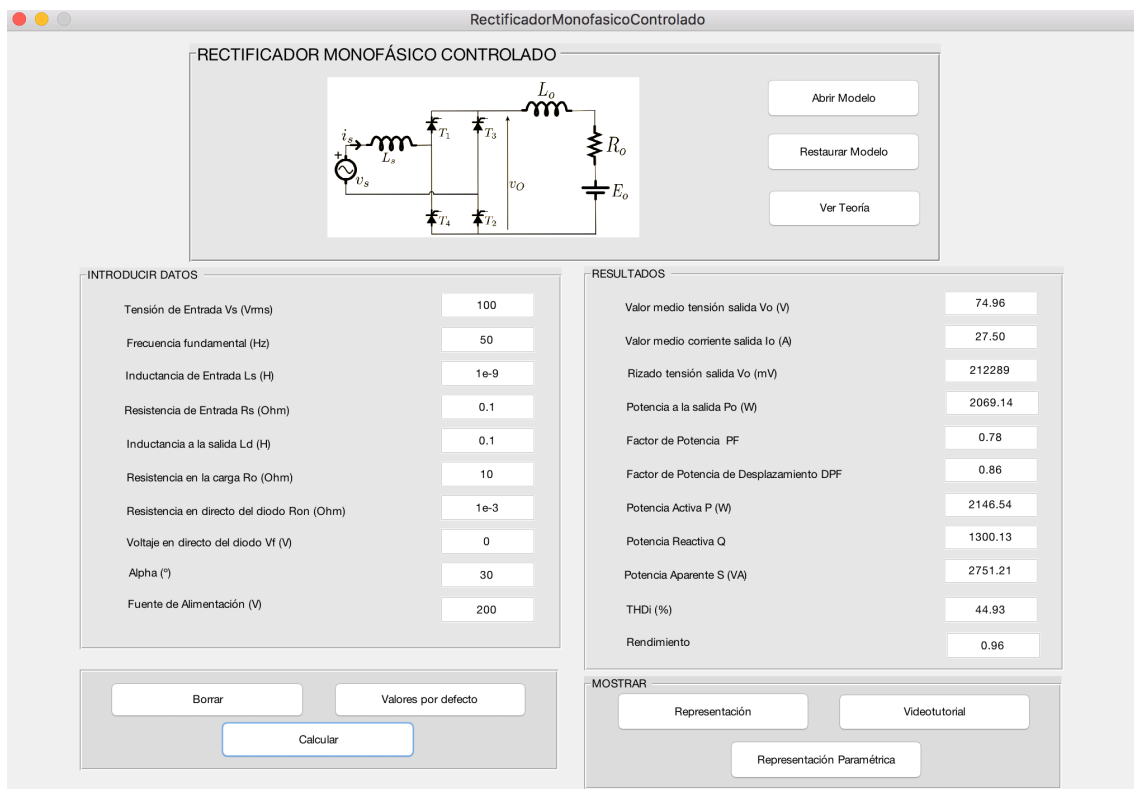


Figura 106: Resultados de la simulación

Para eliminar todos los valores de la interfaz, tanto de la pestaña “**Introducir Datos**” como de la pestaña “**Resultados**”, se pulsa el botón “**Borrar**”.

Además, la herramienta consta de videos explicativos de cada interfaz, el cual sirve como manual de usuario, para acceder al video correspondiente a esta interfaz el usuario debe pulsar el botón “**Videotutorial**”, realizado durante este proyecto.

El botón “**Representación**” abrirá otra interfaz gráfica con las representaciones más relevantes del circuito mostrada en la Figura 107.



Figura 107: Interfaz gráfica de la representación del rectificador monofásico controlado

Para poder visualizar las representaciones se pulsa el botón “**Mostrar**” siempre y cuando se haya realizado el cálculo en la pantalla inicial para poder mostrar los datos actualizados.

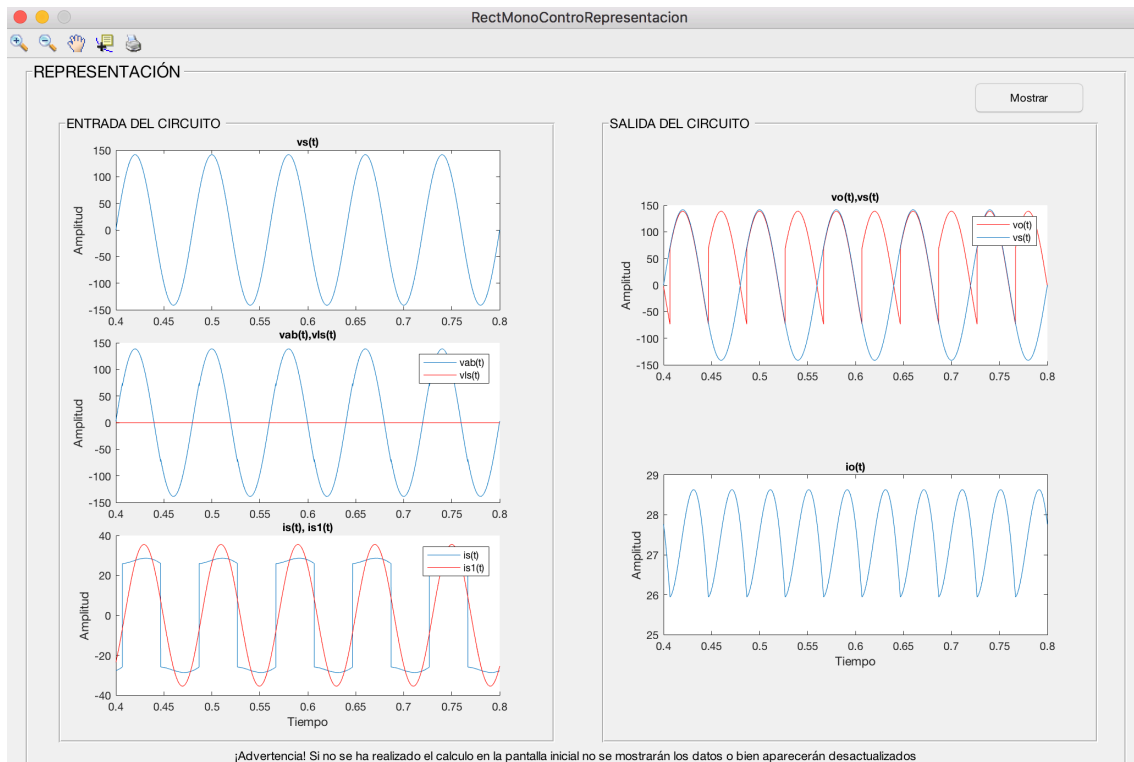


Figura 108: Visualización de las representaciones del circuito con un ángulo de disparo de 30° .

¡Advertencia! Si no se ha realizado el calculo en la pantalla inicial no se mostrarán los datos o bien aparecerán desactualizados

Figura 109: Mensaje de advertencia sobre la necesidad del cálculo previo a la representación

Si se desea aumentar, disminuir o moverse por las representaciones se seleccionarán los botones situados en la parte superior izquierda de la interfaz.

Al igual que si se desea ver el valor en algún punto o incluso imprimir las representaciones.

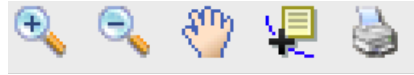


Figura 110: Botones de ayuda

Por último, se puede acceder al botón “**Representación Paramétrica**” el cual abrirá otra interfaz gráfica donde se representarán la potencia aparente (S), su primer armónico (S_1), la potencia activa (P) y el primer armónico de la potencia reactiva (Q_1).

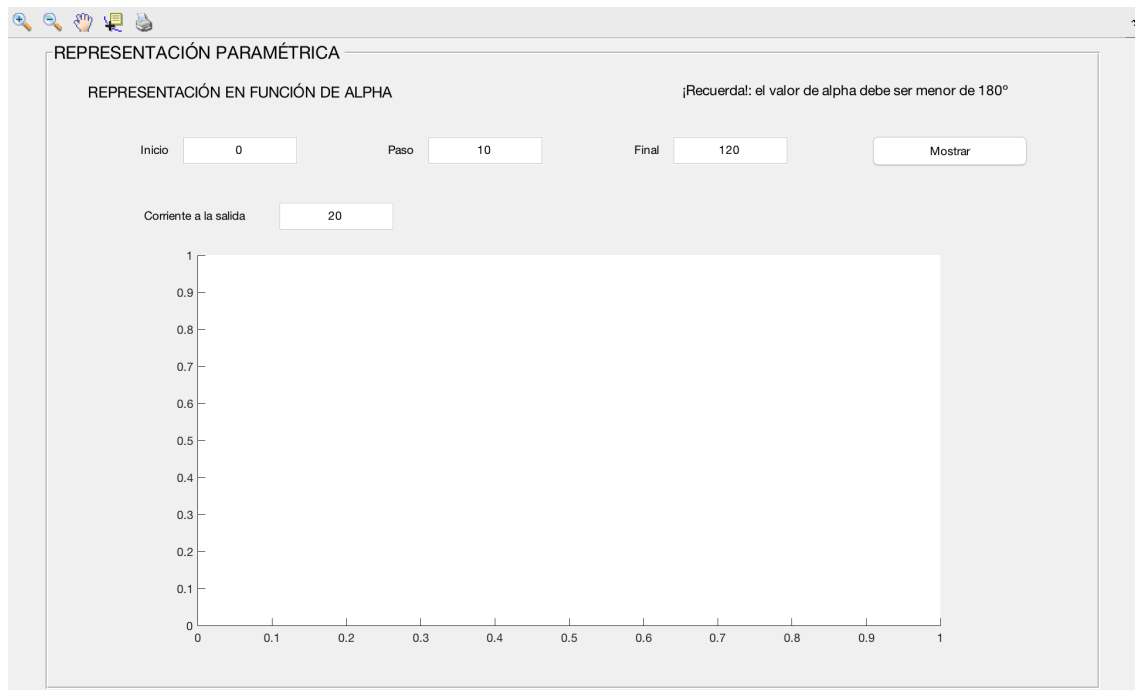


Figura 111: Interfaz gráfica de la representación paramétrica en el rectificador monofásico controlado.

Para la obtención de esta simulación se ejecutará otro circuito donde se ha forzado que la corriente a la salida sea constante con un generador de corriente. El modelo en Simulink es el que se muestra en la figura siguiente, el cual se ejecutará tantas veces como pasos haya desde el valor inicial de alpha hasta el valor final, los cuáles serán elegidos por el usuario habiendo ya unos por defecto, al igual que la corriente a la salida.

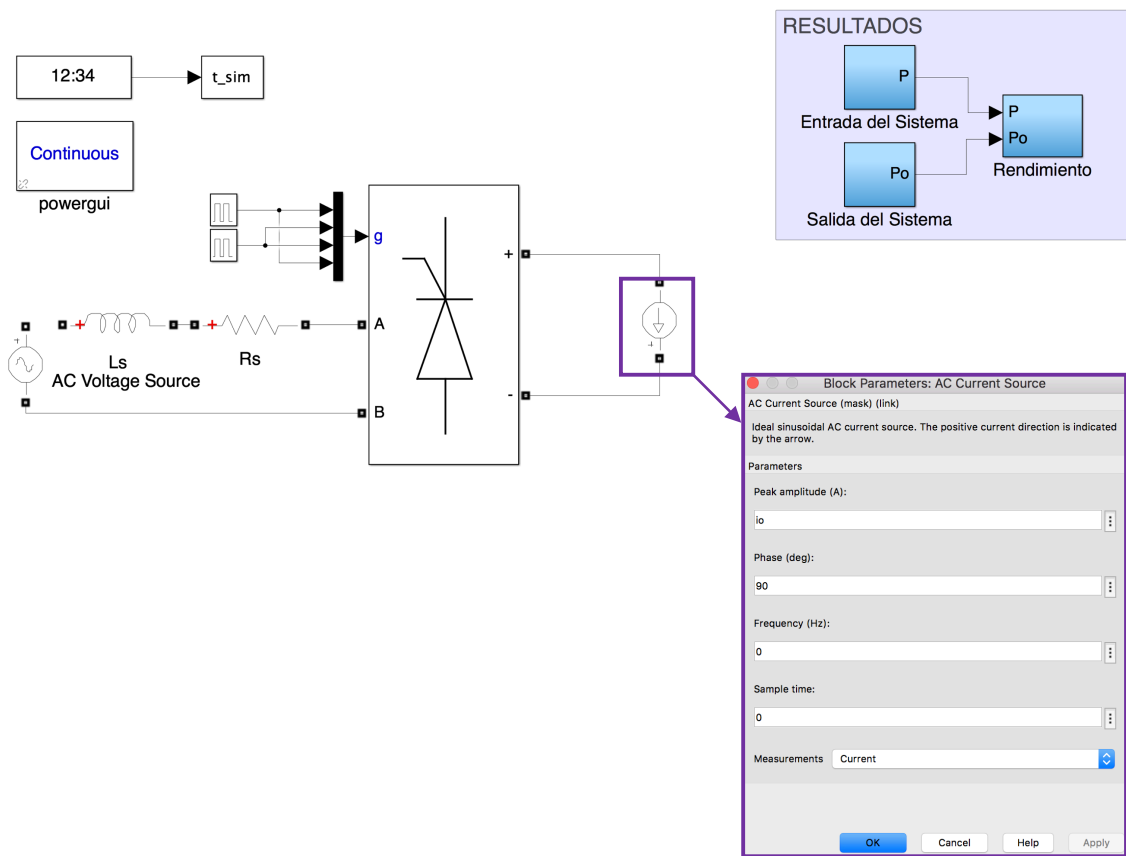


Figura 112. Modelo en Simulink del rectificador monofásico controlado con corriente constante a la salida

Para obtener una corriente constante a la salida en el módulo “AC Current Source” se debe seleccionar que la frecuencia sea nula y un desfase de 90°, lo cual se muestra en la figura anterior.

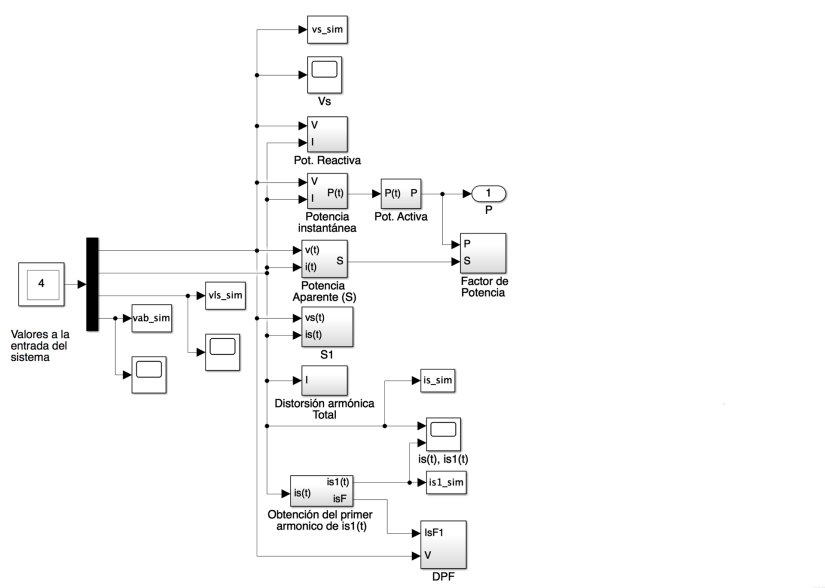


Figura 113. Resultados a la entrada del sistema

Una vez elegido el valor inicial, final y paso de la variable alpha y el valor de la corriente a la salida se pulsará el botón “**Mostrar**” para obtener los resultados. Para que el usuario sepa el tiempo restante para finalizar la tarea salda una ventana informativa.

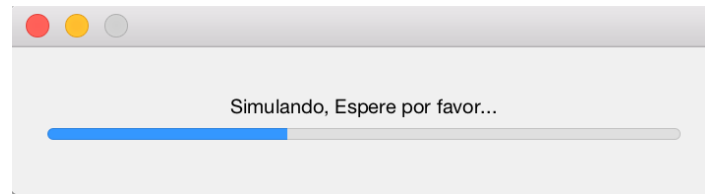


Figura 114: Ventana informativa del avance de la simulación

En el caso mostrado a continuación se pueden ver los resultados obtenidos tras la ejecución de la simulación paramétrica siendo el valor mínimo del parámetro alpha de 0° y el valor máximo de 120° . Dichos valores pueden ser modificados por el usuario siempre y cuando el valor de alpha no alcance los 180° tal y como se indica en la interfaz.

¡Recuerda!: el valor de alpha debe ser menor de 180°

Figura 115. Mensaje de Advertencia para que el usuario sepa el valor máximo del parámetro alpha

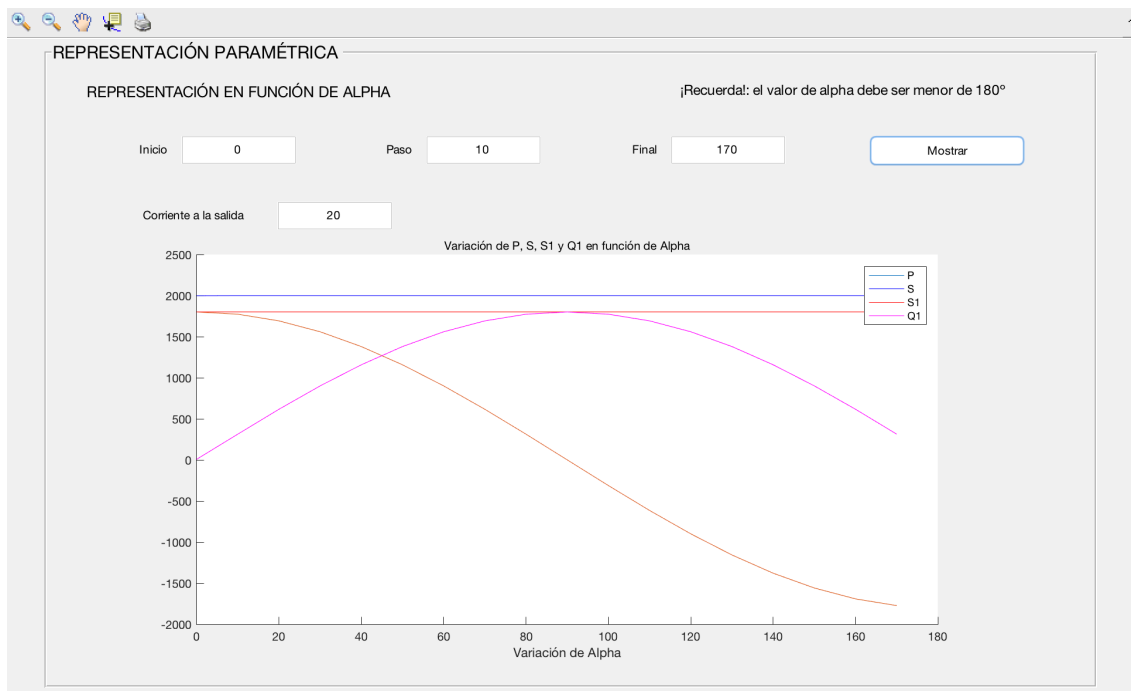


Figura 116: Representación paramétrica del rectificador monofásico controlado con corriente constante a la salida

3.2.4 Rectificadores trifásicos controlados

Al pulsar en el botón “**Rectificador Controlado Trifásico**” se abre la ventana mostrada en la Figura 117 con la interfaz gráfica asociada a estos rectificadores.

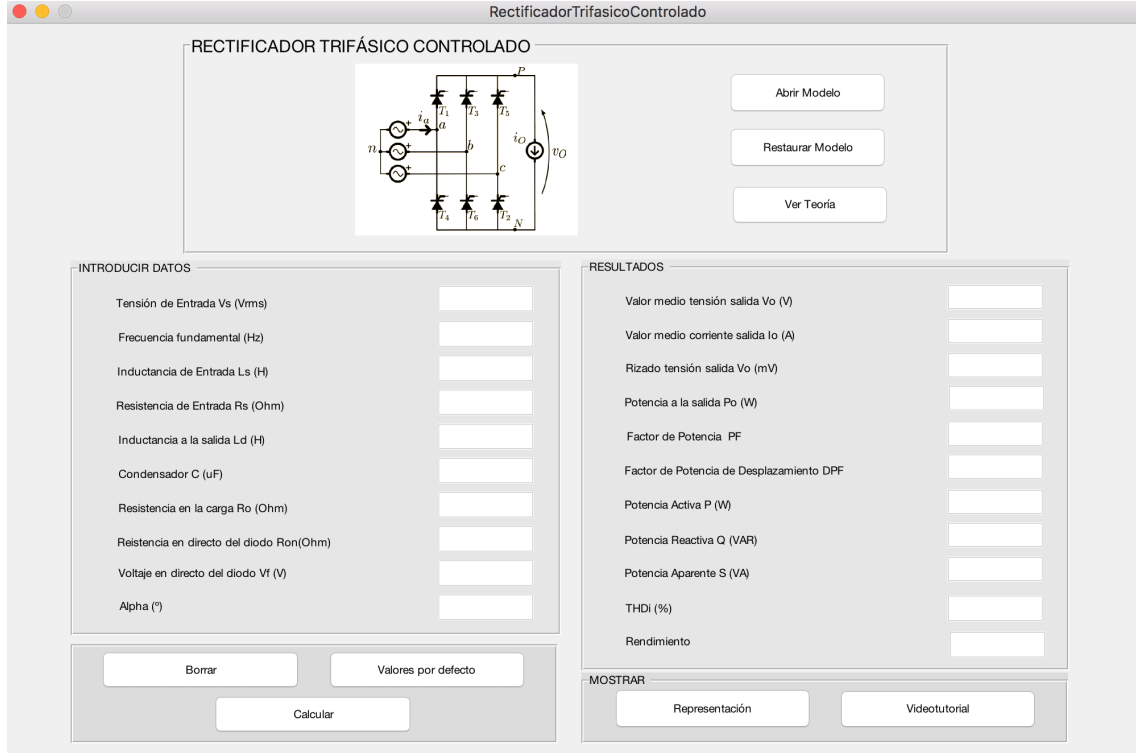


Figura 117. Interfaz gráfica rectificador trifásico controlado

En la interfaz se puede observar el circuito del rectificador en puente completo el cual corresponde al visto en la teoría, en la Figura 45.

Para visualizar dicho circuito en Simulink se debe pulsar el botón “**Abrir Modelo**”, lo que abrirá el archivo .slx, que es el mostrado en la Figura 118, en el cual se ha añadido la resistencia y la bobina de red (R_s y L_s).

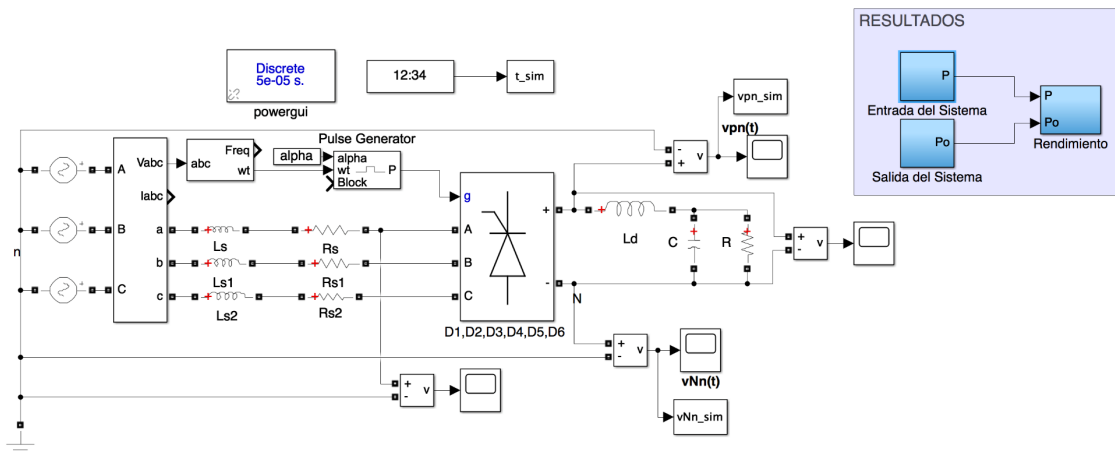


Figura 118: Modelo Simulink del rectificador trifásico controlado en puente completo.

En la figura siguiente se muestran las tensiones de las distintas ramas a la entrada del puente de tiristores además de la generación de los disparos generados que se mandan a la entrada 'g' de dicho puente.

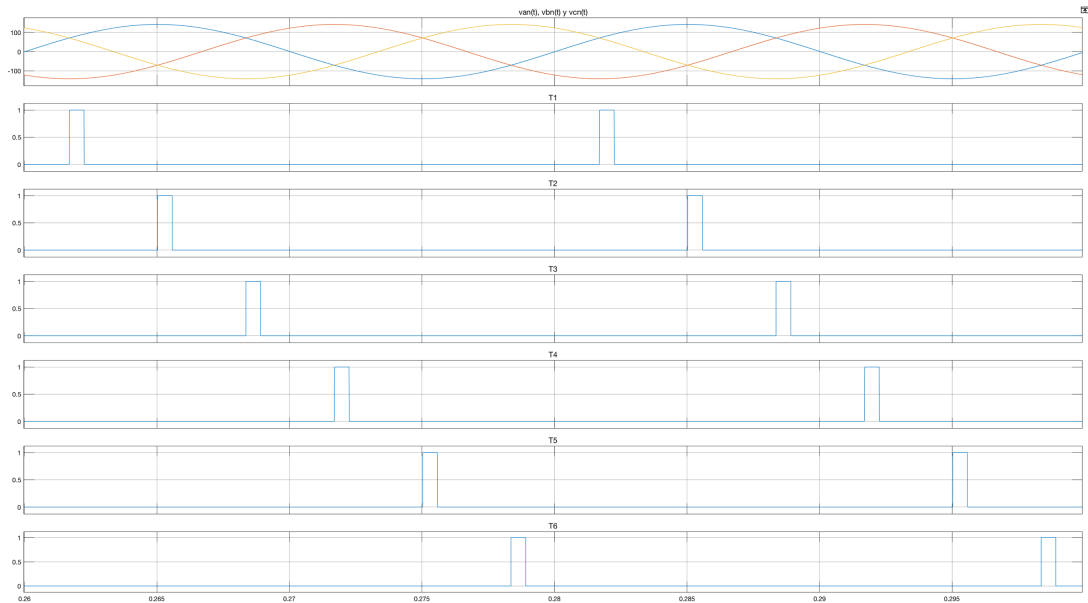


Figura 119. Gráfica de las tensiones a la entrada del puente de tiristores y los disparos de los mismos

Dentro del modelo de Simulink se puede acceder a los valores y resultados relevantes de la entrada del sistema o de la salida seleccionando el subsistema que se desee. Los resultados de la entrada del sistema se muestran en la Figura 120 y Figura 121, mientras que los de la salida son los mostrados en la Figura 122.

Valores a la entrada del sistema

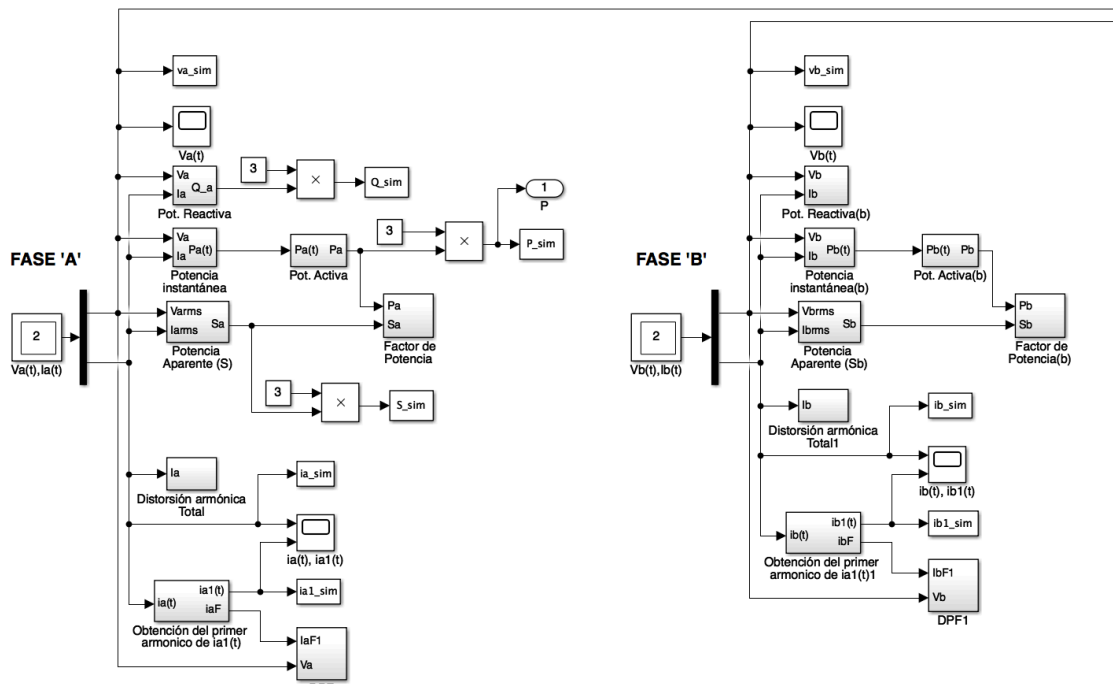


Figura 120: Resultados a la entrada del sistema.

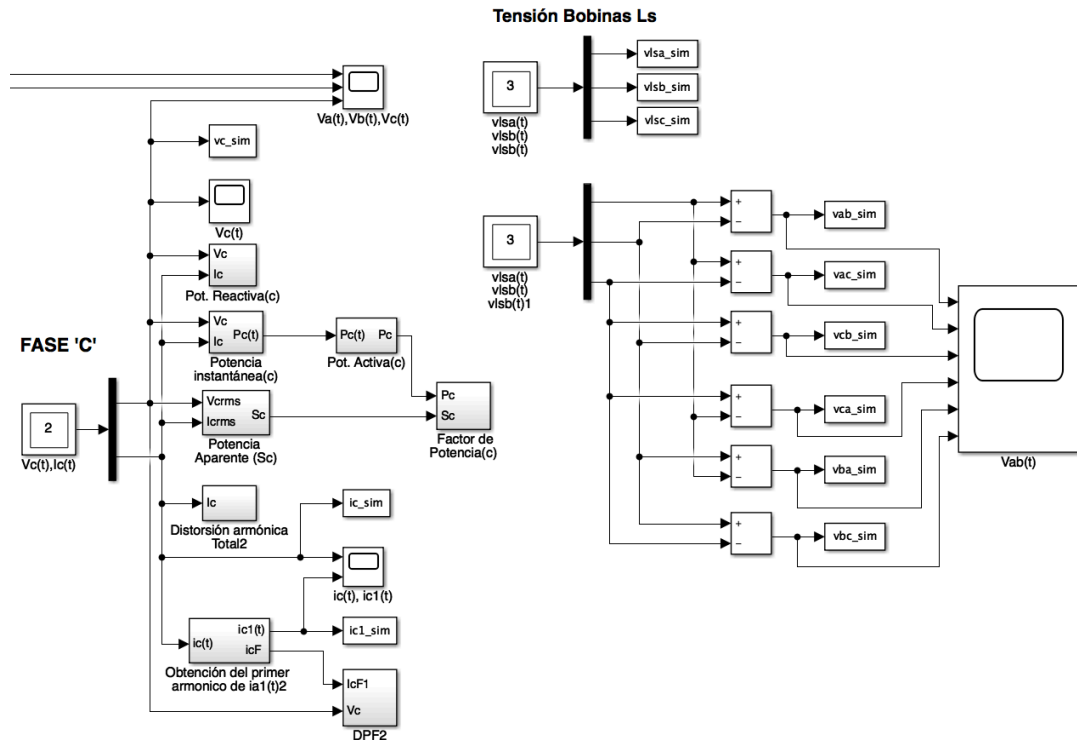


Figura 121: Resultados a la entrada del sistema

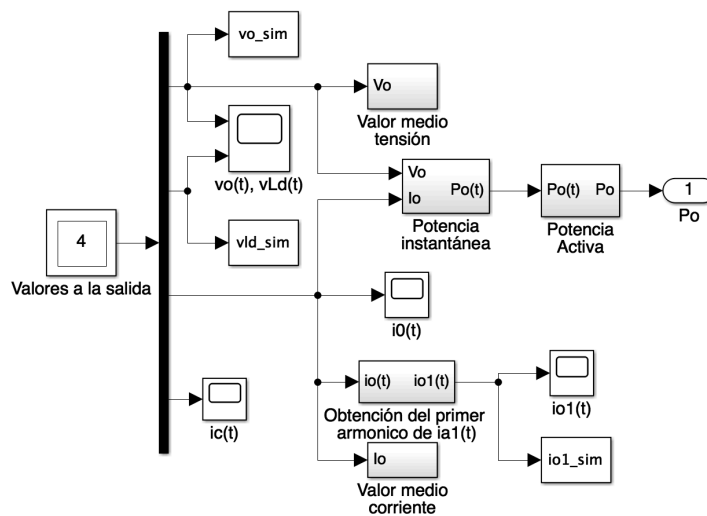


Figura 122: Resultados a la salida del sistema.

Los bloques más importantes empleados en el modelo Simulink:

Three-Phase V-I Measurement: bloque utilizado para obtener la tensión V_{abc} , para la creación del disparo de los tiristores.

Phased Locked Loop (PLL): bloque utilizado para la obtención de ωt en función de la tensión V_{abc} .

Pulse Generator: con dos bloques se implementa el disparo de los tiristores para el correcto funcionamiento del sistema, teniendo como parámetro la variable α y ωt .

Universal Bridge: Con este bloque se ha implementado el puente completo del rectificador monofásico no controlado, el cual está formado por tiristores.

THD: Con este bloque se ha calculado el THD (del inglés Total Harmonic Distortion) de la corriente de entrada.

RMS: Este bloque se utiliza para calcular el valor eficaz de diferentes magnitudes como la tensión y corriente de entrada.

Fourier: Este bloque se ha utilizado para el cálculo del primer armónico de la corriente de entrada.

Sobre este archivo se pueden realizar y guardar modificaciones que desee el usuario para estudiar otros comportamientos que se consideren oportunos o interesantes.

Pulsando el botón “**Restaurar Modelo**” se restaura el modelo a ejecutar por una copia de seguridad guardada y se sobrescribe.

Pulsando el botón “**Ver Teoría**” se abrirán los apuntes correspondientes a los rectificadores trifásicos controlados dados por la asignatura de Electrónica de Potencia, lo cual sirve para completar la herramienta y ayudar al alumno a buscar respuestas a diferentes problemas que puedan surgir.

Lección: Rectificadores controlados

Lección: Rectificadores controlados

Tema: Convertidores AC/DC

Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá,



En la pestaña “**Introducir Datos**” se muestran los distintos parámetros que puede introducir el usuario para la simulación del circuito los cuales son los siguientes:

- * Tensión de Entrada $V_s(V_{rms})$
- * Frecuencia fundamental (Hz)
- * Inductancia de Entrada $L_s(H)$
- * Resistencia de Entrada $R_s(Ohm)$
- * Inductancia a la salida $L_d(H)$
- * Condensador $C(\mu F)$
- * Resistencia en la carga $R_o(Ohm)$
- * Resistencia en directo del diodo $R_{on}(Ohm)$
- * Voltaje en directo del diodo $V_f(V)$
- * Alpha ($^\circ$)

Si se desea introducir los valores por defecto se debe pulsar el botón “**Valores por defecto**” tras lo cual se cargarán dichos valores a los parámetros y se mostrarán dichos valores por pantalla que se puede ver en la Figura 124. Estos valores hacen que la red se comporte de manera ideal, es decir, la inductancia a la entrada es prácticamente nula al igual que la resistencia R_s .

Figura 124: Valores por defecto del rectificador trifásico controlado en puente completo

Si se desea modificar algún valor, sólo se debe seleccionar la casilla y escribir el valor deseado en ella.

Para ejecutar el modelo Simulink y obtener los resultados se selecciona el botón “**Calcular**”, tras lo cual, una vez haya finalizado la simulación se mostrarán en la pestaña “**Resultados**” mostrados en la Figura 125 donde se encuentran:

- * Valor medio tensión salida $V_o(V)$
- * Valor medio corriente salida $I_o(A)$
- * Rizado tensión salida $V_o(mV)$
- * Potencia a la salida $P_o(W)$
- * Factor de Potencia PF
- * Factor de Potencia de Desplazamiento DPF
- * Potencia Activa $PP(W)$
- * Potencia Reactiva $Q(VAR)$
- * Potencia Aparente $S(VA)$
- * THDi (%)
- * Rendimiento

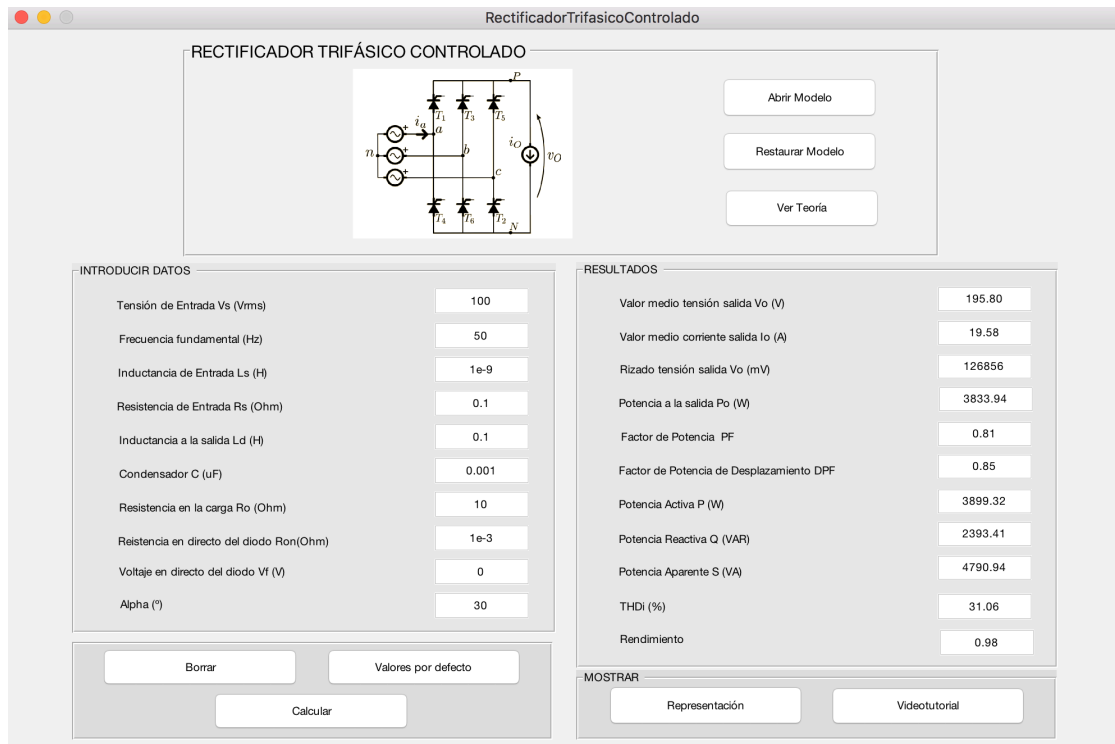


Figura 125: Resultados de la simulación

Para eliminar todos los valores de la interfaz, tanto de la pestaña “**Introducir Datos**” como de la pestaña “**Resultados**”, se pulsa el botón “**Borrar**”.

Además, la herramienta consta de videos explicativos de cada interfaz, el cual sirve como manual de usuario, para acceder al video correspondiente a esta interfaz el usuario debe pulsar el botón “**Videotutorial**”, el cual ha sido de desarrollo propio.

El botón “**Representación**” abrirá otra interfaz gráfica con las representaciones más relevantes del circuito mostrada en la Figura 126.

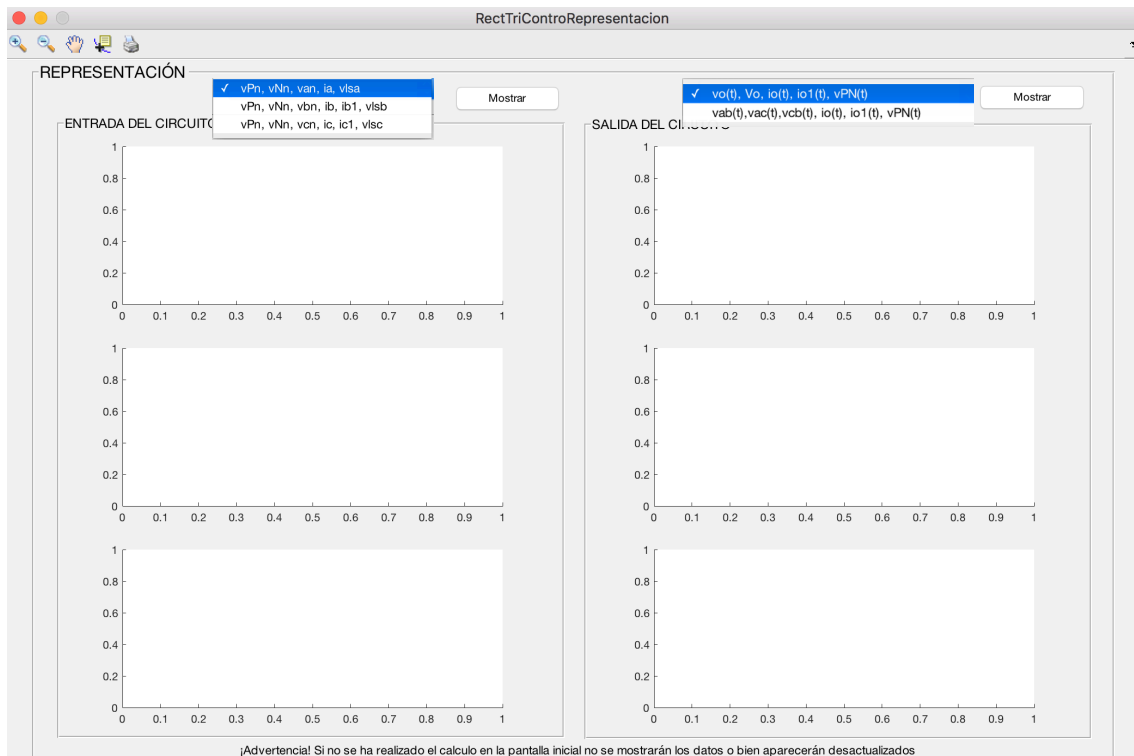


Figura 126: Interfaz gráfica de la representación del rectificador trifásico

En esta ventana hay dos desplegables que permiten seleccionar diferentes opciones de visualización de distintas variables relevantes del circuito, las cuales aparecerán tras pulsar el botón **“Mostrar”**. Dependiendo de que botón **“Mostrar”** se pulse, se mostrará los resultados a la entrada o a la salida del circuito.

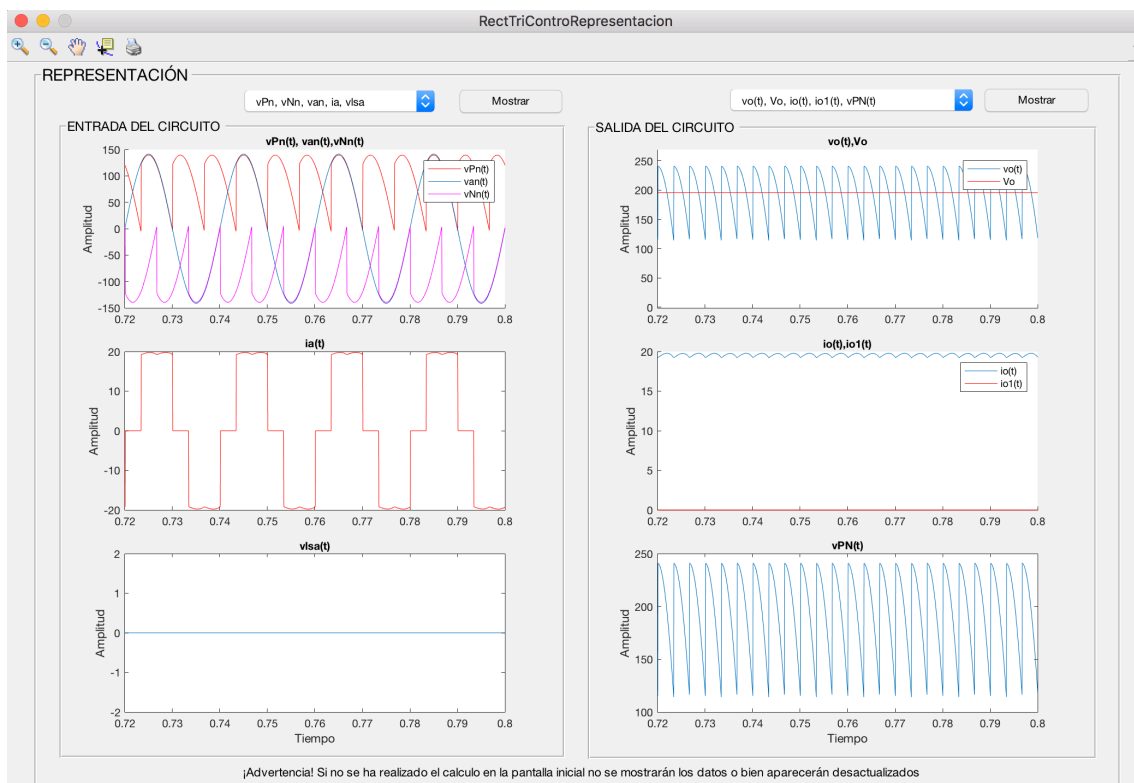


Figura 127: Visualización de las representaciones del circuito.

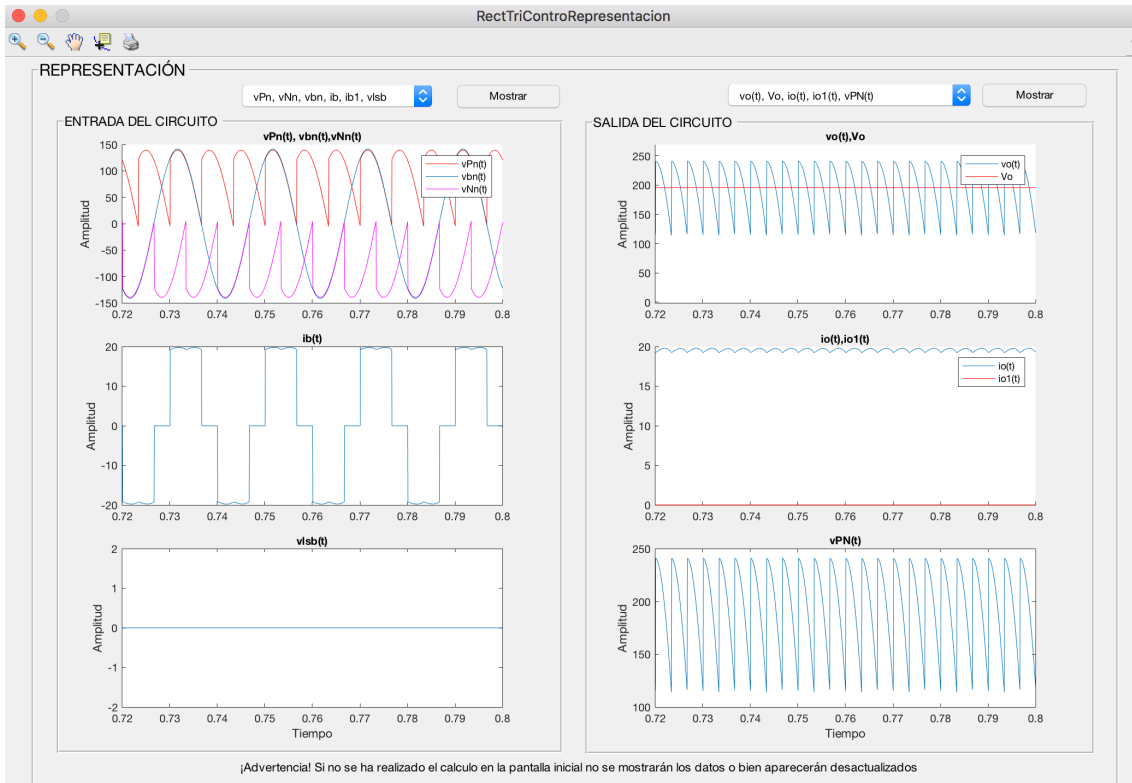


Figura 128: Visualización de las representaciones del circuito

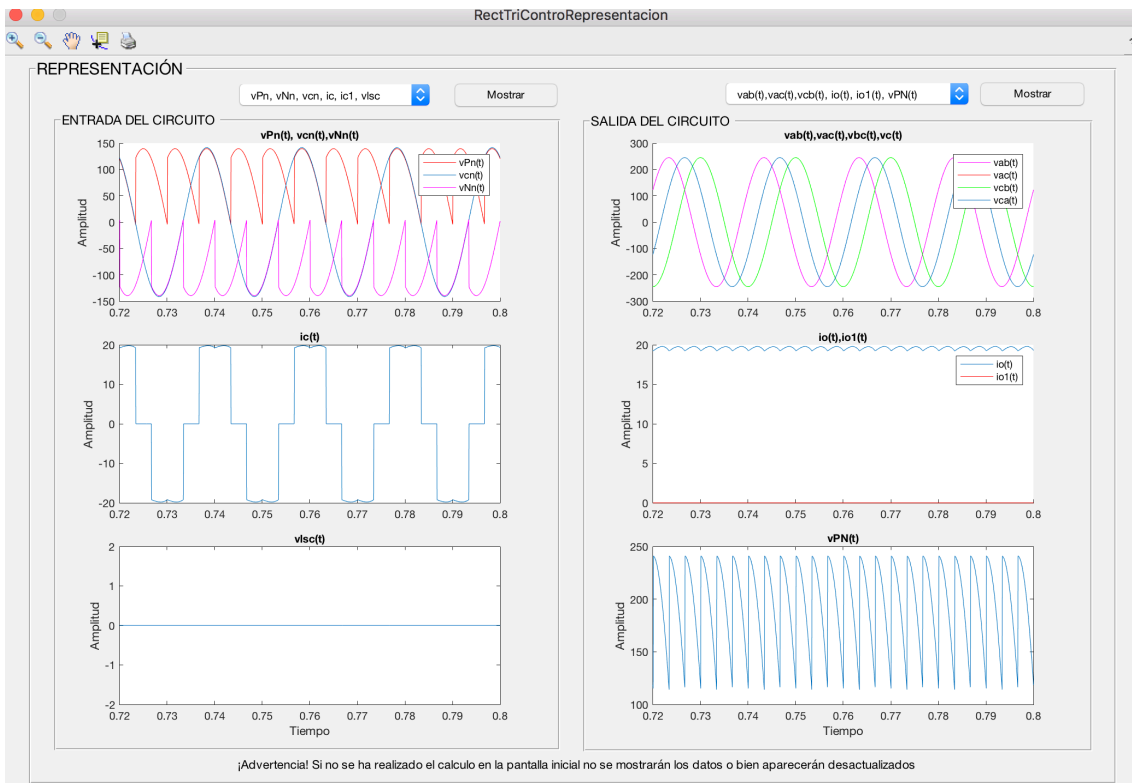


Figura 129: Visualización de las representaciones del circuito

¡Advertencia! Si no se ha realizado el calculo en la pantalla inicial no se mostrarán los datos o bien aparecerán desactualizados

Figura 130: Mensaje de advertencia sobre la necesidad del cálculo previo a la representación

Si se desea aumentar, disminuir o moverse por las representaciones se seleccionarán los botones situados en la parte superior izquierda de la interfaz.

Al igual que si se desea ver el valor en algún punto o incluso imprimir las representaciones.



Figura 131: Botones de ayuda

3.3 Extensión de la herramienta

La herramienta de apoyo a la enseñanza de rectificadores monofásicos y trifásicos realizada en este proyecto se ha unificado a otras realizadas anteriormente. De tal manera que la herramienta sirve para la tanto para los convertidores DC/DC, DC/AC y AC/DC.

Para poder conseguir la unificación de todos ellos se ha debido de añadir los proyectos anteriores a la nueva interfaz gráfica a partir de los código e interfaces realizadas en los proyectos de “Interfaz gráfica para simulación de convertidores DC/AC para el entorno docente” [7] y “Sistema HW de control PWM gestionado desde Matlab” [6].

Además, como dichos proyectos se habían realizado con versiones anteriores de Matlab a la utilizada en este proyecto se han tenido que hacer las modificaciones oportunas para el correcto funcionamiento de la herramienta, tanto en el código de Matlab como en el modelo de simulación además de las interfaces. Sobre todo, para la representación de las gráficas de los circuitos, los barridos... y demás visualizaciones que se han considerado oportunas para una mayor comprensión por parte de los alumnos.

3.4 Potencial de la herramienta

La herramienta realizada durante el proyecto conjunto con la unificación de los proyectos expuestos anteriormente supone una herramienta de un gran potencial para los alumnos que se enfrentan por primera vez a asignaturas relacionadas con el tema como Electrónica de Potencia del Grado en Ingeniería en Electrónica de Comunicaciones.

Ya que cuando un alumno ve por primera vez este tipo de circuitos puede ser un poco compleja su comprensión aun teniendo una buena base teórica de ahí que se haya realizado esta herramienta.

De este modo se puede ver con mayor claridad el comportamiento del circuito con las modificaciones de los distintos componentes que lo forman viendo que es lo que varía en cada caso.

Además, aporta al usuario un primer contacto antes de enfrentarse a los problemas que se le plantearán en la asignatura para que el alumno aprenda de ellos.

Capítulo 4

Ensayo Laboratorio

Como parte final del proyecto se ha llevado a cabo a modo de introducción unas pruebas en el laboratorio con el cubo de potencia *Semiteach Thyristor* de Semikron, todas ellas enfocadas a la docencia y con vistas a ser realizadas por un alumno.

Los componentes que se han utilizado para dichas pruebas han sido el cubo de potencia *Semiteach Thyristor* de Semikron, bombillas a modo de carga resistiva conjunto con una resistencia en paralelo de 390Ω y osciloscopio para la visualización de las señales que se han considerado relevantes.

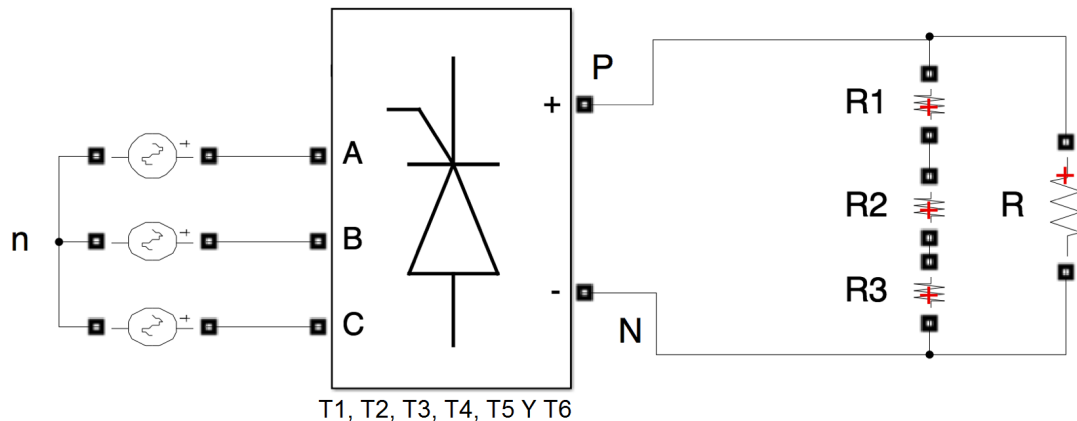


Figura 132. Circuito utilizado en las pruebas

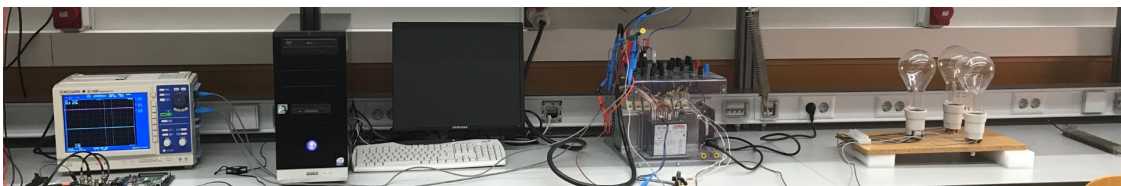


Figura 133. Componentes utilizados en las pruebas



Figura 134. Parte de la carga incorporada al circuito

En la imagen de la izquierda se muestran las bombillas conectadas como carga además de otra en paralelo a ellas de 390Ω , la cual se puede ver en la Figura 132.

Las bombillas son de 500 vatios y 230 voltios. Por lo tanto, aplicando la fórmula

siguiente podemos saber cuánta resistencia suponen cada bombilla.

$$w = v^2/R \Rightarrow R = v^2/w = 230^2/500 = 105.8\Omega \quad (44)$$

La otra parte de la carga es la resistencia mostrada en la imagen de la derecha en paralelo a las bombillas, la cual es de 390Ω .

Por lo tanto, la carga total es de 317.4Ω en paralelo con la resistencia, lo que nos da una carga de $174.98 \approx 175\Omega$.

La carga que se ha usado en las pruebas es una carga resistiva en vez de una inductiva como en las simulaciones porque en el laboratorio no había el material necesario para ello.

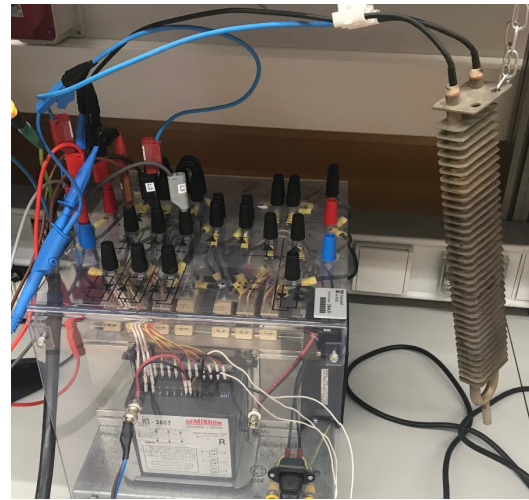


Figura 135. Cubo de Potencia con carga resistiva

El circuito final con el que se han realizado las pruebas es como el mostrado en la figura siguiente. Siendo la tensión en la entrada de 220 voltios y frecuencia de 50 hercios.

Basándonos en la hoja de características del cubo de potencia [15] y fijándonos en la Figura 136 obtenida de la misma, se compara con las conexiones realizadas en el cubo Figura 137.

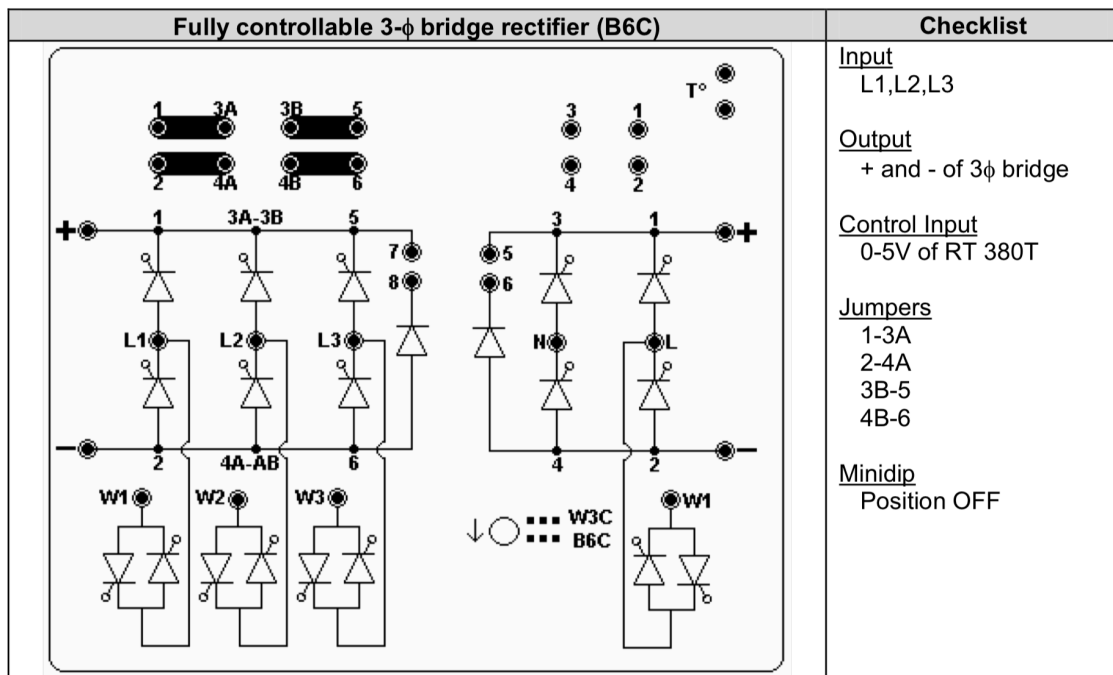


Figura 136. Configuración del rectificador trifásico según el datasheet

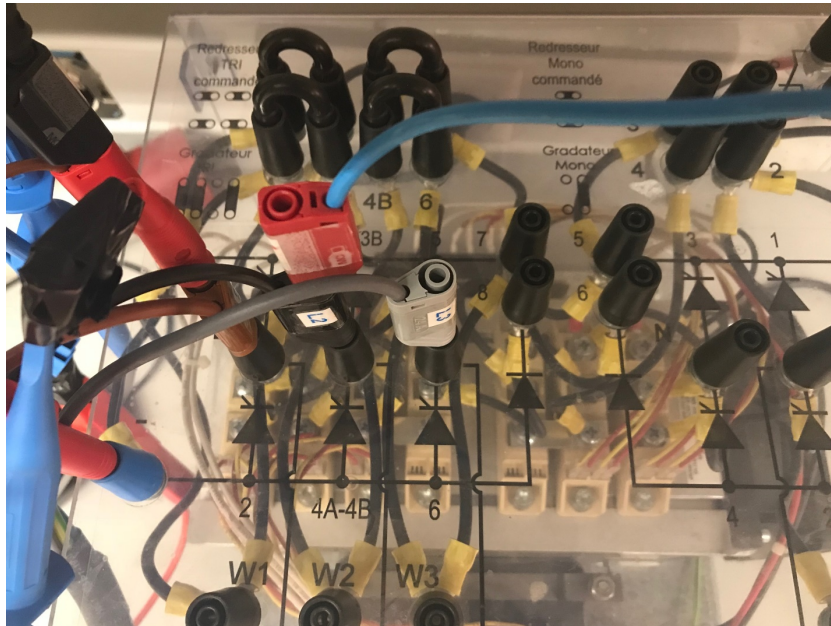


Figura 137. Conexiones del cubo de potencia

Con todo ello se ajustó el osciloscopio para ver de una manera más fácil y rápida las señales que se han medido en el cubo, las cuales son, el disparo de los tiristores, la tensión v_{AB} y la tensión $v_{DC} \equiv v_{PN}$.

Con todo conectado se alimentó el cubo de potencia para obtener las señales en el osciloscopio.

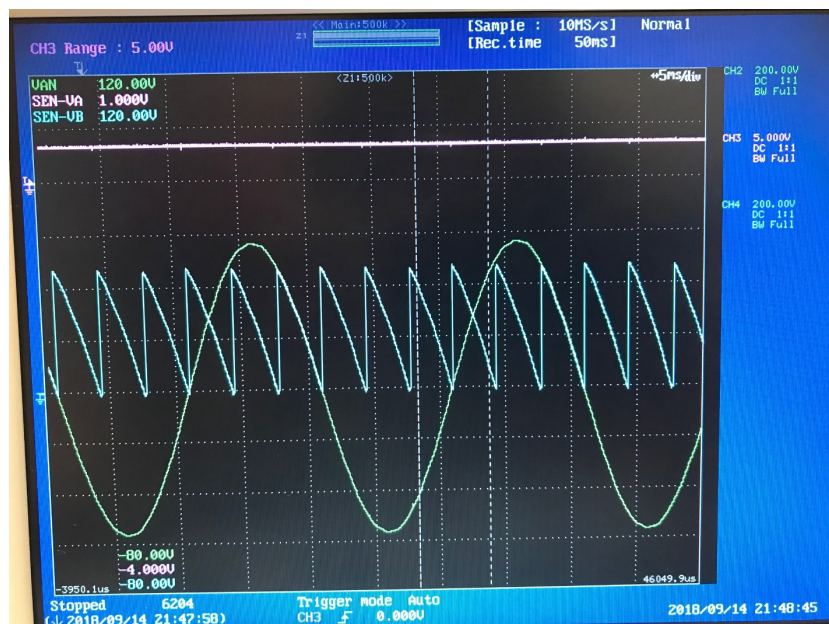


Figura 138. Señales obtenidas con el osciloscopio.

Como se puede observar en las señales obtenidas en el osciloscopio el canal 3 se ha puesto el disparo del tiristor el cual tiene un valor aproximado de 3 voltios. El generador de disparo tiene valores de 0 a 5 voltios, yendo de 0° a 180° .

Por otro lado, el canal 2 muestra la tensión v_{AB} el cual se ha ajustado para que tenga una división de 200v/div, cuyo valor viene dado por $220 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,35 = 514,42V$.

El canal 4 tiene la misma escala para que coincida con el canal anterior al igual que el eje en el mismo sitio. La señal resultante vista en este canal muestra 6 pulsos en un periodo de la señal del canal 2, lo cual es lo esperado.

Además, se ha realizado una simulación con la interfaz creada dando los valores correspondientes, es decir, el valor de la resistencia y condensador a la salida nulos y siendo la carga únicamente resistiva.

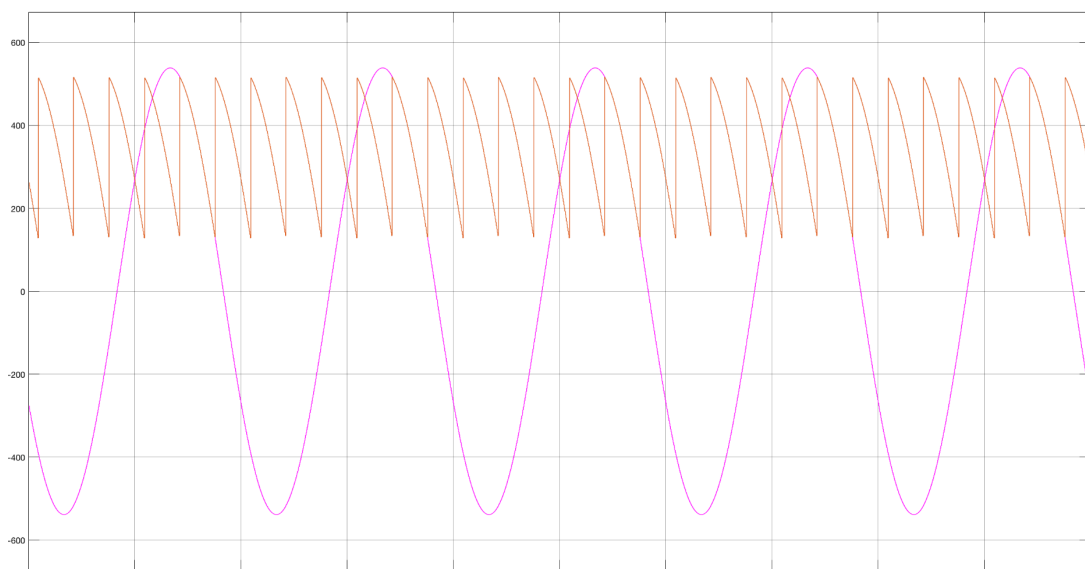


Figura 139. Gráficas obtenidas con la interfaz gráfica creada

Por último, se realizaron varias pruebas modificando el valor del disparo pudiendo observar que según se modificaba la intensidad con la que las bombillas se iluminaban aumentaba o disminuía. A menor ángulo de disparo mayor potencia se entregaba lo cual es lógico porque mayor es el factor de potencia.

La siguiente prueba realizada al compararla con los resultados obtenidos en la interfaz se puede concluir que el ángulo de disparo es un ángulo muy cercano a 90° , pero siendo inferior a este valor.



Figura 140. Prueba realizada modificando en disparo del tiristor

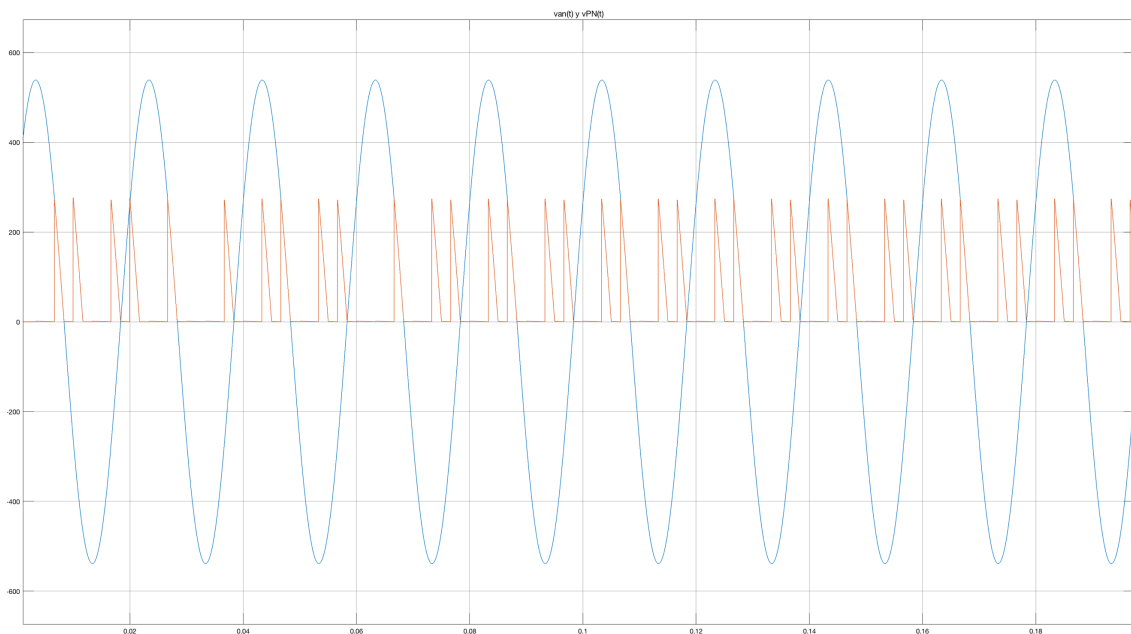


Figura 141. Gráficas obtenidas a través de la interfaz gráfica

Tras realizar las pruebas en el laboratorio con los materiales de los que se disponían, se puede concluir que para poder llevarlas a cabo con alumnos el cubo de potencia y las cargas deberían de estar aislados totalmente. Para ello realizando una búsqueda en internet se han podido encontrar otros cubos de potencia más adaptados a la docencia como los mostrados a continuación.

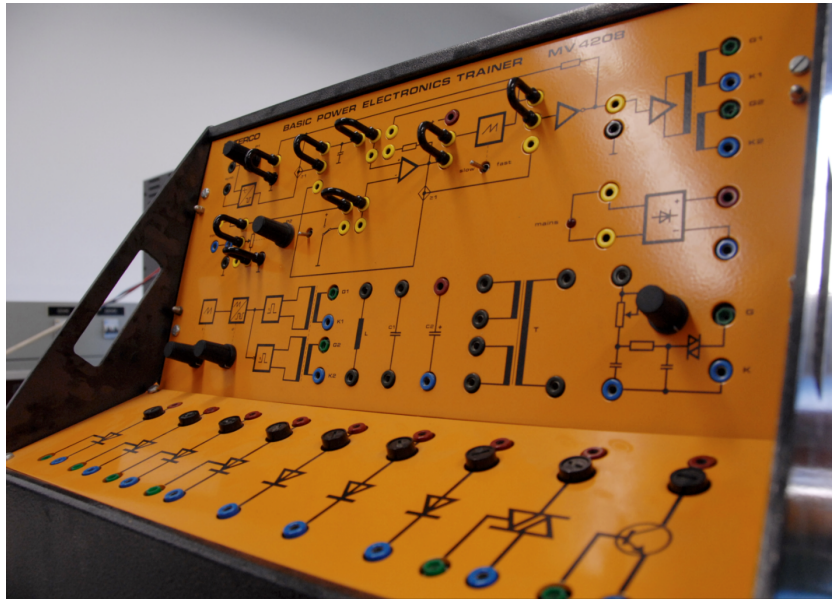


Figura 142. Máquina de potencia preparado para la docencia [16]



Figura 143. Máquina de potencia para la docencia [17]

Capítulo 5

Conclusiones y Líneas Futuras

5.1 Conclusiones

En este trabajo de fin de grado se ha realizado una herramienta educativa para ayudar al alumno a comprender de una manera más fácil el funcionamiento de los convertidores AC/DC, tanto monofásicos como trifásicos, de esta manera puede comprobar de manera experimental los conocimientos adquiridos teóricamente y evaluar el efecto de los diferentes parámetros sobre los elementos de potencia.

Además, esta herramienta complementa las ya creadas anteriormente sobre convertidores DC/DC [6] y convertidores DC/AC [7] lo cual hace que se haya conseguido el objetivo de este trabajo de fin de grado que es que el alumno tenga una herramienta completa que le permita realizar simulaciones para entender el efecto de los distintos parámetros sobre las señales de salida.

Para completar esta herramienta como ayuda al alumnado y para una mayor comprensión se aconsejan los libros de Power Electronics [9] y Problemas de electrónica de Potencia [10].

A nivel personal, este proyecto ha supuesto una oportunidad para aumentar incluso obtener conocimiento que no habría podido tener de los convertidores AC/DC. Además de trabajar con mayor facilidad con la interfaz de Matlab, GUIDE [4].

La temática del proyecto es de los mejores que podría haber encontrado ya que la asignatura fue una de las que más me gusto del grado además me permite ayudar a futuros alumnos a una mayor comprensión de los circuitos y su comportamiento ya que la parte educativa me parece muy relevante e importante.

5.2 Líneas Futuras

Como continuación al trabajo realizado se podrán realizar pruebas prácticas con los cubos de potencia enfocados a la docencia como los mostrados es en capítulo anterior en la Figura 142 y en la Figura 143, siendo estos más fáciles y seguros para el uso.

Además, todos los circuitos vistos hasta el momento están en lazo abierto por lo que se podría realizar también la modificación del control siendo lazo cerrado donde hay un proceso de realimentación, es decir, la señal de entrada se puede

modificar en función de la de salida. Por lo que no depende sólo de la entrada sino también de la salida. Esta parte también es una forma de unificar varias asignaturas del grado en un mismo proyecto debido a que el estudio del lazo abierto y cerrado se pueden ver en las asignaturas de Control Electrónico y Control Industrial del Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones.

Como otras opciones de ampliación del proyecto sería la incorporación de mayor número de niveles en los rectificadores, es decir, rectificadores de 18 pulsos, 24 o mayores. Lo cual serviría para asignaturas de electrónica de potencia más avanza como en los Másteres. Realizando una búsqueda se encontraron algunas topologías de interés, como la mostrada en las siguientes figuras.

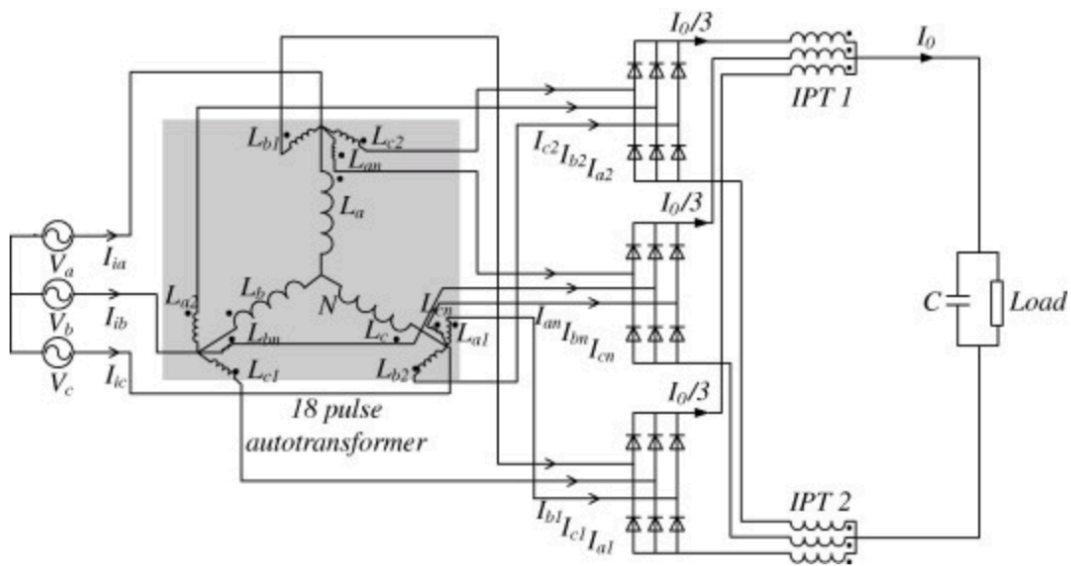


Figura 144. Topología del rectificador de dieciocho pulsos [11]

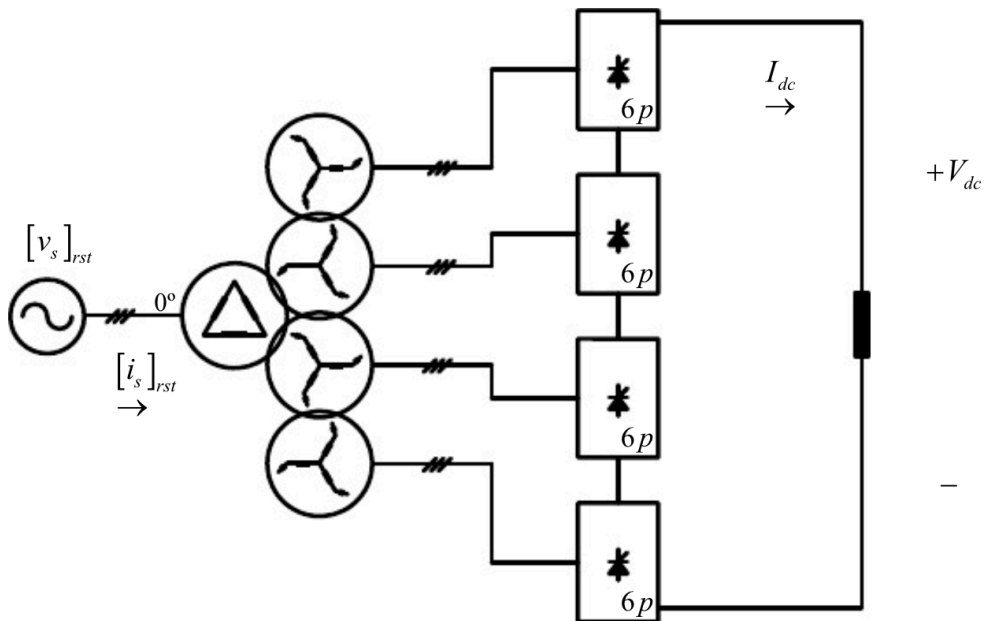


Figura 145. Topología del rectificador de veinticuatro pulsos [12]

De igual modo, realizando la búsqueda se encontró que en la ayuda de Matlab aparecía el modelo en Simulink del rectificador de veinticuatro pulsos.

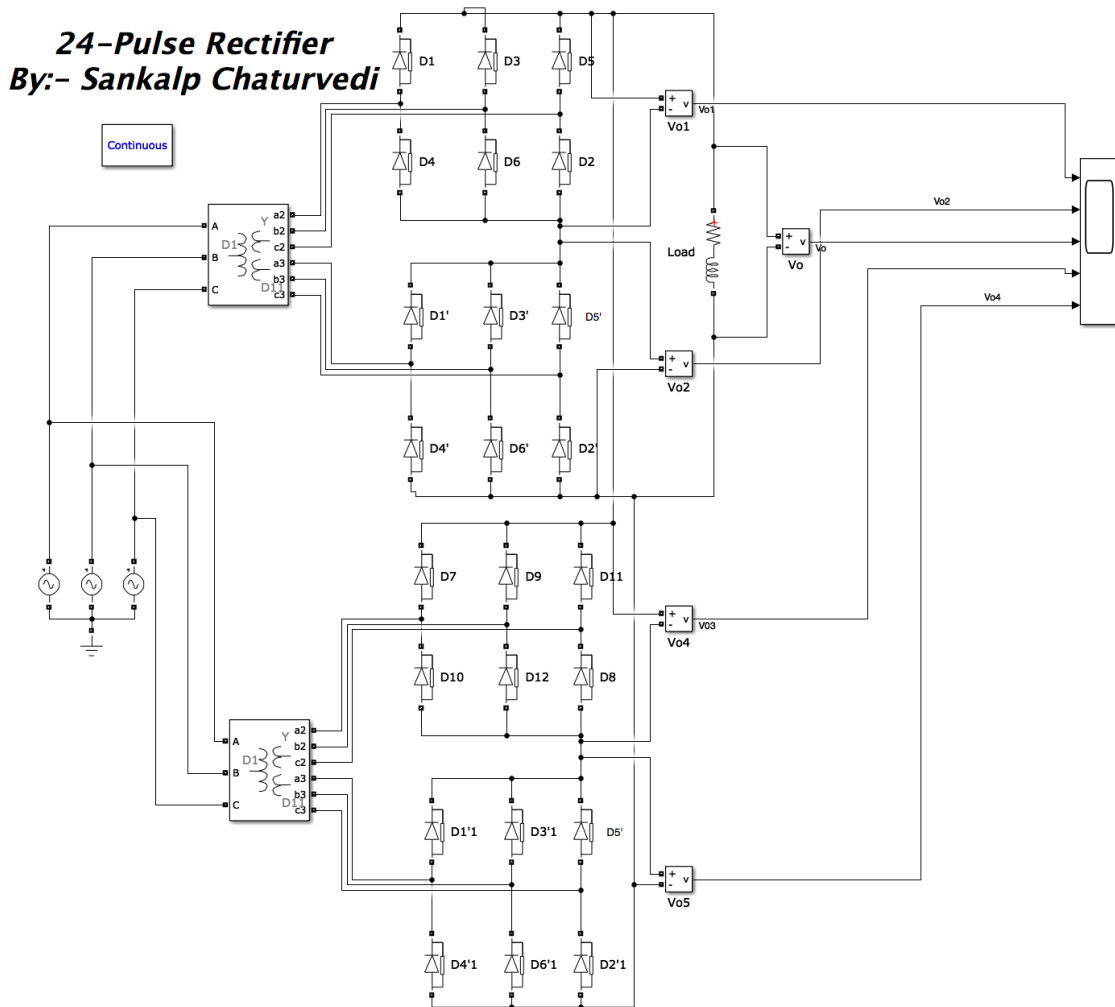


Figura 146. Modelo en Simulink del rectificador de veinticuatro pulsos [13]

También se podría incorporar a la herramienta de aprendizaje autodidacta el Convertidor AC/DC/AC o también conocido como Back to Back cuya topología es la mostrada a continuación.

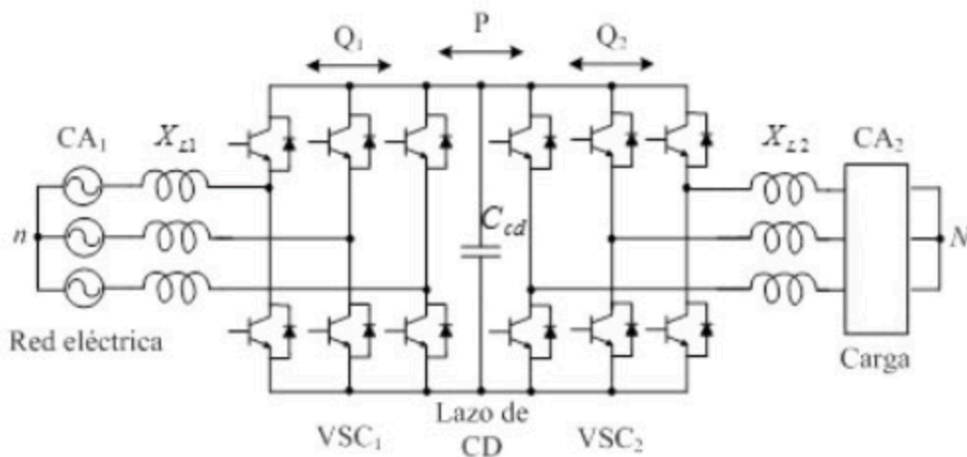


Figura 147. Topología del convertidor Back to Back [14]

Parte III

Pliego de condiciones

Pliego de condiciones

- * Ordenador
 - o Sistema operativo [8]:
 - * Windows 10
 - * Windows 8.1
 - * Windows 7 Service Pack 1
 - * Windows Server 2016
 - * Windows Server 2012 R2
 - * Windows Server 2012
 - * macOS El Capitan (10.11)
 - * macOS Sierra (10.12)
 - * macOS High Sierra (10.13)
 - * Ubuntu 17.10
 - * Ubuntu 16.04 LTS
 - * Ubuntu 14.04 LTS
 - * Debian 9
 - * Debian 8
 - * Red Hat Enterprise Linux 7
 - * Red Hat Enterprise Linux 6 (minimum 6.7)
 - * SUSE Linux Enterprise Desktop 12 (minimum SP2)
 - * SUSE Linux Enterprise Server 12 (minimum SP2)
- * Versión de Matlab: R2017b o posteriores.

Si se utiliza alguna de las versiones anteriores a la indicada en esta página se puede dar algunos problemas de compatibilidad.

Parte IV

Presupuesto

Presupuesto

El presupuesto de este Trabajo de Fin de Grado se basa en la cuantía de materiales utilizados y honorarios de desarrollador. En la tabla mostrada a continuación se recogen los cálculos realizados para el Presupuesto de Ejecución de Material debido a los equipos informáticos y software utilizados.

Presupuesto de Ejecución de Material					
Concepto	Cantidad	Precio Unitario	Periodo de amortización	Uso (meses)	Coste Total
Material:					
Ordenador	1	550,00€	4 años	4	45,83€
Material Software:					
macOS	1	979€	1 año	4	326,33€
Microsoft Office 2016	1	150€	1 año	4	50€
Matlab R2017b	1	800€	1 año	4	266,66€
Total:					688,82 €

Tabla 1: Presupuesto de ejecución por material

Este proyecto además se ha llevado a cabo por una Ingeniera, que ha desarrollado la aplicación y la redacción de la memoria.

Honorarios				
Concepto	Nº Personal	Tiempo(horas)	Precio Unitario (€/hora)	Coste Total
Ingeniería	1	180	50€	9000€
Mecanografía	1	35	15€	525€
Total:				9525€

Tabla 2: Honorarios del empleado

Por lo tanto, el coste total del proyecto será el siguiente.

Presupuesto	
Concepto	Coste Total
Material	688,82€
Honorarios	9525€
Material fungible:	
Gastos de impresión	30,00€
Encuadernación	90,00€
Subtotal	10.333,82€
IVA (21%)	2.170,10€
Total presupuesto	12.503,92€

Tabla 3: Presupuesto total del Trabajo Fin de Grado

Parte V

Diagramas

Diagramas

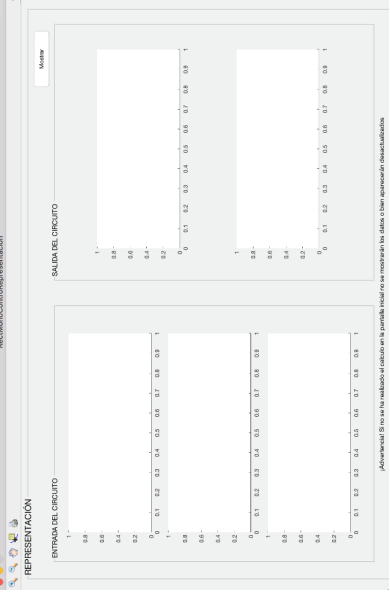
1. Introducción

En esta herramienta de apoyo a la enseñanza el diagrama de bloques que se tiene dependerá de cómo lo use el alumno, pero a continuación se expondrá como serán todas las posibilidades.



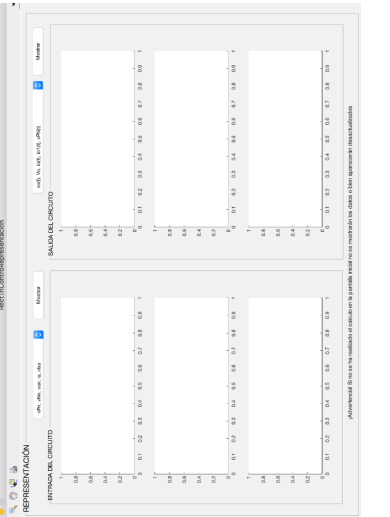
RectificadorMonofasicoControlado.fig

RectMonoControlRepresentacion.fig

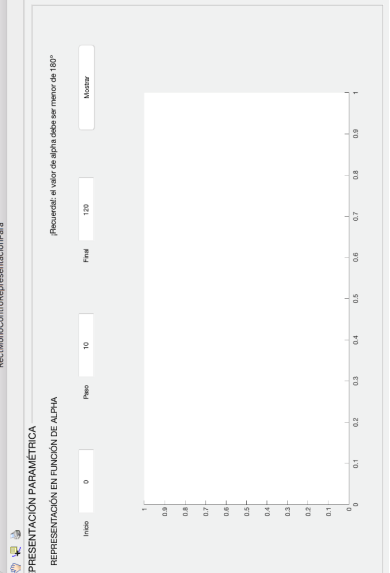


RectificadorTrifasicoControlado.fig

RectTriControlRepresentacion.fig



RectMonoControlRepresentacionPara.fig



Todos los archivos .fig llevan consigo la ejecución de los archivos .m. Se visualizan a continuación las partes relevantes del mismo.

2. Archivos .m

2.1 Rectificador No Controlado Monofásico

```
% --- Executes just before RectificadorMonofasico is made visible.
function RectificadorMonofasico_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to RectificadorMonofasico (see VARARGIN)
    img=imread('Imagenes/RectificadorMonofasico.png');
    axes(handles.axes1);
    imshow(img);
    assignin('base','mod', 1);
% Choose default command line output for RectificadorMonofasico
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in Teoria.
function Teoria_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Teoria (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
open ('Teoria/RectificadoresMonofasicos.pdf')

% --- Executes on button press in Borrar.
function Borrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Borrar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%Valores de la entrada a la simulación
set(handles.Vs,'string',' ');           %Amplitud de la tensión
set(handles.freq,'string',' ');         %Frecuencia fundamental
set(handles.Ls,'string',' ');           %Bobina a la entrada
set(handles.Rs,'string',' ');           %Resistencia a la entrada
set(handles.Ld,'string',' ');           %Bobina a la salida
set(handles.C,'string',' ');            %Condensador a la salida
set(handles.Ro,'string',' ');           %Resistencia a la salida
set(handles.Ron,'string',' ');          %Resistencia de los diodos
set(handles.Vf,'string',' ');           %Tensión de los diodos
%Valores de la salida de la simulación
set(handles.Vo,'String',' ');           %Tensión media
set(handles.Io,'String',' ');           %Corriente media
set(handles.rizadoVo,'String',' ');     %Tensión de rizado de Vo
set(handles.Po,'String',' ');           %Potencia a la salida
set(handles.PF,'String',' ');           %Factor de potencia
set(handles.DPF,'String',' ');          %Factor de potencia de desplazamiento
set(handles.P,'String',' ');            %Potencia activa
set(handles.Q,'String',' ');            %Potencia reactiva
set(handles.S,'string',' ');            %Potencia aparente (VA)
set(handles.THDi,'string',' ');         %Distorsión armónica total
set(handles.Rendimiento,'String',' ');  %Rendimiento

% --- Executes on button press in ValoresPorDefecto.
function ValoresPorDefecto_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ValoresPorDefecto (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.Vs,'String','100');
set(handles.freq,'string','50');
set(handles.Ls,'string','1e-9');        %Valor Ls para que sea lo más parecido a 0 y sea Ideal
por lo tanto
set(handles.Rs,'string','0.1');
set(handles.Ld,'string','0.1');
set(handles.C,'string','0.001');
set(handles.Ro,'string','10');
set(handles.Ron,'string','1e-3');
set(handles.Vf,'string','0');

% --- Executes on button press in Calcular.
function Calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Calcular (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```

% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

%Obtenemos los valores de los cuadros de texto para la simulación
Vs = str2double (get(handles.Vs, 'string'));
assignin('base', 'Am', Vs*sqrt(2));
freq = str2double (get(handles.freq, 'string'));
assignin('base', 'freq', freq);
Ls = str2double (get(handles.Ls, 'string'));
assignin('base', 'Ls', Ls);
Rs = str2double (get(handles.Rs, 'string'));
assignin('base', 'Rs', Rs);
Ld = str2double (get(handles.Ld, 'string'));
assignin('base', 'Ld', Ld);
C = str2double (get(handles.C, 'string'));
assignin('base', 'C', C);
Ro = str2double (get(handles.Ro, 'string'));
assignin('base', 'Ro', Ro);
Ron = str2double (get(handles.Ron, 'string'));
assignin('base', 'Ron', Ron);
Vf = str2double (get(handles.Vf, 'string'));
assignin('base', 'Vf', Vf);

Ts=1/freq;          %Tiempo de muestreo
N_ciclos=40;       %Número de ciclos
N_muestras=400;   %Número de muestras
assignin('base', 'Ts', Ts);
assignin('base', 'N_ciclos', N_ciclos);
assignin('base', 'N_muestras', N_muestras);

sim('Simulink/RectificadorMonofasicoSimulink');

%Introducimos los valores obtenidos al realizar la simulación
%Entrada
% Vo(end) coge el último elemento del vector
Vo=Vo_sim(end);
Vo=sprintf('%.2f', Vo);
set(handles.Vo, 'String', Vo)
Io=Io_sim(end);
Io=sprintf('%.2f', Io);
set(handles.Io, 'String', Io)
vo=vo_sim;
longitud1=size(vo);
set(handles.rizadoVo, 'String', (max(vo((5*(longitud1(1)/6):longitud1(1)))-
min(vo((5*(longitud1(1)/6):longitud1(1))))*1e3); %rizado tension de salida
Po=Po_sim(end);
Po=sprintf('%.2f', Po);
set(handles.Po, 'String', Po)

%Salida
PF=PF_sim(end);
PF=sprintf('%.2f', PF);
set(handles.PF, 'String', PF)
DPF=DPF_sim(end);
DPF=sprintf('%.2f', DPF);
set(handles.DPF, 'String', DPF)
P=P_sim(end);
P=sprintf('%.2f', P);
set(handles.P, 'String', P)
Q=Q_sim(end);
Q=sprintf('%.2f', Q);
set(handles.Q, 'String', Q)
THDi=THDi_sim(end);
THDi=THDi*100;
THDi=sprintf('%.2f', THDi);
set(handles.THDi, 'String', THDi)
S=S_sim(end);
S=sprintf('%.2f', S);
set(handles.S, 'String', S)
%Rendimiento
Rendimiento=Rendimiento_sim(end);
Rendimiento=sprintf('%.2f', Rendimiento);
set(handles.Rendimiento, 'String', Rendimiento)
%valores para la representación
t=t_sim;
vpn=vpn_sim;
vo=vo_sim;
Vo=Vo_sim;
io=io_sim;
Io=Io_sim;
vs=vs_sim;
is=is_sim;
isl=isl_sim;
vls=vls_sim;
vld=vld_sim;

```

```

save workspace;
function Representacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
addpath 'Interfaces'
addpath 'Codigo Matlab'
addpath 'Copias seguridad'
addpath 'Teoria'
addpath 'Imágenes'
addpath 'Simulink'
RectMonoRepresentacion

% --- Executes on button press in Restaurar.
function Restaurar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to Restaurar (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
open_system('RectificadorMonofasicoSimulinkOriginal');
save_system('RectificadorMonofasicoSimulinkOriginal','Simulink/RectificadorMonofasicoSimulink');
close_system('RectificadorMonofasicoSimulinkOriginal');
close_system('RectificadorMonofasicoSimulink');

```

2.1.1 Representaciones

```

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function mostrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
save handles
load workspace.mat
load handles.mat
long=size(t);

%Representación de la entrada
%Representación vs(t)
axes(handles.axes1);
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vs((9*(long(1)/10)):long(1)));
title ('vs(t)', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')

%Representación Vls(t)
axes(handles.axes2)
if vls<1e-3
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vls((9*(long(1)/10)):long(1)));
ylim([-2 2]);
else
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vls((9*(long(1)/10)):long(1)));
end
title ('vls(t)', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')

%Representación is(t),isl(t)
axes(handles.axes3); %Selecciona la gráfica
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),is((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),isl((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
legend ('is(t)', 'isl(t)')
title ('is(t), isl(t)', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
xlabel('Tiempo')
hold off
grid;

%Representación salida
%Representación vpn(t) y Vo
axes(handles.axes4);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vpn((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),Vo((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
title ('vpn(t), Vo', 'FontSize',10)
legend ('vpn(t)', 'Vo')
ylabel ('Amplitud')
hold off

%Representación Vld(t)
axes(handles.axes5);
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vld((9*(long(1)/10)):long(1)));
title ('vld(t)', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')

%Representación io(t), Io
axes(handles.axes6);

```

```

hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),io((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),Io((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
ylim([-1 max(io)+max(io)*0.1]);
legend ('io(t)', 'Io')
title ('io(t), Io', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
xlabel('Tiempo')
hold off

```

2.2 Rectificador No Controlado Trifásico

```

% --- Executes just before RectificadorTrifasico is made visible.
function RectificadorTrifasico_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin unrecognized PropertyName/PropertyValue pairs from the
% command line (see VARARGIN)
    img=imread('Imagenes/RectificadorTrifasico.png');
    axes(handles.axes1);
    imshow(img);
    assignin('base','mod', 1);
% Choose default command line output for RectificadorTrifasico
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Executes when selected object is changed in uibuttongroup3.
function uibuttongroup3_SelectionChangedFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to the selected object in uibuttongroup3
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
newButton=get(eventdata.NewValue,'tag');
%guidata(hObject, handles);
switch newButton
    case 'seispulsos'
        assignin('base','mod', 1);
        img=imread('RectificadorTrifasico.png');
        axes(handles.axes1);
        imshow(img);
        set(handles.Vo,'String',' '); %Tensión media
        set(handles.Io,'String',' '); %Corriente media
        set(handles.rizadoVo,'String',' '); %Tensión de rizado de Vo
        set(handles.Po,'String',' '); %Potencia a la salida
        set(handles.PF,'String',' '); %Factor de potencia
        set(handles.DPF,'String',' '); %Factor de potencia de desplazamiento
        set(handles.P,'String',' '); %Potencia activa
        set(handles.Q,'String',' '); %Potencia reactiva
        set(handles.S,'string',' '); %Potencia aparente (VA)
        set(handles.THDI,'string',' '); %Distorsión armónica total
        set(handles.Rendimiento,'String',' '); %Rendimiento
        set(handles.docepulsos,'Value', 0);
    case 'docepulsos'
        img=imread('RectificadorTrifasicoDoce.png');
        axes(handles.axes1);
        imshow(img);
        set(handles.Vo,'String',' '); %Tensión media
        set(handles.Io,'String',' '); %Corriente media
        set(handles.rizadoVo,'String',' '); %Tensión de rizado de Vo
        set(handles.Po,'String',' '); %Potencia a la salida
        set(handles.PF,'String',' '); %Factor de potencia
        set(handles.DPF,'String',' '); %Factor de potencia de desplazamiento
        set(handles.P,'String',' '); %Potencia activa
        set(handles.Q,'String',' '); %Potencia reactiva
        set(handles.S,'string',' '); %Potencia aparente (VA)
        set(handles.THDI,'string',' '); %Distorsión armónica total
        set(handles.Rendimiento,'String',' '); %Rendimiento
        set(handles.seispulsos,'Value', 0);
end
% --- Executes on button press in abrirmodelo.
function abrirmodelo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to abrirmodelo (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
seispulsos = get(handles.seispulsos,'Value');
docepulsos = get(handles.docepulsos,'Value');

if seispulsos == 1
    open_system('Simulink/RectificadorTrifasicoSimulink');

```

```

elseif docepulsos==1
    open_system('Simulink/RectificadorTrifasicoDoceSimulink');
end

% --- Executes on button press in teoria.
function teoria_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to teoria (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
open ('Teoria/RectificadoresTrifasicos.pdf');

% --- Executes on button press in restaurarmodelo.
function restaurarmodelo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to restaurarmodelo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
seispulsos = get(handles.seispulsos,'Value');
docepulsos = get(handles.docepulsos,'Value');

if seispulsos == 1
    open_system('RectificadorTrifasicoSimulinkOriginal');
save_system('RectificadorTrifasicoSimulinkOriginal','Simulink/RectificadorTrifasicoSimulink');
    close_system('RectificadorTrifasicoSimulinkOriginal');
    close_system('RectificadorTrifasicoSimulink');
elseif docepulsos==1

    open_system('RectificadorTrifasicoDoceSimulinkOriginal');
save_system('RectificadorTrifasicoDoceSimulinkOriginal','Simulink/RectificadorTrifasicoDoc
eSimulink');
    close_system('RectificadorTrifasicoDoceSimulinkOriginal');
    close_system('RectificadorTrifasicoDoceSimulink');
end

% --- Executes on button press in representacion.
function representacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to representacion (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
seispulsos = get(handles.seispulsos,'Value');
docepulsos = get(handles.docepulsos,'Value');

if seispulsos == 1
    addpath 'Interfaces'
    addpath 'Codigo Matlab'
    addpath 'Copias seguridad'
    addpath 'Teoria'
    addpath 'Imágenes'
    addpath 'Simulink'
    RectTriSeisRepresentacion
elseif docepulsos ==1
    addpath 'Interfaces'
    addpath 'Codigo Matlab'
    addpath 'Copias seguridad'
    addpath 'Teoria'
    addpath 'Imágenes'
    addpath 'Simulink'
    RectTriDoceRepresentacion
end

% --- Executes on button press in borrar.
function borrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to borrar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.Vs,'string',' ');           %Amplitud de la tensión
set(handles.freq,'string',' ');         %Frecuencia fundamental
set(handles.Ls,'string',' ');           %Bobina a la entrada
set(handles.Rs,'string',' ');           %Resistencia a la entrada
set(handles.Ld,'string',' ');           %Bobina a la salida
set(handles.C,'string',' ');            %Condensador a la salida
set(handles.Ro,'string',' ');           %Resistencia a la salida
set(handles.Ron,'string',' ');          %Resistencia de los diodos
set(handles.Vf,'string',' ');           %Tensión de los diodos
%Valores de la salida de la simulación
set(handles.Vo,'String',' ');           %Tensión media
set(handles.Io,'String',' ');           %Corriente media
set(handles.rizadoVo,'String',' ');     %Tensión de rizado de Vo
set(handles.Po,'String',' ');           %Potencia a la salida
set(handles.PF,'String',' ');           %Factor de potencia
set(handles.DPF,'String',' ');          %Factor de potencia de desplazamiento
set(handles.P,'String',' ');            %Potencia activa
set(handles.Q,'String',' ');            %Potencia reactiva
set(handles.S,'string',' ');            %Potencia aparente (VA)
set(handles.THDi,'string',' ');         %Distorsión armónica total

```

```

set(handles.Rendimiento, 'String', ' '); %Rendimiento

% --- Executes on button press in valoresdefecto.
function valoresdefecto_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to valoresdefecto (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.Vs, 'String', '100');
set(handles.freq, 'string', '50');
set(handles.Ls, 'string', '1e-9'); %Valor Ls para que sea lo más parecido a 0 y sea Ideal
por lo tanto
set(handles.Rs, 'string', '0.1');
set(handles.Ld, 'string', '0.1');
set(handles.C, 'string', '0.001');
set(handles.Ro, 'string', '10');
set(handles.Ron, 'string', '1e-3');
set(handles.Vf, 'string', '0');

% --- Executes on button press in calcular.
function calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to calcular (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
Vs = str2double (get(handles.Vs, 'string'));
assignin('base', 'Am', Vs*sqrt(2));
freq = str2double (get(handles.freq, 'string'));
assignin('base', 'freq', freq);
Ls = str2double (get(handles.Ls, 'string'));
assignin('base', 'Ls', Ls);
Rs = str2double (get(handles.Rs, 'string'));
assignin('base', 'Rs', Rs);
Ld = str2double (get(handles.Ld, 'string'));
assignin('base', 'Ld', Ld);
C = str2double (get(handles.C, 'string'));
assignin('base', 'C', C);
Ro = str2double (get(handles.Ro, 'string'));
assignin('base', 'Ro', Ro);
Ron = str2double (get(handles.Ron, 'string'));
assignin('base', 'Ron', Ron);
Vf = str2double (get(handles.Vf, 'string'));
assignin('base', 'Vf', Vf);

Ts=1/freq; %Tiempo de muestreo
N_ciclos=40; %Número de ciclos
N_muestras=800; %Número de muestras
assignin('base', 'Ts', Ts);
assignin('base', 'N_ciclos', N_ciclos);
assignin('base', 'N_muestras', N_muestras);

seispulsos = get(handles.seispulsos, 'Value');
docepulsos = get(handles.docepulsos, 'Value');

if seispulsos == 1
    sim('Simulink/RectificadorTrifasicoSimulink');
    %Introducimos los valores obtenidos al realizar la simulación
    %Entrada
    % Vo(end) coge el último elemento del vector
    Vo=Vo_sim(end);
    Vo=sprintf( '%.2f', Vo);
    set(handles.Vo, 'String', Vo)
    Io=Io_sim(end);
    Io=sprintf( '%.2f', Io);
    set(handles.Io, 'String', Io)
    vo=vo_sim;
    longitud1=size(vo);
    set(handles.rizadoVo, 'String', (max(vo((5*(longitud1(1)/6)):longitud1(1)))-
min(vo((5*(longitud1(1)/6)):longitud1(1))))*1e3);%rizado tension de salida
    Po=Po_sim(end);
    Po=sprintf( '%.2f', Po);
    set(handles.Po, 'String', Po)

    %Salida
    PF=PF_a_sim(end);
    PF=sprintf( '%.2f', PF);
    set(handles.PF, 'String', PF)
    DPF=DPF_a_sim(end);
    DPF=sprintf( '%.2f', DPF);
    set(handles.DPF, 'String', DPF)
    P=P_sim(end);
    P=sprintf( '%.2f', P);
    set(handles.P, 'String', P)
    Q=Q_sim(end);
    Q=sprintf( '%.2f', Q);
    set(handles.Q, 'String', Q)

```

```

THDi=THDi_a_sim(end);
THDi=THDi*100;
THDi=sprintf('%.2f',THDi);
set(handles.THDi,'String',THDi)
S=S_sim(end);
S=sprintf('%.2f',S);
set(handles.S,'String',S)
%Rendimiento
Rendimiento=Rendimiento_sim(end);
Rendimiento=sprintf('%.2f',Rendimiento);
set(handles.Rendimiento,'String',Rendimiento)
%valores para la representación
t=t_sim;
vpn=vpn_sim;
vNn=vNn_sim;
van=va_sim;
ia=ia_sim;
ial=ial_sim;
vlsa=vlsa_sim;
vbn=vb_sim;
ib=ib_sim;
ibl=ibl_sim;
vlsb=vlsb_sim;
vcn=vc_sim;
ic=ic_sim;
icl=icl_sim;
vlsc=vlsc_sim;
vo=vo_sim;
vab=vab_sim;
vac=vac_sim;
vcb=vcb_sim;
vca=vca_sim;
Vo=Vo_sim;
io=io_sim;
iol=iol_sim;
vPN=vPN_sim;
close_system('Simulink/RectificadorTrifasicoSimulink');
elseif docepulsos == 1
sim('Simulink/RectificadorTrifasicoDoceSimulink');
%Introducimos los valores obtenidos al realizar la simulación
%Entrada
% Vo(end) coge el último elemento del vector
Vo=Vo_sim(end);
Vo=sprintf('%.2f',Vo);
set(handles.Vo,'String',Vo)
Io=Io_sim(end);
Io=sprintf('%.2f',Io);
set(handles.Io,'String',Io);
vo=vo_sim;
longitudl=size(vo);
set(handles.rizadoVo,'String',(max(vo((5*(longitudl(1)/6)):longitudl(1)))-
min(vo((5*(longitudl(1)/6)):longitudl(1))))*1e3);%rizado tension de salida
Po=Po_sim(end);
Po=sprintf('%.2f',Po);
set(handles.Po,'String',Po)

%Salida
PF=PF_a_sim(end);
PF=sprintf('%.2f',PF);
set(handles.PF,'String',PF)
DPF=DPF_a_sim(end);
DPF=sprintf('%.2f',DPF);
set(handles.DPF,'String',DPF)
P=P_sim(end);
P=sprintf('%.2f',P);
set(handles.P,'String',P)
Q=Q_sim(end);
Q=sprintf('%.2f',Q);
set(handles.Q,'String',Q)
THDi=THDi_a_sim(end);
THDi=THDi*100;
THDi=sprintf('%.2f',THDi);
set(handles.THDi,'String',THDi)
set(handles.THDi,'String',THDi)
S=S_sim(end);
S=sprintf('%.2f',S);
set(handles.S,'String',S)
%Rendimiento
Rendimiento=Rendimiento_sim(end);
Rendimiento=sprintf('%.2f',Rendimiento);
set(handles.Rendimiento,'String',Rendimiento)
%valores para la representación
t=t_sim;
va=va_sim;

```

```

vb=vb_sim;
vc=vc_sim;
va_primera=va_primera_sim;
vb_primera=vb_primera_sim;
vc_primera=vc_primera_sim;
va_segunda=va_segunda_sim;
vb_segunda=vb_segunda_sim;
vc_segunda=vc_segunda_sim;
ial=ial_sim;
ial_primera=ial_primera_sim;
ia2_segunda=ia2_segunda_sim;
ib2_segunda=ib2_segunda_sim;
ia2=ia2_sim;
ia=ia_sim;
vo=vo_sim;
Vo=Vo_sim;
vol=vol_sim;
vo2=vo2_sim;
%close_system('Simulink/RectificadorTrifasicoDoceSimulink');
end
save workspace

```

2.2.1 Representaciones del rectificador trifásico de seis pulsos

```

% --- Executes on button press in mostrar.
function mostrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to mostrar (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
slide=get(handles.popupmenu1,'Value');

save handles
load workspace.mat
load handles.mat
long=size(t);

if slide==1
%Limpiar la imagen anterior
axes(handles.axes1);
cla
axes(handles.axes2);
cla
axes(handles.axes3);
cla
%Representación vpn(t), van(t)
axes(handles.axes1);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vpn((9*(long(1)/10)):long(1)),'r');
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),van((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vNn((9*(long(1)/10)):long(1)),'m');
title('vPn(t), van(t),vNn(t)','FontSize',10)
legend('vPn(t)','van(t)','vNn(t)')
ylabel('Amplitud')
hold off
%Representación ia(t), ial(t)
axes(handles.axes2);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ia((9*(long(1)/10)):long(1)),'r');
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ial((9*(long(1)/10)):long(1)));
title('ia(t), ial(t)','FontSize',10)
legend('ia(t)','ial(t)')
ylabel('Amplitud')
hold off
%Representación Vlsa(t)
axes(handles.axes3);
if vlsa<1e-3
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vlsa((9*(long(1)/10)):long(1)));
ylim([-2 2]);
else
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vlsa((9*(long(1)/10)):long(1)));
end
title('vlsa(t)','FontSize',10)
ylabel('Amplitud')
xlabel('Tiempo')
elseif slide==2
%Limpiar la imagen anterior
axes(handles.axes1);
cla
axes(handles.axes2);
cla
axes(handles.axes3);
cla
%Representación vpn(t), vbn(t)

```



```

axes(handles.axes1);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vpn((9*(long(1)/10)):long(1)),'r');
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vbn((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vNn((9*(long(1)/10)):long(1)),'m');
title ('vPn(t), vbn(t),vNn(t)', 'FontSize',10)
legend ('vPn(t)', 'vbn(t)', 'vNn(t)')
ylabel ('Amplitud')
hold off
%Representación ib(t), ib1(t)
axes(handles.axes2);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ib((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ib1((9*(long(1)/10)):long(1)),'r');
title ('ib(t), ib1(t)', 'FontSize',10)
legend ('ib(t)', 'ib1(t)')
ylabel ('Amplitud')
hold off
%Representación Vlsb(t)
axes(handles.axes3);
if vlsb<1e-3
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vlsb((9*(long(1)/10)):long(1)));
    ylim([-2 2]);
else
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vlsb((9*(long(1)/10)):long(1)));
end
title ('vlsb(t)', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
xlabel ('Tiempo')
elseif slide ==3
    %Limpiar la imagen anterior
    axes(handles.axes1);
    cla
    axes(handles.axes2);
    cla
    axes(handles.axes3);
    cla
    %Representación vpn(t), vcn(t)
    axes(handles.axes1);
    hold on
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vpn((9*(long(1)/10)):long(1)),'r');
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vcn((9*(long(1)/10)):long(1)));
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vNn((9*(long(1)/10)):long(1)),'m');
    title ('vPn(t), vcn(t),vNn(t)', 'FontSize',10)
    legend ('vPn(t)', 'vcn(t)', 'vNn(t)')
    ylabel ('Amplitud')
    hold off
    %Representación ib(t), ib1(t)
    axes(handles.axes2);
    hold on
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ic((9*(long(1)/10)):long(1)));
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),icl((9*(long(1)/10)):long(1)),'r');
    title ('ic(t), icl(t)', 'FontSize',10)
    legend ('ic(t)', 'icl(t)')
    ylabel ('Amplitud')
    hold off
    %Representación Vlsc(t)
    axes(handles.axes3);
    if vlsc<1e-3
        plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vlsc((9*(long(1)/10)):long(1)));
        ylim([-2 2]);
    else
        plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vlsc((9*(long(1)/10)):long(1)));
    end
    title ('vlsc(t)', 'FontSize',10)
    ylabel ('Amplitud')
    xlabel ('Tiempo')
end

% --- Executes on button press in mostrarsalida.
function mostrarsalida_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to mostrarsalida (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%Limpiar la imagen anterior
slide=get(handles.popupmenu2, 'Value');

save handles
load workspace.mat
load handles.mat
long=size(t);

if slide==1

```

```

axes(handles.axes4);
cla
axes(handles.axes5);
cla
axes(handles.axes6);
cla
%Representación vo(t), Vo
axes(handles.axes4);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vo((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),Vo((9*(long(1)/10)):long(1)),'r');
ylim([-1 max(vo)+max(vo)*0.1]);
title ('vo(t),Vo','FontSize',10)
legend ('vo(t)','Vo')
ylabel ('Amplitud')
hold off
%Representación io(t) iol(t)
axes(handles.axes5);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),io((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),iol((9*(long(1)/10)):long(1)),'r');
title ('io(t),iol(t)','FontSize',10)
legend ('io(t)','iol(t)')
ylabel ('Amplitud')
hold off
%Representación vPN(t)
axes(handles.axes6);
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vPN((9*(long(1)/10)):long(1)));
title ('vPN(t)','FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
xlabel ('Tiempo')
elseif slide==2
axes(handles.axes4);
cla
axes(handles.axes5);
cla
axes(handles.axes6);
cla
axes(handles.axes4);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vab((9*(long(1)/10)):long(1)),'m');
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vac((9*(long(1)/10)):long(1)),'r');
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vcb((9*(long(1)/10)):long(1)),'g');
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vca((9*(long(1)/10)):long(1)));
title ('vab(t),vac(t),vcb(t),vca(t)','FontSize',10)
legend ('vab(t)','vac(t)','vcb(t)','vca(t)')
ylabel ('Amplitud')
hold off
%Representación io(t) iol(t)
axes(handles.axes5);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),io((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),iol((9*(long(1)/10)):long(1)),'r');
title ('io(t),iol(t)','FontSize',10)
legend ('io(t)','iol(t)')
ylabel ('Amplitud')
hold off
%Representación vPN(t)
axes(handles.axes6);
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vPN((9*(long(1)/10)):long(1)));
title ('vPN(t)','FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
xlabel ('Tiempo')
end

```

2.2.2 Representaciones del rectificador trifásico de doce pulsos

```

% --- Executes on button press in mostrarentrada.
function mostrarentrada_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to mostrarentrada (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
slide=get(handles.popupmenu1,'Value');

save handles
load workspace.mat
load handles.mat
long=size(t);

if slide==1
%Limpiar la imagen anterior
axes(handles.axes1);
cla

```

```

axes(handles.axes2);
cla
axes(handles.axes3);
cla
%Representación va(t), vb(t) y vc(t)
axes(handles.axes1);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),va((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vb((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vc((9*(long(1)/10)):long(1)), 'm');
title ('va(t), vb(t),vc(t)', 'FontSize',10)
legend ('va(t)', 'vb(t)', 'vc(t)')
ylabel ('Amplitud')
hold off
%Representación ial(t) ia2(t)
axes(handles.axes2);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ial((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ia2((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
title ('ial(t), ia2(t)', 'FontSize',10)
legend ('ial(t)', 'ia2(t)')
ylabel ('Amplitud')
hold off
%Representación ia(t)
axes(handles.axes3);
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ia((9*(long(1)/10)):long(1)));
title ('ia(t)', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
xlabel ('Tiempo')

elseif slide==2
%Limpiar la imagen anterior
axes(handles.axes1);
cla
axes(handles.axes2);
cla
axes(handles.axes3);
cla
%Representación va'(t), vb'(t) y vc'(t)
axes(handles.axes1);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),va_primera((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vb_primera((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vc_primera((9*(long(1)/10)):long(1)), 'm');
title ('va(t), vb(t),vc(t)', 'FontSize',10)
legend ('va(t)', 'vb(t)', 'vc(t)')
ylabel ('Amplitud')
hold off
%Representación ial'(t)
axes(handles.axes2);
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ial_primera((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
title ('ial(t)', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
%Representación ial(t)
axes(handles.axes3);
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ial((9*(long(1)/10)):long(1)));
title ('ial(t)', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
xlabel ('Tiempo')

elseif slide ==3
%Limpiar la imagen anterior
axes(handles.axes1);
cla
axes(handles.axes2);
cla
axes(handles.axes3);
cla
%Representación va"(t), vb"(t) y vc"(t)
axes(handles.axes1);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),va_segunda((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vb_segunda((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vc_segunda((9*(long(1)/10)):long(1)), 'm');
title ('va"(t), vb"(t),vc"(t)', 'FontSize',10)
legend ('va"(t)', 'vb"(t)', 'vc"(t)')
ylabel ('Amplitud')
hold off
%Representación ia2"(t) ib2"(t)
axes(handles.axes2);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ia2_segunda((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ib2_segunda((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
title ('ia2"(t), ib2"(t)', 'FontSize',10)
legend ('ia2"(t)', 'ib2"(t)')

```

```

ylabel ('Amplitud')
hold off
%Representación ia2(t)
axes(handles.axes3);
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ia2((9*(long(1)/10)):long(1)));
title ('ia2(t)','FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
xlabel ('Tiempo')
end

% --- Executes on button press in mostrarsalida.
function mostrarsalida_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to mostrarsalida (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
save handles
load workspace.mat
load handles.mat
long=size(t);
%Representación vo(t)
axes(handles.axes4);
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vo((9*(long(1)/10)):long(1)));
title ('vo(t)','FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
%Representación vol(t) y vo2(t)
axes(handles.axes5);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vol((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vo2((9*(long(1)/10)):long(1)));
title ('vol(t), vo2(t)','FontSize',10)
legend ('vol(t)', 'vo2(t)')
ylabel ('Amplitud')
xlabel ('Tiempo')
hold off

```

2.3 Rectificador Controlado Monofásico

```

% --- Executes just before RectificadorMonofasicoControlado is made visible.
function RectificadorMonofasicoControlado_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin command line arguments to RectificadorMonofasicoControlado (see VARARGIN)
img=imread('Imágenes/RectificadorMonofasicoControlado.png');
axes(handles.axes1);
imshow(img);
assignin('base','mod', 1);
% Choose default command line output for RectificadorMonofasicoControlado
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in representacion.
function representacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to representacion (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
addpath 'Interfaces'
addpath 'Codigo Matlab'
addpath 'Copias seguridad'
addpath 'Teoria'
addpath 'Imágenes'
addpath 'Simulink'
RectMonoControRepresentacion

% --- Executes on button press in RepresentacionParametrica.
function RepresentacionParametrica_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to RepresentacionParametrica (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
addpath 'Interfaces'
addpath 'Codigo Matlab'
addpath 'Copias seguridad'
addpath 'Teoria'
addpath 'Imágenes'
addpath 'Simulink'
RectMonoControRepresentacionPara

% --- Executes on button press in Borrar.
function Borrar_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject handle to Borrar (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%Valores de la entrada a la simulación
set(handles.Vs,'string',' '); %Amplitud de la tensión
set(handles.freq,'string',' '); %Frecuencia fundamental
set(handles.Ls,'string',' '); %Bobina a la entrada
set(handles.Rs,'string',' '); %Resistencia a la entrada
set(handles.Ld,'string',' '); %Bobina a la salida
set(handles.Ro,'string',' '); %Resistencia a la salida
set(handles.Ron,'string',' '); %Resistencia de los diodos
set(handles.Vf,'string',' '); %Tensión de los diodos
set(handles.alpha,'string',' '); %Valor de disparo
set(handles.Eo,'string',' '); %Fuente para modo inversor
%Valores de la salida de la simulación
set(handles.Vo,'String',' '); %Tensión media
set(handles.Io,'String',' '); %Corriente media
set(handles.rizadoVo,'String',' '); %Tensión de rizado de Vo
set(handles.Po,'String',' '); %Potencia a la salida
set(handles.PF,'String',' '); %Factor de potencia
set(handles.DPF,'String',' '); %Factor de potencia de desplazamiento
set(handles.P,'String',' '); %Potencia activa
set(handles.Q,'String',' '); %Potencia reactiva
set(handles.S,'string',' '); %Potencia aparente (VA)
set(handles.THDI,'string',' '); %Distorsión armónica total
set(handles.Rendimiento,'String',' '); %Rendimiento

% --- Executes on button press in ValoresDefecto.
function ValoresDefecto_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to ValoresDefecto (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.Vs,'String','100');
set(handles.freq,'string','50');
set(handles.Ls,'string','1e-9'); %Valor Ls para que sea lo más parecido a 0 y sea Ideal
por lo tanto
set(handles.Rs,'string','0.1');
set(handles.Ld,'string','0.1');
set(handles.Ro,'string','10');
set(handles.Ron,'string','1e-3');
set(handles.Vf,'string','0');
set(handles.alpha,'string','30');
set(handles.Eo,'string','200');

% --- Executes on button press in Calcular.
function Calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Calcular (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
Vs = str2double (get(handles.Vs,'string'));
assignin('base','Am', Vs*sqrt(2));
global freq;
freq = str2double (get(handles.freq,'string'));
assignin('base','freq', freq);
Ls = str2double (get(handles.Ls,'string'));
assignin('base','Ls', Ls);
Rs = str2double (get(handles.Rs,'string'));
assignin('base','Rs', Rs);
Ld = str2double (get(handles.Ld,'string'));
assignin('base','Ld', Ld);
Ro = str2double (get(handles.Ro,'string'));
assignin('base','Ro', Ro);
Ron = str2double (get(handles.Ron,'string'));
assignin('base','Ron', Ron);
Vf = str2double (get(handles.Vf,'string'));
assignin('base','Vf', Vf);
alpha = str2double (get(handles.alpha,'string'));
assignin('base','alpha', alpha/360*(1/freq));
Eo = str2double (get(handles.Eo,'string'));
assignin('base','Eo', Eo);

Ts=1/freq; %Tiempo de muestreo
N_ciclos=40; %Número de ciclos
N_muestras=400; %Número de muestras
assignin('base','Ts',Ts);
assignin('base','N_ciclos',N_ciclos);
assignin('base','N_muestras',N_muestras);

sim('Simulink/RectificadorMonofasicoControladoSimulink');

%Introducimos los valores obtenidos al realizar la simulación
%Entrada
% Vo(end) coge el último elemento del vector
Vo=Vo_sim(end);

```

```

Vo=sprintf( '%.2f',Vo);
set(handles.Vo, 'String',Vo)
Io=Io_sim(end);
Io=sprintf( '%.2f', Io);
set(handles.Io, 'String', Io)
vo=vo_sim;
longitudl=size(vo);
set(handles.rizadoVo, 'String', (max(vo((5*(longitudl(1)/6)):longitudl(1)))-
min(vo((5*(longitudl(1)/6)):longitudl(1))))*1e3);%rizado tension de salida
Po=Po_sim(end);
Po=sprintf( '%.2f',Po);
set(handles.Po, 'String',Po)

%Salida
PF=PF_sim(end);
PF=sprintf( '%.2f',PF);
set(handles.PF, 'String',PF)
DPF=DPF_sim(end);
DPF=sprintf( '%.2f',DPF);
set(handles.DPF, 'String',DPF);
P=P_sim(end);
P=sprintf( '%.2f',P);
set(handles.P, 'String',P)
Q=Q_sim(end);
Q=sprintf( '%.2f',Q);
set(handles.Q, 'String',Q)
THDi=THDi_sim(end);
THDi=THDi*100;
THDi=sprintf( '%.2f',THDi);
set(handles.THDi, 'String',THDi)
S=S_sim(end);
S=sprintf( '%.2f',S);
set(handles.S, 'String',S)
%Rendimiento
Rendimiento=Rendimiento_sim(end);
Rendimiento=sprintf( '%.2f',Rendimiento);
set(handles.Rendimiento, 'String',Rendimiento)
%valores para la representación
t=t_sim;
vo=vo_sim;
io=io_sim;
vs=vs_sim;
is=is_sim;
isl=isl_sim;
vab=vab_sim;
vls=vls_sim;
save workspace

% --- Executes on button press in abrirmodelo.
function abrirmodelo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to abrirmodelo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
open_system('Simulink/RectificadorMonofasicoControladoSimulink');

% --- Executes on button press in teoria.
function teoria_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to teoria (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
open ('Teoria/RectificadoresControlados.pdf')

% --- Executes on button press in restaurar.
function restaurar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to restaurar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
open_system('RectificadorMonofasicoControladoSimulinkOriginal');
save_system('RectificadorMonofasicoControladoSimulinkOriginal','Simulink/RectificadorMonofasicoControladoSimulink');
close_system('RectificadorMonofasicoControladoSimulinkOriginal');
close_system('RectificadorMonofasicoControladoSimulink');

2.3.1 Representaciones

% --- Executes on button press in mostrar.
function mostrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to mostrar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
save handles

```

```

load workspace.mat
load handles.mat
long=size(t);

%Representación de la entrada
%Representación vs(t)
axes(handles.axes1);
plot(t((5*(long(1)/10)):long(1)),vs((5*(long(1)/10)):long(1)));
title ('vs(t)', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')

%Representación Vls(t)
axes(handles.axes2);
hold on
plot(t((5*(long(1)/10)):long(1)),vab((5*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((5*(long(1)/10)):long(1)),vls((5*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
title ('vab(t),vls(t)', 'FontSize',10)
legend ('vab(t)', 'vls(t)')
ylabel ('Amplitud')
hold off

%Representación is(t),isl(t)
axes(handles.axes3); %Selecciona la gráfica
hold on
plot(t((5*(long(1)/10)):long(1)),is((5*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((5*(long(1)/10)):long(1)),isl((5*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
legend ('is(t)', 'isl(t)')
title ('is(t), isl(t)', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
xlabel('Tiempo')
hold off

%Representación salida
%Representación vo(t) y vs(t)
axes(handles.axes4);
hold on
plot(t((5*(long(1)/10)):long(1)),vo((5*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
plot(t((5*(long(1)/10)):long(1)),vs((5*(long(1)/10)):long(1)));
title ('vo(t),vs(t)', 'FontSize',10)
legend ('vo(t)', 'vs(t)')
ylabel ('Amplitud')
hold off

% %Representación io(t)
axes(handles.axes5);
plot(t((5*(long(1)/10)):long(1)),io((5*(long(1)/10)):long(1)));
title ('io(t)', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
xlabel ('Tiempo')

```

2.3.2 Representación paramétrica

```

% --- Executes on button press in mostrar.
function mostrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to mostrar (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global freq;
inicio = str2double (get(handles.inicio,'string'));
assignin('base','inicio', inicio);
paso = str2double (get(handles.paso,'string'));
assignin('base','paso', paso);
final = str2double (get(handles.final,'string'));
assignin('base','final', final);
%Vcont_aux = evalin('base','Vcont_aux');
D_vec= (inicio:paso:final);
longitud=size(D_vec);
h = waitbar(0,'Simulando, Espere por favor...');
for i=1:longitud(2)
waitbar(i/longitud(2),h);
alpha = D_vec(i);
alpha = alpha/360*(1/freq);
assignin('base','alpha', alpha);
sim('Simulink/RectificadorMonofasicoControladoSimulink');
P(i)=P_sim(end);
S(i)=S_sim(end);
S1(i)=S1_sim(end);
Q1(i)=Q1_sim(end);
end
close(h);
axes(handles.axes1);
hold on

```

```

plot(D_vec,P);
plot(D_vec,S,'b');
plot(D_vec,S1,'r');
plot(D_vec,Q1,'m');
title('Variación de P, S, S1 y Q1 en función de Alpha','FontSize',10)
legend ('P', 'S', 'S1', 'Q1')
xlabel('Variación de Alpha')
hold off

```

2.4 Rectificador Controlado Trifásico

```

% --- Executes just before RectificadorTrifasicoControlado is made visible.
function RectificadorTrifasicoControlado_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to RectificadorTrifasicoControlado (see VARARGIN)
    img=imread('Imágenes/RectificadorTrifasicoControlado.png');
    axes(handles.axes1);
    imshow(img);
    assignin('base','mod', 1);
% Choose default command line output for RectificadorTrifasicoControlado
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in abrirSimulink.
function abrirSimulink_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to abrirSimulink (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
open_system('Simulink/RectificadorTrifasicoControladoSimulink');

% --- Executes on button press in teoria.
function teoria_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to teoria (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
open ('Teoria/RectificadoresControlados.pdf')

% --- Executes on button press in restaurar.
function restaurar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to restaurar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
open_system('RectificadorTrifasicoControladoSimulinkOriginal');
save_system('RectificadorTrifasicoControladoSimulinkOriginal','Simulink/RectificadorTrifasicoControladoSimulink');
close_system('RectificadorTrifasicoControladoSimulinkOriginal');
close_system('RectificadorTrifasicoControladoSimulink');

% --- Executes on button press in representacion.
function representacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to representacion (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
addpath 'Interfaces'
addpath 'Codigo Matlab'
addpath 'Copias seguridad'
addpath 'Teoria'
addpath 'Imágenes'
addpath 'Simulink'
RectTriControRepresentacion

% --- Executes on button press in borrar.
function borrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to borrar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%Valores de la entrada a la simulación
set(handles.Vs,'string',' ');           %Amplitud de la tensión
set(handles.freq,'string',' ');         %Frecuencia fundamental
set(handles.Ls,'string',' ');           %Bobina a la entrada
set(handles.Rs,'string',' ');           %Resistencia a la entrada
set(handles.Ld,'string',' ');           %Bobina a la salida
set(handles.C,'string',' ');            %Condensador a la salida

```



```

set(handles.Ro,'string',' '); %Resistencia a la salida
set(handles.Ron,'string',' '); %Resistencia de los diodos
set(handles.Vf,'string',' '); %Tensión de los diodos
set(handles.alpha,'string',' '); %Disparo de los tiristores
%Valores de la salida de la simulación
set(handles.Vo,'String',' '); %Tensión media
set(handles.Io,'String',' '); %Corriente media
set(handles.rizadoVo,'String',' '); %Tensión de rizado de Vo
set(handles.Po,'String',' '); %Potencia a la salida
set(handles.PF,'String',' '); %Factor de potencia
set(handles.DPF,'String',' '); %Factor de potencia de desplazamiento
set(handles.P,'String',' '); %Potencia activa
set(handles.Q,'String',' '); %Potencia reactiva
set(handles.S,'string',' '); %Potencia aparente (VA)
set(handles.THDI,'string',' '); %Distorsión armónica total
set(handles.Rendimiento,'String',' '); %Rendimiento

% --- Executes on button press in ValoresDefecto.
function ValoresDefecto_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to ValoresDefecto (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.Vs,'String','100');
set(handles.freq,'string','50');
set(handles.Ls,'string','1e-9'); %Valor Ls para que sea lo más parecido a 0 y sea Ideal
por lo tanto
set(handles.Rs,'string','0.1');
set(handles.Ld,'string','0.1');
set(handles.C,'string','0.001');
set(handles.Ro,'string','10');
set(handles.Ron,'string','1e-3');
set(handles.Vf,'string','0');
set(handles.alpha,'string','30');

% --- Executes on button press in calcular.
function calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to calcular (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%Obtenemos los valores de los cuadros de texto para la simulación
Vs = str2double (get(handles.Vs,'string'));
assignin('base','Am', Vs*sqrt(2));
freq = str2double (get(handles.freq,'string'));
assignin('base','freq', freq);
Ls = str2double (get(handles.Ls,'string'));
assignin('base','Ls', Ls);
Rs = str2double (get(handles.Rs,'string'));
assignin('base','Rs', Rs);
Ld = str2double (get(handles.Ld,'string'));
assignin('base','Ld', Ld);
C = str2double (get(handles.C,'string'));
assignin('base','C', C);
Ro = str2double (get(handles.Ro,'string'));
assignin('base','Ro', Ro);
Ron = str2double (get(handles.Ron,'string'));
assignin('base','Ron', Ron);
Vf = str2double (get(handles.Vf,'string'));
assignin('base','Vf', Vf);
alpha = str2double (get(handles.alpha,'string'));
assignin('base','alpha', alpha);

Ts=1/freq; %Tiempo de muestreo
N_ciclos=40; %Número de ciclos
N_muestras=400; %Número de muestras
assignin('base','Ts',Ts);
assignin('base','N_ciclos',N_ciclos);
assignin('base','N_muestras',N_muestras);

sim('Simulink/RectificadorTrifasicoControladoSimulink');

%Introducimos los valores obtenidos al realizar la simulación
%Entrada
Vo(end) coge el último elemento del vector
Vo=Vo_sim(end);
Vo=sprintf('%.2f',Vo);
set(handles.Vo,'String',Vo)
Io=Io_sim(end);
Io=sprintf('%.2f',Io);
set(handles.Io,'String',Io)
vo=vo_sim;
longitud1=size(vo);

```

```

set(handles.rizadoVo, 'String', (max(vo((5*(longitudl(1)/6)):longitudl(1)))-
min(vo((5*(longitudl(1)/6)):longitudl(1))))*1e3);%rizado tension de salida
Po=Po_sim(end);
Po=sprintf('%.2f',Po);
set(handles.Po, 'String',Po)

%Salida
PF=PF_a_sim(end);
PF=sprintf('%.2f',PF);
set(handles.PF, 'String',PF)
DPF=DPF_a_sim(end);
DPF=sprintf('%.2f',DPF);
set(handles.DPF, 'String',DPF)
P=P_sim(end);
P=sprintf('%.2f',P);
set(handles.P, 'String',P)
Q=Q_sim(end);
Q=sprintf('%.2f',Q);
set(handles.Q, 'String',Q)
THDi=THDi_a_sim(end);
THDi=THDi*100;
THDi=sprintf('%.2f',THDi);
set(handles.THDi, 'String',THDi)
S=S_sim(end);
S=sprintf('%.2f',S);
set(handles.S, 'String',S)
%Rendimiento
Rendimiento=Rendimiento_sim(end);
Rendimiento=sprintf('%.2f',Rendimiento);
set(handles.Rendimiento, 'String',Rendimiento)
%valores para la representación
t=t_sim;
va=va_sim;
ia=ia_sim;
ial=ial_sim;
vlsa=vlsa_sim;
vb=vb_sim;
ib=ib_sim;
ibl=ibl_sim;
vlsb=vlsb_sim;
vc=vc_sim;
ic=ic_sim;
icl=icl_sim;
vlsc=vlsc_sim;
vPn=vPn_sim;
vNn=vNn_sim;
vbc=vbc_sim;
vab=vab_sim;
vac=vac_sim;
vo=vo_sim;
Vo=Vo_sim;
io=io_sim;
Io=Io_sim;
iol=iol_sim;
vls=vlsa_sim;
vld=vld_sim;
vPN=vPN_sim;
save workspace

```

2.4.1 Representaciones

```

% --- Executes on button press in mostrar.
function mostrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
slide=get(handles.popupmenu1, 'Value');

save handles
load workspace.mat
load handles.mat
long=size(t);

if slide==1
    %Limpiar la imagen anterior
    axes(handles.axes1);
    cla
    axes(handles.axes2);
    cla
    axes(handles.axes3);
    cla
    %Representación vpn(t), van(t)

```

```

axes(handles.axes1);
hold on
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vPn((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),va((9*(long(1)/10)):long(1)));
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vNn((9*(long(1)/10)):long(1)), 'm');
title ( 'vPn(t), van(t),vNn(t)', 'FontSize',10)
legend ( 'vPn(t)', 'van(t)', 'vNn(t)')
ylabel ( 'Amplitud')
hold off
%Representación ia(t), ial(t)
axes(handles.axes2);
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ia((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
title ( 'ia(t)', 'FontSize',10)
ylabel ( 'Amplitud')

%Representación Vlsa(t)
axes(handles.axes3);
if vlsa<1e-3
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vlsa((9*(long(1)/10)):long(1)));
    ylim([-2 2]);
else
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vlsa((9*(long(1)/10)):long(1)));
end
title ( 'vlsa(t)', 'FontSize',10)
ylabel ( 'Amplitud')
xlabel ( 'Tiempo')
elseif slide==2
    %Limpiar la imagen anterior
    axes(handles.axes1);
    cla
    axes(handles.axes2);
    cla
    axes(handles.axes3);
    cla
    %Representación vpn(t), vbn(t)
    axes(handles.axes1);
    hold on
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vPn((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vb((9*(long(1)/10)):long(1)));
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vNn((9*(long(1)/10)):long(1)), 'm');
    title ( 'vPn(t), vbn(t),vNn(t)', 'FontSize',10)
    legend ( 'vPn(t)', 'vbn(t)', 'vNn(t)')
    ylabel ( 'Amplitud')
    hold off
    %Representación ib(t), ib1(t)
    axes(handles.axes2);
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ib((9*(long(1)/10)):long(1)));
    title ( 'ib(t)', 'FontSize',10)
    ylabel ( 'Amplitud')
    %Representación Vlsb(t)
    axes(handles.axes3);
    if vlsb<1e-3
        plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vlsb((9*(long(1)/10)):long(1)));
        ylim([-2 2]);
    else
        plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vlsb((9*(long(1)/10)):long(1)));
    end
    title ( 'vlsb(t)', 'FontSize',10)
    ylabel ( 'Amplitud')
    xlabel ( 'Tiempo')
elseif slide ==3
    %Limpiar la imagen anterior
    axes(handles.axes1);
    cla
    axes(handles.axes2);
    cla
    axes(handles.axes3);
    cla
    %Representación vpn(t), vcn(t)
    axes(handles.axes1);
    hold on
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vPn((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vc((9*(long(1)/10)):long(1)));
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vNn((9*(long(1)/10)):long(1)), 'm');
    title ( 'vPn(t), vcn(t),vNn(t)', 'FontSize',10)
    legend ( 'vPn(t)', 'vcn(t)', 'vNn(t)')
    ylabel ( 'Amplitud')
    hold off
    %Representación ib(t), ib1(t)
    axes(handles.axes2);
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),ic((9*(long(1)/10)):long(1)));
    title ( 'ic(t)', 'FontSize',10)
    ylabel ( 'Amplitud')
    %Representación Vlsc(t)

```

```

axes(handles.axes3);
if vlsc<1e-3
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vlsc((9*(long(1)/10)):long(1)));
    ylim([-2 2]);
else
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vlsc((9*(long(1)/10)):long(1)));
end
title ('vlsc(t)', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
xlabel ('Tiempo')
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
slide=get(handles.popupmenu2, 'Value');

save handles
load workspace.mat
load handles.mat
long=size(t);

if slide==1
    axes(handles.axes4);
    cla
    axes(handles.axes5);
    cla
    axes(handles.axes6);
    cla
    %Representación vo(t), Vo
    axes(handles.axes4);
    hold on
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vo((9*(long(1)/10)):long(1)));
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),Vo((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
    ylim([-1 max(vo)+max(vo)*0.1]);
    title ('vo(t),Vo', 'FontSize',10)
    legend ('vo(t)', 'Vo')
    ylabel ('Amplitud')
    hold off
    %Representación io(t) iol(t)
    axes(handles.axes5);
    hold on
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),io((9*(long(1)/10)):long(1)));
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),iol((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
    title ('io(t),iol(t)', 'FontSize',10)
    legend ('io(t)', 'iol(t)')
    ylabel ('Amplitud')
    hold off
    %Representación vPN(t)
    axes(handles.axes6);
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vPN((9*(long(1)/10)):long(1)));
    title ('vPN(t)', 'FontSize',10)
    ylabel ('Amplitud')
    xlabel ('Tiempo')
elseif slide==2
    axes(handles.axes4);
    cla
    axes(handles.axes5);
    cla
    axes(handles.axes6);
    cla
    axes(handles.axes4);
    hold on
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vab((9*(long(1)/10)):long(1)), 'm');
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vac((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vbc((9*(long(1)/10)):long(1)), 'g');
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vac((9*(long(1)/10)):long(1)));
    title ('vab(t),vac(t),vbc(t),vc(t)', 'FontSize',10)
    legend ('vab(t)', 'vac(t)', 'vbc(t)', 'vca(t)')
    ylabel ('Amplitud')
    hold off
    %Representación io(t) iol(t)
    axes(handles.axes5);
    hold on
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),io((9*(long(1)/10)):long(1)));
    plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),iol((9*(long(1)/10)):long(1)), 'r');
    title ('io(t),iol(t)', 'FontSize',10)
    legend ('io(t)', 'iol(t)')
    ylabel ('Amplitud')
    hold off
    %Representación vPN(t)

```

```
axes(handles.axes6);
plot(t((9*(long(1)/10)):long(1)),vPN((9*(long(1)/10)):long(1)));
title ('vPN(t)', 'FontSize',10)
ylabel ('Amplitud')
xlabel ('Tiempo')
end
```


Parte VI

Manual de usuario

Manual de usuario

Como manual de usuario la herramienta consta de videotutoriales asignados en cada una de las interfaces de cada convertidor, para ello se deberá de pulsar el

botón

Videotutorial

Además de ellos se va a proceder a una explicación en papel.

1. Inicio

Para poder comenzar el uso de la aplicación el usuario se debe de copiar o descargar la carpeta TFG en la cual se encuentran todos los archivos necesarios.

Una vez tengamos la carpeta en nuestro ordenador y tengamos instalado el programa de Matlab, el cual puede ser descargado desde este link: <https://es.mathworks.com/downloads/> se procederá a la ejecución del archivo TFG.fig tras lo cual mostrará la pantalla principal.



Figura 148: Pantalla principal del programa

Desde esta pantalla se tiene acceso a los diferentes tipos de convertidores y sus versiones:

- * Convertidor DC/DC
- * Convertidor DC/DC Puente en H
- * Inversor DC/AC Monofásico
- * Inversor DC/AC Trifásico
- * Rectificador No Controlado Monofásico
- * Rectificador No Controlado Trifásico
- * Rectificador Controlado Monofásico
- * Rectificador Controlado Trifásico

2. Rectificador No controlado Monofásico

Para acceder a este tipo de convertidor se deberá seleccionar el botón

Rectificador No Controlado Monofásico

Figura 149: Botón para abrir el rectificador no controlado monofásico



Figura 150: Acceso al rectificador no controlado monofásico

Tras seleccionar dicho botón aparecerá una nueva interfaz del módulo.

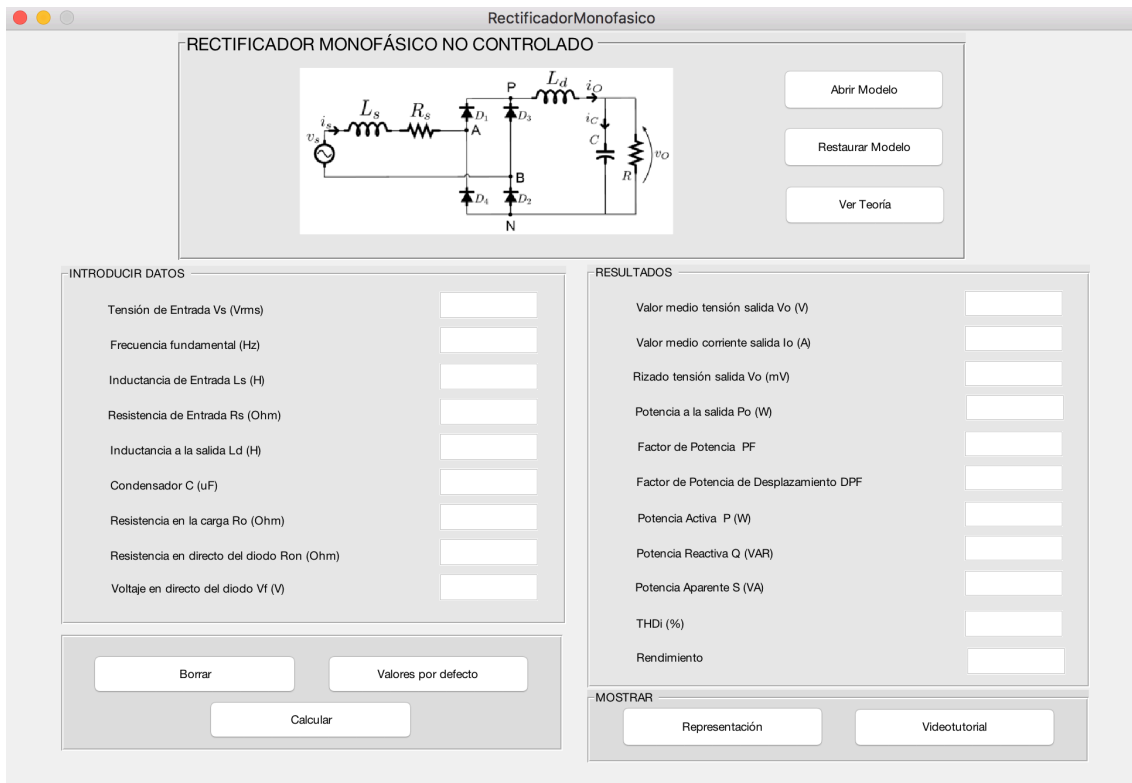


Figura 151: Pantalla rectificador no controlado monofásico

Si se desea ver el modelo Simulink para realizar algún cambio en el circuito o para saber cómo es el circuito se debe pulsar el botón

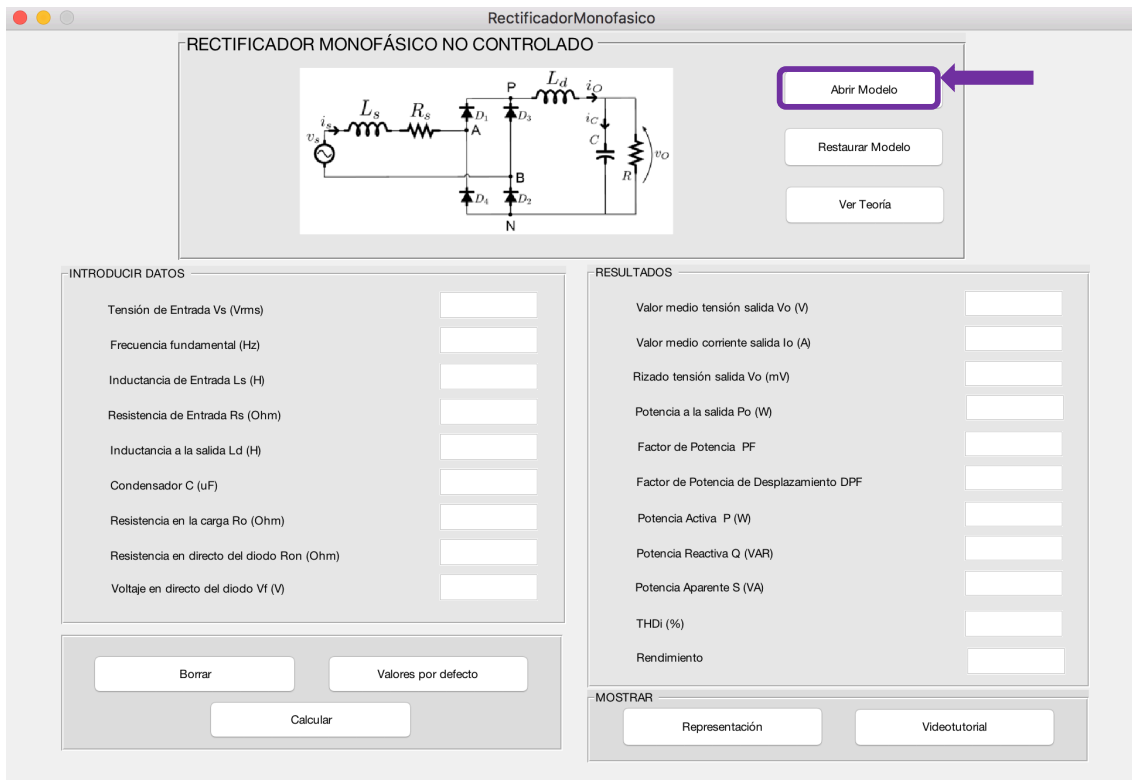


Figura 152: Acceso al modelo Simulink del rectificador

Tras lo cual aparecerá el modelo abierto en Simulink donde se puede ver el circuito además de los resultados más relevantes y gráficas de los mismos.

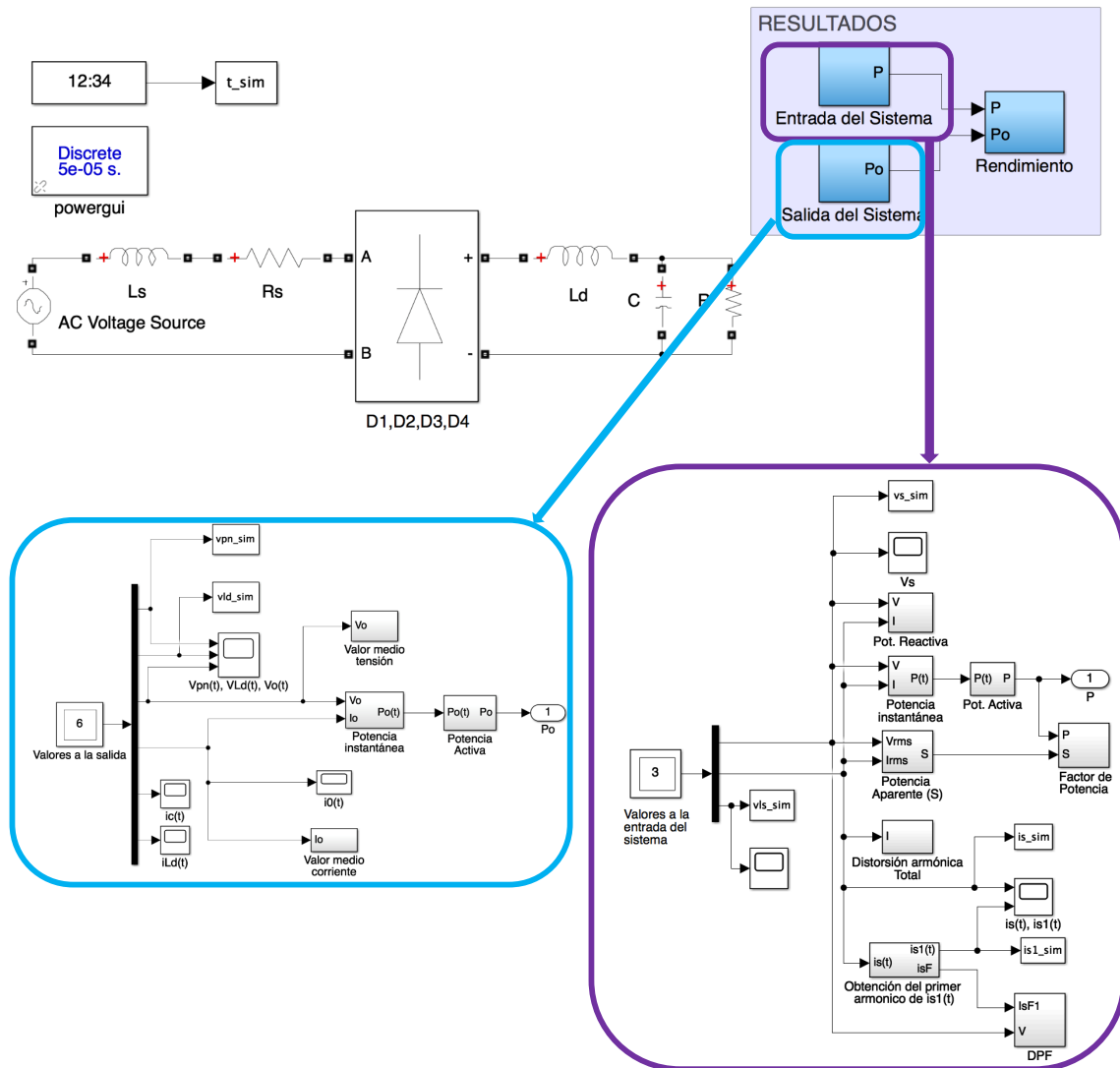


Figura 153: Modelo en Simulink del rectificador monofásico no controlado

Si se ha hecho algún cambio en el modelo y quiere modificarlo por el modelo original se deberá seleccionar el botón Restaurar Modelo

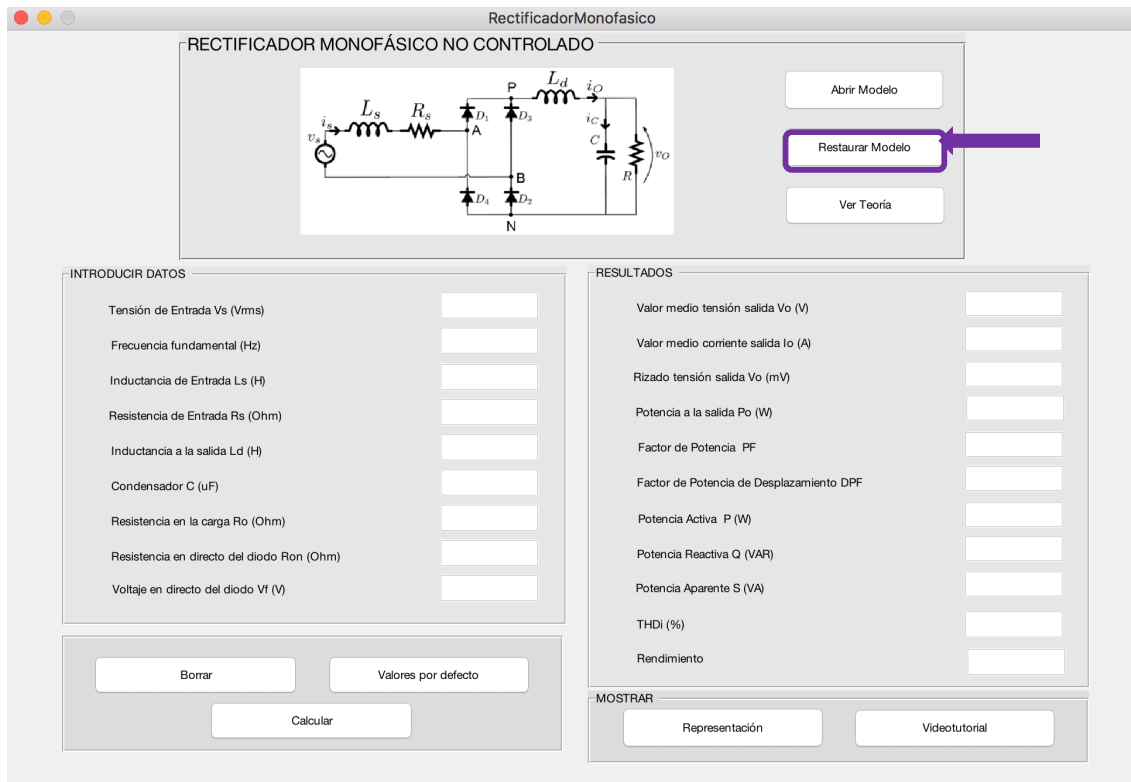


Figura 154: Botón para restaurar el modelo Simulink


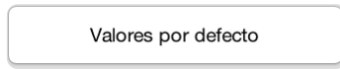
Para abrir la teoría relacionada con este rectificador para una mayor comprensión de su funcionamiento se pulsa el botón  tras lo cual se abrirá un pdf.



Figura 155: Archivo pdf con la teoría del rectificador monofásico no controlado

Para realizar una simulación del circuito se debe completar las variables que se encuentran en la pestaña **“Introducir Datos”**, las cuales se pueden introducir seleccionando las casillas e introduciéndolas de manera manual o seleccionando

el botón



RECTIFICADOR MONOFÁSICO NO CONTROLADO

INTRODUCIR DATOS

Tensión de Entrada V_s (Vrms)	100
Frecuencia fundamental (Hz)	50
Inductancia de Entrada L_s (H)	1e-9
Resistencia de Entrada R_s (Ohm)	0.1
Inductancia a la salida L_d (H)	0.1
Condensador C (μ F)	0.001
Resistencia en la carga R_o (Ohm)	10
Resistencia en directo del diodo R_{on} (Ohm)	1e-3
Voltaje en directo del diodo V_f (V)	0

RESULTADOS

Valor medio tensión salida V_o (V)	
Valor medio corriente salida I_o (A)	
Rizado tensión salida V_o (mV)	
Potencia a la salida P_o (W)	
Factor de Potencia PF	
Factor de Potencia de Desplazamiento DPF	
Potencia Activa P (W)	
Potencia Reactiva Q (VAR)	
Potencia Aparente S (VA)	
THDi (%)	
Rendimiento	

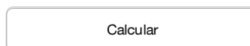
MOSTRAR

Representación Videotutorial

Figura 156: Valores por defecto para el cálculo

Aun habiendo seleccionado los valores por defecto se pueden modificar seleccionando la casilla de la variable que se desea variar.

Por último, se pulsará el botón



para proceder a la

ejecución del circuito con Simulink. Tras lo cual se visualizarán los resultados por la pantalla y en concreto la pestaña de **“Resultados”**.

RESULTADOS

Valor medio tensión salida V_o (V)	89.13
Valor medio corriente salida I_o (A)	8.91
Rizado tensión salida V_o (mV)	3109.67
Potencia a la salida P_o (W)	794.45
Factor de Potencia PF	0.90
Factor de Potencia de Desplazamiento DPF	1.00
Potencia Activa P (W)	802.77
Potencia Reactiva Q (VAR)	61.74
Potencia Aparente S (VA)	891.93
THDi (%)	47.67
Rendimiento	0.99

Figura 157: Resultados de la simulación

Si desea eliminar los valores tanto introducidos como los del resultado se debe pulsar el botón

Tras haber realizado la simulación se pueden visualizar las medidas más relevantes del circuito para lo cual se pulsa el botón apareciendo una nueva ventana.

RECTIFICADOR MONOFÁSICO NO CONTROLADO

Abrir Modelo

Restaurar Modelo

Ver Teoría

INTRODUCCIÓN DE DATOS

Tensión de Entrada V_s (Vmms)	100
Frecuencia fundamental (Hz)	50
Inductancia de Entrada L_s (H)	1e-9
Resistencia de Entrada R_s (Ohm)	0.1
Inductancia a la salida L_d (H)	0.1
Condensador C (μ F)	0.001
Resistencia en la carga R_o (Ohm)	10
Resistencia en directo del diodo R_{on} (Ohm)	1e-3
Voltaje en directo del diodo V_f (V)	0

Borrar

Valores por defecto

Calcular

RESULTADOS

Valor medio tensión salida V_o (V)	89.13
Valor medio corriente salida I_o (A)	8.91
Rizado tensión salida V_o (mV)	3109.67
Potencia a la salida P_o (W)	794.45
Factor de Potencia PF	0.90
Factor de Potencia de Desplazamiento DPF	1.00
Potencia Activa P (W)	802.77
Potencia Reactiva Q (VAR)	61.74
Potencia Aparente S (VA)	891.93
THDi (%)	47.67
Rendimiento	0.99

MOSTRAR

Representación

Videotutorial

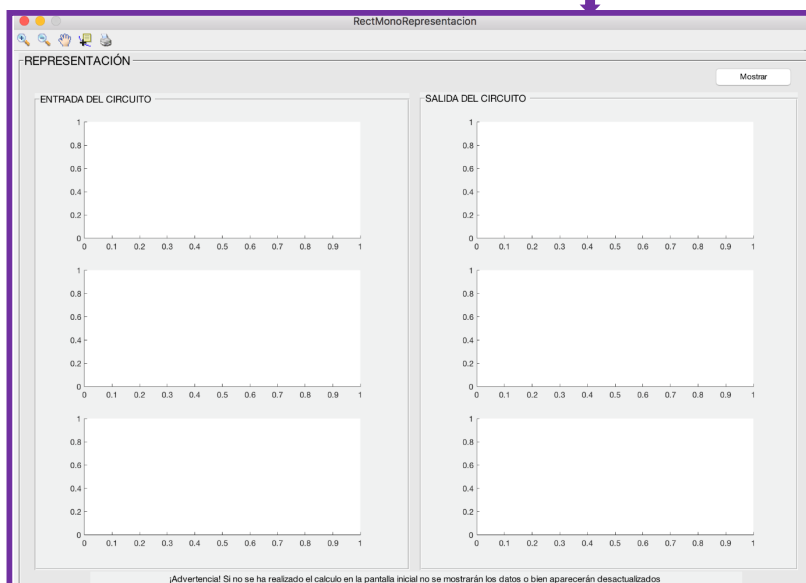
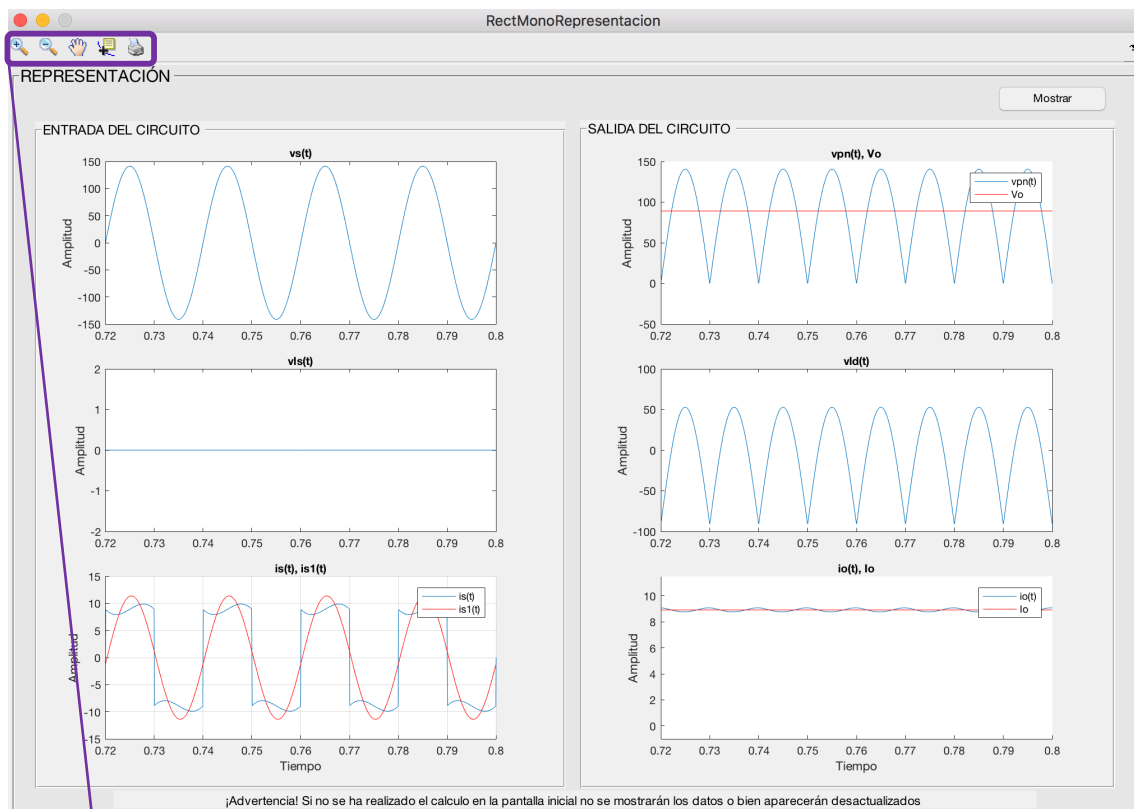


Figura 158: Pantalla de visualización de gráficas relevantes

Para visualizar las gráficas se pulsa el botón

Mostrar



Botón para imprimir las gráficas de la

Botón para añadir un cursor a la gráfica y ver valores relevantes en la misma

Botón para moverse por la gráfica

Botón para minimizar la

Botón para maximizar la gráfica

Figura 159: Visualización de las gráficas y ajustes

3. Rectificador No controlado Trifásico

Para acceder a este tipo de convertidor se deberá seleccionar el botón

Rectificador No Controlado Trifásico

Figura 160: Botón para abrir el rectificador no controlado trifásico



Figura 161: Acceso al rectificador no controlado trifásico

Tras seleccionar dicho botón aparecerá una nueva interfaz del módulo.

Dentro de esta ventana el usuario puede seleccionar el ejecutar y estudiar el rectificador trifásico de seis pulsos o de doce pulsos, para ello en la pestaña de "Rectificador Trifásico No Controlado" selecciona la opción que desee tal y como se muestra en la Figura 162.

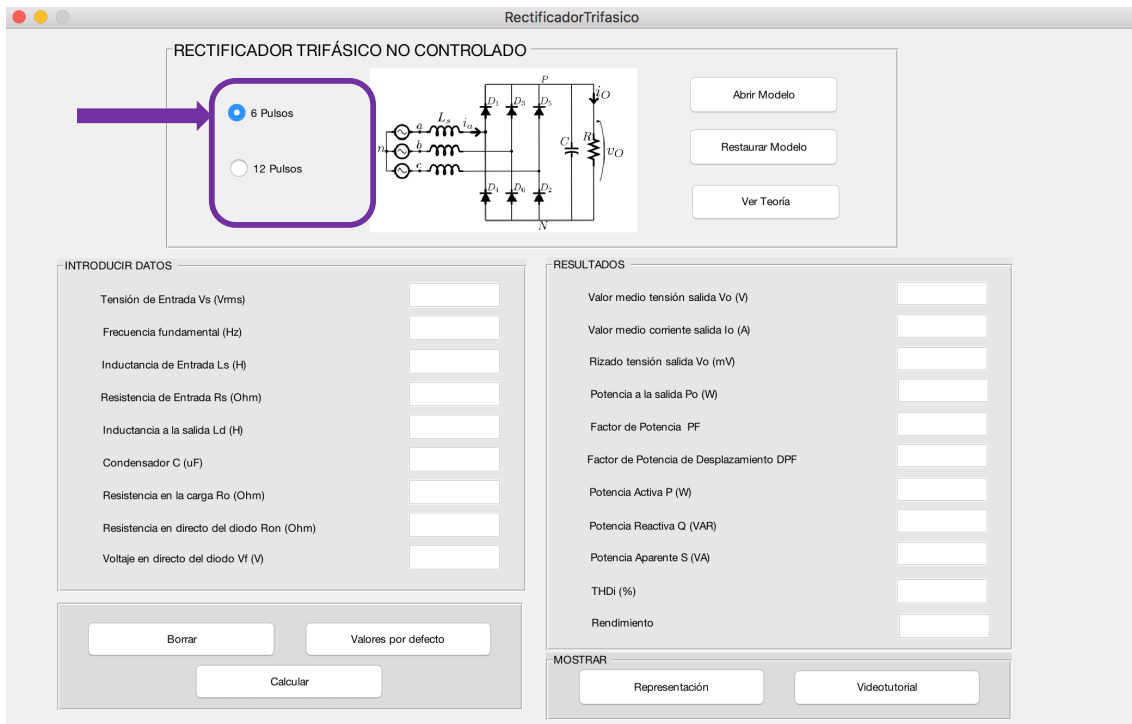


Figura 162: Pantalla rectificador no controlado trifásico

3.1 Rectificador No Controlado Trifásico de seis pulsos

Si se desea ver el modelo Simulink para realizar algún cambio en el circuito o para saber cómo es el circuito se debe pulsar el botón

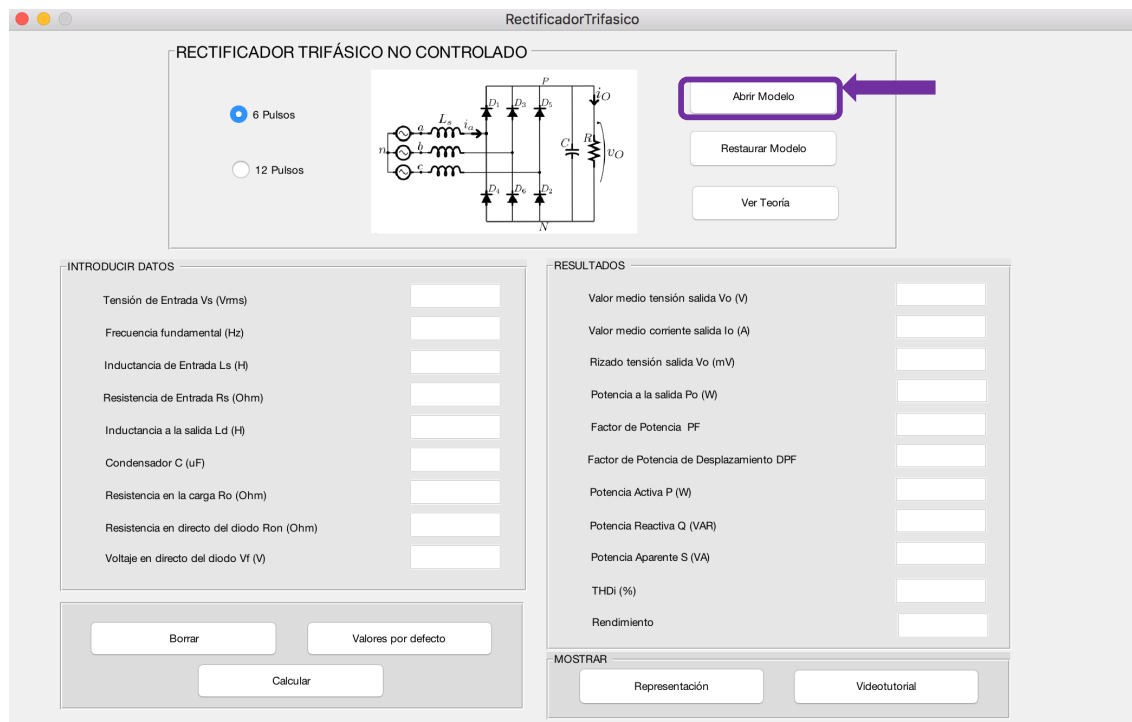
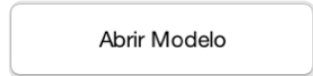


Figura 163: Acceso al modelo Simulink del rectificador

Tras lo cual aparecerá el modelo abierto en Simulink donde se puede ver el circuito además de los resultados más relevantes y gráficas de los mismos.

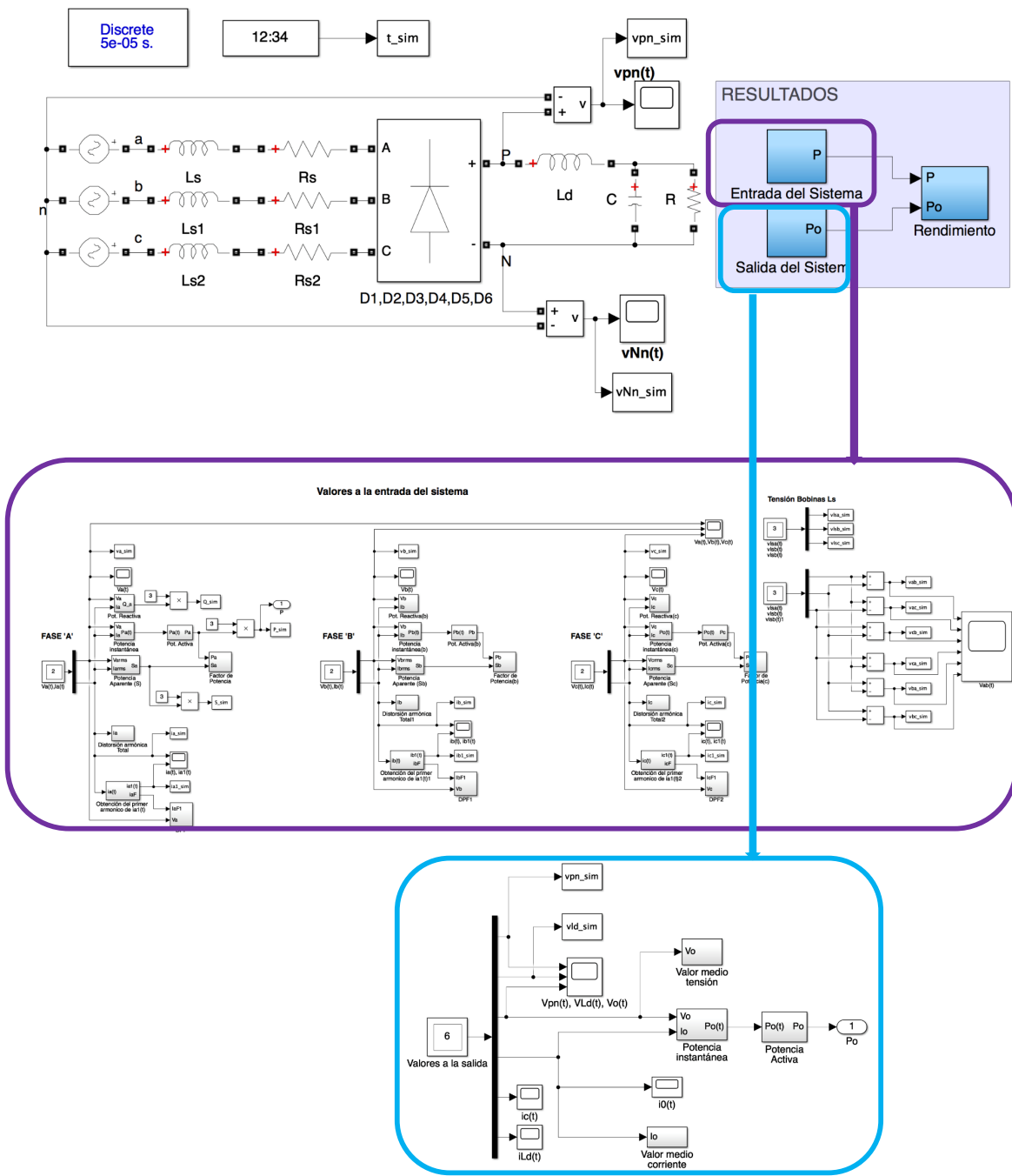


Figura 164: Modelo en Simulink del rectificador trifásico no controlado

Si se ha hecho algún cambio en el modelo y quiere modificarlo por el modelo original se deberá seleccionar el botón

Restaurar Modelo

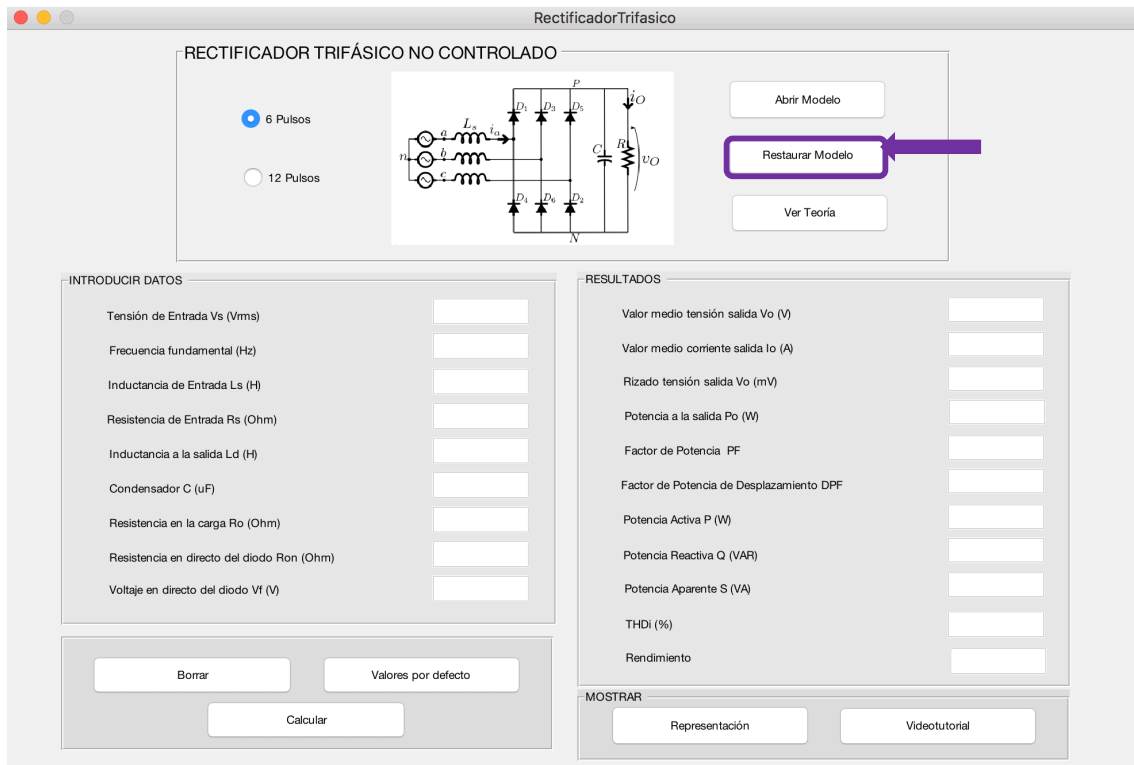


Figura 165: Botón para restaurar el modelo Simulink


Para abrir la teoría relacionada con este rectificador para una mayor comprensión de su funcionamiento se pulsa el botón  tras lo cual se abrirá un pdf.



Figura 166: Archivo pdf con la teoría del rectificador monofásico no controlado

Para realizar una simulación del circuito se debe completar las variables que se encuentran en la pestaña “**Introducir Datos**”, las cuales se pueden introducir seleccionando las casillas e introduciéndolas de manera manual o seleccionando el botón

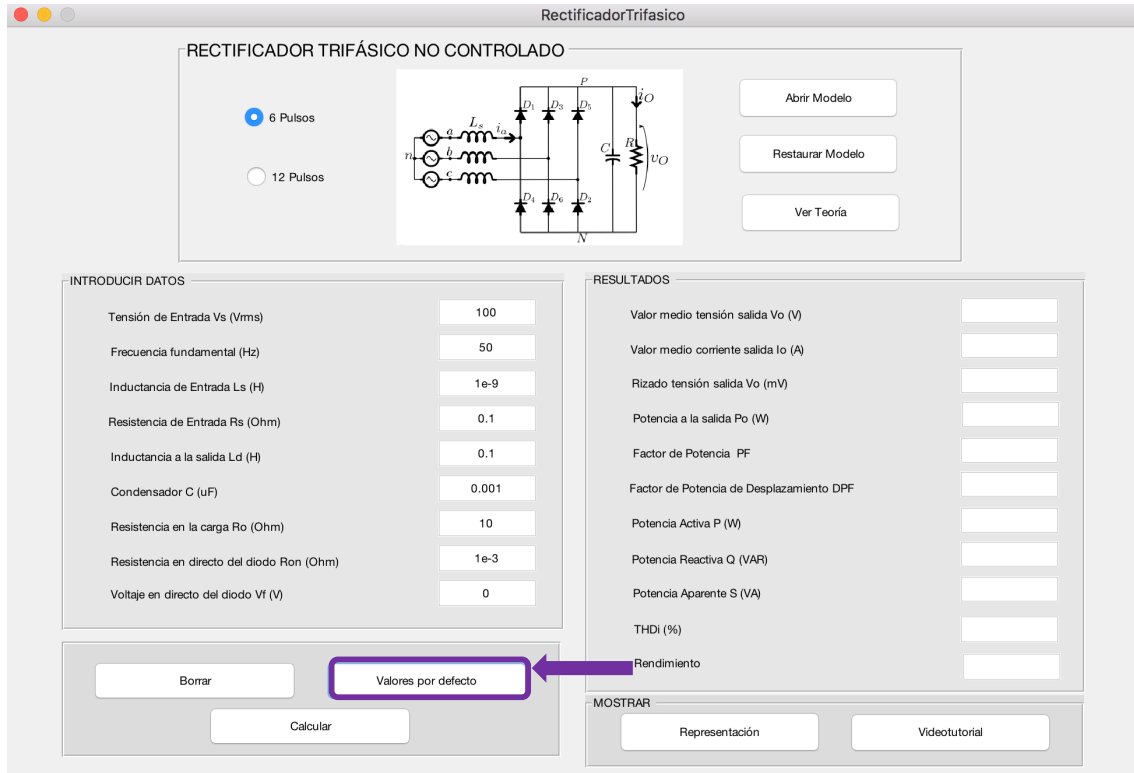
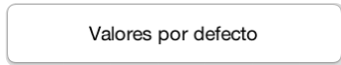
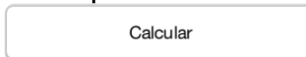


Figura 167: Valores por defecto para el cálculo

Aun habiendo seleccionado los valores por defecto se pueden modificar seleccionando la casilla de la variable que se desea variar.

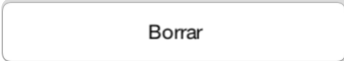
Por último, se pulsará el botón

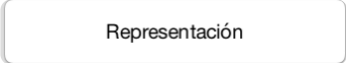


para proceder a la ejecución del circuito con Simulink. Tras lo que se visualizarán los resultados por la pantalla y en concreto la pestaña de “**Resultados**”.

RESULTADOS	
Valor medio tensión salida V_o (V)	229.29
Valor medio corriente salida I_o (A)	22.93
Rizado tensión salida V_o (mV)	76.2423
Potencia a la salida P_o (W)	5257.24
Factor de Potencia PF	0.96
Factor de Potencia de Desplazamiento DPF	1.00
Potencia Activa P (W)	5365.26
Potencia Reactiva Q (VAR)	3.08
Potencia Aparente S (VA)	5609.86
THDi (%)	30.54
Rendimiento	0.98

Figura 168: Resultados de la simulación

Si desea eliminar los valores tanto introducidos como los del resultado se debe pulsar el botón 

Tras haber realizado la simulación se pueden visualizar las medidas más relevantes del circuito para lo cual se pulsa el botón  apareciendo una nueva ventana.

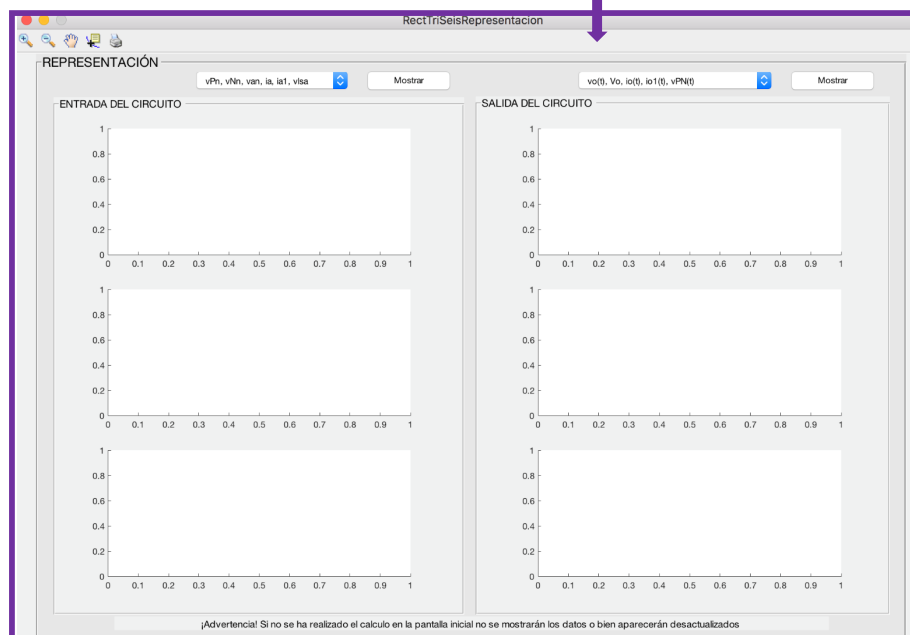
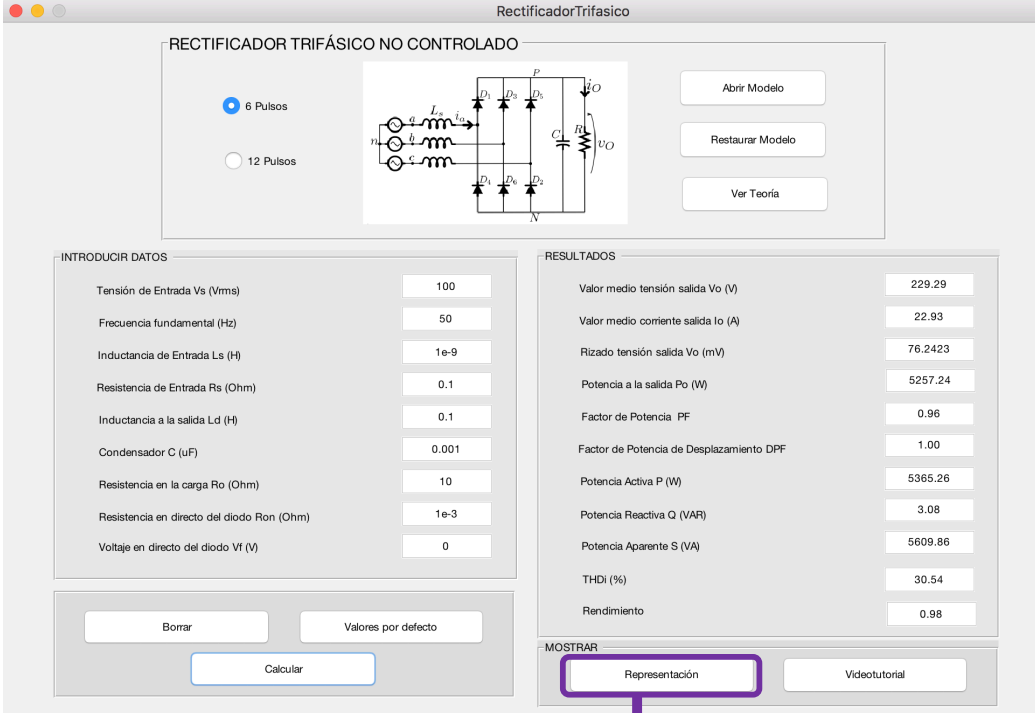


Figura 169: Pantalla de visualización

En la ventana de visualización hay dos desplegables para que el usuario elija la opción que más desea mostrar de los datos de entrada y de los de salida.

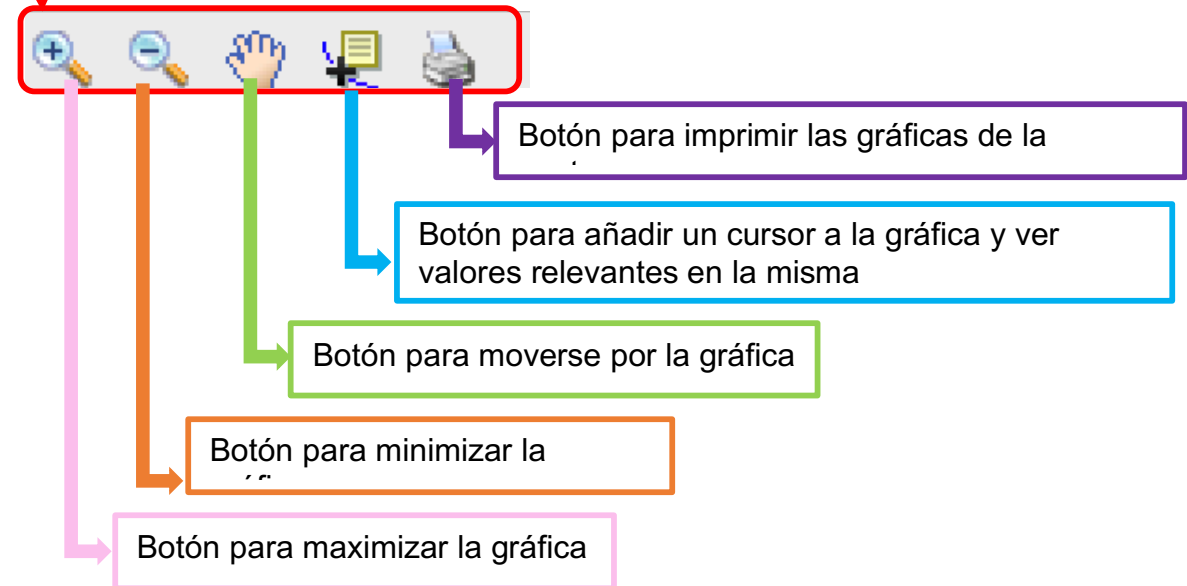
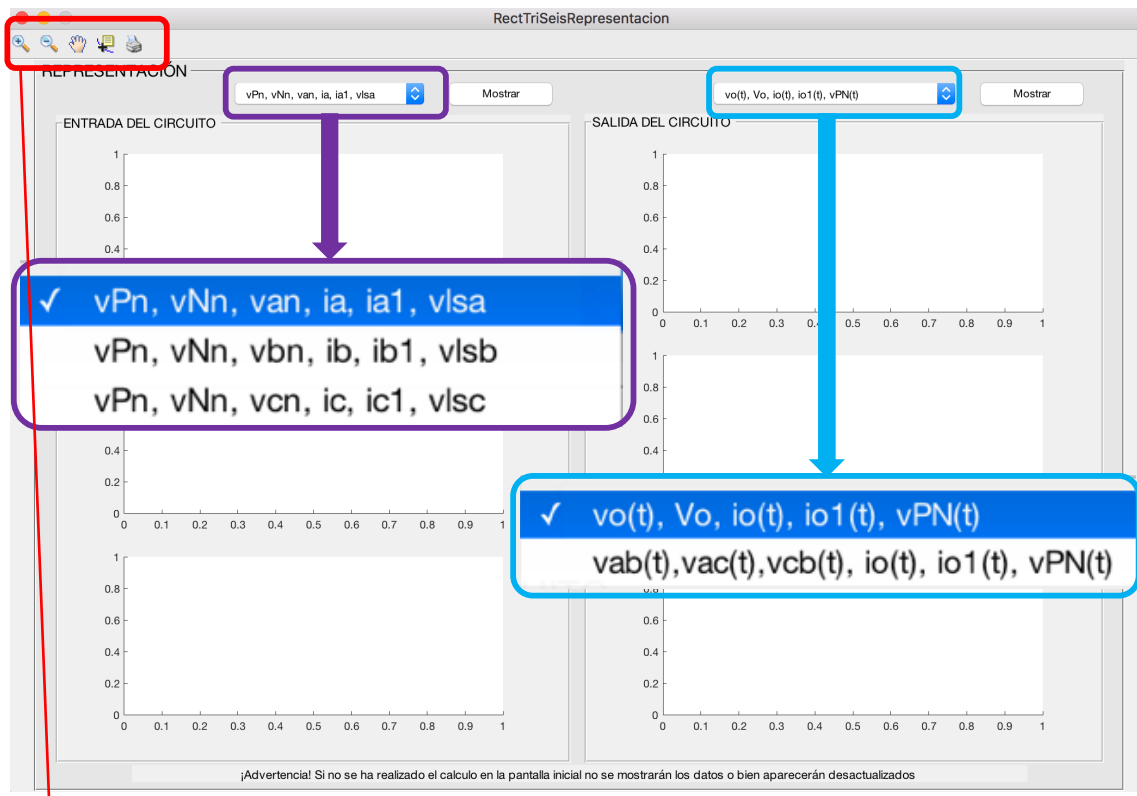


Figura 170: Pantalla de visualización explicada

El usuario selecciona alguna de las tres opciones de la entrada en este caso la primera y pulsa el botón tras lo que se mostrarán las gráficas de la entrada.

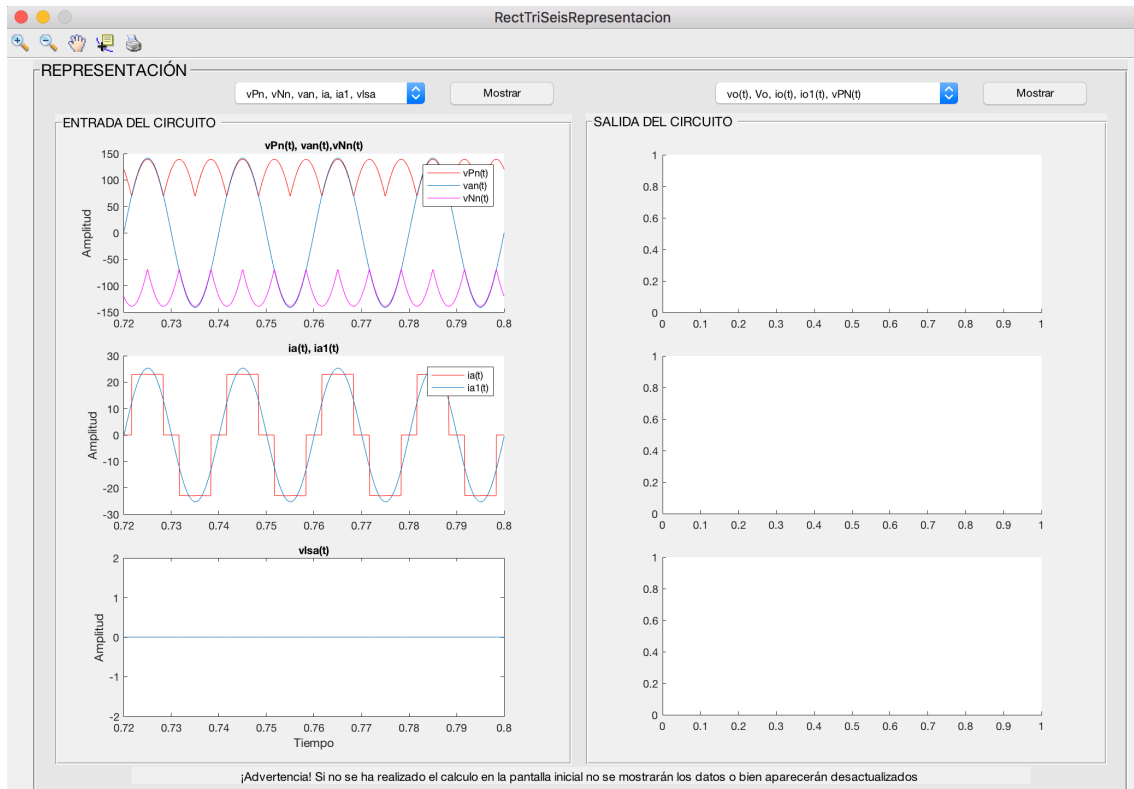


Figura 171: Visualización de las gráficas a la entrada del sistema

Si se desea ver la gráfica de la salida el usuario deberá seleccionar la opción que desee del desplegable y pulsar el botón

Mostrar

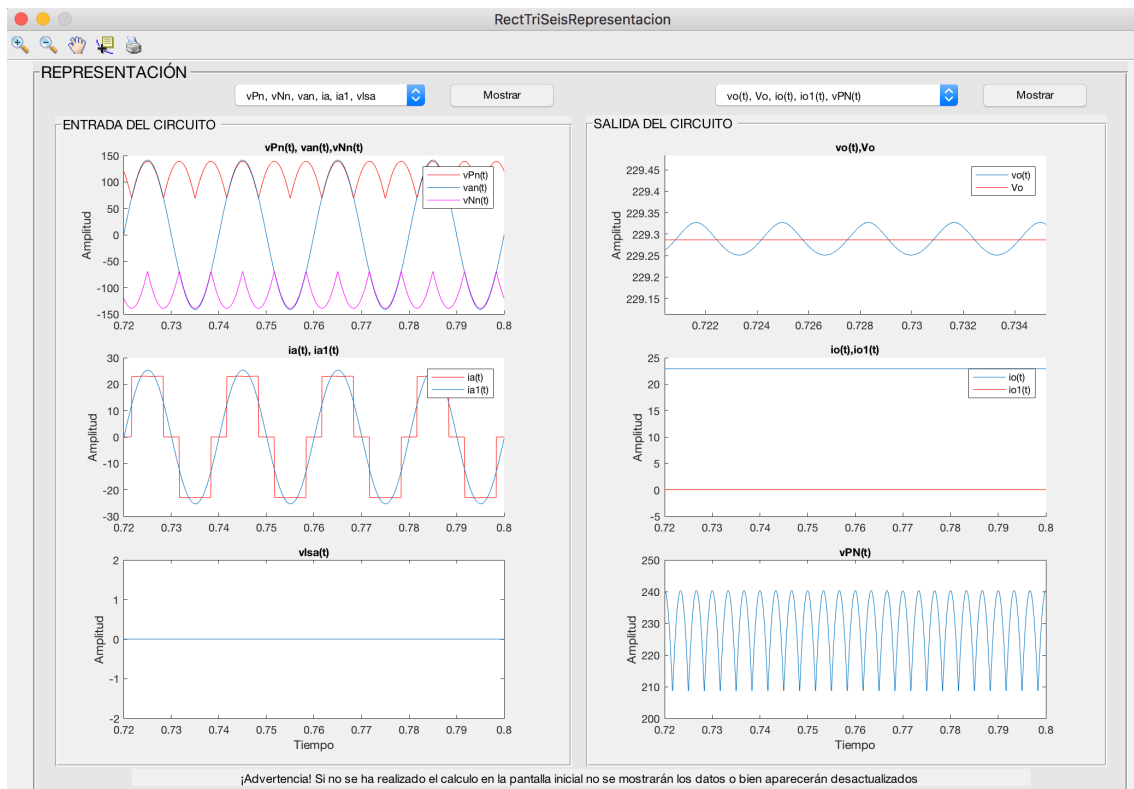


Figura 172: Visualización de las gráficas de la salida del sistema

3.1 Rectificador No Controlado Trifásico de doce pulsos

Para realizar la simulación del rectificador no controlado trifásico de doce pulsos el usuario debe seleccionar la opción de 12 Pulsos en la pestaña de **“Rectificador Trifásico no Controlado”**.

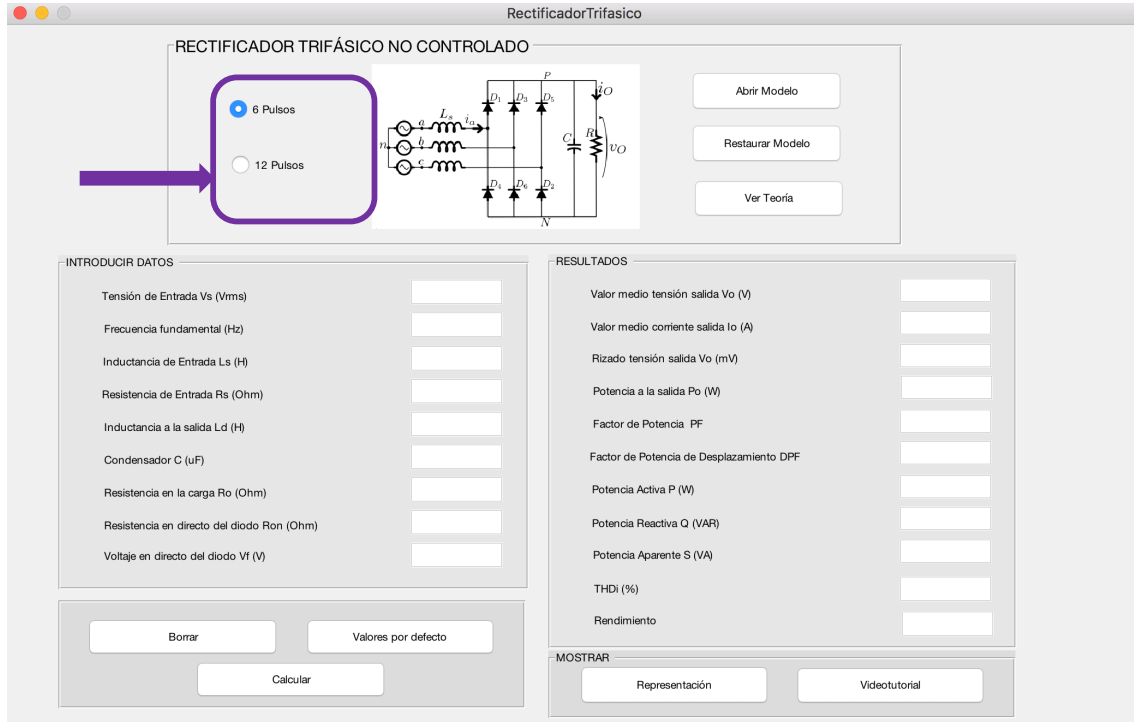


Figura 173: Selección del rectificador trifásico no controlado de doce pulsos

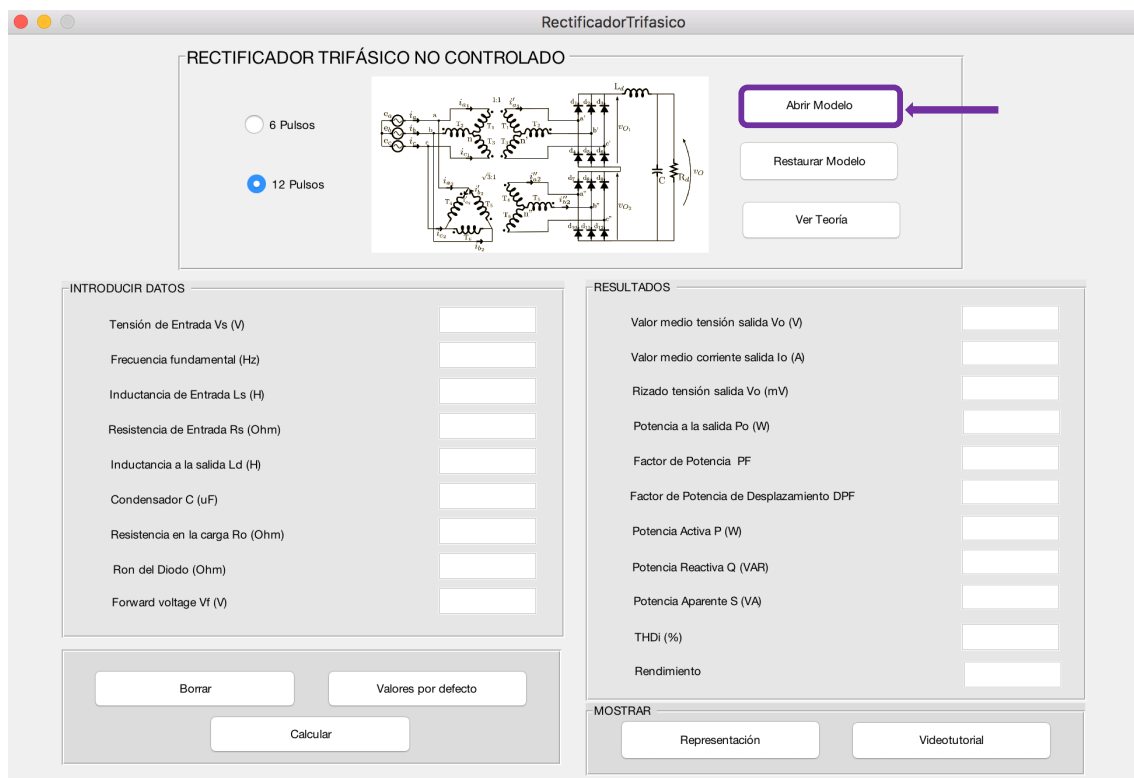


Figura 174: Pantalla rectificador trifásico no controlado de doce pulsos

Si se desea ver el modelo Simulink para realizar algún cambio en el circuito o

para saber cómo es el circuito se debe pulsar el botón

Abrir Modelo

Tras lo cual aparecerá el modelo abierto en Simulink donde se puede ver el circuito además de los resultados más relevantes y gráficas de los mismos.

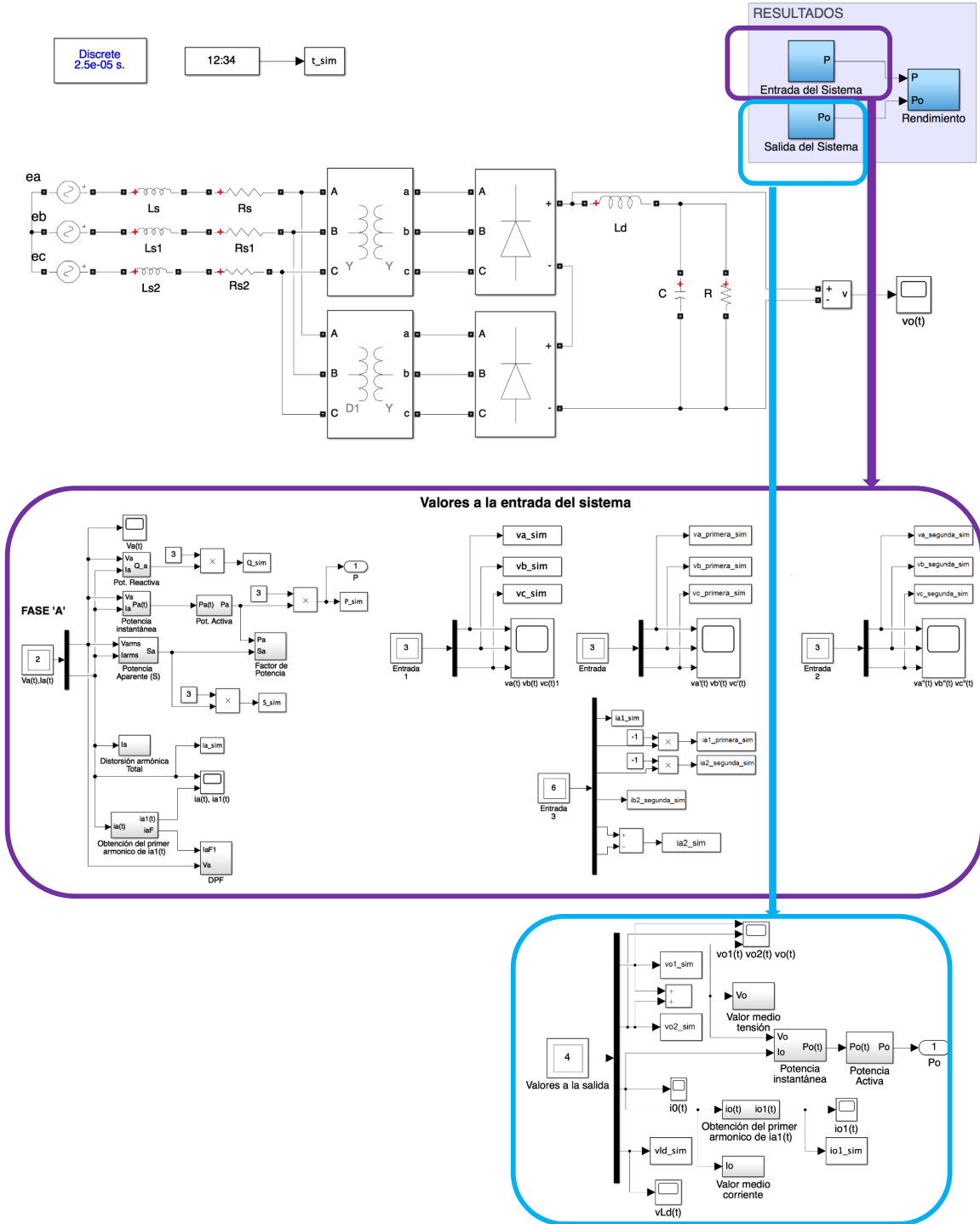


Figura 175: Modelo en Simulink del rectificador trifásico no controlado de doce pulsos

Si se ha hecho algún cambio en el modelo y quiere modificarlo por el modelo original se deberá seleccionar el botón

Restaurar Modelo

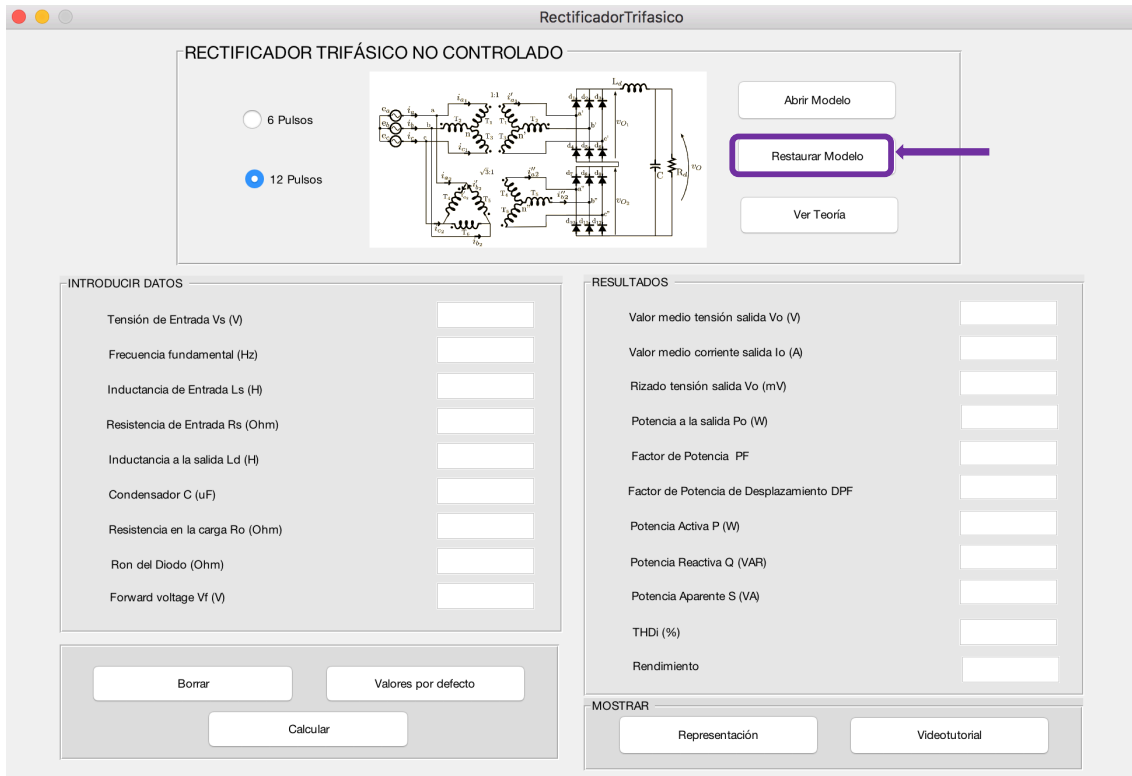



Figura 176: Botón para restaurar el modelo Simulink

Para abrir la teoría relacionada con este rectificador para una mayor comprensión de su funcionamiento se pulsa el botón  tras lo cual se abrirá un pdf.

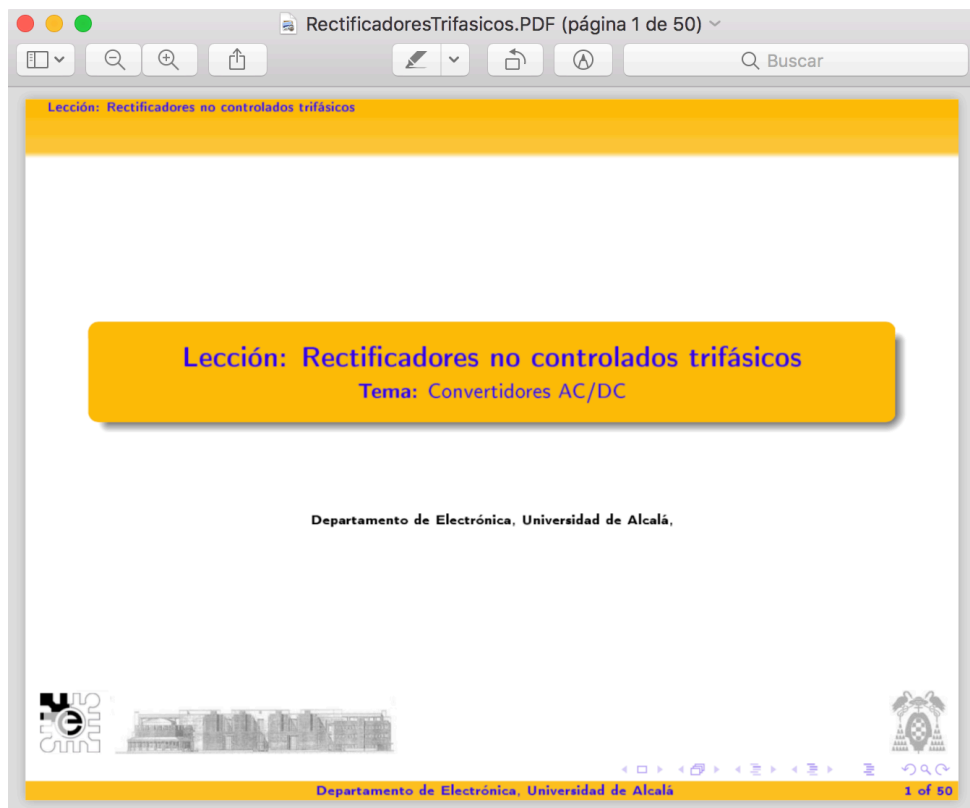


Figura 177: Archivo pdf con la teoría del rectificador monofásico no controlado

Para realizar una simulación del circuito se debe completar las variables que se encuentran en la pestaña **“Introducir Datos”**, las cuales se pueden introducir seleccionando las casillas e introduciéndolas de manera manual o seleccionando el botón

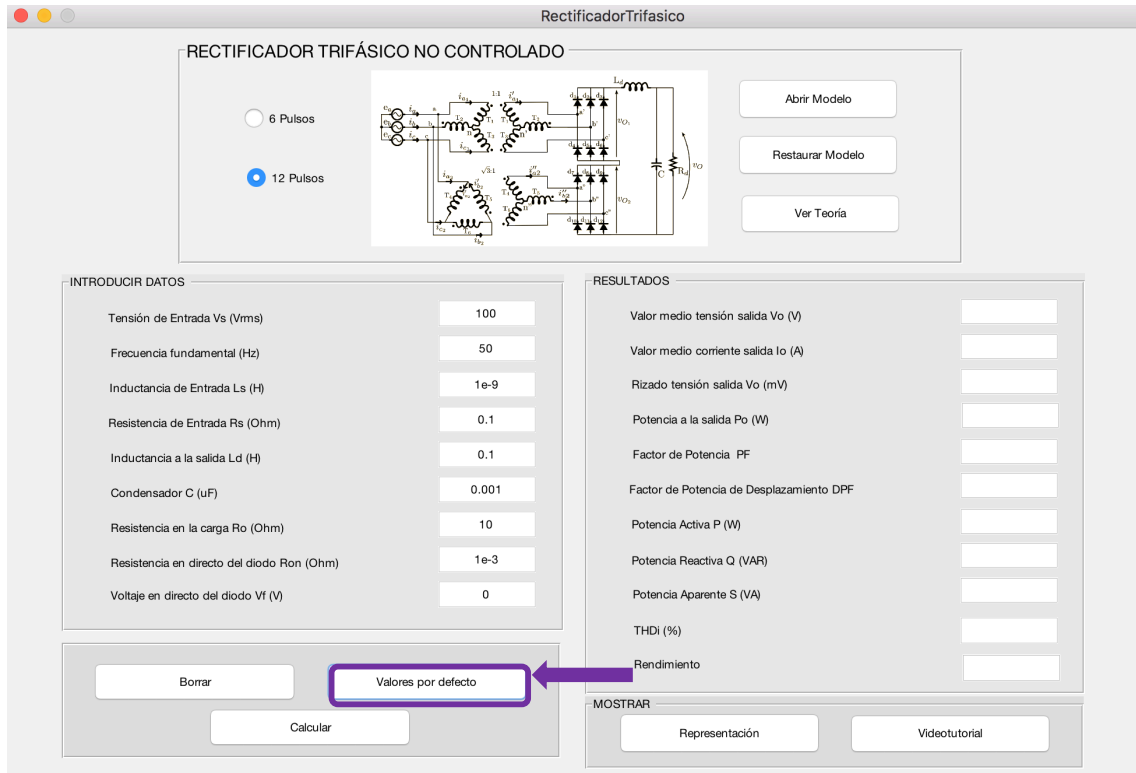
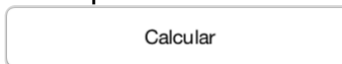


Figura 178: Valores por defecto para el cálculo

Aun habiendo seleccionado los valores por defecto se pueden modificar seleccionando la casilla de la variable que se desea variar.

Por último, se pulsará el botón



para proceder a la ejecución del circuito con Simulink.

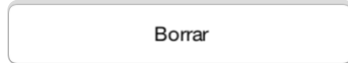
Una vez que haya terminado de ejecutarse la simulación se visualizarán los resultados por la pantalla y en concreto la pestaña de **“Resultados”**.

RESULTADOS

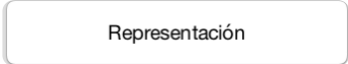
Valor medio tensión salida Vo (V)	434.96
Valor medio corriente salida Io (A)	43.50
Rizado tensión salida Vo (mV)	13982.5
Potencia a la salida Po (W)	18919.20
Factor de Potencia PF	0.99
Factor de Potencia de Desplazamiento DPF	1.00
Potencia Activa P (W)	20349.80
Potencia Reactiva Q (VAR)	167.36
Potencia Aparente S (VA)	20553.89
THDi (%)	14.17
Rendimiento	0.93

Figura 179: Resultados de la simulación

Si desea eliminar los valores tanto introducidos como los del resultado se debe pulsar el botón



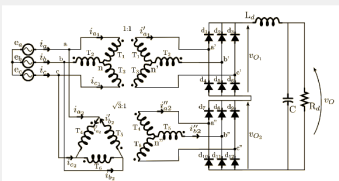
Tras haber realizado la simulación se pueden visualizar las medidas más relevantes del circuito para lo cual se pulsa el botón



RectificadorTrifasico

RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO

6 Pulsos
 12 Pulsos



INTRODUCIR DATOS

Tensión de Entrada V_s (Vrms)	100
Frecuencia fundamental (Hz)	50
Inductancia de Entrada L_s (H)	1e-9
Resistencia de Entrada R_s (Ohm)	0.1
Inductancia a la salida L_d (H)	0.1
Condensador C (uF)	0.001
Resistencia en la carga R_o (Ohm)	10
Resistencia en directo del diodo Ron (Ohm)	1e-3
Voltaje en directo del diodo Vf (V)	0

RESULTADOS

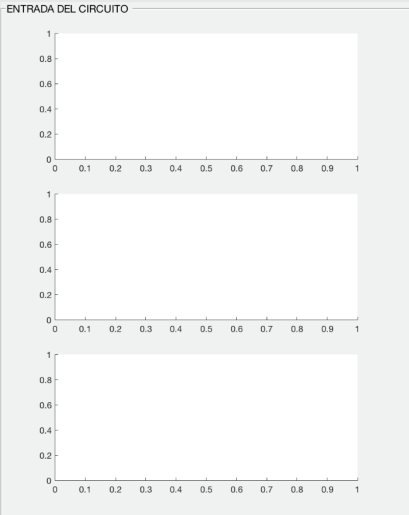
Valor medio tensión salida V_o (V)	434.96
Valor medio corriente salida I_o (A)	43.50
Rizado tensión salida V_o (mV)	13982.5
Potencia a la salida P_o (W)	18919.20
Factor de Potencia PF	0.99
Factor de Potencia de Desplazamiento DPF	1.00
Potencia Activa P (W)	20349.80
Potencia Reactiva Q (VAR)	167.36
Potencia Aparente S (VA)	20553.89
THDi (%)	14.17
Rendimiento	0.93

MOSTRAR

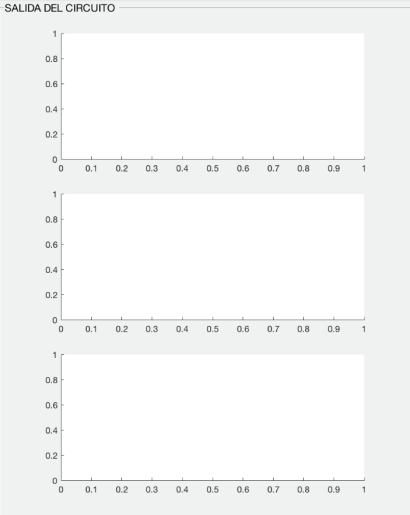
RectTriSeisRepresentacion

REPRESENTACIÓN

ENTRADA DEL CIRCUITO



SALIDA DEL CIRCUITO



¡Advertencia! Si no se ha realizado el cálculo en la pantalla inicial no se mostrarán los datos o bien aparecerán desactualizados

Figura 180: Pantalla de visualización

El usuario selecciona alguna de las tres opciones de la entrada en este caso la primera y pulsa el botón **Mostrar** tras lo que se mostrarán las gráficas de la entrada.

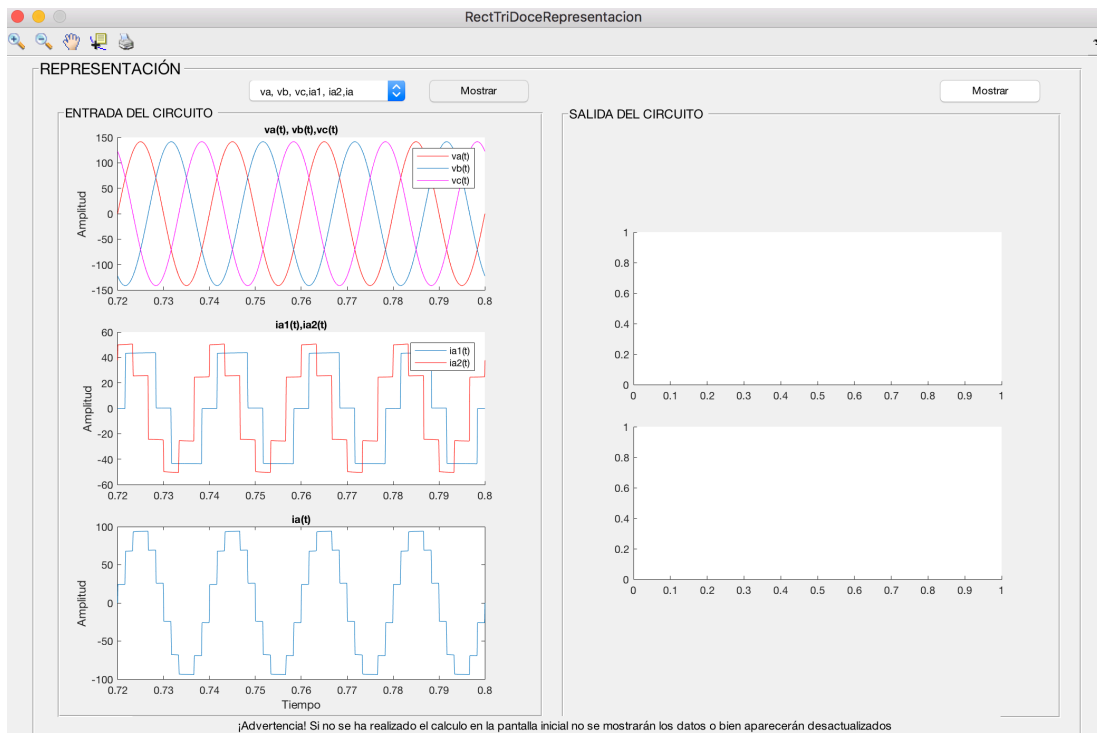


Figura 181: Representación de las gráficas a la entrada

Si se desea ver la gráfica de la salida el usuario deberá seleccionar la opción que desee del desplegable y pulsar el botón **Mostrar**

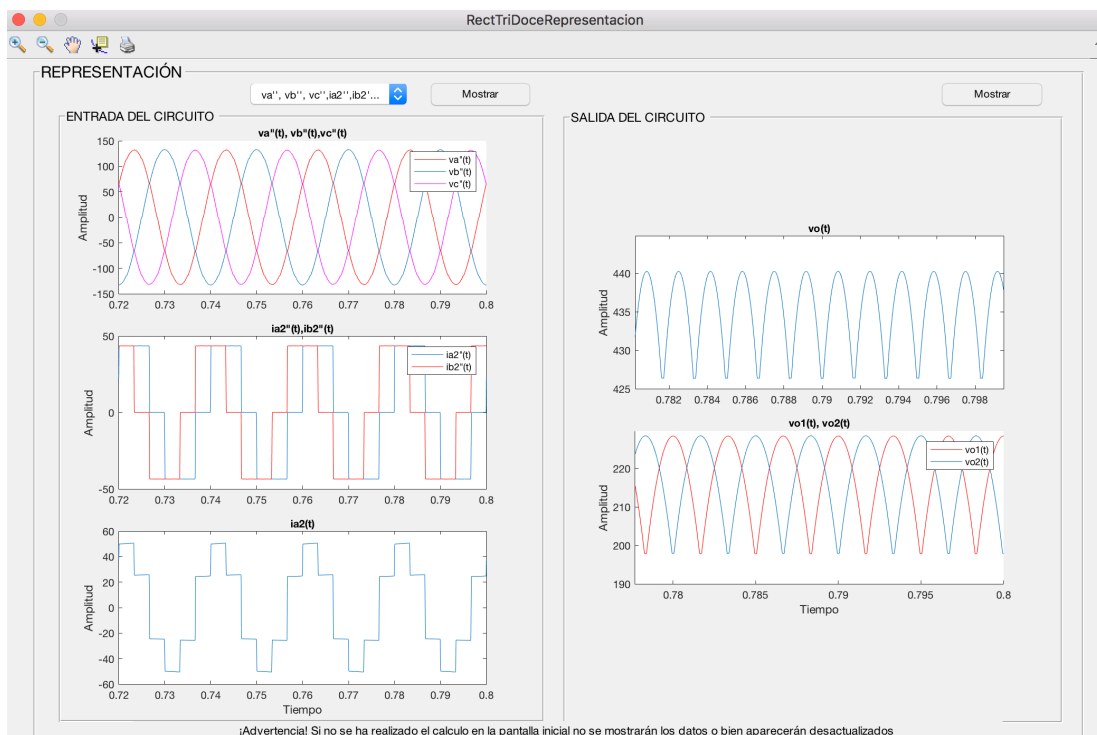


Figura 182: Representación de las gráficas de la salida

4. Rectificador Controlado Monofásico

Para acceder a este tipo de convertidor se deberá seleccionar el botón

Rectificador Controlado Monofásico

Figura 183: Botón para abrir el rectificador controlado monofásico



Figura 184: Acceso al rectificador controlado monofásico

Tras seleccionar dicho botón aparecerá una nueva interfaz del módulo.

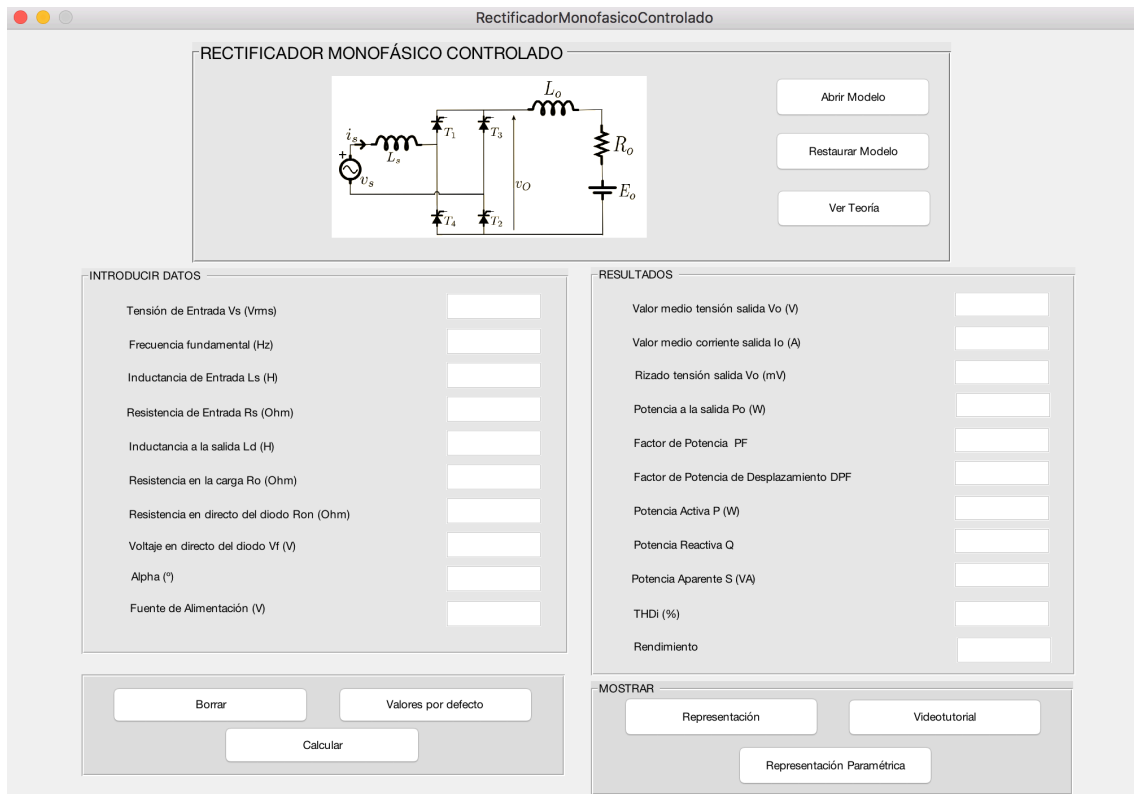


Figura 185: Pantalla rectificador no controlado monofásico

Si se desea ver el modelo Simulink para realizar algún cambio en el circuito o para saber cómo es el circuito se debe pulsar el botón

Abrir Modelo

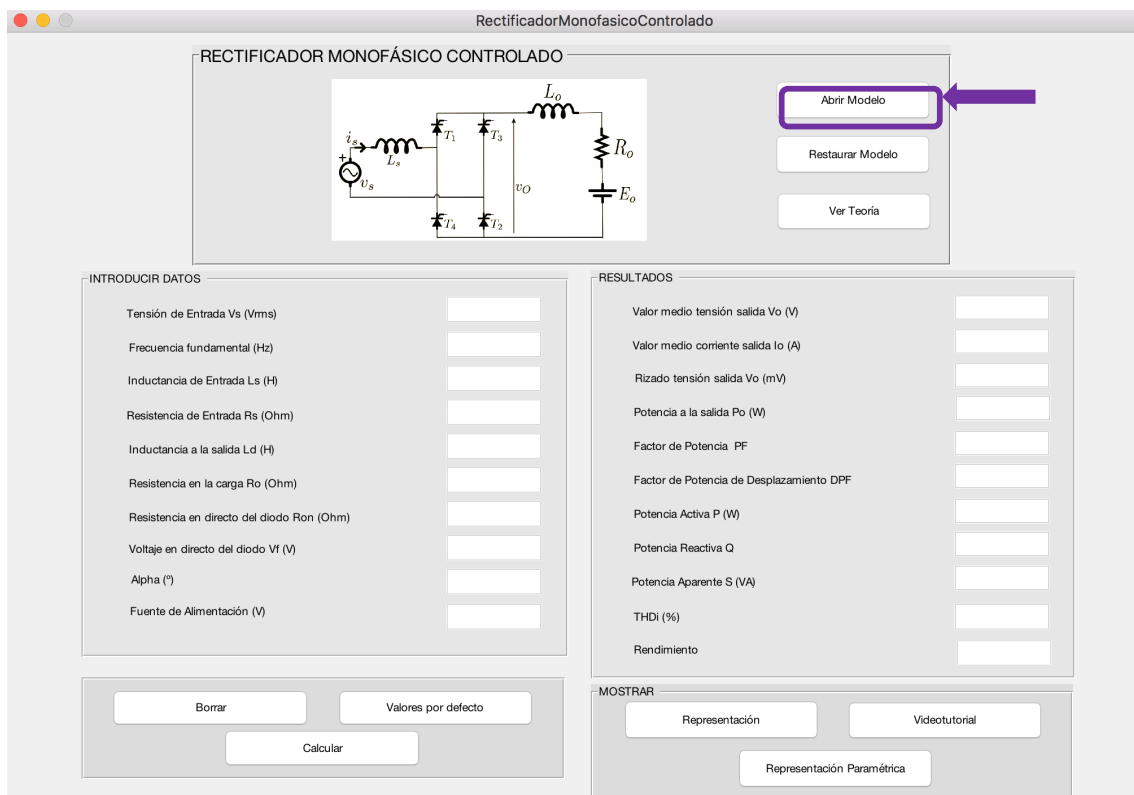


Figura 186: Acceso al modelo Simulink del rectificador

Tras lo cual aparecerá el modelo abierto en Simulink donde se puede ver el circuito además de los resultados más relevantes y gráficas de los mismos.

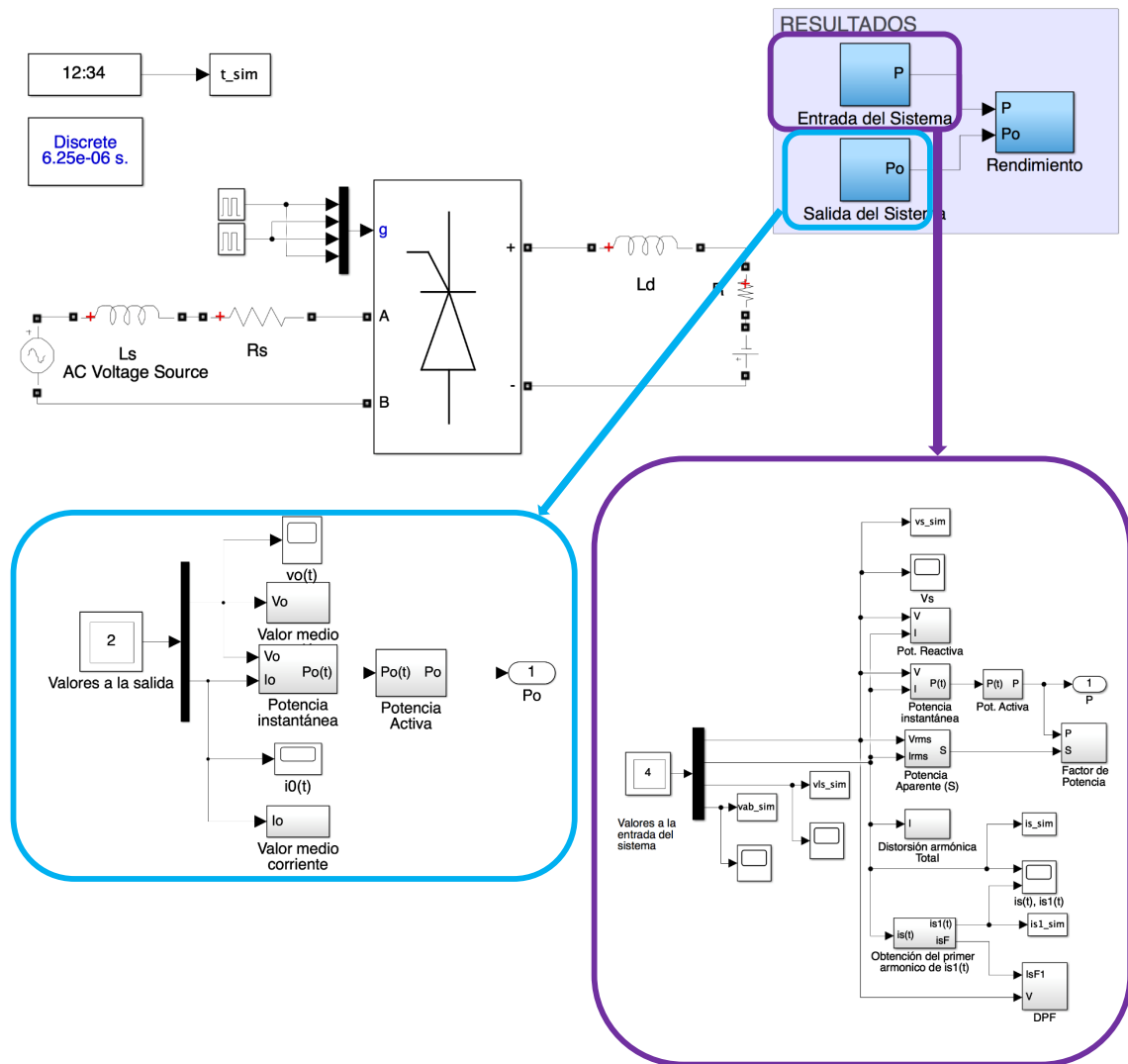


Figura 187: Modelo en Simulink del rectificador monofásico controlado

Si se ha hecho algún cambio en el modelo y quiere modificarlo por el modelo original se deberá seleccionar el botón

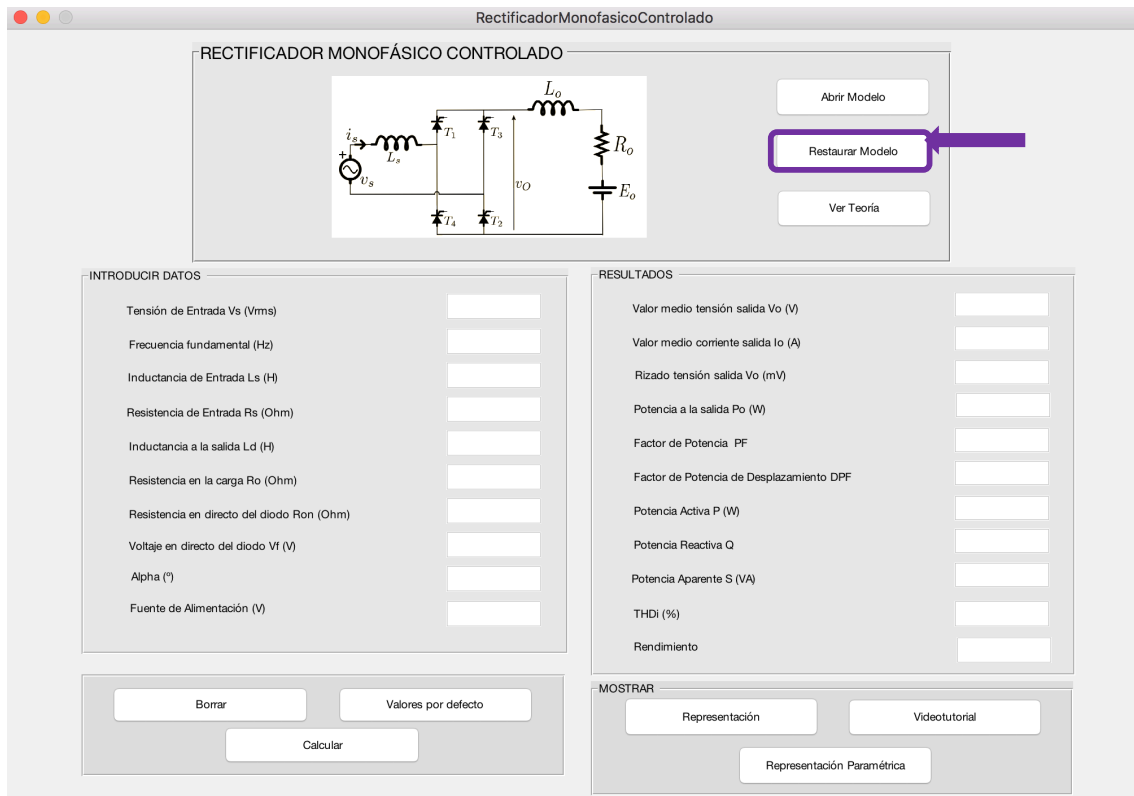



Figura 188: Botón para restaurar el modelo Simulink

Para abrir la teoría relacionada con este rectificador para una mayor comprensión de su funcionamiento se pulsa el botón  tras lo cual se abrirá un pdf.

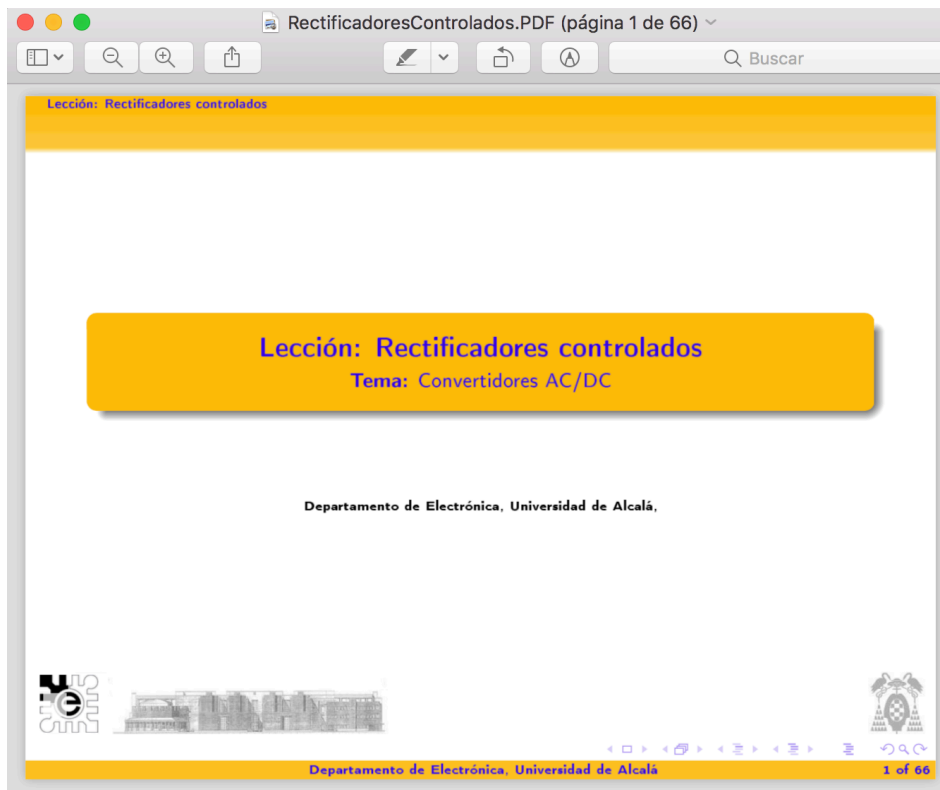


Figura 189: Archivo pdf con la teoría del rectificador monofásico no controlado

Para realizar una simulación del circuito se debe completar las variables que se encuentran en la pestaña “**Introducir Datos**”, las cuales se pueden introducir seleccionando las casillas e introduciéndolas de manera manual o seleccionando el botón

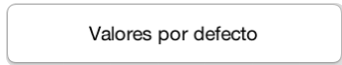
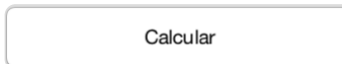


Figura 190: Valores por defecto para el cálculo

Aun habiendo seleccionado los valores por defecto se pueden modificar seleccionando la casilla de la variable que se desea variar.

Por último, se pulsará el botón



para proceder a la ejecución del circuito con Simulink. Tras lo cual se visualizarán los resultados por la pantalla y en concreto la pestaña de “**Resultados**”.

Parámetro	Valor
Valor medio tensión salida Vo (V)	74.96
Valor medio corriente salida Io (A)	27.50
Rizado tensión salida Vo (mV)	212289
Potencia a la salida Po (W)	2069.14
Factor de Potencia PF	0.78
Factor de Potencia de Desplazamiento DPF	0.86
Potencia Activa P (W)	2146.54
Potencia Reactiva Q	1300.13
Potencia Aparente S (VA)	2751.21
THDi (%)	44.93
Rendimiento	0.96

Figura 191: Resultados de la simulación

Si desea eliminar los valores tanto introducidos como los del resultado se debe pulsar el botón

Tras haber realizado la simulación se pueden visualizar las medidas más relevantes del circuito para lo cual se pulsa el botón apareciendo una nueva ventana.

Figura 192: Pantalla de visualización de gráficas relevantes

Para visualizar las gráficas se pulsa el botón

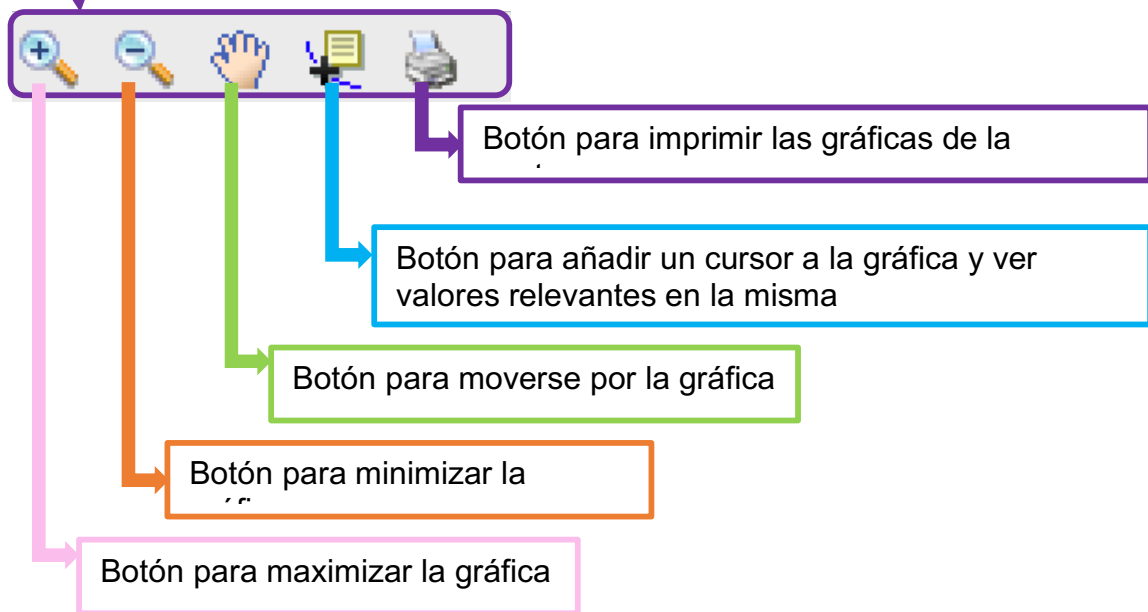
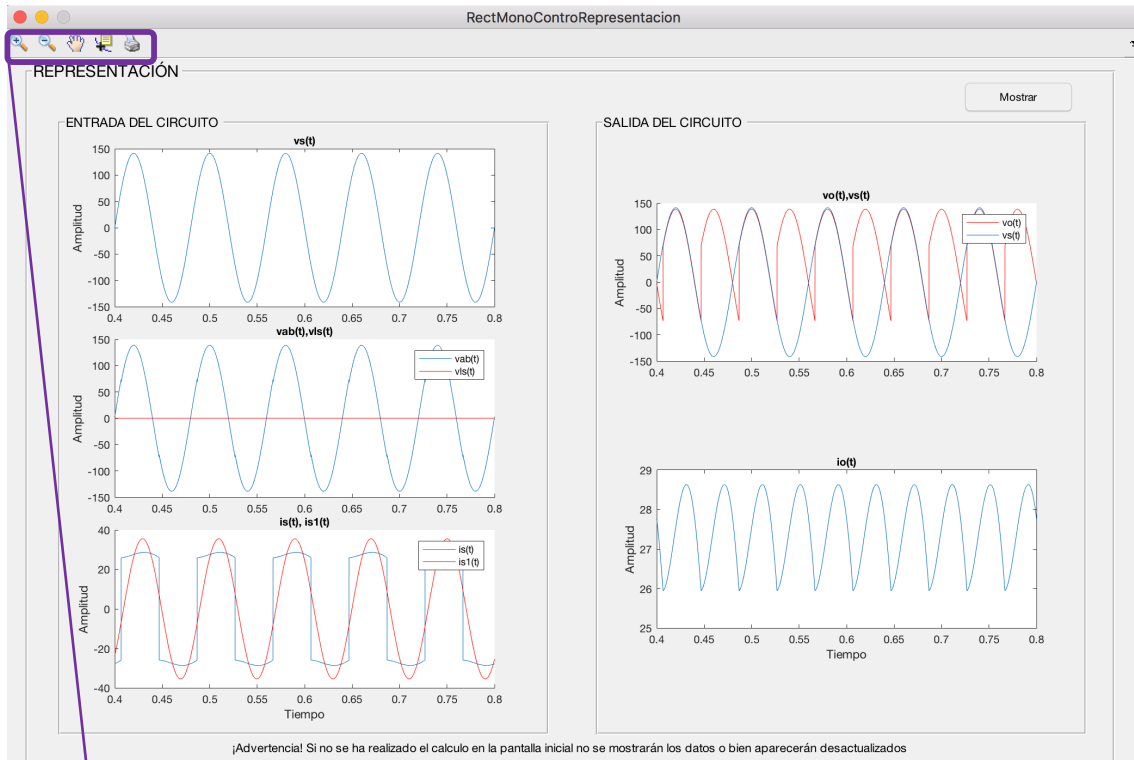
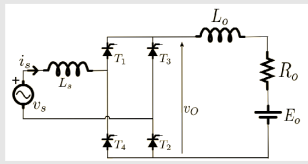


Figura 193: Visualización de las gráficas y ajustes

Para la visualización de la representación paramétrica y ver el comportamiento de las distintas potencias en función de la variación del disparo se seleccionará el botón Representación Paramétrica

Rectificador Monofásico Controlado

RECTIFICADOR MONOFÁSICO CONTROLADO



INTRODUCIR DATOS

Tensión de Entrada V_s (Vrms)	100
Frecuencia fundamental (Hz)	50
Inductancia de Entrada L_s (H)	1e-9
Resistencia de Entrada R_s (Ohm)	0.1
Inductancia a la salida L_d (H)	0.1
Resistencia en la carga R_o (Ohm)	10
Resistencia en directo del diodo R_{on} (Ohm)	1e-3
Voltaje en directo del diodo V_f (V)	0
Alpha (°)	30
Fuente de Alimentación (V)	200

RESULTADOS

Valor medio tensión salida V_o (V)	74.96
Valor medio corriente salida I_o (A)	27.50
Rizado tensión salida V_o (mV)	212289
Potencia a la salida P_o (W)	2069.14
Factor de Potencia PF	0.78
Factor de Potencia de Desplazamiento DPF	0.86
Potencia Activa P (W)	2146.54
Potencia Reactiva Q	1300.13
Potencia Aparente S (VA)	2751.21
THDi (%)	44.93
Rendimiento	0.96

MOSTRAR

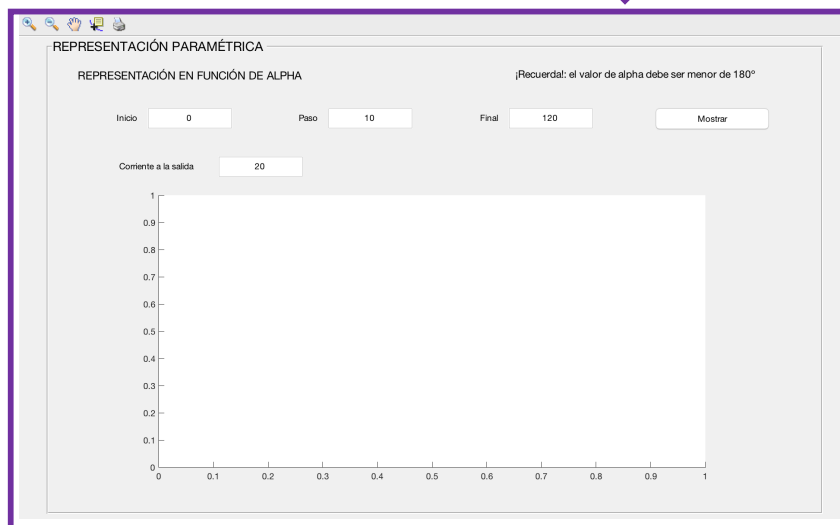


Figura 194: Pantalla de representación paramétrica

Para este tipo de representación el programa simulará otro modelo de Simulink donde se ha forzado que la corriente a la salida sea constante.

En este tipo de representación el usuario debe introducir el valor de inicio del parámetro alpha, al igual que el paso y el valor final del mismo y la corriente a la salida del circuito.

Tras lo cual se debe seleccionar el botón



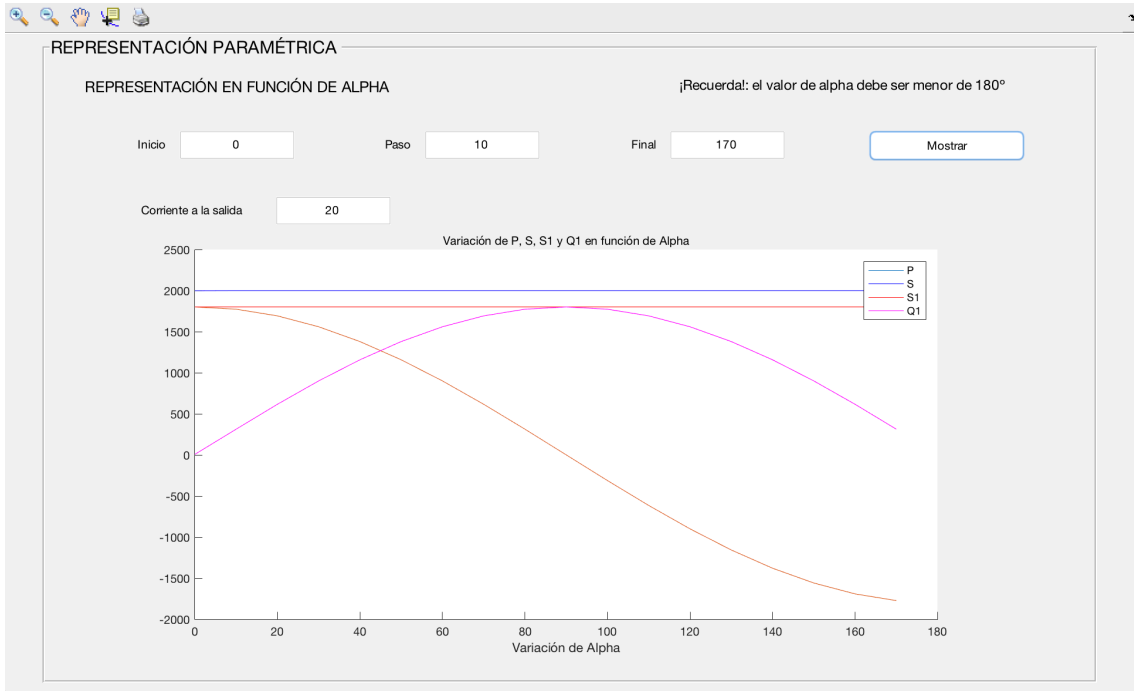


Figura 195: Representación paramétrica

5. Rectificador Controlado Trifásico

Para acceder a este tipo de convertidor se deberá seleccionar el botón

Rectificador Controlado Trifásico

Figura 196: Botón para abrir el rectificador controlado monofásico

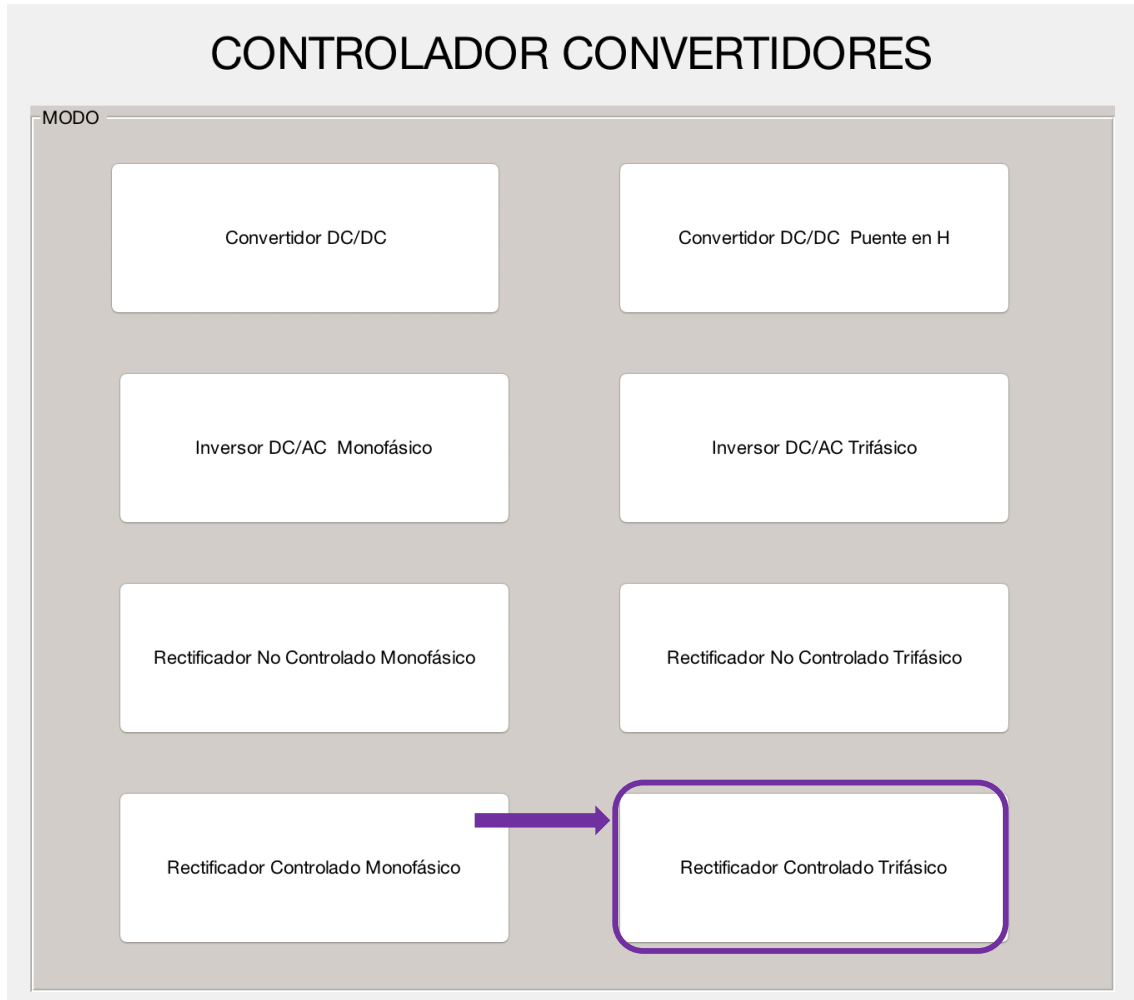


Figura 197: Acceso al rectificador controlado monofásico

Tras seleccionar dicho botón aparecerá una nueva interfaz del módulo.

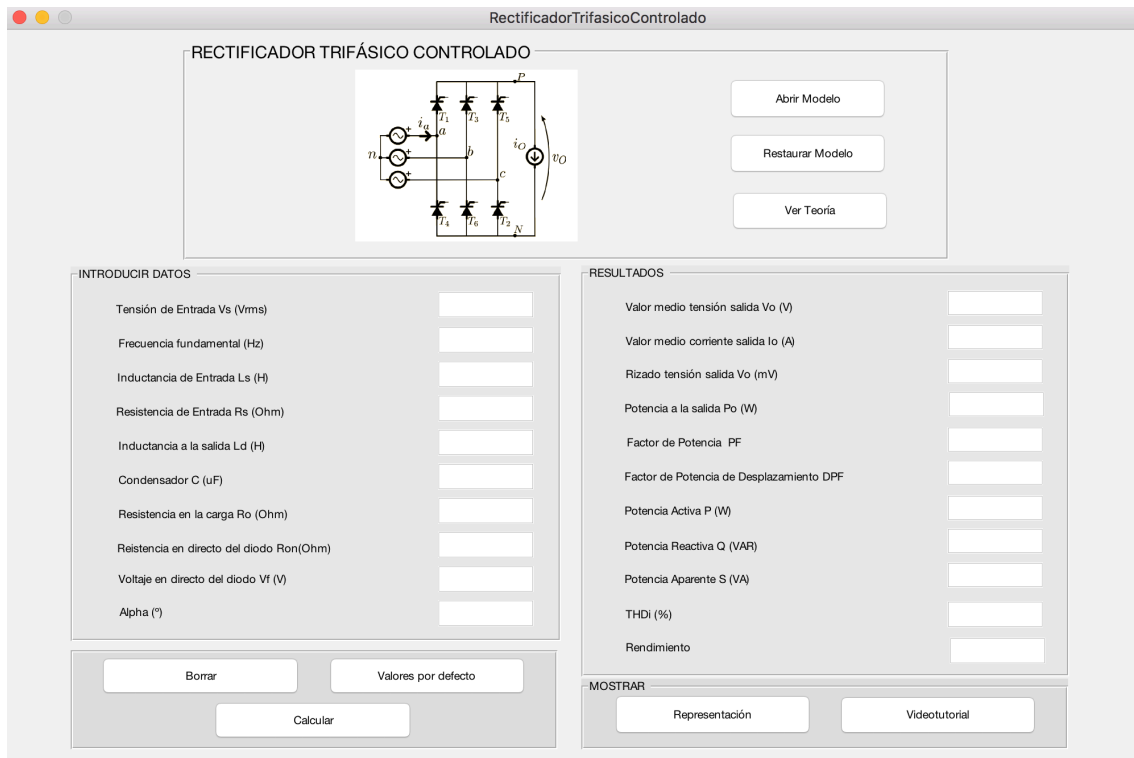


Figura 198: Pantalla rectificador no controlado monofásico

Si se desea ver el modelo Simulink para realizar algún cambio en el circuito o para saber cómo es el circuito se debe pulsar el botón

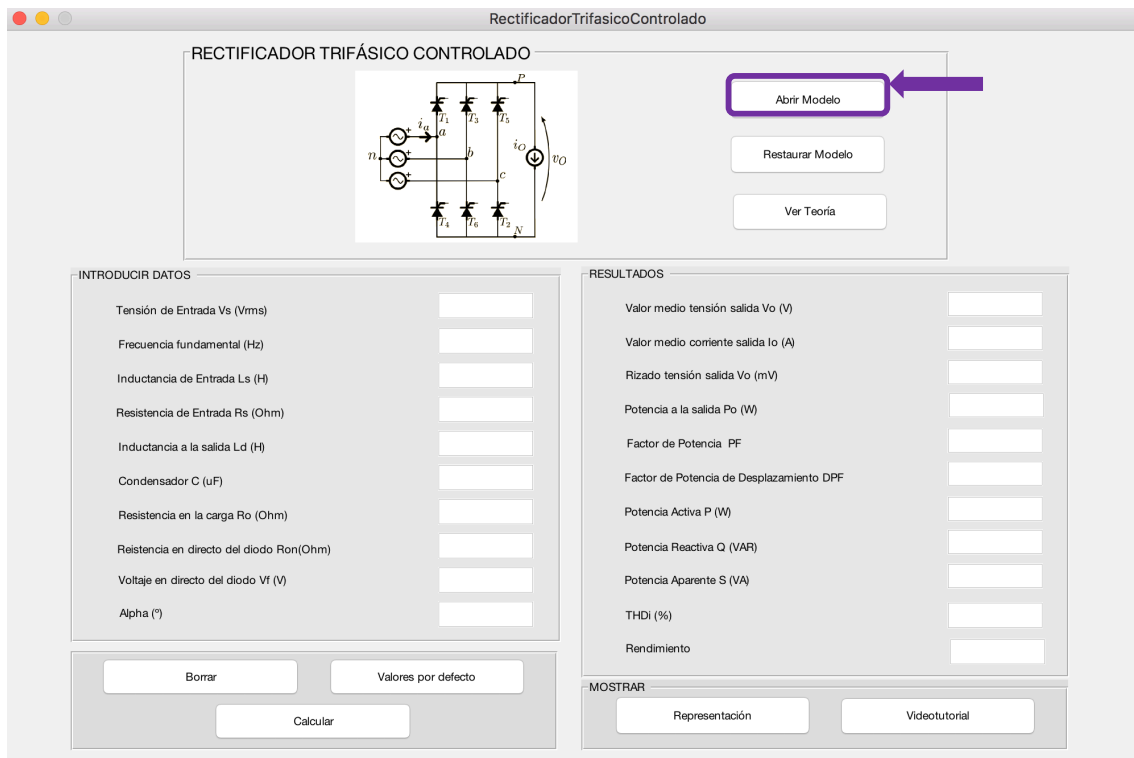


Figura 199: Acceso al modelo Simulink del rectificador

Tras lo cual aparecerá el modelo abierto en Simulink donde se puede ver el circuito además de los resultados más relevantes y gráficas de los mismos.

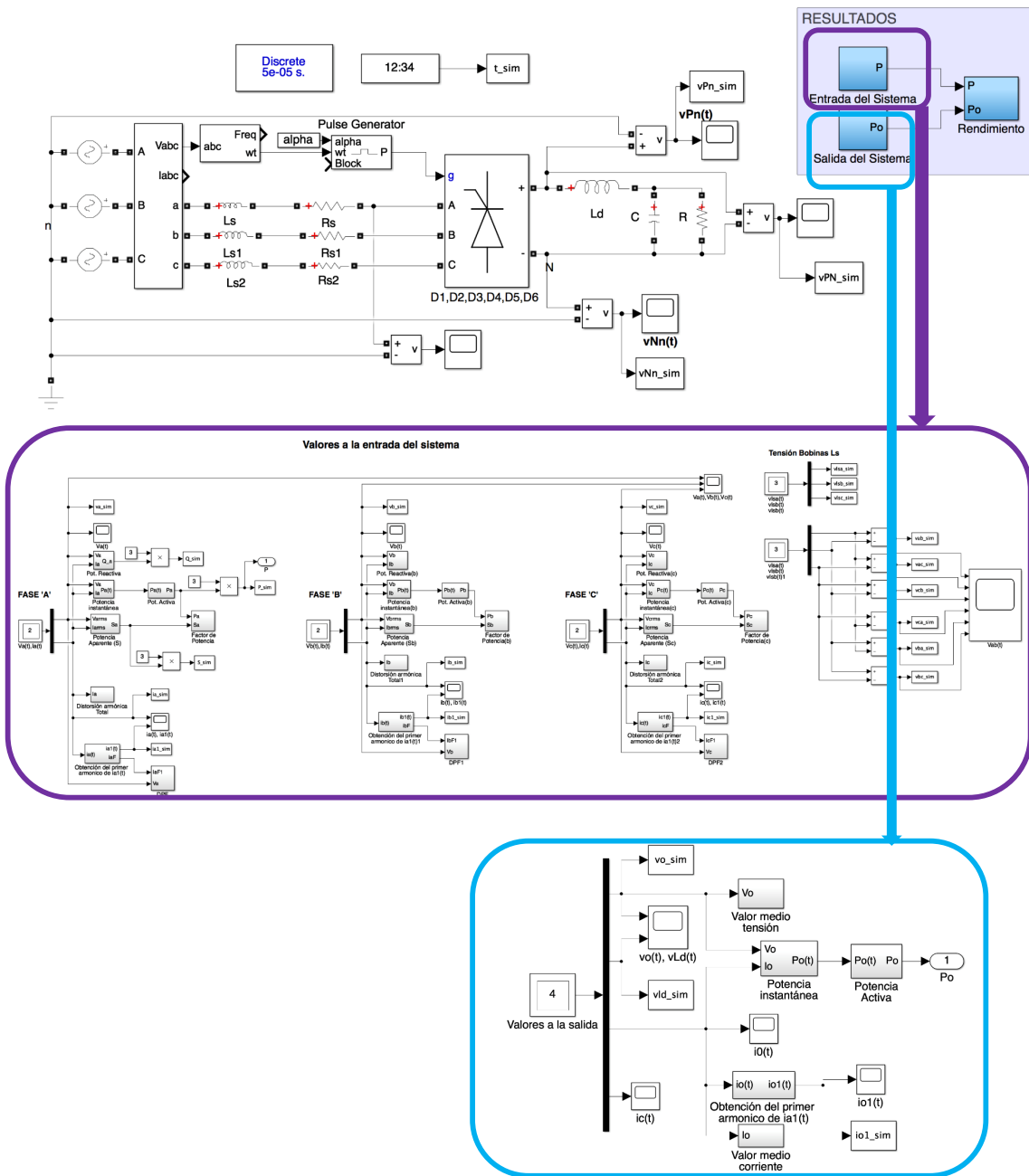


Figura 200: Modelo en Simulink del circuito

Si se ha hecho algún cambio en el modelo y quiere modificarlo por el modelo original se deberá seleccionar el botón

Restaurar Modelo

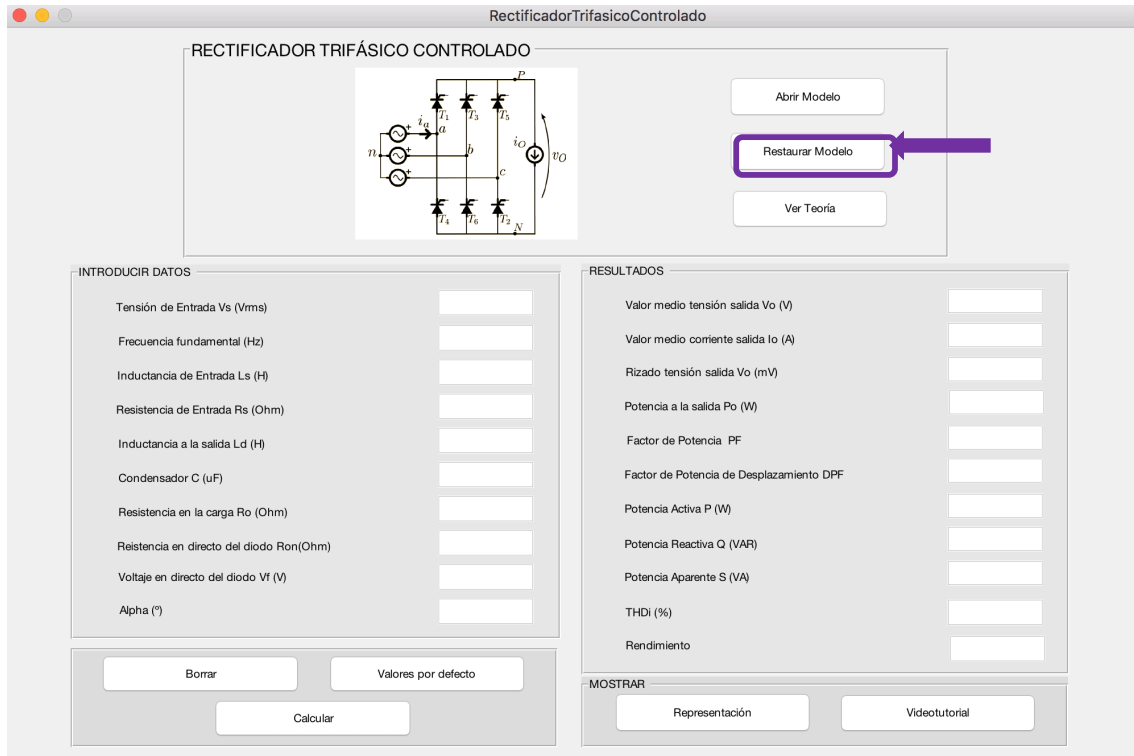


Figura 201: Botón para restaurar el modelo Simulink

Para abrir la teoría relacionada con este rectificador para una mayor comprensión de su funcionamiento se pulsa el botón

Ver Teoría

tras lo cual se abrirá un pdf.

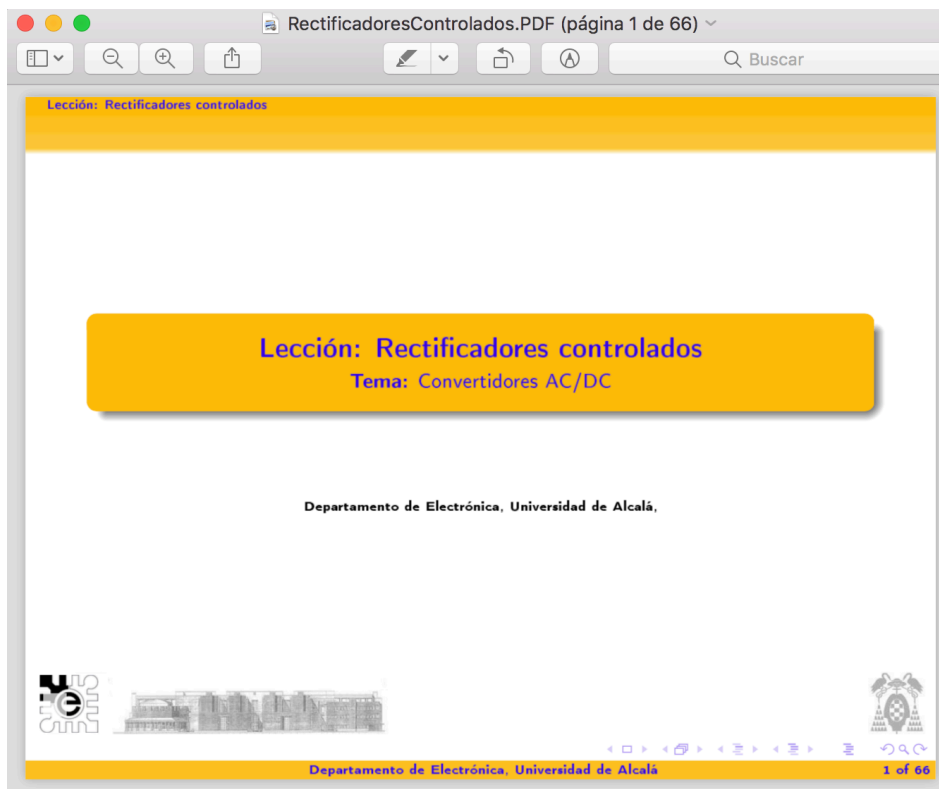


Figura 202: Archivo pdf con la teoría del rectificador monofásico no controlado

Para realizar una simulación del circuito se debe completar las variables que se encuentran en la pestaña “**Introducir Datos**”, las cuales se pueden introducir seleccionando las casillas e introduciéndolas de manera manual o seleccionando el botón

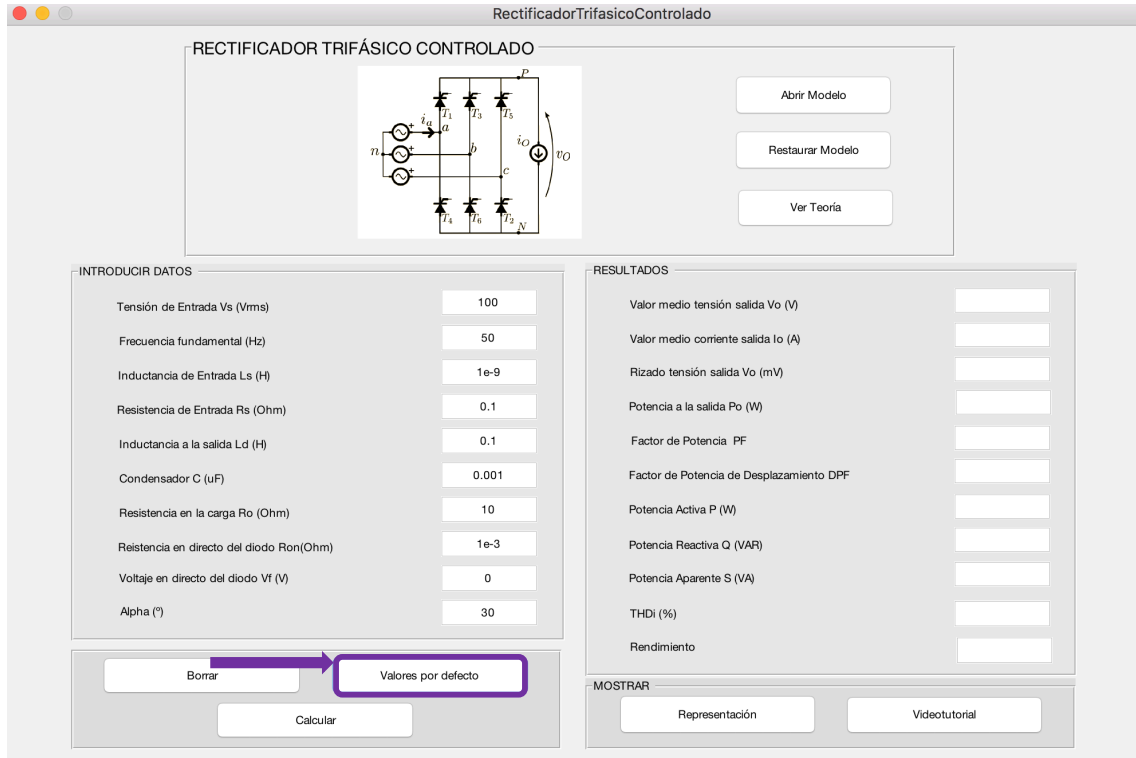
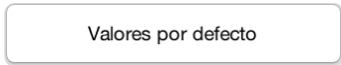
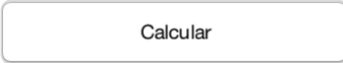


Figura 203: Valores por defecto para el cálculo

Aun habiendo seleccionado los valores por defecto se pueden modificar seleccionando la casilla de la variable que se desea variar.

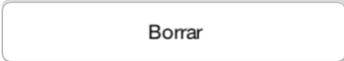
Por último, se pulsará el botón




para proceder a la ejecución del circuito con Simulink. Tras lo cual se visualizarán los resultados por la pantalla y en concreto la pestaña de “**Resultados**”.

RESULTADOS	
Valor medio tensión salida V_o (V)	195.80
Valor medio corriente salida I_o (A)	19.58
Rizado tensión salida V_o (mV)	126856
Potencia a la salida P_o (W)	3833.94
Factor de Potencia PF	0.81
Factor de Potencia de Desplazamiento DPF	0.85
Potencia Activa P (W)	3899.32
Potencia Reactiva Q (VAR)	2393.41
Potencia Aparente S (VA)	4790.94
THDi (%)	31.06
Rendimiento	0.98

Figura 204: Resultados de la simulación

Si desea eliminar los valores tanto introducidos como los del resultado se debe pulsar el botón 

Tras haber realizado la simulación se pueden visualizar las medidas más relevantes del circuito para lo cual se pulsa el botón  apareciendo una nueva ventana.

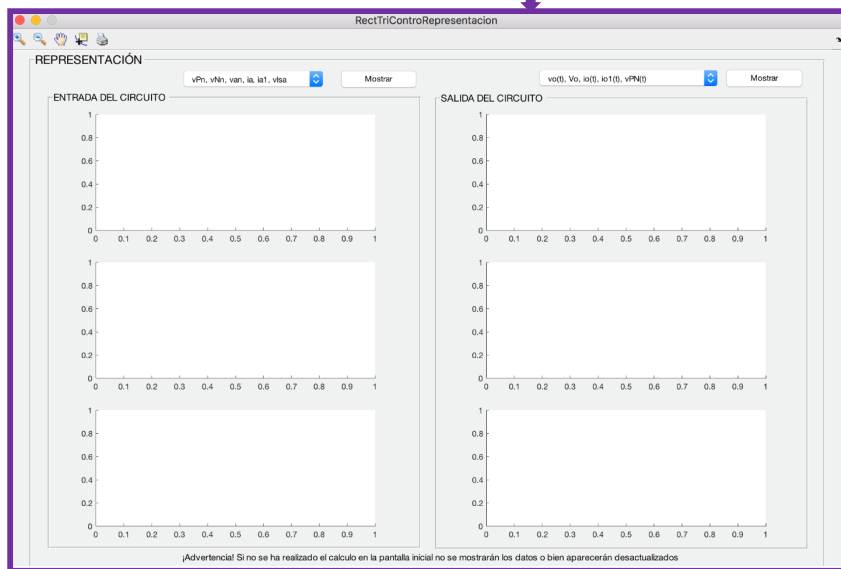
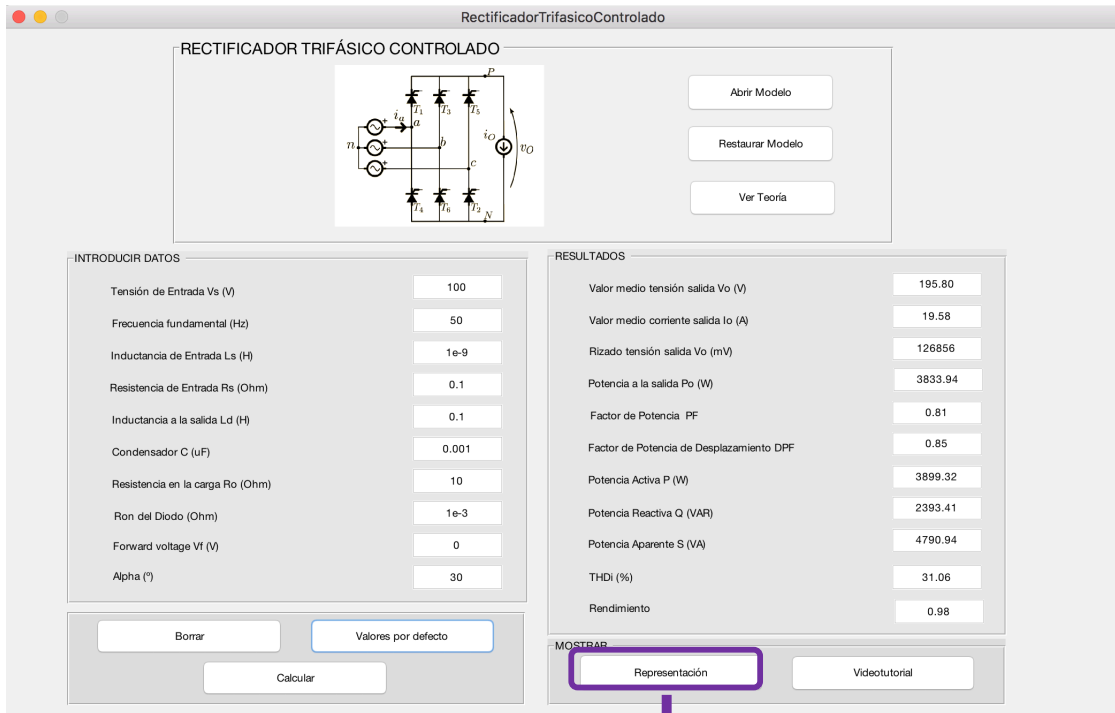


Figura 205: Pantalla de visualización de gráficas relevantes

El usuario selecciona alguna de las tres opciones de la entrada en este caso la primera y pulsa el botón **Mostrar** tras lo que se mostrarán las gráficas de la entrada.

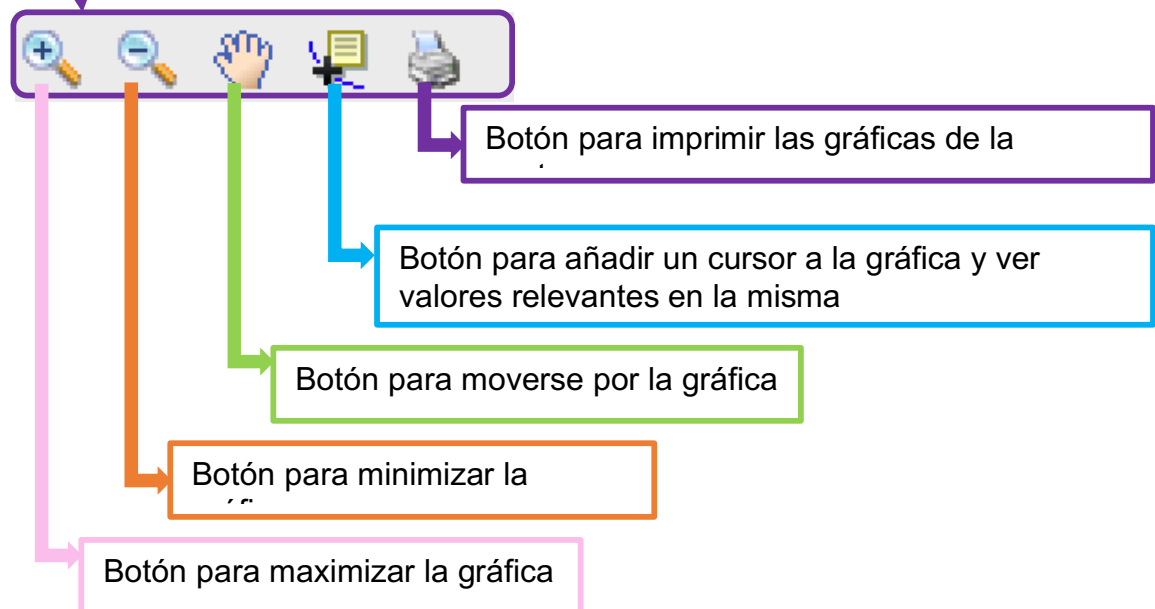
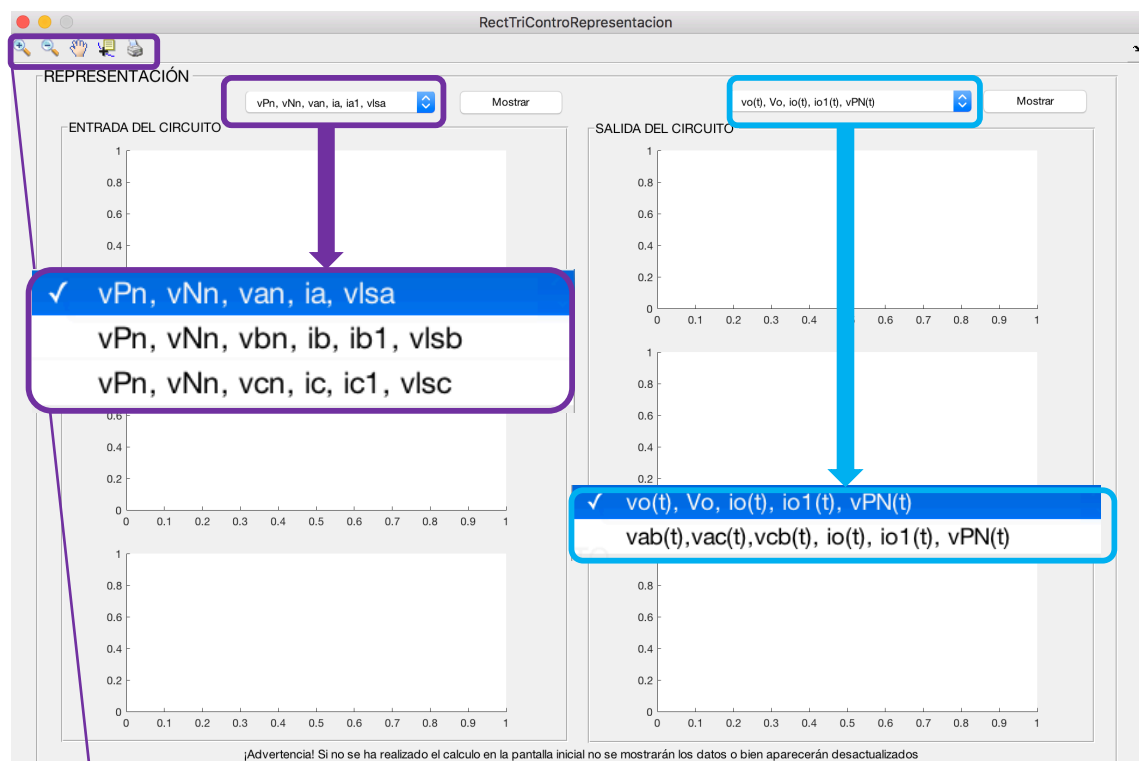


Figura 206: Pantalla de visualización explicada

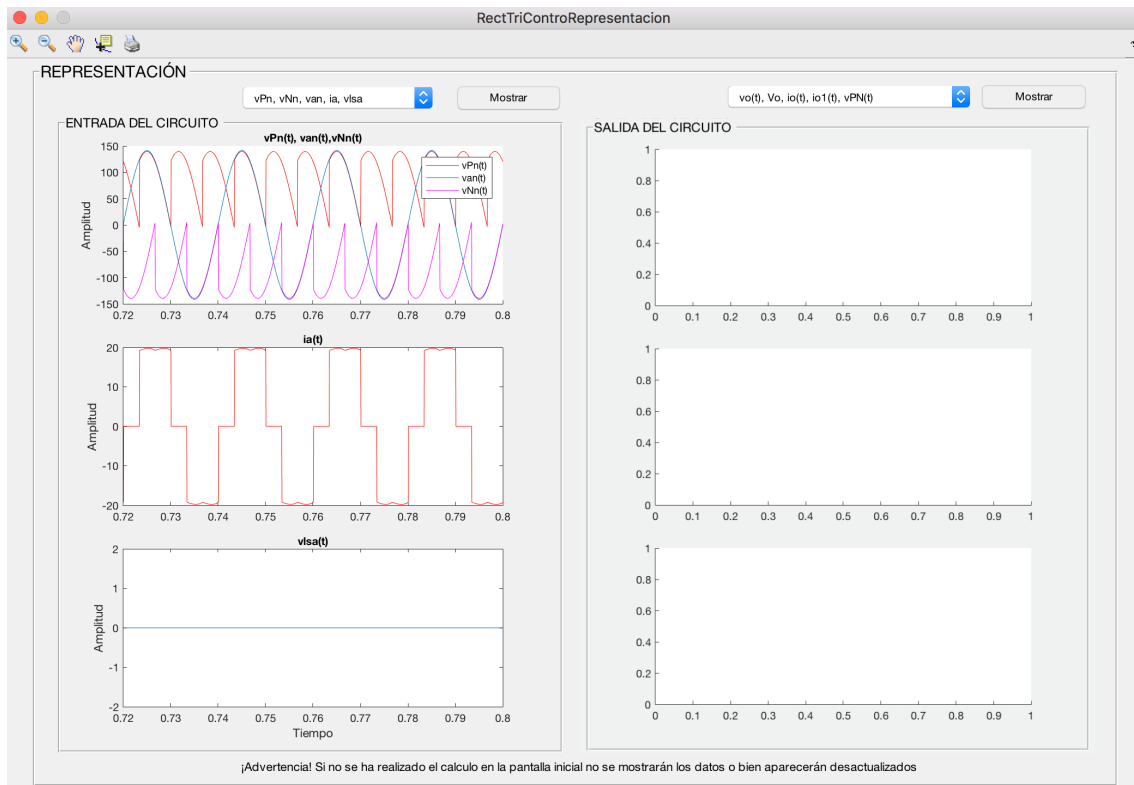


Figura 207: Representación de las gráficas a la entrada del sistema

El usuario selecciona alguna de las dos opciones de la entrada en este caso la primera y pulsa el botón tras lo que se mostrarán las gráficas de la salida.

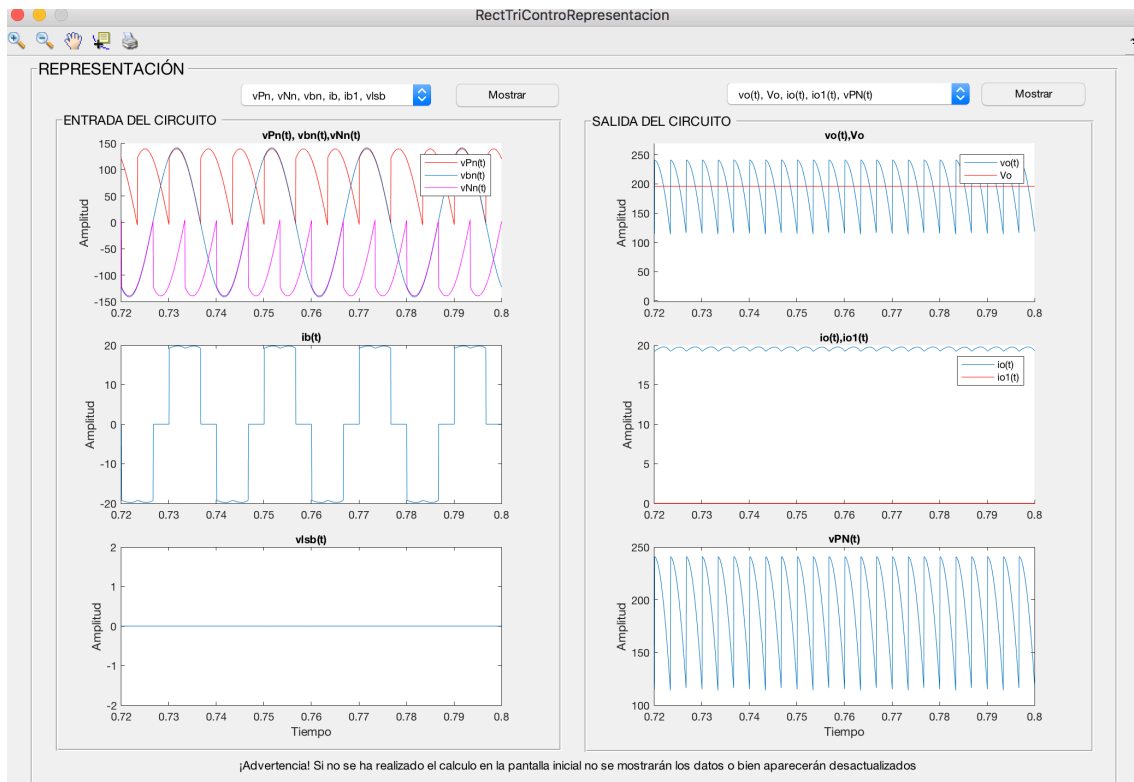


Figura 208: Representación de las gráficas a la salida del sistema

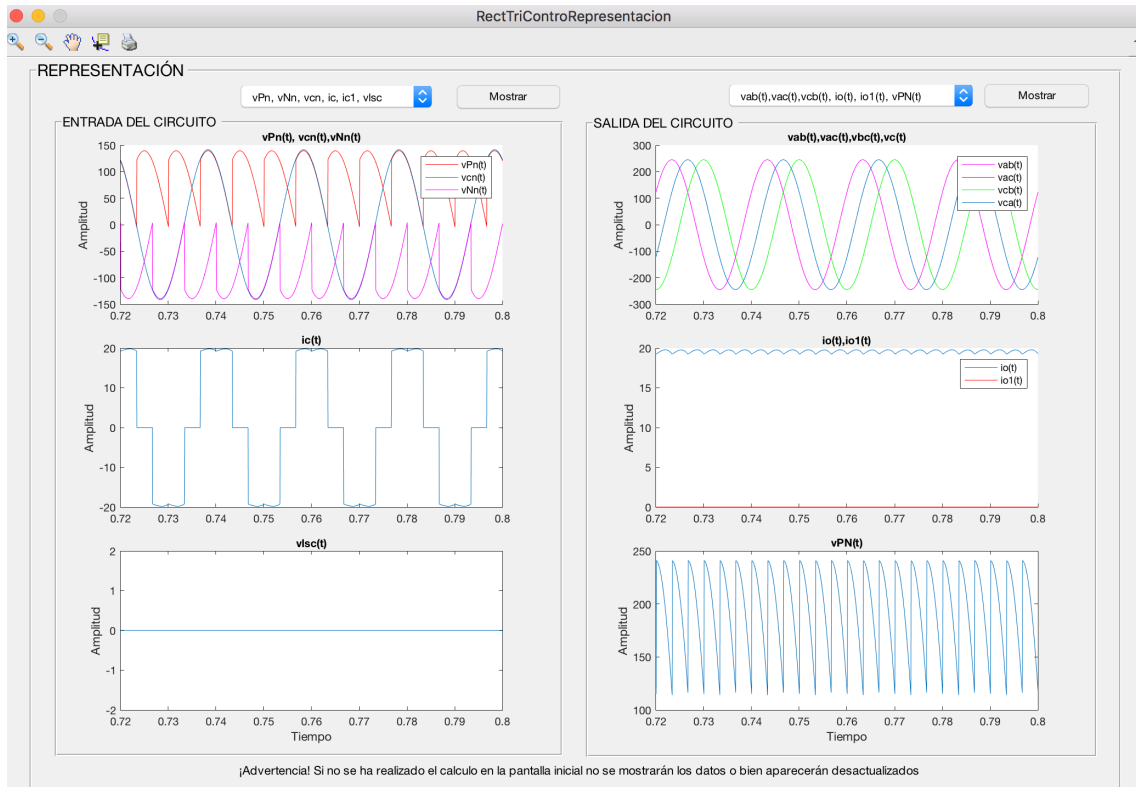


Figura 209: Representación de las gráficas a la entrada y salida del circuito

Parte VII

Bibliografía

Bibliografía

- [1] S. Cóbreces, J. Ureña, M. C. Pérez, "Rectificadores no controlados monofásicos", *Transparencias de la asignatura electrónica de potencia, Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones, Universidad de Alcalá, 2018.*
- [2] S. Cóbreces, J. Ureña, M. C. Pérez, "Rectificadores no controlados Trifásicos", *Transparencias de la asignatura electrónica de potencia, Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones, Universidad de Alcalá, 2018.*
- [3] S. Cóbreces, J. Ureña, M. C. Pérez, "Rectificadores controlados", *Transparencias de la asignatura electrónica de potencia, Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones, Universidad de Alcalá, 2018.*
- [4] «Manual Matlab GUI,» [En línea]. Available: https://es.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html?s_tid=srchtitle [Último acceso: Septiembre 2018].
- [5] «Manual Matlab Simulink,» [En línea]. Available: <http://es.mathworks.com/products/simulink/>. [Último acceso: Septiembre 2018].
- [6] R. B. Galindo, "Sistema HW de control PWM gestionado desde Matlab", *Universidad de Alcalá, 2014.*
- [7] J. Cabeza Picazo, "Interfaz gráfica para la simulación de convertidores DC/AC para entorno docente", *Universidad de Alcalá 2015.*
- [8] <https://es.mathworks.com/support/sysreq.html> [Último acceso: Septiembre 2018].
- [9] Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins. *Power Electronics. Third Edition.*, Willey, 2003.
- [10] Andrés Barrado Bautista and Antonio Lázaro Blanco, editors. *Problemas de Electrónica de Potencia, chapter 4, pages 325 424. Pearson Education., 2007.*
- [11] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890409001897> [Último acceso: Septiembre 2018].
- [12] <https://es.scribd.com/document/291232637/proyecto-rectificadores-2011> [Último acceso: Septiembre 2018].
- [13] <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/48431-24-pulse-rectifier> [Último acceso: Septiembre 2018].

[14] https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642014000600014 [Último acceso: Septiembre 2018].

[15] http://shop.semikron.com/out/media/ds/SEMIKRON_DataSheet_Stack_didactique_x2026_thyristors_Avec_capot_08753402.pdf [Último acceso: Septiembre 2018].

[16] <https://website.aub.edu.lb/fea/ece/Laboratories/Pages/PowerElectronicsandDrivesLab.aspx> [Último acceso: Septiembre 2018].

[17] <https://www.niu.edu/ceet/about/laboratories/power-systems.shtml> [Último acceso: Septiembre 2018].